

**Сәулет, қала құрылысы және құрылыс  
саласындағы мемлекеттік нормативтер  
ҚР НОРМАТИВТІК-ТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРАЛЫ**

---

**Государственные нормативы в области  
архитектуры, градостроительства и строительства  
НОРМАТИВНО–ТЕХНИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ РК**

## **БОЛАТ КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЖОБАЛАУ. БОЛАТ БУНКЕРЛЕР БӨЛІМІ**

---

### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ЧАСТЬ. СТАЛЬНЫЕ БУНКЕРЫ**

**ҚР НТҚ 03-04-1.1-2012  
(ҚР ҚН EN 1993-4-1:2007/2011 әзірленген)  
НТП РК 03-04-1.1-2012  
(к СН РК EN 1993-4-1:2007/2011)**

Ресми басылым  
Издание официальное

**Қазақстан Республикасы Ұлттық экономика министрлігінің  
Құрылыс, тұрғын үй–коммуналдық шаруашылық істері және жер  
ресурстарын басқару комитеті**

**Комитет по делам строительства, жилищно–коммунального  
хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства  
национальной экономики Республики Казахстан**

**Астана 2015**

## АЛҒЫ СӨЗ

<b>ӘЗІРЛЕГЕН:</b>	«ҚазҚСҒЗИ» АҚ, «Астана Строй-Консалтинг» ЖШС
<b>ҰСЫНҒАН:</b>	Қазақстан Республикасы Ұлттық экономика министрлігінің Құрылыс, тұрғын үй-коммуналдық шаруашылық істері және жер ресурстарын басқару комитетінің Техникалық реттеу және нормалау басқармасы
<b>БЕКІТІЛІП, ҚОЛДАНЫСҚА ЕНГІЗІЛГЕН:</b>	Қазақстан Республикасы Ұлттық экономика министрлігі Құрылыс, тұрғын үй-коммуналдық шаруашылық істері және жер ресурстарын басқару комитетінің 2014 жылғы 29-желтоқсандағы № 156-НҚ бұйрығымен 2015 жылғы 1-шілдеден бастап

## ПРЕДИСЛОВИЕ

<b>РАЗРАБОТАН:</b>	АО «КазНИИСА», ТОО «Астана Строй-Консалтинг»
<b>ПРЕДСТАВЛЕН:</b>	Управлением технического регулирования и нормирования Комитета по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики Республики Казахстан
<b>УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ:</b>	Приказом Комитета по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики Республики Казахстан от «29» декабря 2014 года № 156-НҚ с 1 июля 2015 года

Осы мемлекеттік нормативті Қазақстан Республикасының сәулет, қала құрылысы және құрылыс істері жөніндегі уәкілетті мемлекеттік органның рұқсатысыз ресми басылым ретінде толық немесе ішінара қайта басуға, көбейтуге және таратуға болмайды

Настоящий государственный норматив не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения уполномоченного государственного органа по делам архитектуры, градостроительства и строительства Республики Казахстан

## МАЗМҰНЫ

КІРІСПЕ .....	VII
1 ЖАЛПЫ ЕРЕЖЕЛЕР .....	1
1.1 Қолданылу саласы.....	1
1.2 Нормативтік сілтемелер .....	2
1.3 Бастапқы деректер .....	3
1.4 Қағидалар мен қолдану ережелер арасындағы айырмашылықтар.....	3
1.5 Терминдер мен анықтамалар .....	3
1.6 Шартты белгілер .....	7
1.6.1 Латын әліпбиінің бас әріптері.....	7
1.6.2 Латын әліпбиінің кіші әріптері.....	7
1.6.3 Грек әліпбиінің әріптері .....	8
1.6.4 Жолма- жол индекстер .....	9
1.7 Белгілердің ережесі.....	10
1.7.1 Цилиндр бункерге арналған жаһандық координаталар жүйелері .....	10
1.7.2 Тік бұрышты бункерге арналған жаһандық координаталар жүйесінде.....	11
1.7.3 Цилиндр және тік бұрышты бункерлерде құрылымдық элементтердің жергілікті осьтер үшін шарттар мен белгілер ережесі .....	13
1.7.4 Цилиндр және тік бұрышты бункерлерде бірдей әрекеттесетін кернеулерге арналған ереже.....	15
1.8 Өлшем бірліктері.....	17
2 ЕСЕПТЕУ НЕГІЗДЕРІ.....	18
2.1 Негізгі талаптар .....	18
2.2 Сенімділік бойынша бункерлер топтары.....	18
2.3 Шекті күйлер .....	19
2.4 Технологиялық және климаттық әсерлер .....	19
2.4.1 Жалпы ереже .....	19
2.4.2 Желдік жүктемелер.....	20
2.4.3 Қатты материалдардың қысымын басқа әсерлермен үйлестіру.....	20
2.5 Материалдың қасиеттері .....	20
2.6 Геометриялық сипаттамалары .....	20
2.7 Әсер ету нәтижелерін анықтау үшін бункерді модельдеу .....	21
2.8 Сынаулар негізіндегі есеп .....	21
2.9 Шекті күйлер тексерістері үшін әсер ету нәтижелері .....	21
2.9.1 Жалпы ереже .....	21
2.9.2 Көтергіш қасиетті шекті күйлері үшін жеке сенімділік коэффициенттері .....	21
2.9.3 Қалыпты пайдалануға жарамдылықтың шекті күйлері .....	22
2.10 Төзімділік.....	22
2.11 Отқа төзімділік .....	22
3 МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ҚАСИЕТТЕРІ.....	23
3.1 Жалпы ережелер.....	23

3.2 Құрылымдық болаттар .....	23
3.3 Тот баспайтын болаттар .....	24
3.4 Арнайы қоспаланған болаттар .....	24
3.5 Соққылық тұтқырлық бойынша талаптар .....	24
4 ҚҰРЫЛЫМДАРДЫ ЕСЕПТЕУ НЕГІЗДЕРІ .....	25
4.1 Көтергіш қасиеттің шекті күйлері .....	25
4.1.1 Негізгі ережелер .....	25
4.1.2 Шекті күйлерді тексеру нысаны .....	25
4.1.3 Төзімділік және аз циклдық қажу .....	25
4.1.4 Уатылу мен коррозияға шектер .....	25
4.1.5 Температуралық әсерлердің есебі .....	26
4.2 Бункердің қабыршағын есептеу .....	26
4.2.1 Қабықша құрылымын модельдеу .....	26
4.2.2 Есептеу әдістері .....	26
4.2.3 Геометриялық жетілмегендік .....	29
4.3 Тік бұрышты бункердің қорапшалы құрылымдарын есептеу .....	30
4.3.1 Қораптың құрылымдарын модельдеу .....	30
4.3.2 Геометриялық жетілмегендіктер .....	30
4.3.3 Есептеу әдістері .....	31
4.4 Кеңірдектелген табақтан қаптаудың баламалы ортотропты қасиеттері .....	31
5 ЦИЛИНДРДІҢ ҚАБЫРҒАЛАРЫН ЖОБАЛАУ .....	34
5.1 Есептеу негіздері .....	34
5.1.1 Жалпы ереже .....	34
5.1.2 Бункер қабырғасын есептеу .....	34
5.2 Цилиндр қабықшалардың пішіндері арасындағы ерекшеліктер .....	35
5.3 Бункердің цилиндр қабырғаларының көтергіш қасиеті .....	35
5.3.1 Жалпы ереже .....	35
5.3.2 Дәнекерленген және болттық қосылыстарымен изотропты қабырғалар .....	36
5.3.3 Тік қатаңдық қырларымен изотропты қабырғалар .....	47
5.3.4 Көлденең кеңірдектелген қабырғалар .....	49
5.3.5 Сақиналы қатаңдық қырларымен тік кеңірдектелген қабырғалар .....	58
1 МЫСАЛІ Бункердің изотропты қабырғасын есептеу .....	59
5.4 Цилиндрлік қабырғалардың тірегіне қойылатын арнайы талаптар .....	85
5.4.1 Толығымен арқалық торға тірелген немесе орнатылған түбі бар қабықша .....	85
5.4.2 Юбкаға тірелетін қабықша .....	86
5.4.3 Цилиндрлік қабырғаның жалғасатын ұстынға тірелуі .....	86
5.4.4 Жеке тіректердегі цилиндрлік қабықша .....	86
5.4.5 Шұңғыма астында орналасқан ұстындарға тірелген бункер .....	87
5.4.6 Жергілікті тіректердің элементтері және цилиндрлік қабырғаларға күшті жіберуге арналған қырлар .....	88
5.4.7 Бункер базасын анкерлік бекіту .....	89
2 МЫСАЛІ Бункердің тіреу құрылымдарын есептеу (юбкалар) .....	90
5.5 Цилиндрлік қабырғалардағы тесіктердің құралымдық шешімдері .....	98



5.5.1 Жалпы ережелер.....	98
5.5.2 Тік бұрышты тесіктер .....	98
5.6 Пайдаланушылық жарамдылығы бойынша шекті күйлер .....	99
5.6.1 Негізгі ережелер .....	99
5.6.2 Ауытқулар.....	100
6 КОНУСТЫҚ ШҰҢҒЫМАЛАРДЫ ЖОБАЛАУ.....	101
6.1 Есептеу негіздері.....	101
6.1.1 Жалпы ережелер.....	101
6.1.2 Шұңғыманың қабырғаларын есептеу .....	101
6.2 Шұңғыма қабықшамының нысандары арасындағы айырмашылықтар .....	101
6.3 Конустық шұңғымалардың көтергіш қасиеті.....	102
6.3.1 Жалпы ережелер.....	102
6.3.2 Дәнекерленген немесе бұрандалы қосылыстарда қаттылық қырларсыз изотропты қабырғасы бар шұңғымалар .....	102
3 МЫСАЛ Бункердің конустық құйғышын есептеу .....	107
6.4 Құйғыштардың арнайы құрылымдары .....	100
6.4.1 Тіреу құрылымдары .....	113
6.4.2 Ұстындағы шұңғыма .....	113
6.4.3 Симметриялық емес шұңғыма .....	113
6.4.4 Қаттылық қырлары бар конустар .....	113
6.4.5 Сегменттерден тұратын конус .....	114
6.5 Пайдаланушылық жарамдылықтың шекті күйлері .....	114
6.5.1 Негізгі ережелер .....	114
6.5.2[6.5.2(1)] Діріл .....	114
7 ДОМАЛАҚ КОНУСТЫҚ ҚАҚПАҚ ҚҰРЫЛЫМДАРЫН ЖОБАЛАУ.....	115
7.1 Негізгі ережелер .....	115
7.2 Қақпақтың құрылымдың пішіндері арасындағы ерекшеліктер .....	115
7.2.1 Терминология .....	115
7.3 Бункердің домалақ конус қақпақтарының көтергіш қасиеті .....	115
7.3.1 Қабықша-шатырлар .....	115
7.3.2 Қаңқалы шатырлар.....	116
7.3.3 Карнизтік түйін .....	116
8 ӨТПЕЛІ ҚОСЫЛЫСТАР МЕН САҚИНАЛЫ АРҚАЛЫҚТАРДЫ ЖОБАЛАУ ...	117
8.1 Негізгі ережелер .....	117
8.1.1 Жалпы ережелер.....	117
8.1.2 Сақиналы элементін есептеу.....	117
8.1.3 Терминология .....	117
8.1.4 Қосылыстарды үлгілеу .....	118
8.1.5 Сақинаның орналасуына шектеу.....	118
8.2 Қосылыстың есебі .....	119
8.3 Көтергіш қасиеті .....	119
8.4 Шекті күйлер бойынша тексерулер.....	119
4 МЫСАЛ Сақиналы арқалықты есептеу .....	120

9 ЖАЗЫҚ БҮЙІРЛІК ҚАБЫРҒАЛАРЫМЕН ТІК БҰРЫШТЫ БУНКЕРЛЕРДІ

ЖОБАЛАУ .....	134
9.1 Негізгі ережелер .....	134
9.2 Құрылымдық пішіндерді жіктеу .....	134
9.2.1 Қатайылмаған бункерлер .....	134
9.2.2 Қаттылық қырлары бар бункерлер.....	134
9.2.3 Созылулары бар бункерлер .....	135
9.3 Қатайтылмаған тік қабырғалардың көтергіш қасиеті .....	135
9.4 Қаттылық қабырғаларымен кеңірдектелген табактардан бункер қабырғаларының көтергіш қасиеті .....	135
9.5 Ішкі созылуларымен бункерлер .....	135
9.6 Пирамидальді шұңғылдардың салмақ түсіретін қабілеттілігі.....	135
9.7 Қорап қабырғаларында тік қаттылық қабырғалары .....	135
9.8 Пайдаланушылық жарамдылықтың шекті күйлері .....	136
9.8.1 Негізгі ережелер .....	136
9.8.2 Ауытқулар .....	136
5 МЫСАЛ Жазық қабырғаларымен тік бұрышты бункерді есептеу .....	136

## КІРІСПЕ

Осы нормативті-техникалық құралды «Астана Құрылыс-Консалтинг» ЖШС-і «Қазақ құрылыс және сәулет ғылыми-зерттеу және жобалау институты» Акционерлік қоғамымен («ҚазҚСҒЗИ» АҚ) жасаған келісімшарт бойынша дайындаған.

Осы нормативтік- техникалық құрал 1993-4-1 ҚР ҚН EN «Болат құрылымдарын жобалау – 4-1 Бөлім: Бункерлер» ережелерін дамытуға құралған, жоспарда домалақ және тік бұрышты пішінді болат бункерлерді жобалауға арналған.

Осы нормативтік- техникалық құрал Еурокодына 3 ұқсас, Қазақстан Республикасының 1993 ҚР ҚН EN құрылыс нормаларына нормативтік- техникалық құралдар тобының бір бөлігі болып табылады.

1993 ҚН EN нормативтік- техникалық құралдар тобы – бұл нормативтік- техникалық құжаттар тізімі, оларда келтірілген: 1993 ҚР ҚН EN Жобалау қағидасы мен Ережелеріне сәйкес болат құрылымдарды есептеу мен құрылымдауға ұсыныстар; нормативтік сілтеме ақпараттың түсіндірулері; есептеудің сандық мысалдары; қосымша анықтамалық ақпарат.

1993ҚР ҚН EN - ге нормативтік- техникалық құралдардың ережелері болат құрылымдардың көтергіш қасиеті, пайдаланушылық жарамдылығы, пайдаланушылық жарамдылығы, төзімділігі мен отқа төзімділігі бойынша талаптарды ғана қамтиды. Басқа талаптар 1993 ҚР ҚН EN - ге нормативтік - техникалық құралдарда көрсетілмеген.

1993 ҚР ҚН EN - ге нормативтік - техникалық құралдарды келесі нормативтік-техникалық құжаттармен бірге пайдалану қажет:

- 1990 ҚР ҚН EN - ге НТҚ;
- 1991 ҚР ҚН EN - ге НТҚ;
- 1992 ҚР ҚН EN - 1999 ҚР ҚН EN - ге НТҚ, болат құрылымдарды немесе олардың элементтерін есептеуді тікелей қозғайтын бөліктерінде;
- EN, ETAG, ETA стандарттары және болат құрылымдарға жататын құрылыс заттарына басқа да сәйкес стандарттар.

1993 ҚР ҚН EN-ге нормативтік- техникалық құралдарды әзірлеу кезінде, 1993 ҚР ҚН EN «Болат құрылымдарды жобалау» 20 бөлімдерінен басқа, негізгі құжаттар 1990ҚР ҚН EN, 1991 ҚР ҚН EN және 1090 EN болып табылады.

1993ҚР ҚН EN-не нормативтік- техникалық құралдар тобы 19 құралдан тұрады:

- 1993-1 ҚР ҚН EN-ге нормативтік- техникалық құрал (12 құрал);
- 1993-2 ҚР ҚН EN -ге нормативтік- техникалық құрал (1 құрал);
- 1993-3 ҚР ҚН EN -ге нормативтік- техникалық құрал (1 құрал);
- 1993-4 ҚР ҚН EN-ге нормативтік- техникалық құрал (3 құрал);
- 1993-5 ҚР ҚН EN-ге нормативтік- техникалық құрал (1 құрал);
- 1993-6 ҚР ҚН EN-ге нормативтік- техникалық құрал (1 құрал).

1993-2 ҚР ҚН EN-ге нормативтік- техникалық құралдарда болат құрылымдарды жобалау бойынша нұсқаулар келтірілген, олар арнайы болат ғимараттары мен құрылыстарына қатысы бар 1993ҚР ҚН EN бөлімдеріне таралады:

- 1993-2ҚР ҚН EN;
- 1993-3ҚР ҚН EN;
- 1993-4 ҚР ҚН EN;

## **ҚР НТҚ 03-04-1.1-2012**

- 1993-5 ҚР ҚН EN;

- 1993-6 ҚР ҚН EN.

1993-4-1 ҚР ҚН EN –ге осы нормативтік- техникалық құралда келтірілген:

- 1993-4-1 ҚР ҚН EN – де жазылған, жоспардағы Домалақ немесе тік бұрышты пішінді болат бункерлерді жобалау қағидалары мен Ережесі;

- 1993-4-1 ҚН EN-де келтірілген Жобалау қағидалары мен Ережелерінде келтірілген Жобалау қағидалары мен Ережелерін дамытатын ережелер;

- 1993-4-1 ҚР ҚН EN-де келтірілген Жобалау қағидалары мен Ережесін толықтыратын ұсыныстар;

- жобалау тәжірибесінде 1993-1-12 ҚР ҚН EN ережелерін қолдануды суреттейтін есептеудің сандық мысалдары.

Осы нормативтік- техникалық құралды әзірлеу кезінде, 1993-4-1 ҚР ҚН EN ережелерінен басқа, ескерілген:

- 1993-4-1 ҚР ҚН EN-ге Ұлттық Қосымшаның ережелері;

- 1990 ҚР ҚН EN сәйкес ережелері;

- 1991 ҚР ҚН EN сәйкес ережелері.

Осы нормативтік- техникалық құрал 12 бөлімнен тұрады. Осы нормативтік- техникалық құралдың 1- нен 12- ге дейінгі бөлімдері 1993-4-1 ҚР ҚН EN нормативтерінің құрылымын қайталайды. Осы нормативтік- техникалық құралда 1993-4-1 ҚР ҚН EN тармақтарының нөмірлері жақшаның ішінде келтірілген.

Осы нормативтік- техникалық құрал жобалық ұйымдардың ғылыми- техникалық жұмысшыларына, ғылыми жұмысшыларға, жобалық өнімнің тапсырыс берушілеріне, жоғары оқу орындарының оқытушылары мен студенттеріне арналған.

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ НОРМАТИВТІК–ТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРАЛЫ**  
**НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ РЕСПУБЛИКИ КАЗАКСТАН**  
**БОЛАТ КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЖОБАЛАУ. БОЛАТ БУНКЕРЛЕР БӨЛІМІ**

---

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ЧАСТЬ.**  
**СТАЛЬНЫЕ БУНКЕРЫ**

---

Енгізілген күні - 2015-07-01

**1 ЖАЛПЫ ЕРЕЖЕЛЕР**

**1.1 Қолданылу саласы**

1.1 1993-4-1 ҚР ҚН EN-ге жоспарда домалақ немесе тік бұрышты пішінді болат бункерлерді жобалау әдісін және ережесін белгілейді, олар:

- ғимаратта орнатылуы және ғимараттың құрылымына тірелуі мүмкін.
- жеке және бағанаға тірелу немесе үздіксіз тірелуі болуы мүмкін.

ҚР ҚН EN1993-4-1 осы нормативтік- техникалық құрал (әрі қарай құрал) жазық және кеңірдектелген табақтардан қабырғалары бар цилиндр және призма бункерлердің сақиналы тірек арқалықтарының, құйғыштардың, қабырғалардың көтергіш қасиетін өлшеу мен тексеруді белгілеуге, есептеулер орындауға арналған.

1.1.2 ҚР ҚН EN 1993-4-1 болат бункерлердің беріктігі мен орнықтылығына қойылатын талаптар ғана жазылған. Пайдаланушылық қауіпсіздігіне, функционалдық белгіленудің орындалуына, дайындауға, монтаждауға, сапаны бақылауға қойылатын талаптар ҚР ҚН EN сәйкес бөлімдерінде баяндалған. Ішкі кіруге арналған қақпақтар, фланецтер, тиек құрылғылары, қоректендіргіштер және т.б. секілді бункерлердің жекелеген элементтерін Жобалау қағидалары мен Ережесін тиісті нормаларға сәйкес қабылдау қажет.

1.1.3 Сейсмикалық әсер етулер жағдайларында жобалау бойынша ерекше талаптар ҚР ҚН EN 1998 «Сейсмикалық конструкциялардың жобалау бойынша ережесі» белгіленеді, ол ҚР ҚН EN 1993 ережелер нормаларын толықтырады немесе бейімдейді.

1.1.4 Бункерлер үшін болат тірек құрылымдарды есептеу ережелері және жобалау 1993-1-1 ҚР ҚН EN-де жазылған. Бұнымен қоса тірек құрылымдарға ең төменгі тірек сақинаның төменгі сөресінен немесе бункердің арқалығынан төмен және іргетастан жоғары орналасқан барлық құрылымдық элементтер жатады (1.1 және 1.2 Суретті қараңыз). Құрылымның металл тіректері үздіксіз қабықша немесе жекелеген (дискретті) тіреулер түрінде орындалуы мүмкін

1.1.5 Болат бункерлер үшін іргетастардың темірбетон құрылымдарын Жобалау қағидалары мен Ережесі 1992 ҚН EN және 1997ҚР ҚН EN – де жазылған.

1.1.6 Болат бункерлерге сақталатын сусымалы материалдардан ерекше күш түсулер мен әсер етулердің мәндері 1991-4 ҚР ҚН EN «Бункерлер мен резервуарларға әсерлер» сәйкес қабылдануы тиіс.

1.1.7 ҚР ҚН EN 1993-4-1 отқа төзімді құрылымдар, ішкі бөліктерімен және ішкі құрылымдарымен бункерлер; сыйымдылығы 100кН (10 т) кем бункерлер; апаттардың зардаптарының алдын алу үшін ерекше шаралар қажет жағдайлар қарастырылмайды.

1.1.8 ҚР ҚН EN 1993-4-1 жоспарда домалақ пішінді бункерлер осьсимметриялық геометриялық пішіні қолданылады. Осесимметриялық пішінді мұндай бункерлерге симметриялы емес жүктемелер әсер етуі мүмкін, сондай-ақ бункердің тіректері құрылымдарда осьсимметриялық болып табылмайтын күшті туғызуы мүмкін.

## **1.2 Нормативтік сілтемелер**

ҚР ҚН EN 1993-4-1 ішінде басқа стандарттан алынған датасымен немесе датасыз ережелер, сілтемелер кіреді. Осы нормативтік сілтемелер мәтінде төмендегі стандарттың көрсетілген басылымдарына лайықты жерлерде дәйексөз келтіреді.

ҚР ҚН EN 1993-4-1 түзетудің немесе толықтырулардың енгізуінің жолымен қосылған жағдайда, егер есілтеме даталанса, онда кейінгі өзгерістер немесе басылымның өзгерілген редакциясына ғана қолданылған. Даталанбаған сілтемелерге жария басылымның соңғы редакциясы жатады.

ҚР ҚН EN 1090 «Болат құрылымдарын дайындау»;

ҚР ҚН EN 1990 Еврокод: Құрылыстағы жобалау негізі;

ҚР ҚН EN 1991 Еврокод 1: Конструкцияларға түсетін әсерлер;

Бөлім 1–1 Конструкцияларға әсер ету. Мезгілдік жүктері және меншікті көлемінен пайда болатын құнарлы ғимараттарға түсетін әсерлер;

Бөлім 1–2 Конструкцияларға әсер ету. Оттан қорғалмаған конструкцияларға әсерлер;

Бөлім 1–3 Конструкцияларға әсер ету. Қар түсетін жүктемелер;

Бөлім 1–4 Конструкцияларға әсер ету. Жел түсетін жүктемелер;

Бөлім 1–5 Конструкцияларға әсер ету. Температур түсетін жүктемелер;

Бөлім 1–6 Конструкцияларға әсер ету. Конструкция түсетін жүктемелер;

Бөлім 1–7 Конструкцияларға әсер ету. Кездейсоқ әсер ету;

Бөлім 4 бункерлер мен резервуарға әсер ету;

ҚР ҚН EN 1993 Еврокод 3: Болат конструкцияларын жобалау;

Бөлім 1–1 Ғимараттар үшін ережелер және жалпы ережер;

Бөлім 1–3 Жұқа қабырғалы суықтай бүгілген элементтер және қабаттар;

Бөлім 1–4 Тот баспайтын болаттар;

Бөлім 1–6 қабық конструкцияның тиянағы және беріктігі;

Бөлім 1–7 Көлденең жүкпен дәнекерленген қабаттардан жасалған планарлы конструкциялар;

Бөлім 1–8 Қосылуды жобалау;

Бөлім 1–9 Болатты конструкцияның қажу беріктігі;

Бөлім 1–10 Прокат қалыңдығының бағыты бойынша қасиеті және екпінді тұтқырлығының есебімен болатты таңдау;

Бөлім 4.2 Резервуарлар;

ҚР ҚН EN 1997 Еврокод 7: Геотехникалық жобалау;

ҚР ҚН EN 1998 Еврокод 8: Сейсмөтөзімді конструкцияның жобалау бойынша ережелер;

Бөлім 4 Бункерлер, резервуарлар және құбырлар;

ҚР ҚН EN 10025 «Қоспаланбаған болаттардан ыстықтай тегістелген бұйымдар-өнеркәсіптік жеткізу шарттары»;

- ҚР ҚН EN 10149 «Суықтай қалыптау үшін аққыштықтың жоғары шегімен болаттардан ыстықтай тегістелген жазық бұйымдар»;

- ISO 1000 «ӨЖ бірліктері»;

- ISO 3898 «Құрылымдарды жобалау негіздері. Шартты белгілер. Жалпы символдар»;

- ISO 4997 «Суық күйде қысылған құрылымдық болат табактар»;

- ISO 8930 «Құрылымдардың сенімділігінің жалпы қағидалары. Баламалы терминдер тізімі».

### 1.3 Бастапқы деректер

ҚР ҚН EN 1990 бастапқы жағдайларын толықтыру үшін ҚР ҚН EN 1090-2 сәйкес бункерлерді құрастыру және дайындау қажет.

### 1.4 Қағидалар мен қолдану ережелер арасындағы айырмашылықтар

ҚР ҚН EN 1990 1.4 Тармағын қар.

### 1.5 Терминдер мен анықтамалар

Құрылыс конструкциялардың жобалауында ҚР ҚН EN нормаларында жалпы қолдану үшін ҚР ҚН EN 1990 1.5 Тармағында терминдер келтірілген және ҚР ҚН EN 1993-4-1 осы құралда ISO 8930 анықтамасы қолданылады. ҚР ҚН EN 1993-4-1 бункерлердің есептеуі және жобалауы үшін келесі қосымша терминдер енгізіледі:

1.5.1 **Қабықша:** Майысқан жұқа табактан құралған құрылым.

1.5.2 **Осьсимметриялық қабықша:** Бетінің геометриясы орталық осьтің айналасында меридионалды құраушының айналуы арқылы құралатын қабықша.

1.5.3 **Қорап:** Қорап жекелеген жазық қабырғалардан құралған бункердің жабық призма тік бөлігін ұсынады. Жоспарда қораптың тік бұрышты немесе квадрат қимасы бар. Әдетте, қораптың ұзындығы, ені мен биіктігі бойынша салыстырмалы мөлшерлері бар. Қорап пирамидалы-призмалық бункердің жоғарғы бөлігі болып табылады.

1.5.4 **Меридиональды бағыт:** Бункердің қабыршағының бетінің нүктелеріне қатысты бағыт тік жазықта болатын бағыт. Басқаша сөзбен айтқанда, бұл қабықшаның тік немесе еңіс бағыты, онымен жаңбыр тамшысы төмен ағады.

1.5.5 **Айналма бағыт:** Бункер қабырғасының кез келген нүктесіне жанасатын бағыт көлденең жазықта болады. Ол бункердің периметрі бойынша ауысады және оның пішініне

– домалақ немесе тік бұрышты екеніне байланыссыз бункердің шеңберімен нүктеге жанаманың бағытымен сәйкес келеді.

**1.5.6 Орта беті:** Бұл термин қабықшаның орта бетін құрау үшін қолданылады, оған қалыпты кернеулер тек майысатын сәттер, немесе қораптың бір бөлігі болып табылатын жазық табақтың орта жазықтығы әсер еткен жағдайда нөлге тең.

**1.5.7 Қаттылық қабырғаларының қадамы:** Қатар орналасқан параллель қаттылық қабырғалары арасындағы қашықтық.

**1.5.8 Бункер:** Бункер сусымалы қатты материалдарды уақытша сақтауға арналған. Бункердің тік пішіні бар және үстінен сусымалы материалдың ауырлық күші есебінен үстінен тиеледі. «Бункер» термині силос, құйғыш немесе олардың комбинацияларының түрі болуы мүмкін сусымалы материалды сақтау үшін құрылымдардың барлық пішіндеріне жатады.

**1.5.9 Бункердің тік бөлігі (barrel):** «barrel» сөзі «цилиндр» деп аударылады және домалақ немесе тік бұрышты қима бункерлеріне жатады. Орыс тілінде цилиндрдің тек домалақ (сақиналы) қимасы болуы мүмкін, сондықтан бұл терминнің баламасы «бункердің тік бөлігі», яғни тік қабырғалары бар бункердің жоғарғы бөлігі болып табылады. Призма бункерлердің бұл бөлігінің қимасында тік бұрыштың немесе квадраттың пішіні бар, сондықтан мұндай бункерлер «жоспарда тік бұрышты пішінді бункерлер» деп аталуы мүмкін. Цилиндр бункерлерде жоспарда жоғарғы бөліктің шеңбер пішіні бар.

**1.5.10 Құйғыш (hopper):** Құйғыш – бұл төменнен тарылатын және сусымалы материалды меншікті салмағының әсерімен тиейтін тесікке бағыттауға арналған бункердің бір бөлігі.

**1.5.11 Торап (junction):** Торап – бұл қабықшаның немесе призмалық бөліктің жазық элементтерінің екі немесе одан артық сегменті қосылатын нүкте, Қаттылық қабырғалары тораптың бір бөліктері құрауы немесе құрамауы мүмкін. Мысалы, домалақ қабырғаны қабықшаға немесе бункердің призма бөлігіне қосу торап ретінде қарастырылуы мүмкін.

**1.5.12 Өтпелі қосылу:** Бұл бункер мен құйғыштың тік бөлігінің қосылу торабы. Бұл торап бункердің тік бөлігінің негізінде немесе біраз төмен орналасуы мүмкін.

**1.5.13 Юбка (skirt):** Юбка – бұл бункердің тік бөлігінің (қабырғасының) бөлігі және өтпелі тораптан төмен орналасады. Юбка бункердің жоғарғы бөлігінің қабыршағынан жоғары жатқан құрылымдардан жүктемені қабылдамауымен және сақталатын сусымалы материалмен тікелей байланыста болмауымен ерекшеленеді.

**1.5.14 Белдік:** Белдік, немесе қатар – бұл бірге қосылған және цилиндр бункердің тік қабыршағының көлденең жабық учаскесін құрайтын болат табактар.

**1.5.15 Бойлық қатаңдық қыры:** Өз кезегінде, айналу қабыршағының құраушысы болып табылатын қабықшаның пішінін қайталайтын қаттылықтың жергілікті элементі. Ол жергілікті жүктемелердің немесе тік осьтік қысушы күштердің тұрақтылығы арттыру, қабылдау үшін қолданылады. Бойлық қабырға негізгі көлденең жүктемеден майысушы сәттердің әсер етуі кезінде көтергіш қасиетті арттыруға арналмаған.

**1.5.16 Қабырға (rib):** Қабықшаның меридианының немесе жазық пластинаның жазығында иілу туғызатын жүктемені тікелей қабылдайтын жергілікті элемент. Қабырға айнарудың құраушы қабыршағында немесе призмалық бөліктің тік қабырғасы ретінде



орналасады. Ол майысуға жұмыстың есебінен құрылымға көлденең жүктемені тарату үшін қолданылады.

**1.5.17 Сақиналы қатандық қыры:** Сақиналы қатандық қыры — бұл белгілі бір биіктікте құрылым периметрімен өтетін және меридианды кесетін қаттылықтың жергілікті элементі. Ол қабықшаның меридиональды жазықтығында шағын қаттылығы бар деп алынады. Сақиналы қыр қабықшаның орнықтылығын арттырады немесе жергілікті жүктемелерді, бірақ негізгі көтергіш элемент ретінде емес қабылдайды. Айналу қабыршағында ол шеңбер бойынша өтеді, ал тік бұрышты құрылымдарда оның бункердің көлденең қимасының тік бұрышты пішіні бар.

**1.5.18 Аралас қатандық қыры (smeared stiffeners):** Егер қабықшаның қабырғасы немесе жекелеген қаттылық қырлары қырлардың қадамына еселі енмен құраушы қима ретінде қарастырылса, қаттылық қырларын аралас деп атайды. Аралас қырларымен қабықшаның қырының қаттылық параметрлері иілу мен созылудың өзара әрекеттесуіне әкелетін ішкі күштердің орталықтан тыс ортотропты құрылымына сәйкес келеді.

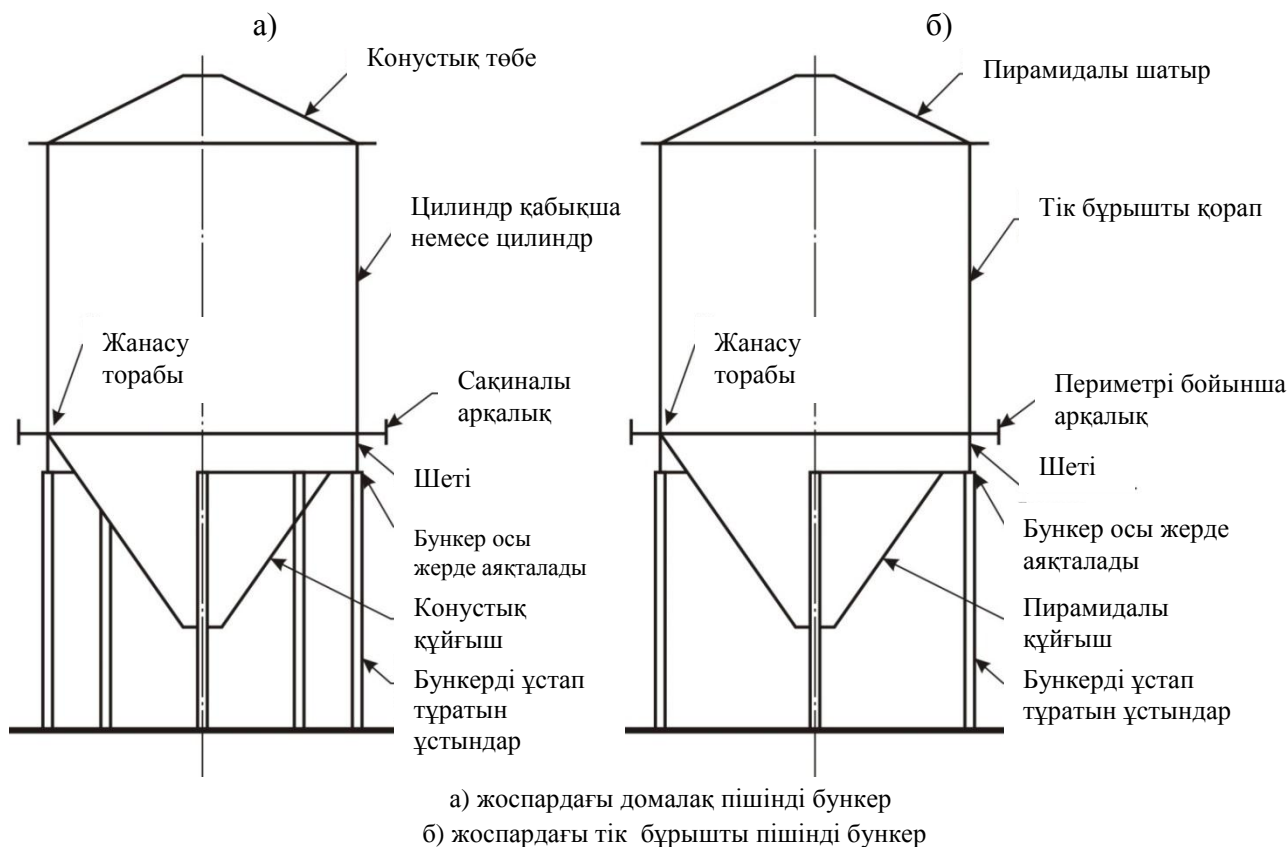
**1.5.19 Тірек сақина (base ring):** Тірек сақина — бұл құрылымның бойымен өтетін және құрылысты іргетасқа немесе басқа құрылымдық элементтерге бекітетін құрылымдық элемент. Тірек сақина есепте қабылданған бункерді бекіту шарттары іс жүзіндегіге сәйкес келуін қамтамасыз етуі тиіс.

**1.5.20 Құраушы немесе прокаттық сақиналы арқалық (ring girder or ring beam):** Бұл арқалық бункердің қимасының көлденең жазықтығында, сол секілді перпендикуляр қаттылықта майысушы қаттылыққа ие қатты элемент болып табылады. Цилиндр бункерлерде сақиналы арқалықтың сақина пішіні бар, призма бункерлерде арқалық квадраттың немесе тік бұрыштың қабырғалары бойынша орналасады. Сақиналы арқалық негізгі көтергіш элементтердің бірі болып табылады және қабықшадан немесе призма бөлімнен тіректерге жүктемені береді.

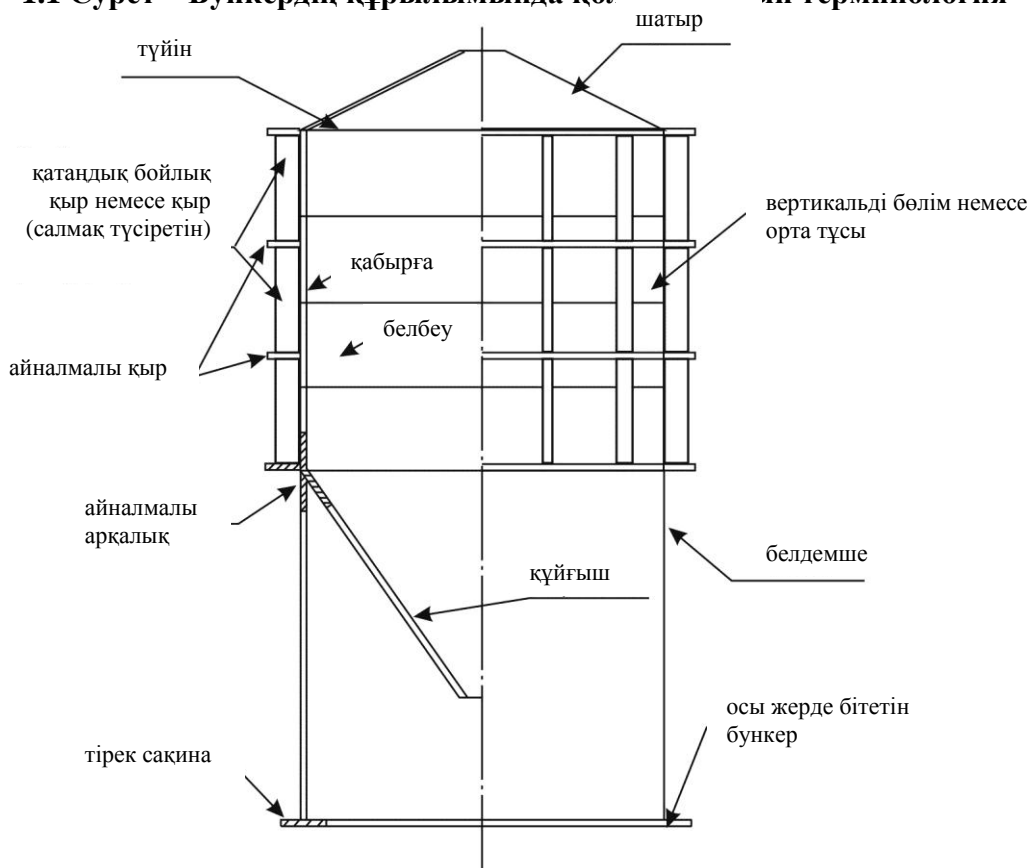
**1.5.21 Үздіксіз (кесілмейтін) сүйену (continuous support):** Егер көлденең және тік жүктемелердің беруі периметрімен кез келген нүктеде бункердің үздіксіз сүйенуі бар болса, бұл шарттан мүмкін кішігірім ауытқулар (мысалы, кішігірім тесік түрінде) бұл анықтаманың қолданылмаушылығына әсер етпейді.

**1.5.22 Жекелеген тірек (дискретті тіреу) (discrete support):** Дискретті тіреу бункер құрылыстың периметрімен орналасқан тар консолдардың немесе ұстындардың шектеулі санымен ұсталатын кезде орын алады. Әдетте төрт немесе алты жеке тірек қолданылады, бірақ үш және алтыдан артық тірек қолдану жағдайлары бар.

**1.5.23 Пирамидалы құйғыш:** Пирамидалы құйғыш призмалы бункер үшін құйғыш ретінде қолданылады және төңкерілген пирамиданың түрі болады. Осы құралда құйғыштың геометриясы қарапайым болып табылады деп алынады, яғни ол трапеция түрлі пішінді төрт жазық элементтерден ғана тұрады.



1.1 Сурет – Бункердің құрылымында қолданылатын терминология



1.2 Сурет – Бункер конструкциясында қолданылатын терминология (цилиндрлік бункердің бұзылмайтын тірегі)

**1.5.24 Изотропты қабырға:** Қасиеті барлық бағытты бірдей болатын бункер қабырғасы. Негізгі қасиеті қатаңдық болып табылады, сондықтан берілген анықтама қабырғаның тегіс қабатына жатады.

## **1.6 Шартты белгілер**

### **1.6.1 Латын әліпбиінің бас әріптері**

A - көлденең қима ауданы;  
 C - созу кезіндегі мембраналық қаттылық;  
 C - бойлық иілу коэффициенті;  
 D - иілу кезіндегі қаттылық;  
 E - ЮНг модулі;  
 F - күш;  
 G - өзгеріс модулі;  
 H - құрылым биіктігі;  
 I - көлденең кома инерциясының сәті;  
 I<sub>t</sub> - ширатудың бірыңғайландырылған тұрақтысы;  
 K - қабырға панелінің бұрылыс қаттылығы;  
 L - қаттылық қабыршағы сегментінің немесе қабырғасының биіктігі;  
 M - иілу сәті;  
 N - осьтік күш;  
 Q - орнықтылық шығынына ұшыратылған қабыршақты дайындауға шектің сапасының деңгейі;  
 R<sub>φ</sub> - кеңірдек ойпатындағы немесе қырындағы жергілікті радиус.

### **1.6.2 Латын әліпбиінің кіші әріптері**

a - коэффициент;  
 b - қаттылық табағының немесе қабырғасының ені;  
 d - кеңірдек қырлары арасындағы қашықтық;  
 e - қаттылық күшінің немесе қабырғасының эксцентриситеті;  
 f<sub>y</sub> - болаттың аққыштық шегі;  
 f<sub>u</sub> - болаттың беріктік шегі;  
 h - сақиналы арқалықтың сөрелері арасындағы қашықтық;  
 j - мембраналық кернеулердің көмегімен анықталатын, айқастыра дәнекерленген қосылыстарының беріктік коэффициенті;  
 j - есептік кернеу өзгерісінің баламалы гармоникасы;  
 l - кернеулерді сызықтық есептеу үшін қабықшаның келтірілген ұзындығы;  
 l - кеңірдекелген болаттан кеңірдек толқынының ұзындығы;  
 l - орнықтылық жойылуының ықтимал пішінді толқын ұзындығының жартысы (есепте ескерілетін биіктік);

$m$  - ен бірлігіне иілу сәті;

$m_x$  - шеңбер ұзындығының бірлігіне меридиондық иілу сәті;

$m_y$  - қорап биіктігі бірлігіне шеңбер бағыттағы иілу сәті;

$m_\theta$  - айналма бағытта қабықша биіктігінің бірлігіне сақиналы иілу сәті;

$m_{xy}$  - пластина енінің бірлігіне көлденең айналатын сәт;

$m_{x\theta}$  - қабықша енінің бірлігіне көлденең айналатын сәт;

$n$  - бірдей әрекеттесуші мембраналық кернеулер;

$n$  - бункердің периметрі бойынша жекелеген тіректер саны;

$n_y$  - қорап биіктігінің бірлігіне айналма бағытта бірдей әрекеттесуші мембраналық кернеулер;

$n_x$  - шеңбер ұзындығының бірлігіне бірдей әрекет етуші меридионалды мембраналық кернеулер;

$n_\theta$  - қабықша биіктігінің бірлігіне бірдей әрекет етуші айналма мембраналық кернеулер;

$n_{xy}$  - пластина енінің бірлігіне бірдей әрекет етуші мембраналық жанама кернеулер;

$n_{x\theta}$  - қабықша енінің бірлігіне бірдей әрекет етуші мембраналық жанама кернеулер;

$p$  - қысым;

$p_n$  - қабықшаның бетіне перпендикуляр қалыпты қысым (сыртқа бағытталған);

$p_x$  - қабықшаға параллель меридионалды үстіңгі жүктеме (төмен бағытталған);

$p_\theta$  - қабықшаға параллель шеңбер үстіңгі жүктеме (сағат тіліне қарсы бағытталған);

$q$  - өзекке әсер ететін ұзындық бірлігіне көлденең күш;

$r$  - домалақ конфигурациялы бункер үшін радиусты координата;

$r$  - қабықшаның орта бетінің радиусы;

$s$  - айналма бағытта қаттылық қабырғаларының қадамы;

$t$  - қабырға қалыңдығы;

$t_x, t_y$  -  $x, y$  бағыттарда созған кезде кеңірдектелген табақтың баламалы қабырға қалыңдығы;

$w$  - жетілмегендік қарқыны;

$w$  - тарамдалған деформация;

$x$  - жергілікті меридионалды координата;

$y$  - айналма бағытта жергілікті координата;

$z$  - жаһандық осьтік координата;

$z$  - осьсимметриялық бункердің тік осінің бойымен координата (айналу қабықшасы).

### **1.6.3 Грек әліпбиінің әріптері**

$\alpha$  - жетілмегендік болған кезде тұрақтылықты төмендетудің берік коэффициенті (төмендетуші коэффициент);

$\alpha$  - температуралық кеңею коэффициенті;

$\beta$  - құйғыш төбесіндегі бұрыштың жартысы;

$\gamma_F$  - жүктемелер үшін сенімділіктің жеке коэффициенті;

$\gamma_M$  - көтергіш қасиет үшін сенімділіктің жеке коэффициенті;

$\delta$  - шекті майысу;  
 $\Delta$  - үстелу;  
 $\chi$  - майысқақ ұстынның беріктігін жоғалту үшін төмендетуші коэффициент;  
 $\chi$  - беріктік жоғалған кезде қабықшаның шекті кернеуін төмендету коэффициенті;  
 $\lambda$  - қабықшаның меридиональды майысуының жартылай толқыны;  
 $\bar{\lambda}$  - қабықшаның шартты майысқақтығы;  
 $\mu$  - қабырғаға сүйкелу коэффициенті;  
 $\nu$  - Пуассонның көлденең деформациялану коэффициенті ;  
 $\theta$  - көлденең жазықтықта қабықшаның бұрыштық координатасы;  
 $\sigma$  - қалыпты кернеулер;  
 $\sigma_{bx}$  - иілу кезінде меридиональды кернеулер;  
 $\sigma_{by}$  - қорапта майысудың қалыпты шеңбер кернеулері;  
 $\sigma_{b\theta}$  - қисықсыздықты қабыршақтағы майысудың қалыпты шеңбер (сақиналы) кернеулері;  
 $\tau_{bxy}$  - қорапта айналу кезінде жанама кернеулер;  
 $\tau_{bx\theta}$  - қисық сызықты қабыршақта бұралу кезінде жанама кернеулер;  
 $\sigma_{mx}$  - меридиональды мембраналық кернеулер;  
 $\sigma_{my}$  - қораптағы айналма мембраналық кернеулер;  
 $\sigma_{m\theta}$  - қисық сызықты қабыршақтағы сақиналы мембраналы кернеулер;  
 $\tau_{mxy}$  - қораптағы мембраналы жанама кернеулер;  
 $\tau_{mx\theta}$  - қисық сызықты қабыршақтағы мембраналы жанама кернеулер;  
 $\sigma_{sox}$  - сыртқы бетіндегі меридиональды кернеулер;  
 $\sigma_{soy}$  - қораптың сыртқы бетіндегі айналма кернеулер;  
 $\sigma_{so\theta}$  - қисық сызықты қабықшаның сыртқы бетіндегі айналма кернеулер;  
 $\tau_{soxy}$  - қораптың сыртқы бетіндегі жанама кернеулер;  
 $\tau_{sox\theta}$  - қисық сызықты қабықшаның сыртқы бетіндегі жанама кернеулер;  
 $\tau$  - жанама кернеулер;  
 $\omega$  - орнықтылық есептеулеріндегі өлшеусіз параметр;  
 $\omega$  - тік емес құйғыштың ось вертикалына еңкею;  
 $\psi$  - кернеулер бөлінуінің біркелкіліксіздік параметрі.

#### 1.6.4 Жолма- жол индекстер

$E$  - есептік әсерлерден туындайтын кернеулердің немесе орын ауысулардың мәндері;  
 $F$  - әсерлер;  
 $M$  - материал;  
 $R$  - көтергіш қасиеті;  
 $S$  - есептік әсерлерден туындайтын бірдей әрекеттесуші кернеулердің мәні;  
 $b$  - майысу;  
 $c$  - цилиндр;  
 $cr$  — беріктік жоғалтуының шекті мәні;  
 $d$  - есептік мән;

eff - келтірілген (есептік) мән;  
h - құйғыш;  
m - мембрана, аралықтың орта нүктесі;  
min - минималды мүмкін мән;  
n - қабырғаға нормаль;  
p - қысым;  
r - тарамдалған;  
s - юбка, тірек;  
s - беттегі кернеу (o - сыртқы бет, i - ішкі бет);  
u - шекті мән;  
 $\omega$  - қабырғаға қатысты меридиональды параллель (қабырғаға сүйкелу);  
x - меридиональды бағыт;  
y - айналма бағыт (қорап құрылымдары), аққыштық;  
z - осьтік бағыт;  
 $\theta$  - айналмалы, сақиналы (айналу қабықшалары үшін).

## **1.7 Белгілердің ережесі**

### **1.7.1 Цилиндр бункерге арналған жаһандық координаталар жүйелері**

1.7.1.1 1993-4-1 ҚР ҚН EN-ге құралдың бұл бөлімінде келтірілетін белгілер ережесі тұтастай бункердің барлық құрылымына қолданылады, яғни бункер ортақ құрылыстан артық жеке құрылымдық элемент болып табылмайды (1.3 Суретті қараңыз). Бұл ереже бункер қабықшасының элементтерінің кернеуленген- деформацияланған күйін есептеулерді орындаған кезде қолданылады.

4.1.2 Бункер құрылымдарының жаһандық координаталар жүйесінде осьтер жүйесі үшін келесі цилиндр координаталар қолданылады:

z – айналу қабықшасының орталық осінің бойымен тік координата;

r – тарамдалған координата (радиус) ;

$\theta$  – бұрыштық координата;

1.7.1.3 Шамаларды оң бағыттау мен сәйкес мәніне арналған келісімдер:

– сыртқа бағыт оң болып табылады ішкі қысымның оң белгісі бар, қабықшаның сыртқа жылжуы – оң белгі;

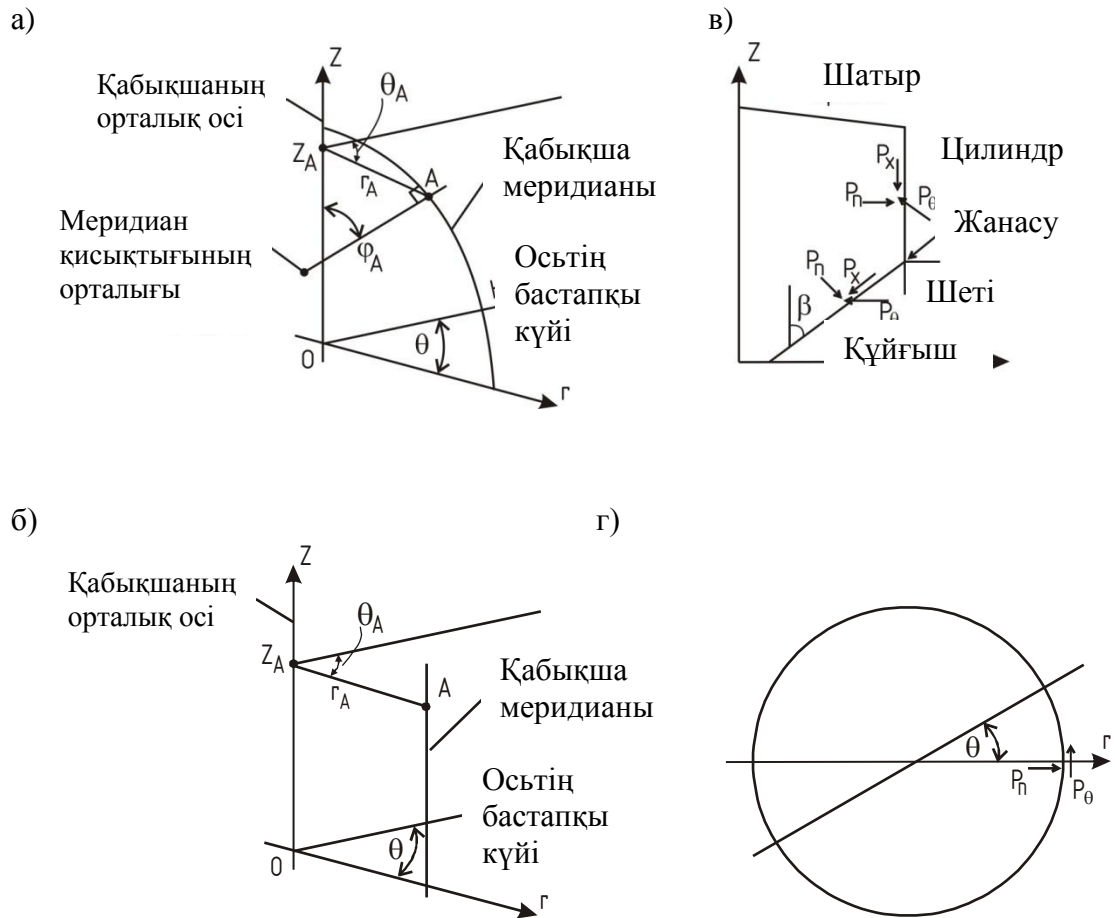
– созушы кернеулердің оң белгісі болады, ерекшелік қысу оң болып саналатын орнықтылыққа есептеулер формулалары құрайды.

1.7.1.4 Бункер қабырғасының бетіне бөлінген жүктемелер үшін белгілер туралы келісім мен белгілеулер:

$r_n$  – қабықшаның бетіне қалыпты қысым, сыртқа бағыттау оң болып табылады

$r_x$  – қабықшаның бетіне меридиональды жүктеме және оған параллель, төмен бағыт оң болып табылады, жүктеме тік жазықтықта қабықшаға салынады

$r_\theta$  – қабықшаның бетіне сақиналы жүктеме және оған параллель, сағат тіліне қарсы бағыт оң болып табылады. Жүктеме көлденең жазықтықта қабықшаға салынады



а) айналмалы қабықша үшін жаһандық координаталар жүйесі;

б) цилиндр үшін жаһандық координаталар жүйесі;

в – бункер қабықшасының және жүктемелер үшін координаттар (вертикальді қима);

г – бункер қабықшасының және жүктемелер үшін координаттар (горизонтальді қима)

### 1.3 Сурет – Цилиндр бункерге арналған координаталар жүйесі

#### 1.7.2 Тік бұрышты бункерге арналған жаһандық координаталар жүйесінде

1.7.2.1 Бұл бөлімде келтірілетін белгілер ережесі тұтастай бункердің барлық құрылымына қолданылады, яғни бункер басқа құрылыстың құрамында жеке құрылымдық элемент болып табылмайды. Бұл ереже бункер қорап мен бункер құйғышының кернеуленген- деформацияланған күйін есептеулерді орындаған кезде қолданылады.

1.7.2.2 Бункер құрылымдарының жаһандық координаталар жүйесінде осьтер жүйесі үшін координаталардың декарттық жүйесі қолданылады  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Тік бағытқа  $z$  координатасы сәйкес келеді.

1.7.2.3 Шамалардың оң бағыты мен сәйкес мән үшін белгілер ережесінің түрі мынадай болады:

– сыртқа бағыт оң болып табылады (ішкі қысымның оң белгісі бар, қабықшаның сыртқа жылжуы – оң белгі);

– созушы кернеулердің оң белгісі болады, ерекшелік қысу оң болып саналатын орнықтылыққа есептеулер формулалары құрайды.

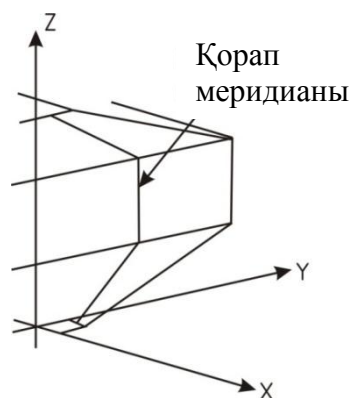
1.7.2.4 Бункер қабырғасының бетіне бөлінген жүктемелер үшін белгілер туралы келісім мен белгілеулер:

$p_n$  – қабықшаның бетіне қалыпты қысым, сыртқа бағыттау оң болып табылады.

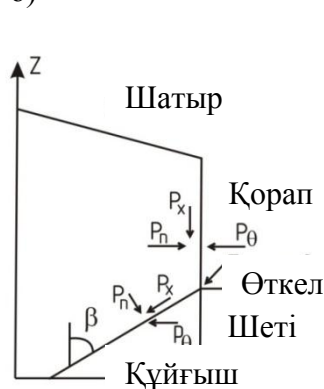
$p_x$  – қабықшаның бетіне меридиональды жүктеме және оған параллель, төмен бағыт оң болып табылады, жүктеме тік жазықтықта қабықшаға салынады.

$p_\theta$  – қабықшаның бетіне сақиналы жүктеме және оған параллель, сағат тіліне қарсы бағыт оң болып табылады. Жүктеме көлденең жазықтықта қабықшаға салынады.

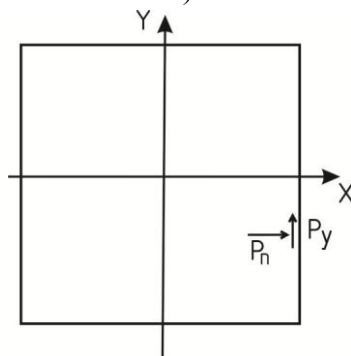
а)



б)



в)



а) жаһандық координаталар жүйесі;

б) бункер мен жүктемеге арналған координаталар (вертикальді қима)

в) бункер мен жүктемеге арналған координаталар (горизонтальді қима)

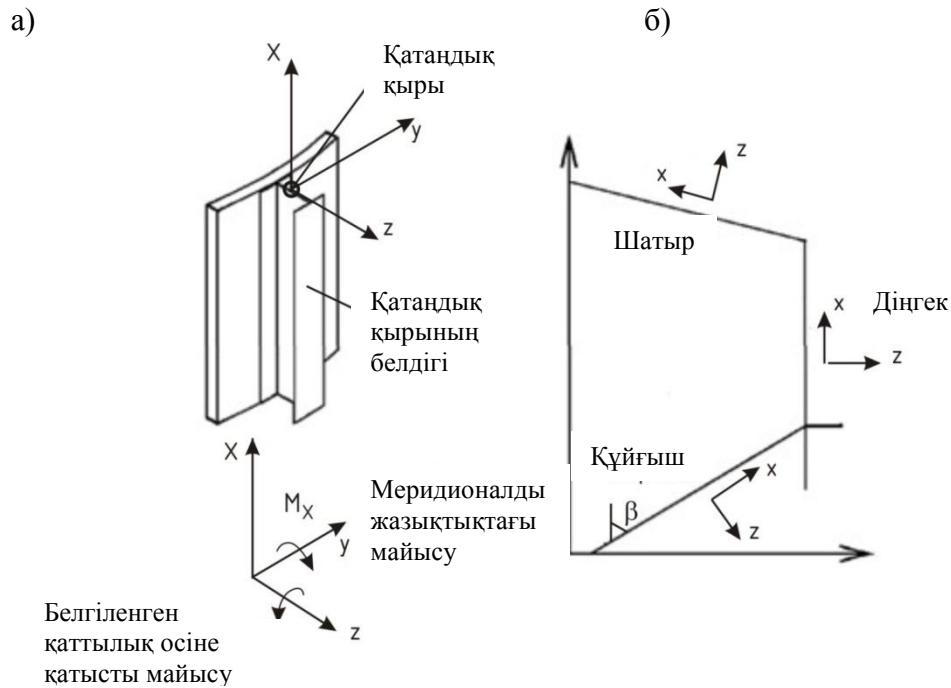
#### 1.4 Сурет – Тік бұрышты бункер үшін координаталар жүйесі

#### 1.7.3 Цилиндр және тік бұрышты бункерлерде құрылымдық элементтердің жергілікті осьтер үшін шарттар мен белгілер ережесі

1.7.3.1 Бункердің қабырғасына бекітілетін құрылымдық элементтер үшін келісімдер қарастырылатын элементтің бағдарлануына байланысты әр түрлі болып қабылданатын құрылымдық элементтер үшін келісімдер, ол бункердің периметрі бойынша меридиональды жазықтықта немесе көлденең жазықтықта орналасуы мүмкін (4.3 және 4.4



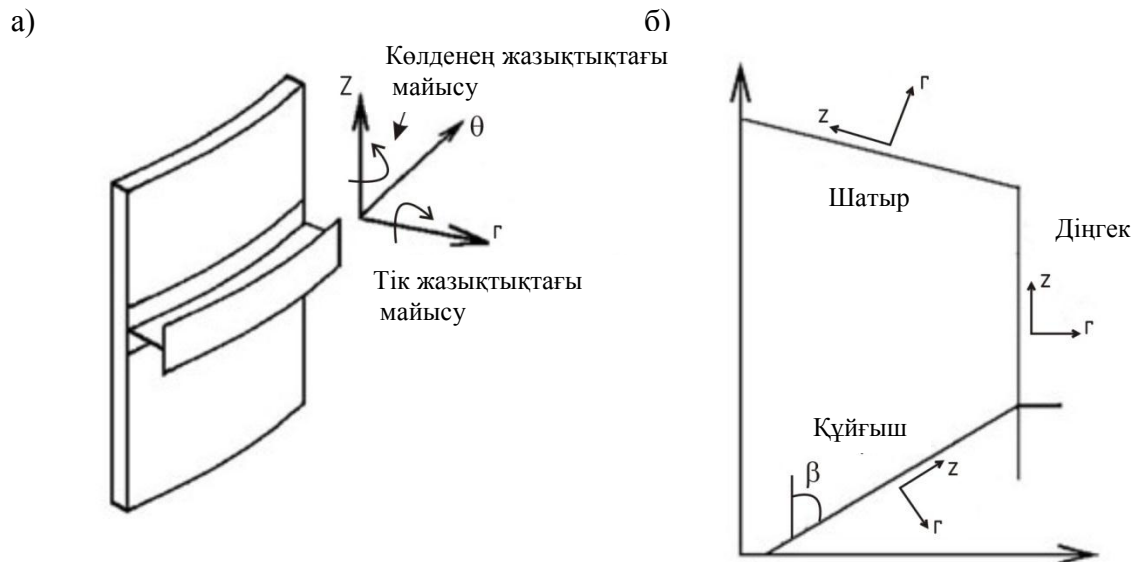
Суреттерді қараңыз). Цилиндр бункерлер үшін периметрдің сақинаның пішіні бар. Тік бұрышты, немесе пирамидалы-призмалы бункерлер үшін периметрдің тік бұрыштың пішіні бар.



а) иілу соларға қатысты болатын қатандық және ось қыры;

б) әр түрлі учаскелердегі жергілікті осьтер

**1.5 Сурет – Қабықшада немесе қорапта меридионалды қатандық қырлары үшін жергілікті координаталар жүйелері**



а) иілу соларға қатысты болатын қатандық және ось қыры;

б) әр түрлі учаскелердегі жергілікті осьтер

**1.6 Сурет – Қабықшада немесе қорапта айналма қатандық қырлары үшін жергілікті координаталар жүйелері**

1.7.3.2 Меридианның бойымен орналасқан және бункердің қабырғасына тіркелген тура құрылымдық элементтер үшін осьтердің белгілеулері мен бағыттары (1.5 а Суретті қараңыз) келесі деп алынады:

$x$  – тік бөлім, құйғыш пен қақпақ үшін меридиональды координата;

$y$  – қатаңдық қырларының сөрелеріне параллель ең үлкен иілу қатаңдығымен ось, бұл оське қатысты меридиональды жазықтықта иілу болады;

$z$  – қатаңдық қырларының сөрелеріне перпендикуляр ең аз иілу қатаңдығымен ось.

1.7.3.3 Көлденең жазықтықта периметрі бойынша орналасқан және бункердің қабырғасына тіркелген қисық сызықты құрылымдық элементтер үшін осьтердің белгілеулері мен бағыттары (1.6 а Суретті қараңыз) келесі деп алынады:

$\theta$  – бұрыштық координаталық ось, көлденең жазықтықта орналасады;

$r$  – тарамдалған ось, көлденең жазықтықта орналасады; бұл оське қатысты тік жазықтықта иілу болады;

$z$  – тік ось, бұл оське қатысты көлденең жазықтықта иілу жүреді.

Жергілікті тік оське  $z$  қатысты көлденең қатаңдық (сақина) қырының майысуына қоршаған сәттің  $m_\theta$  әсерінен цилиндр қабықшадағы иілу сәйкес келеді. Жазық сақинада келесі жағдайларда жергілікті тарамдалған оське  $r$  қатысты июші сәттер туындайды:

– сақина сақиналы көтергіш арқалық болып табылады;

– сақинаға сақина қимасы ауырығының ортасына қатысты эксцентриситетпен салынған жазық тарамдалған күштер әсер етеді.

1.7.3.4 Қабырғаның бойымен орналасқан және қорапта тіркелген жазық тура құрылымдық элементтер үшін осьтердің белгілеулері мен бағыттары (1.6 а Суретті қараңыз) келесі деп алынады:

– қабырғаның бойымен жазық ось -  $x$

– қабырғаға перпендикуляр жазық ось -  $y$

– тік ось -  $z$

Жазық тура құрылымдық элемент қабырғаның жазығынан қораптың қабырғасы майысқан жағдайда тік оське қатысты  $z$  майысады. Бұл жағдай элементтің кәдімгі жұмысына сәйкес келеді.

#### **1.7.4 Цилиндр және тік бұрышты бункерлерде бірдей әрекеттесетін кернеулерге арналған ереже**

1.7.4.1 Кернеуді білдерітін шамалардың жолма- жол индекстеріне арналған ереженің мынадай түрі бар: «жолма- жол индекс салынған күш қалыпты кернеулерді туғызатын» бағытты білдіреді».

Бірдей әрекеттесуші мембраналық кернеулер:

$n_x$  - бірдей әрекет етуші меридиональды мембраналық кернеулер;

$n_\theta$  - қабықшалардағы бірдей әрекет етуші сақиналы мембраналық кернеулер;

$n_y$  - қораптардағы бірдей әрекет етуші айналма мембраналық кернеулер;

$n_{xy}$  немесе  $n_{x\theta}$  - бірдей әрекет етуші жанама мембраналық кернеулер.

Мембраналық кернеулер:

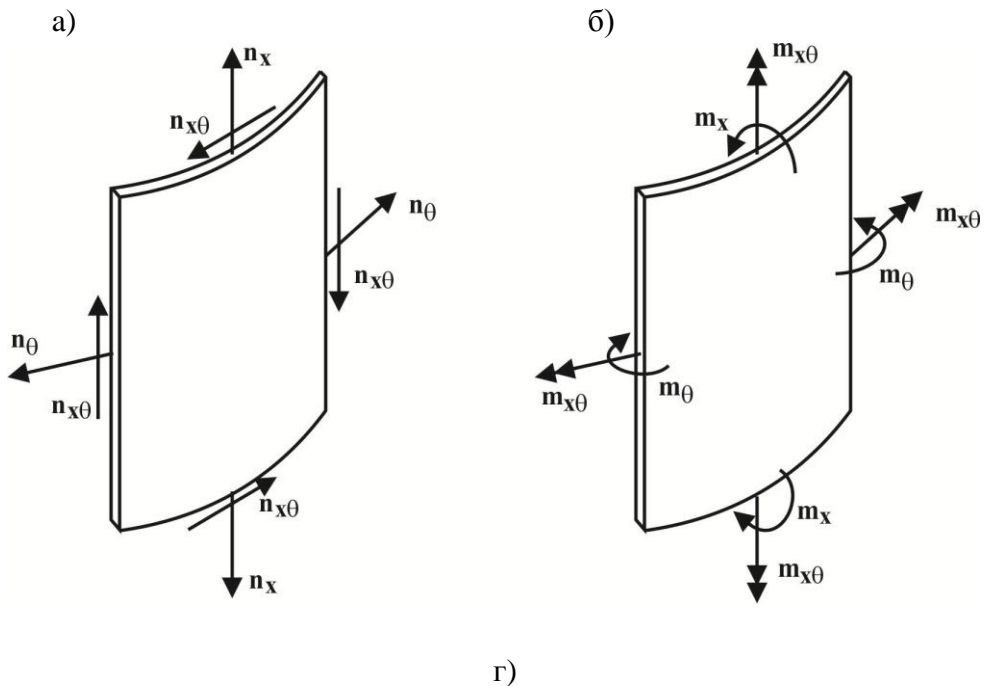
$\sigma_{mx}$  - меридионалды мембраналық кернеулер;  
 $\sigma_{m\theta x}$  - қабықшалардағы сакиналы мембраналы кернеулер;  
 $\sigma_{my}$  - тік бұрышты қораптардағы айналма мембраналық кернеулер;  
 $\tau_{mx}$  немесе  $\tau_{mx\theta}$  - жанама мембраналық кернеулер.

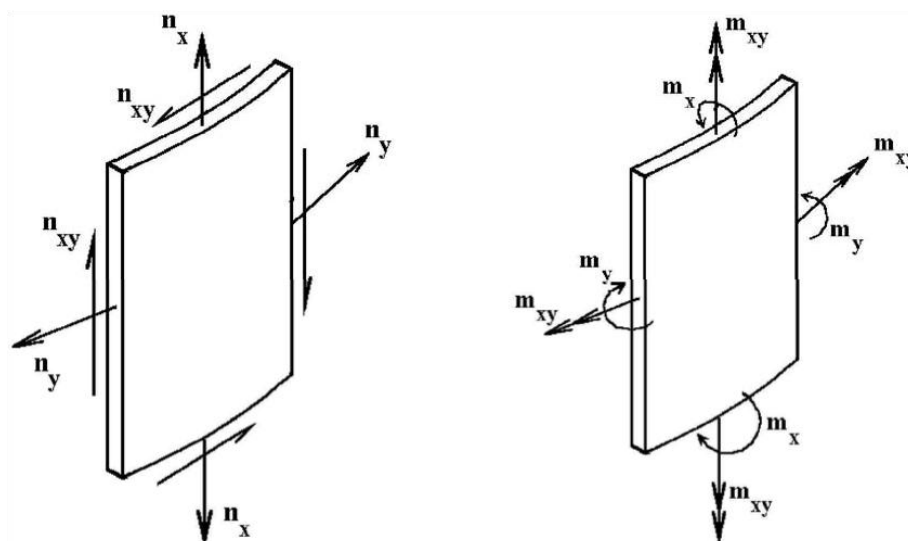
1 ЕСКЕРТПЕ Ағылшын тілді әдебиетте кернеулердің бір түрі үшін жеке түрлі, яғни «кернеуді» қолдану қабылданған. Бұдан ерекше, есептеудің орыс тілді нормаларында көпше түр, яғни «кернеулер» қолданылады.

2 ЕСКЕРТПЕ «resultant» термині үшін аударма ретінде «нәтижелеуші» терминін пайдалану қажет. Бұл келесі себептермен себепші болған:

- әдебиетте инженерлік есептеулер бойынша нәтижелеуші деп әдетте келтірілген кернеулерді, яғни бірнеше кернеулердің қолданылу нәтижесін атайды;

- 1993 -1-6 ҚР ҚН EN сәйкес, кернеу деректері қабықша қалыңдығы бойынша қалыпты кернеулерден интеграл ретінде анықталады, сондықтан баламалы аудармасы «бірдей әрекет етуші» термині болады.





- а) қабықшаның бірдей әрекеттесуші мембраналық кернеулер;  
 б) қабықшаның иілуі кезіндегі бірдей әрекет етуші кернеулер;  
 в) қораптағы бірдей әрекеттесуші мембраналық кернеулер;  
 г) қораптағы иілуі кезіндегі бірдей әрекет етуші кернеулер

### 1.7 Сурет- Бункер қабырғаларындағы (қабықша мен қораптарда) бірдей әрекет етуші кернеулер

1.7.4.2 Сәттерді білдіретін шамалардың жолма- жол индекстері үшін ереженің келесі түрі бар: «жолма- жол индекс салынған сәт қалыпты кернеулерді білдіретін бағытты білдіреді». Бұл ереже 1993-1-1 ҚР ҚН EN және 1993-1-3 ҚР ҚН EN –ге сәйкес арқалықтар мен ұстындар үшін қолданылатын белгілеулер мен белгілердің ережесінен ерекшеленеді.

Бірдей әрекет етуші июші әрекеттер:

$m_x$  - ен бірлігіне меридиональды иілу сәті;

$m_\theta$  - қабықшалардағы ен бірлігіне сақиналы иілу сәті;

$m_y$  - тік бұрышты қораптардағы қабырғаның ені бірлігіне айналма иілу сәті;

$m_{xy}$  немесе  $m_{x\theta}$  - ен бірлігіне айналатын сәттер.

Иілу кезіндегі кернеулер:

$\sigma_{bx}$  - иілуден меридиональды қалыпты кернеулер;

$\sigma_{b\theta}$  - қабықшалардағы иілуден сақиналы қалыпты кернеулер;

$\sigma_{by}$  - тік бұрышты қораптардағы иілуден жазық қалыпты кернеулер;

$\tau_{bxy}$  немесе  $\tau_{bx\theta}$  - қабықша жазығынан бұралудан жанама кернеулер.

Ішкі және сыртқы беттердегі кернеулер:

$\sigma_{six}$ ,  $\sigma_{sox}$  - қораптар мен қабықшалардағы меридиональды ішкі және сыртқы кернеулер;

$\sigma_{si\theta}$ ,  $\sigma_{so\theta}$  - қабықшалардағы бетте сақиналы ішкі және сыртқы кернеулер;

$\tau_{six\theta}$ ,  $\tau_{sox\theta}$  - қабықшалардағы бетте ішкі және сыртқы кернеулер;

$\sigma_{siy}$ ,  $\sigma_{soy}$  - тік бұрышты қораптардағы бетте айналма ішкі және сыртқы кернеулер;

$\tau_{sixy}$ ,  $\tau_{soxy}$  - тік бұрышты қораптардағы бетте ішкі және жанама жанама кернеулер на поверхности тік бұрышты қораптардағы.

## 1.8 Өлшем бірліктері

1.8.1 Есептеулер орындаған кезде ISO 1000 стандартына сәйкес ӨЖ жүйесінің өлшем бірліктері қолданылуы тиіс.

1.8.2 Есептеулер үшін келесі өзара келісілген шамалар мен өлшемдерді қолдану ұсынылады:

- өлшемдері мен қалыңдықтары: м, см, мм;
- меншікті салмағы:  $\text{кН/м}^3$ ,  $\text{Н/мм}^3$ ;
- күш салулар мен жүктемелер: кН, Н;
- сызықтық таратылған күштер мен жүктемелер:  $\text{кН/м}$   $\text{Н/мм}$ ;
- ауданы бойынша бөлінген қысым мен әсерлер: кПа, МПа;
- бірлкті масса:  $\text{кг/м}^3$   $\text{кг/мм}^3$ ;
- күшею:  $\text{км/сек}^2$   $\text{м/сек}^2$ ;
- бірдей әрекеттесуші мембраналық кернеулер:  $\text{кН/м}$ ,  $\text{кН/см}$ ,  $\text{Н/мм}$ ;
- бірдей әрекет етуші иілуші кернеулер:  $\text{кН} \cdot \text{м/м}$ ,  $\text{кН} \cdot \text{см/см}$ ,  $\text{Н} \cdot \text{мм/мм}$ ;
- кернеулер мен серпінділік модульдері: кПа, МПа ( $=\text{Н/мм}^2 = 0,1 \text{кН/см}^2$ ).

ЕСКЕРТПЕ  $\text{кН/см}$  және  $\text{кН/см}^2$  өлшемдерін қолдану кернеулердің есептеулерін орындаған кезде неғұрлым ыңғайлы, себебі элементтердің көлденең қималарының геометриялық сипаттамалары әдетте см- мен өлшенеді. Бұл ӨЖ бірліктер жүйесіне қайшы келмейді, өйткені арнайы аударма коэффициенттерін қажет етпейді.

## 2 ЕСЕПТЕУ НЕГІЗДЕРІ

### 2.1 Негізгі талаптар

2.1.1 Бункер құрылымдары 1990 ҚР ҚН EN-ң 2 Бөлімінде баяндалған құрылыс құрылымдарының қауіпсіздіктеріне негізгі талаптарға сәйкес, сондай-ақ осы құралдың бұл бөлімінде келтірілген толықтыруларды ескерумен жобалануы, дайындалуы және құрылуы тиіс.

2.1.2 Бункердің көтергіш құрылымдарының құрамына кіреді: құрылымның барлық қабықшалары мен жазық элементтер, көлденең және тік қатаңдық қырлары, сақиналы қырлар, тірек қырлары мен тірек аркалықтар, сондай-ақ қосылатын элементтер.

2.1.3 Бункер сүйенетін ұстап тұратын құрылымдар бункердің бір бөлігі болып табылмайды. Бункер мен оның тіректері арасындағы шекара 3.1 Суретте көрсетілген. Осыған ұқса бункерге үстінен сүйенетін құрылымдар бункер құрылымдарының құрамына кірмейді.

2.1.4 Бункер құрылымдары бункерді пайдаланған кезде туындайтын зақымданулардың әсерімен бұзылмайтын етіп есептелуі және жобалануы тиіс (бұл мүмкін жерде).

2.1.5 Бункер құрылымдарына технологиялық процеспен себепші болған арнайы талаптар қойылуы мүмкін. Жобалау кезінде есепке алу үшін бұл талаптар жобалық ұйымның, тапсырыс беруші мен сәйкес бақылау органның арасында келісілуі тиіс.

## 2.2 Сенімділік бойынша бункерлер топтары

2.2.1 Құрылыс құрылымдарының жауапкершілік деңгейі бойынша бөлінуі мен бұл талаптан туындайтын сенімділікке қойылатын талаптар 1990 ҚР ҚН EN-де айтылады.

2.2.2 Бункерлердің құрылымдарын есептеу және жобалау кезінде зардаптардың тандалған тобына, құрылымдық шешімге, қабылдамаудың мүмкін түрлері мен бұзылу нысандарына байланысты талаптардың әр түрлі деңгейлерін қолдану қажет.

2.2.3 Осы стандартта барлық бункерлер зардаптардың 3 тобына бөлінеді: 1,2, 3 топ. Әр түрлі топтарға талаптар мен оларды есептеу әдістерінің жобалау мен құрылысқа шығындарды ескерумен әр түрлі топты бункерлерінің шамамен бірде сенімділігін қамтамасыз ету мақсаты бар. Жауапкершілік тобы қаншалықты жоғары болса, қабылдамаулар қаупін төмендетуді қамтамасыз етуге талаптар соншалықты жоғары.

2.1 Кестеде сенімділікке әсер ететін жұмыс мөлшері мен типі бойынша бункерлерді жіктеу келтіріледі. ҚР ҚН EN 1991-4 -де қолданыстағы жүктемелердің типтеріне байланысты және мөлшерлерінің қатынасы бойынша бункерлерді жіктеу келтіріледі.

**2.1 Кесте - Бункерлер үшін зардаптарымен топтар**

Зардаптар тобы	Жобалау шарттары Есептік жағдайлар
1 Зардаптар тобы	Жер деңгейіне дейін тұтас юбкаға сүйенетін және 5000 т артық сыйымдылығы бар жерүсті тіректерімен бункерлер немесе бункерлер. Сыйымдылығы 1000 т артық жеке ұстындардағы бункерлер. Есептік жағдайлардың кез келген біреуі болатын 200 тоннадан артық сыйымдылықты бункерлер: а) эксцентриситетпен түсіру б) жергілікті бүйір жүктеме с) симметриялы емес толтыру
2 Зардаптар тобы	Бұл стандарт бойынша және басқа топқа кірмейтін барлық бункерлер
3 Зардаптар тобы	Сыйымдылығы 10- нан 100 т дейінгі бункерлер
ЕСКЕРТПЕ Сыйымдылығы 10 т кем бункерлер осы стандарттың талаптарына түспейді.	

2.2.4 Жобалау кезінде бункер үшін 1993-4-1 ҚР ҚН EN 2.1 Кестесінде көрсетілгенге қарағанда зардаптардың неғұрлым жоғары тобын қабылдауға болады.

2.2.5 Зардаптар тобын таңдау жобалық ұйыммен, тапсырыс берушімен және сәйкес мемлекеттік бақылау органымен бірлесіп келісілуі тиіс.

2.2.6 3 зардаптар тобын, егер бункердің қабырғасына бункер шеңберінің кем дегенде жартысына таралатын сақталатын материалдан жергілікті бүйір жүктеме әсер етсе, қолдану қажет. Жергілікті жүктеме бункердің қабырғасында иілуші сәттердің пайда болуын туғызады, оның мәні 1991-4 ҚР ҚН EN бойынша анықталады.

2.2.7 1 зардаптар тобының бункерлері үшін 1993-4-1 ҚР ҚН EN А Қосымшасында жазылатын жеңілдетілген есептеу ережесі қолданылады.

### **2.3 Шекті күйлер**

Бункерлер үшін берілген стандарт бойынша бункерлер үшін қабықшаларды есептеуге 1993 -1-6 ҚР ҚН EN анықталған шекті күйлерді қолдану қажет.

### **2.4 Технологиялық және климаттық әсерлер**

#### **2.4.1 Жалпы ереже**

Бункерлерді есептеу және жобалау кезінде ҚР ҚН EN 1990 4 Бөлімінде және ҚР ҚН EN 1991-4 жазылған жүктемелерге жалпы талаптар орындалуы тиіс.

#### **2.4.2 Желдік жүктемелер**

2.4.2.1 ҚР ҚН EN1991-1-4 көрсетілмеген топта жеке тұрған бункер үшін желдік әсерлерді анықтаған кезде, анықтамалық деректермен немесе эксперименталдық зерттеулерден алынған қосымша ақпаратты пайдалану қажет.

2.4.2.2 Биік жеңіл тұтастай қабырғалы құрылымдар есептеу кезінде қабылданатын шеңбер бойынша жел қысымының таралуына сезімтал. Сондықтан бункер бос болған кезде қабырға мен арнайы жағдайларда іргетасқа бункерді бекіту бөлшектерін есептеу үшін ҚР ҚН EN 1991-1-4 келтірілетіндермен салыстырғанда желдік жүктеменің неғұрлым жоғары мәндері қолданылуы мүмкін. Цилиндр бункерлердің шеңбері бойынша желдік қысымның таралуы туралы қосымша ақпарат С Қосымшасында келтіріледі.

#### **2.4.3 Қатты материалдардың қысымын басқа әсерлермен үйлестіру**

Бункерді есептеу кезінде ҚР ҚН EN 1993-4-1 2.9.2 Тармағында көрсетілген әсерлерге жеке қауіпсіздік коэффициенттерін қолдану қажет.

### **2.5 Материалдың қасиеттері**

2.5.1 Бункерлерге арналған материалдар ҚР ҚН EN 1993-1-1 баяндалған жалпы талаптарға сәйкес келуі тиіс.

2.5.2 ҚР ҚН EN 1993-4-1 3 Бөлімінде баяндалған, бункерлер үшін материалдардың қасиеттеріне арнайы талаптарды қолдану қажет.

## **2.6 Геометриялық сипаттамалары**

2.6.1 Сипаттамалардың номиналды мәндеріне және мөлшерлердің қолайсыз ауытқуларын ескеруге қатысты, ҚР ҚН EN 1990 6 Бөлімінде жазылған геометриялық сипаттамалар туралы ережелерді қолдану қажет.

2.6.2 Сонымен қатар ҚР ҚН EN 1993-1-6 келтірілген қабықшалардың құрылымдарына жататын қосымша геометриялық деректерді пайдалану қажет.

2.6.3 Қабықша табақтарының қалыңдығы номиналды қалыңдығы ретінде қабылданады. Егер болат табақ ҚР ҚН EN 10149 сәйкес ыстық мырыштаумен металл жабын келтірілген болса, номиналды қалыңдық ретінде табақтың негізгі метал қалыңдығын қабылдау қажет, ол болат табақтың екі бетінде мырыш жабынының жалпы қалыңдығының номиналды сыртқы қалыңдығынан шегерумен анықталады.

2.6.4 Коррозия мен ұсатылу салдарынан қабырғалар металының қалыңдығын және бункер құйғышын азайту ҚР ҚН EN 1993-4-1 4.1.4 Тармағына сәйкес жобалау кезінде ескерілуі тиіс.

## **2.7 Әсер ету нәтижелерін анықтау үшін бункерді модельдеу**

2.7.1 Статикалық есептеу кезінде есептік модельдерді жасау мен есептеулерді орындауға ҚР ҚН EN 1990 5 Бөлімде баяндалған жалпы талаптарды сақтау қажет.

2.7.2 Пайдаланушылық жарамдылығының шекті күйлері бойынша тексерістерді орындау үшін құрылымдарды есептеуге арнайы талаптарды құрылымдық элементтердің әр түрлі типтері үшін ҚР ҚН EN 1993-4-1 берілген құралдың 4-9 Бөлімдерінің нұсқауларына сәйкес орындау қажет.

2.7.3 Көтергіш қасиеттің шекті күйлері бойынша тексерістер орындау үшін құрылымдарды есептеуге ерекше талаптарды ҚР ҚН EN 1993-1-6 және ҚР ҚН EN 1993 - 1-7 неғұрлым толық баяндалған, ҚР ҚН EN 1993-4-1 берілген құралдың 4-9 Бөлімдерінде көрсетілген нұсқауларына сәйкес орындау қажет.

## **2.8 Сынаулар негізіндегі есеп**

2.8.1 Эксперименталдық деректерді қолданумен есептеген кезде ҚР ҚН EN 1990 5 Бөлімінде баяндалған жалпы талаптарды басшылыққа алу қажет.

2.8.2 Дайындаудан кейін толық өлшемді сынаулардан өтетін зауыттық дайындамадағы типтік бункерлер үшін жобалау кезінде алынған міндетті сәйкестік критерийі қолданылуы мүмкін.

## **2.9 Шекті күйлер тексерістері үшін әсер ету нәтижелері**

### **2.9.1 Жалпы ереже**

Шекті күйлердің тексерістері кезінде ҚР ҚН EN 1990 6 Бөлімнің жалпы талаптары орындалуы тиіс.



## **2.9.2 Көтергіш қасиетті шекті күйлері үшін жеке сенімділік коэффициенттері**

### **2.9.2.1 Бункерлер үшін жүктемелер бойынша жеке сенімділік коэффициенттері**

2.9.2.1.1 Тұрақты, өтпелі және апатты есептік жағдайлар үшін ҚР ҚН EN 1990 де келтірілетін  $\gamma_F$  жүктеме бойынша жеке сенімділік коэффициенттерін қолдану қажет. Жүктемелердің үйлесу коэффициенттері  $\psi_0$  ҚР ҚН EN 1991-4 келтіріледі.

2.9.2.1.2 Зауытта дайындалатын жаппай типтік бункерлер үшін жүктеме бойынша жеке сенімділік коэффициенттерінің мәндері сәйкес өкілетті органдармен белгіленуі мүмкін. Мұндай бункерлер үшін ҚР ҚН EN 1993-4-1 2.9.2.1.1 Тармағынан сенімділік коэффициенттері бункерлердің басқа жобаларымен келісілген сенімділіктің қажетті деңгейін көрсету үшін бағдарлық ретінде ғана қызмет етеді.

### **2.9.2.2 Көтергіш қасиетті шекті күйлері үшін жеке сенімділік коэффициенттері**

2.9.2.2.1 Егер құрылымдардың беріктік сипаттамалары сынаулардың немесе эксперименттердің негізінде анықталады, ҚР ҚН EN 1990 нұсқауларын пайдалану қажет.

2.9.2.2.2 Қажушылық беріктікті (төзімділікті) тексеруді ҚР ҚН EN 1993 -1-6 9 Бөліміне сәйкес орындау қажет.

2.9.2.2.3 Әр түрлі шекті күйлер үшін  $\gamma_{Mi}$  жеке сенімділік коэффициенттерінің мәндері ҚР ҚН EN 1993-4-1 2.2 Кестесінде келтіріледі.

## **2.9.3 Қалыпты пайдалануға жарамдылықтың шекті күйлері**

ҚР ҚН EN 1993-4-1 сәйкес бөлімдерінде қалыпты пайдалануға жарамдылықтың шекті күйлерін тексерудің жеңілдетілген ережесі берілетін жерде, жүктемелердің есептік үйлесулерін қолданумен толық есептеулер орындамаған жөн.

## **2.10 Төзімділік**

Есептік ұзаққа төзуді қамтамасыз ету үшін ҚР ҚН EN 1990 2.4 Бөлімде жазылған жалпы талаптарды орындау қажет.

## **2.11 Отқа төзімділік**

Бункерлердің құрылымдарының отқа төзімділіктің қажетті деңгейін қамтамасыз ету үшін ҚР ҚН EN 1993-1-2 белгіленген ережелерді сақтау қажет.

## 2.2 Кесте - Көтергіш қасиет үшін жеке сенімділік коэффициенттері

Түсу пішіні үшін көтергіш қасиет	$\gamma_{M0}$ коэффициентінің мәні
Илемдіктің шекті күйі бойынша қабықша қабырғасының дәнекерленген немесе болттық қосылысының көтергіш қасиеті	$\gamma_{M0} = 1,00$
Қабықша қабырғасының орнықтылығы	$\gamma_{M1} = 1,10$
Ажырау бойынша дәнекерленген немесе болттық қосылысының көтергіш қасиеті	$\gamma_{M2} = 1,25$
Аз циклдық қажу бойынша қабықша қабырғасының көтергіш қасиеті	$\gamma_{M4} = 1,00$
Қосылыстардың көтергіш қасиеті	$\gamma_{M5} = 1,25$
Төзімділік бойынша қабықша қабырғасының көтергіш қасиеті	$\gamma_{M6} = 1,10$

## 3 МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ҚАСИЕТТЕРІ

### 3.1 Жалпы ережелер

3.1.1 Бункерлерді дайындау үшін болаттың маркалары жөндеу мен қайта құру бойынша кейінгі шараларды орындауды жеңілдету үшін жақсы дәнекерленушілікке ие болуы тиіс.

3.1.2 Цилиндр бункерлерді дайындау үшін болаттың маркалары қасиеттерін нашарлатусыз майысу операцияларын орындау және қисық сызықты пішінді элементтерді құрау үшін жеткілікті илемдікке ие болуы тиіс.

3.1.3 1993-4-1 ҚР ҚН EN берілген бөлімінде қарастырылатын және 1993-1-1 ҚР ҚН EN 3.1 Кестесінде және 1993-1-3 ҚР ҚН EN 3.16 Кестесінде келтірілетін болаттың беріктік қасиеттері номиналды мәндер болып табылады, оларды есептеулерді орындаған кезде есептеудер үшін сипаттамалық мәндер ретінде қабылдау қажет.

ЕСКЕРТПЕ EN 10025 талаптарына сәйкес келетін болаттың отандық маркаларын пайдалануға жол беріледі (А Қосымшасын қараңыз).

3.1.4 Соққылық тұтқырлық, шекті салыстырмалы ұзару, химиялық құрамы секілді және т.б. болаттың басқа қасиеттері 1993-1-1 ҚР ҚН EN-де көрсетілген сәйкес стандарттарда келтіріледі.

3.1.5 Егер бункер жанғыш қатты материалдармен толтыруға арналған жағдайда болаттың беріктік қасиеттерінің мәндері сақталатын материалдың максималды мүмкін мәндеріне сәйкес келетін мәндерге төмендетілуі тиіс.

3.1.6 Егер бункерле сақталатын материалдың температурасы 100 °C- тан асса, болаттың қасиеттерін 13084-7 ҚР ҚН EN –ге сәйкес анықтау қажет.

### 3.2 Құрылымдық болаттар

3.2.1 1993-4-1 ҚР ҚН EN- де жазылған есептік әдістер 1993-4-1 ҚР ҚН EN 3.1 Кестесінде аталған еуропалық және халықаралық стандарттарға сәйкес келетін, 1993-1-1 ҚР ҚН EN-де көрсетілген құрылымдық болаттарға арналған.

3.2.2 10025 ҚР ҚН EN және 10149 EN – де көрсетілген құрылымдық болаттардың механикалық қасиеттерін 1993-1-1 ҚР ҚН EN-де, 1993-1-3 ҚР ҚН EN және 1993-1-4 ҚР ҚН EN бойынша қабылдауға жол беріледі.

ЕСКЕРТПЕ Аққыштың шегі мен уақытша кедергілесу шегінің нормативтік мәндерін анықтау мақсатымен отандық болаттардың ұқсастарын таңдау үшін А Қосымшасының А.11 Кестесін пайдалануға жол беріледі.

3.2.3 Коррозия мен тозуға шектер 1993-4-1 ҚР ҚН EN 4 Бөлімінде келтірілген.

3.2.4 Созу мен қысу кезінде болаттың болаттың механикалық қасиеттері бірдей алынады.

3.2.5 1993-4-1 ҚР ҚН EN- де қарастырылатын болаттар үшін Юнг серпінділік модулінің есептік мәні  $E = 210\,000$  МПа деп алынады, Пуассонның көлденең деформация коэффициенті –  $\nu = 0,3$ .

### 3.3 Тот баспайтын болаттар

3.3.1 Тот баспайтын болаттардың механикалық қасиеттері 1993-1-4 ҚР ҚН EN бойынша қабылдануы тиіс.

3.3.2 Коррозиялық және абразивті әсерлердің ерекшеліктеріне байланысты тот баспайтын болаттардың маркаларын таңдау үшін басқарушы ережелерді тиісті құзыретті көздерден алу қажет.

3.3.3 Егер есептеулер тұрақтылықты анықтаумен байланысты болса, болаттардың механикалық қасиеттерінің сәйкес азайтылған мәндері қабылдануы тиіс (1993 -1-6 ҚР ҚН EN қараңыз).

### 3.4 Арнайы қоспаланған болаттар

3.4.1 Стандартты емес қоспаланған болаттар үшін механикалық қасиеттердің сәйкес мәндері қолданылуы тиіс.

3.4.2 Коррозиялық және абразивті әсерлердің ерекшеліктеріне байланысты стандартты емес қоспаланған болаттардың маркаларын таңдау үшін басқарушы ережелерді тиісті құзыретті көздерден алу қажет.

3.4.3 Егер есептеулер тұрақтылықты анықтаумен байланысты болса, болаттардың механикалық қасиеттерінің сәйкес азайтылған мәндері қабылдануы тиіс ( 1993 -1-6 ҚР ҚН EN қараңыз).

ЕСКЕРТПЕ Серпінділік модульден кәдімгі конструкциялық болаттар ажырайтын, екіталай кернеуге әсер ететін тұрақтылықтың шығыны қоспалы және тот басатын болаттардың серпінділік модулінің мағынасы 3.3.3 және 3.4.3 Тармақтарда көрсетіледі.

### **3.5 Соққылық тұтқырлық бойынша талаптар**

Болаттардың соққылық тұтқырлығына қойылатын талаптарды 1993-1-10 ҚР ҚН EN-ге сәйкес анықтау қажет.

## **4 ҚҰРЫЛЫМДАРДЫ ЕСЕПТЕУ НЕГІЗДЕРІ**

### **4.1 Көтергіш қасиеттің шекті күйлері**

#### **4.1.1 Негізгі ережелер**

Болат құрылымдар мен олардың элементтері 1993-4-1 ҚР ҚН EN 2 Бөлімінде келтірілген негізгі есептік талаптарды қанағаттандыруы тиіс.

#### **4.1.2 Шекті күйлерді тексеру нысаны**

Есептеулерді орындау кезінде барлық шекті күйлер үшін шарттың орындалуы қамтамасыз етілуі тиіс:

$$S_d < R_d \quad (4.1)$$

мұндағы  $S$  және  $R$  - әсер ету және көтергіш қасиеттің параметрлері.

#### **4.1.3 Төзімділік және аз циклдық қажу**

4.1.3.1 Иісудің едәуір жергілікті кернеулері туындайтын құрылымдардың элементтері 1993 -1-6 ҚР ҚН EN немесе ҚР ҚН EN 1993-1-7 сәйкес стандартында баяндалған, әдістемелер бойынша төзімділік және аз циклдық қажудың шекті күйлері бойынша тексерілуі тиіс.

4.1.3.2 1 зардаптар тобының бункерлерінде төзімділік және аз циклдық қажудың шекті күйлері бойынша тексеруді орындау қажет емес.

#### **4.1.4 Уатылу мен коррозияға шектер**

4.1.4.1 Бункердің қабырғасы мен құйғышына сақталатын сусымалы материалдың абразивті әсерін оның қызмет ету мерзімі ішінде қабықша элементтерінің қалыңдығын есептеуді орындаған кезде ескеру қажет.

4.1.4.2 Абразивті тозу деңгейі футерлеу арқылы бункердің қабырғаларын қорғау деңгейіне байланысты. Футерленген бункерлер үшін сондай-ақ пайдалану тәжірибесіне байланысты абразивті тозуға шектерді беру қажет. Егер бұл ақпарат жоқ болса, сусымалы

материалмен  $\Delta_{ta} = 2$  мм шамасына контактының барлық нүктелерінде қабырғаның қалыңдығын азайтуды қабылдау қажет.

4.1.4.3 Қызмет ету мерзімі ішінде ылғал сақталатын материалдың әсер етуі нәтижесінде бункердің қабырғасының коррозиялық тозуының әсерін бункердің қабықшасының элементтерінің қалыңдығын есептеулерді орындау кезінде ескеру қажет.

4.1.4.4 Бункерді пайдалану шарттары мен сақталатын материалдың параметрлеріне сәйкес келетін коррозия мен уатылуға шектердің мүмкін мәндері жобалық ұйымның, тапсырыс беруші мен сәйкес мемлекеттік органының арасындағы келісімнің негізінде тағайындалуы тиіс. Қабырға қалыңдығының азаюының нақты мәндері жобалау кезінде қабылданғаннан аспау үшін, бақылау мен қызмет көрсету бойынша сәйкес шараларды орындау қажет.

#### **4.1.5 Температуралық әсерлердің есебі**

Егер бункерде қатты материалдар ыстық күйде сақталатын болса, ыстық материалмен және суытылатын сыртқы элементтермен тікелей байланыста болатын элементтер арасында температуралардың айырмашылығының болуы салдарынан бункер элементтерінде туындайтын кернеулерді есептеуді орындау қажет.

### **4.2 Бункердің қабыршағын есептеу**

#### **4.2.1 Қабықша құрылымын модельдеу**

4.2.1.1 Қабықша құрылымдарын модельдеу 1993-1-6 ҚР ҚН EN талаптарына сәйкес орындалуы тиіс. Бұл талаптар төмендегі ережелерді орындаған кезде қанағаттандырылады.

4.2.1.2 Қабықша құрылымының моделі сақиналы және бойлық қатаңдық қырларын, үлкен тесіктер мен қосылған элементтерді қамтуы тиіс.

4.2.1.3 Қабықшаның құрылымы жүктемелер, шекаралық жағдайлар бөлігінде, есептеулерге салынған есептік алғышарттарды орындауды қамтамасыз етуі тиіс және т.б.

#### **4.2.2 Есептеу әдістері**

##### **4.2.2.1 Жалпы ереже**

4.2.2.1.1 Бункердің қабыршағын есептеу 1993-1-6 ҚР ҚН EN талаптарына сәйкес жүргізілуі тиіс.

4.2.2.1.2 Зардаптардың белгілі бір тобының бункеріне неғұрлым жоғары топты есептеу әдістерін қолдануға жол беріледі.

#### **4.2.2.2 3 Зардаптар тобы**

3 зардаптар тобының бункерлерінде (2.3 Тармағын қараңыз) ішкі күштер мен сәттер 1993-1-6 ҚР ҚН EN-де анықталғандай сенімді сандық талдау арқылы анықталуы тиіс (қабықшаны соңғы элементтер әдісімен зерттеу). Негізгі кернеулердің әсерімен пластикалық бұзылу кезінде беріктік 1993-1-6 ҚР ҚН EN-де анықталғандай илемдіктің шекті күйін тексеру үшін қолданылуы мүмкін.

ЕСКЕРТПЕ пластикалық күйзеліс деп жеткілікті мөлшердегі нүктелері бар қабырғаның кескін бойымен аққыштық шегін асыратын кернеудің есептік келтірілуін айтады.

#### **4.2.2.3 2 Зардаптар тобы**

4.2.2.3.1 2 зардаптар тобының бункерлері осьсимметриялық әсерлер жағдайлары мен сүйкелу жағдайларында келесі әдістерді қолданумен ескерілуі мүмкін:

а) Қабықшаларды есептеудің мембраналы (сәтсіз) теориясы негізгі кернеулерді анықтау үшін қолданылуы мүмкін. Берік иілу теориясының формулалары жергілікті кернеулерді иілуден сипаттау үшін қолданылуы мүмкін.

ЕСКЕРТПЕ сыртқы жүктер және конструкциялардың тепе теңдігі болатын негізгі кернеу болып табылады. Серпінді иілу теориясы ішкі күш факторларын анықтайтын формуласы ҚР ҚН EN 1993-1-6 талабында және анықтама әдебиеттерінде келтірілген.

конструкцияның және сыртқы жүктің равновесия үшін керек кернеулер болып табылатын. формулалар үшін ішкі күштің факторының ұйғарымы үшін ша қатпардың майысқақ қағидасына ара ҚР ҚН EN 1993-1-6 және анықтама әдебиет ара аддендум келтір-

б) Сенімді сандық талдау қолданылады (яғни қабықшаны соңғы элементтер әдісімен зерттеу) 1993-1-6 ҚР ҚН EN-дегі анықтамаға сәйкес.

ЕСКЕРТПЕ егер түзу немесе оның көмегімен алынған жанама тексерулер орындалса, онда сандық анализ тиянақты болып саналады.

4.2.2.3.2 Егер сақталатын қатты материалдардан жобалық жүктеме осьсимметриялық ретінде қарастырылмайды, сенімді сандық талдау қолданылуы тиіс.

4.2.2.3.3 1993-4-1 ҚР ҚН EN-ң 4.2.2.3.2 Тармағының ережелеріне қарамастан, егер қабықша шеңбері бойынша жүктеме тек жалпы иілу туғызып, бір қалыпты өзгерсе (яғни бірінші гармоника түрінде), негізгі кернеулерді анықтау үшін қабықшаларды есептеудің мембраналық теориясын қолдануға болады.

4.2.2.3.4 Желдік жүктемеден, және/немесе іргетастың отыруынан және/немесе жекелеген учаскелерге жүктеменің бір қалыпты өзгерістерінен күш түсулерді есептеу

үшін (жұқа қабырғалы бункерлер үшін 1991-4 ҚР ҚН EN ережелерін қараңыз) қабықшаларды есептеудің жартымембраналы немесе мембраналы теориясын қолдануға болады.

4.2.2.3.5 Егер қабықшадағы негізгі кернеулерді анықтау үшін мембраналы теория қолданылса:

а) Ішкі қысымның әсерінде болатын бункердің изотропты қабықшасына бекітілген дискретті сақиналы қырлардың өтпелі қимада сақинаны қоспағанда,  $0,78\sqrt{rt}$ , қырынан төмен және жоғары қабықшаның ұзындығын қамтитын есептік ауданы бар.

б) Қабықшаның немесе иілу бетінің үздіксіздігі бұзылған жерлерде жергілікті иілуші кернеулердің әсері жеке бағалануы тиіс.

4.2.2.3.6 Егер қабықшаның изотропты қабырғасында тік қатандық қырлары орнатылса, онда қатандық қырлары мен қабықша қабырғасындағы кернеулер қабықшаның есептік ауданына қырдың көлденең қима ауданын қосқанда (smeared – «жағылған» қырлар) қабырға мен қырлардың бірлескен жұмысын ескерумен анықталады. Бұл үшін қатандық қырлары арасындағы қашықтық  $5\sqrt{rt}$  артық еместі құрауы тиіс, мұндағы  $r$  және  $t$  – қабықшаның радиусы және қалыңдығы.

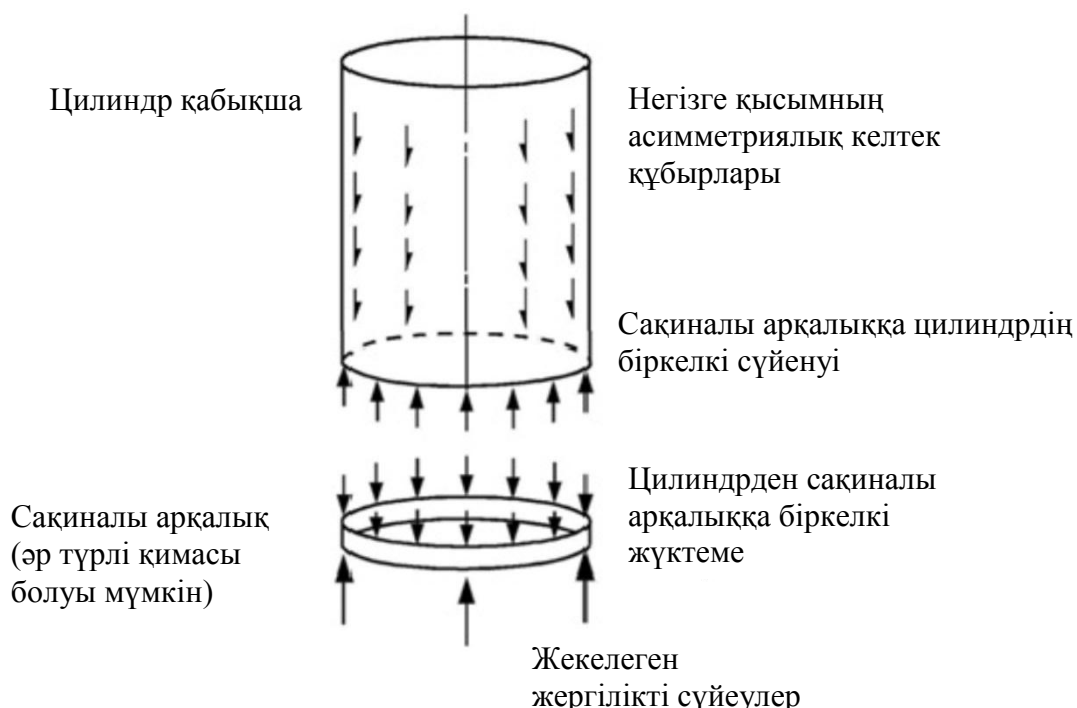
4.2.2.3.7 Егер қатаң қырлары мен қабырғасының бірлескен жұмысы ескерілсе (4.2.2.3.6 Тармағы бойынша), қатандық қырларында кернеулер мембраналы меридиональды кернеулердің қырларына әсерді қосқанда, олардың бірлескен жұмысын ескерумен анықталуы тиіс.

4.2.2.3.8 Егер сақиналы арқалық дискретті тіректерден жоғары құрастырылса, негізгі кернеулерді анықтау үшін мембраналы теорияны қолдануға болады; бұнымен қоса қосымша осьсимметрия емес негізгі кернеулерді есептеуге қатысты 1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.4 және 8.1.4 Тармақтарының талаптарын сақтау қажет.

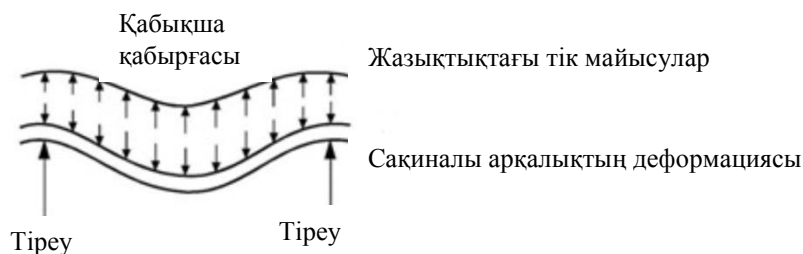
4.2.2.3.9 Егер сақиналы арқалық дискретті тіректерден жоғары құрастырылса, сақиналы арқалық пен қабықшаның шектес сегменттері арасындағы деформациялардың үйлесімділігі ескерілуі тиіс (1993-4-1 ҚР ҚН EN 4.1 Суретті қараңыз). Осьтік деформациялардың үйлесімділігіне ерекше көңіл бөлу қажет, себебі бұнымен туындаған кернеулер қабықша бойынша биік таралады.

Егер мұндай сақиналы арқалық қолданылса, қабықшаның қабырғасы мен тіректің орталық осіне қатысты сақиналы арқалық пен қозғалу ортасының ауырлық орталығының эксцентриситетін ескеру қажет (1993-4-1 ҚР ҚН EN 8.1.4 және 8.2.3 Тармақтарын қараңыз).

а)



б)



а) ұстындардағы кәдімгі есептік модель;

б) арқалық деформацияларымен бірлесіп туындаған цилиндр деформациялары

#### 4.1 Сурет- Сақиналы арқалық пен қабықшаның деформацияларының үйлесімділігі

4.2.2.3.10 Егер бункер сусымалы материалдардан симметриялы емес жүктеменің кез келген түрінің әсеріне ұшыраса (жергілікті бүйірлік жүктемелер, эксцентриситетпен жүктеме, симметриялы емес толтыру және т.б.), құрылымның есептік моделі қабырғадағы және қабырға мен сақиналы қырлардың арасындағы қозғалудың мембраналы кернеулерін анықтауға мүмкіндік беруі тиіс. Қабырға мен сақина бөліктері арасындағы жылжуды берудің болттар мен басқа жеке қосатын элементтер қолданылатын құрылымдарда ерекше мәні бар.

4.2.2.3.11 Егер сақиналы арқалық дискретті тіректерге бункердің қабырғасынан жүктемелерді беру үшін қолданылса немесе құрылым элементтері болттарда қолданылса,



сақиналы қырлардың жекелеген бөліктері арасындағы жылжу күштеріне есептеуді орындау қажет. Жылжу күштері қабықша мен сақиналы арқалықты иілту нәтижесінде туындайды.

4.2.2.3.12 Түсіру кезінде қатты материалдың қозғалмаушылығының дәлелдемесі бар болған жағдайларда мұқият талдау нәтижелерін қолдануды қоспағанда, сусымалы материалдың қатаңдығы қабырғалардың деформациясына және қабықшаның орнықтылығына әсер етпейді.

#### **4.2.2.4 1 Зардаптар тобы**

1 зардаптар тобының бункерлері негізгі кернеулерді анықтау үшін қабықшаның мембраналық теориясымен есептелуі мүмкін, бұнымен қоса жергілікті иілу әсерлері мен симметриялық емес әсерлерді сипатату үшін коэффициенттер мен жеңілдетілген формулаларды қолдану қажет.

#### **4.2.3 Геометриялық жетілмегендік**

4.2.3.1 Қабықшаның геометриялық жетілмегендіктері үшін 1993-1-6 ҚР ҚН EN-де белгіленген шектеулер орындалуы тиіс.

4.2.3.2 2 және 3 зардаптардың тобы бункерлерінде геометриялық жетілмегендіктер дайындауға шектер сапасының болжанылатын деңгейіне жетуді қамтамасыз ету үшін құрылыс салулардан кейін өлшенілуі тиіс.

4.2.3.3 Қабықшаның геометриялық жетілмегендіктерін ішкі күштер мен сәттерді анықтаған кезде анық түрде ескермеу қажет. Бұл жетілмегендіктерді (GNIA) ескерумен геометриялық сызықтық емес есептеу ретінде немесе 1993-1-6 ҚР ҚН EN-де анықталғандай жетілмегендіктерді ескерумен (GMNIA) физикалық сызықтық емес есептеу ретінде қолданылатын жағдайларға жатады.

#### **4.3 Тік бұрышты бункердің қорапшалы құрылымдарын есептеу**

##### **4.3.1 Қораптың құрылымдарын модельдеу**

4.3.1.1 Қораптың құрылым моделі 1993 -1-7 ҚР ҚН EN талаптарына жауап беруі тиіс. Бұл талаптар келесі ережелерді орындау кезінде қанағаттандырылады.

4.3.1.2 Қораптың құрылым моделі қатаңдықтың барлық элементтерін, үлкен тесіктер мен қосылған элементтерді қамтуы тиіс.

4.3.1.3 Бункердің құрылымдары есептеуде қабылданған шекаралық жағдайларды жүзеге асыруды қамтамасыз етуі тиіс.

4.3.1.4 Қораптың элементтерінің қосылыс тораптары беріктік пен қатаңдық бойынша есептік модельге сәйкес келуі тиіс.

4.3.1.5 Қораптың әрбір панелін мына шартпен жеке пластинка ретінде есептеуге болады:

а) жанасатын панельдерден күштер мен сәттер ескерілсе;

б) жанасатын панельдердің иілетін қатаңдығы ескерілген.

4.3.1.6 Егер изотропты жазық қабырғада қатаңдықтың жазық қабырғалары белгіленсе, онда қатаңдық қырлары мен қабықша қабырғасындағы кернеулерді қабырға мен қырлардың бірлескен жұмысын ескерумен анықтауға болады, яғни қабықшаның есептік ауданына қырлардың көлденең қима ауданын қосқанда. Бұл үшін қатаңдық қырлары арасындағы қашықтық  $40 \cdot t$  артық еместі құрауы тиіс.

4.3.1.7 Егер қатаңдықтың қабырғасы мен жазық қырларының бірлескен жұмысы ескерілсе, қатаңдық қырларындағы кернеулер қабырғаға және қырға перпендикуляр қабырғадағы кернеулерге қатысты қырдың эксцентриситетін ескерумен анықталуы тиіс.

4.3.1.8 Қырдың жалпы есептік қимасына қосылатын қатаңдық қырының әрбір жағынан табақтың есептік ені  $15t$  мәнінен аспауы тиіс, мұндағы  $t$  - жанасатын табақтың қалыңдығы.

#### **4.3.2 Геометриялық жетілмегендіктер**

4.3.2.1 Қорап элементтерінің геометриялық жетілмегендіктері үшін ҚР ҚН EN 1993-1-7 де белгіленген шектеулер орындалуы тиіс.

4.3.2.2 Қорап элементтерінің геометриялық жетілмегендіктерін ішкі күштер мен сәттерді анықтаған кезде анық түрде ескермеу қажет.

#### **4.3.3 Есептеу әдістері**

4.3.3.1 Қорап қабырғасының жазық элементтеріндегі ішкі күштерді анықтауды келесі тәсілдермен орындауға болады:

а) мембраналы күштердің статикалық теңдігінің әдісі және иілудің арқалықтық теориясы;

б) иілу мен созудың сызықтық теориясы негізінде есептеу (сәттік теория);

в) иілу мен созудың сызықтық емес теориясы негізінде есептеу.

4.3.3.2 1 зардаптар тобының бункерлерін есептеуді 1993-4-1 ҚР ҚН EN 4.3.3.1 Тармағынан (а) әдісімен орындау қажет.

4.3.3.3 Егер есептік жүктемелер әрбір жазық элементке қатысты симметриялы болса, 2 зардаптар тобының бункерін есептеуді 1993-4-1 ҚР ҚН EN 4.3.3.1 Тармағынан (а) әдісімен орындау қажет.

4.3.3.4 Егер есептік жүктемелер симметриялы емес болса, 2 зардаптар тобының бункерін есептеуді 1993-4-1 ҚР ҚН EN 4.3.3.1 Тармағынан (б) немесе (в) әдісімен орындау қажет.

4.3.3.5 Зардаптар тобының бункерлеріндегі ішкі күштер мен сәттерді есептеуді 4.3.3.1 Тармағынан (б) әдісімен орындау қажет.

#### **4.4 Кеңірдектелген табактан қаптаудың баламалы ортотропты қасиеттері**

4.4.1 Кеңірдектелген табақтан қаптауды есептеуді біртекті ортотропты баламалы қабырға ретінде орындау қажет.

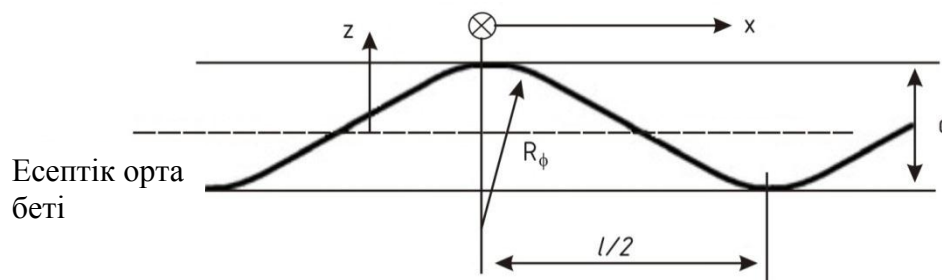
4.4.2 Бұл бөлімде анықталатын кеңірдектелген табақтың сипаттамаларын кеңірдектің профилінің арктангенциальды немесе синусоидальды конфигурациясының болуы шартымен құрылымның беріктігі мен орнықтылығын есептеу үшін қолдануға болады. Кеңірдектің басқа пішінімен табақтардың сипаттамаларын ортақ қағидалардың негізінде басқа тәсілдермен анықтау қажет.

4.4.3 Кеңірдектелген табақ қаптаудың қатаңдық сипаттамаларын  $x$ ,  $y$ , координаталар жүйесінде анықтау қажет, бұнымен қоса  $y$  осі кеңірдек бүрмелерінің бойымен өтеді, ал  $x$  осі кеңірдек бүрмелеріне перпендикуляр орналасады. Кеңірдектеуді кеңірдектелген пішіннің нақты мөлшерлеріне байланысты төменде сипатталатын параметрлермен сипаттау қажет (1993-4-1 ҚР ҚН EN 4.2 Суретті қараңыз):

$d$  - адырдан адырға дейінгі қашықтық;

$l$  - кеңірдек толқынының ұзындығы;

$R_\phi$  - адырдың немесе ойпаттың жергілікті радиусы.



**4.2 Сурет - Кеңірдек пішіні мен геометриялық параметрлер**

4.4.4 Кеңірдектің барлық қатаңдық сипаттамалары бір бағыттас болып табылады, яғни олар басқа бағыттарға қатысты сипаттамаларға әсер етпейді (Пуассонның коэффициенті ескерілмейді).

4.4.5 Баламалы мембраналы қатаңдық, яғни созу кезіндегі қатаңдық сипаттамалары мына формулалар бойынша анықталады:

$$C_x = E \cdot t_x = E \cdot \frac{2 \cdot t^3}{3 \cdot d^2} \quad (4.2)$$

$$C_y = E \cdot t_y = E \cdot t \left( 1 + \frac{\pi^2 \cdot d^2}{4 \cdot l^2} \right) \quad (4.3)$$

$$C_{xy} = G \cdot t_{xy} = \frac{G \cdot t}{\left( 1 + \frac{\pi^2 \cdot d^2}{4 \cdot l^2} \right)} \quad (4.4)$$

мұндағы  $t_x$  - кеңірдектелген перпендикуляр ортотропты мембраналы күштер үшін баламалы қалыңдық;

$t_y$  - кеңірдекке параллель ортотропты мембраналы күштердің баламалы қалыңдығы;

$t_{xy}$  - жылжудың ортотропты мембраналы күштердің баламалы қалыңдығы.

ЕСКЕРТПЕ «Ортотропты» күш салу нақты кеңірдектелген табақта емес, баламалы ортотропты қабықшада әсер ететінін білдіреді.

4.4.6 Иілу кезіндегі баламалы қасиеттер, яғни иілу қатаңдықтары мына формулалар бойынша берілген бағытта иілуді туғызатын сәттер үшін анықталады:

$$D_x = E \cdot I_x = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi^2 \cdot d^2}{4 \cdot l^2}\right)} \quad (4.5)$$

$$D_y = E \cdot I_y = 0,13 \cdot E \cdot t \cdot d^2 \quad (4.6)$$

$$D_{xy} = G \cdot I_{xy} = \frac{G \cdot t^3}{12} \cdot \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot d^2}{4 \cdot l^2}\right) \quad (4.7)$$

мұндағы  $I_x$  - кеңірдекке перпендикуляр жазықтықта иілу үшін ен бірлігіне қиманың инерциясының баламалы сәті;

$I_y$  - кеңірдекке параллель жазықтықта иілу үшін ен бірлігіне қиманың инерциясының баламалы сәті;

$I_{xy}$  - бұралу үшін ен бірлігіне қиманың инерциясының баламалы сәті.

ЕСКЕРТПЕ  $x$ ,  $y$  иілуші сәттерді белгілеу пластинаның қисаю бағытын көрсетеді, яғни ол арқалықтар үшін қабылданған белгілеуге қарама- қарсы (арқалықтар үшін сәттер иілу жазықтығында перпендикулярлы оське қатысты көрсетіледі). Кеңірдектерге параллель иілу оны пайдаланудың негізгі себебі болып табылатын, кеңірдектелген пішіннің иілетін қатаңдығымен байланысты.

4.4.7 Жоғарыда келтірілген формулаларда  $x$  және  $y$  координаталарының осьтерінің бағыт шеңберімен кеңірдектің орналасуымен цилиндр бункерлерде сәйкесінше, меридиональды  $\phi$  және айналма  $\theta$  бағыттарға ауыстырылуы тиіс (1993-4-1 ҚР ҚН EN 1.2(a) Суретті қараңыз). Егер кеңірдек меридиональды жазықтықта орналасса, жоғарыда келтірілген ұғымдарда  $x$  және  $y$  осьтерінің бағыттары айналма  $\theta$  және меридиональды  $\phi$  бағыттар ретінде қабылдануы тиіс.

4.4.8 Жылжу қасиеттері кеңірдек бағдарынан тәуелсіз ретінде қарастырылуы тиіс. Жылжу кезінде серпінділік модулінің мәні:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 80800 \text{ МПа}$$

4.4.9 Кеңірдектің көлденең орналасуымен тік бұрышты бункерлерде жоғарыда келтірілген ұғымдарда  $x$  және  $y$  осьтерінің бағыттары сәйкесінше осьтік  $x$  және жазық  $y$  осьтік бағыттар ретінде қабылдануы тиіс (1993-4-1 ҚР ҚН EN 1.3(a) Суретін қараңыз). Егер кеңірдектер тік орналасса, жоғарыда келтірілген ұғымдарда  $x$  және  $y$  бағыттары нақты құрылым үшін сәйкесінше осьтік  $x$  және жазық  $y$  осьтік бағыттар ретінде қабылдануы тиіс.

## 5 ЦИЛИНДРДІҢ ҚАБЫРҒАЛАРЫН ЖОБАЛАУ

### 5.1 Есептеу негіздері

#### 5.1.1 Жалпы ереже

5.1.1.1 Бункердің болат цилиндр қабырғаларының мөлшерлерін 2 Бөлімінде көрсетілгендей көтергіш қасиет бойынша шекті күйлердің негізгі талаптары орындалатындай етіп белгілеу қажет.

5.1.1.2 Цилиндр қабықшаның сенімділігін бағалау 1993 -1-6 ҚР ҚН EN талаптарын қолданумен орындалуы тиіс.

#### 5.1.2 Бункер қабырғасын есептеу

5.1.2.1 Шекті күйлер бойынша есептеулерді орындаған кезде бункердің цилиндр қабырғасының көтергіш қасиеті 1993-1-6 ҚР ҚН EN-де көрсетілген келесі критерийлер бойынша тексерілуі тиіс:

- жалпы орнықтылық және статикалық теңдік.
- LS1: пластикалық шекті күй
  - ішкі қысымның әсері кезінде немесе басқа әсерлер кезінде пластикалық бұзылудың, ажыраудың, механизмінің алдын алу (шамадан тыс пластикалық деформациялар);
  - тораптардың (қосылыстардың) көтергіш қасиеті.
- LS2: циклдық илемдік
  - иілуден жергілікті пластикалық деформациядан алдын алу;
  - жергілікті әсерлер.
- LS3: орнықтылықты жою
  - осьтік қысу кезінде орнықтылықты жоюдың алдын алу;
  - сыртқы қысым кезінде (жел немесе вакуум) орнықтылықты жоюдың алдын алу;
  - симметриялы емес әсерлердің нәтижесінде жанама кернеулердің әсерінен жылжу кезінде орнықтылықты жоюдың алдын алу;
  - жанасатын ұстындардың жанындағы жанама кернеулердің әсерінен жылжу кезінде орнықтылықты жоюдың алдын алу;
  - тіректерден жоғары учаскелерде жергілікті бұзылулардың алдын алу;
  - тесіктердің жанындағы жергілікті қисаюлардың алдын алу;
  - симметриялы емес әсерлердің нәтижесінде орнықтылықты жергілікті жоюдың алдын алу.

LS4: қажу

- қажу бұзушылықтарының алдын алу.

5.1.2.2 Цилиндр қабықшаның қабырғасы бұл сәйкестік 5.3 – 5.6 Тармақтарында көрсетілген шарттарды орынлаумен қамтамасыз етілетін жағдайларды қоспағанда, 1993 - 1-6 ҚР ҚН EN талаптарына сәйкес келуі тиіс.

5.1.2.3 1 зардаптар тобының бункерлерінде циклдық илемдік және қажудың шекті күйлері бойынша көтергіш қасиеті тексерілмеуі мүмкін.

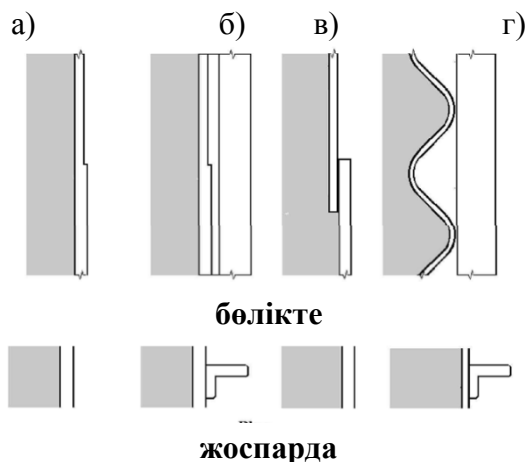
## 5.2 Цилиндр қабықшалардың пішіндері арасындағы ерекшеліктер

5.2.1 Жазық прокаттық болат табақтардан дайындалған және «изотропты» деп аталатын қабықша қабырғасының көтергіш қасиеті (5.1 Суретін қараңыз) 5.3.2 Тармағына сәйкес анықталуы тиіс.

5.2.2 Бункердің шеңберінің бойымен кеңірдектердің орналасуымен кеңірдектелген болат табақтардан дайындалған қабықша қабырғасы «көлденең кеңірдектелген» деп аталады (осы құралдың 8.1 Суретін қараңыз), оның көтергіш қасиеті 5.3.4 Тармағына сәйкес анықталуы тиіс. Бункер меридианының бойымен кеңірдектердің орналасуымен кеңірдектелген болат табақтардан дайындалған қабықша қабырғасы «тігінен кеңірдектелген» деп аталады (8.1 Суретті қараңыз), оның көтергіш қасиеті 5.3.5 Тармағына сәйкес анықталуы тиіс.

5.2.3 Сыртқы қатандық қырларымен қабықшаның қабырғасы қырының қадамына байланыссыз «сыртқы қырларымен» деп аталады, оның көтергіш қасиеті 5.3.3 Тармағына сәйкес анықталуы тиіс.

5.2.4 Табақтары айқастыра жалғасаны қабықшаның қабырғасы «айқастыра жалғанған» деп аталады, ал көтергіш қасиеті 5.3.2 Тармағына сәйкес анықталуы тиіс.



а) изотропты, б) сыртқы қатандық қырларымен, в) айқастыра жалғаумен; г) жазық кеңірдектелген.

**5.1 Сурет – Цилиндр қабықшалардың түрлері**

## 5.3 Бункердің цилиндр қабырғаларының көтергіш қасиеті

### 5.3.1 Жалпы ереже

Цилиндр қабықша 1993 -1-6 ҚР ҚН EN талаптарына сәйкес келуі тиіс. Бұл талаптар есептік көтергіш қасиетті бағалаудың төмендегі тәсілдерін қолданумен орындалады.

### **5.3.2 Дәнекерленген және болттық қосылыстарымен изотропты қабырғалар**

#### **5.3.2.1 Жалпы ереже**

5.3.2.1.1 Қабықша қабырғасының көлденең қимасының ажырау немесе пластикалық деформациялардың нәтижесінде бұзылу салдарынан жеткілікті мөлшерлері болуы тиіс.

5.3.2.1.2 Қосылыстардың мөлшерлері уақытша кедергілесу бойынша есептеу кезінде «нетто» қимасы бойынша ажырауға көтергіш қасиетті қамтамасыз ететіндей таңдалуы тиіс.

5.3.2.1.3 Ажырауға қосылыстың беріктігін есептеу кезінде айқастыра жалғауларда эксцентриситеттің болуын ескеру қажет.

5.3.2.1.4 Қабықша қабырғасының мөлшерлері орнықтылықтың жойылуының алдын алу үшін жеткілікті көтергіш қасиетті қамтамасыз етуі тиіс.

#### **5.3.2.2 Бірдей әрекеттесетін есептік кернеулерді анықтау**

5.3.2.2.1 Ішкі қысымның, үйкелу күші мен басқа есептік жүктемелерден бірдей әрекет етуші есептік кернеулер ішкі қысымның және сүйкелу күштерінің әр түрлі мәндері үшін қабықшаның әрбір нүктесінде анықталуы тиіс.

1 ЕСКЕРТПЕ Бункердегі сусымалы материалдан бірдей әрекет етуші есептік кернеулердің әрбір жиынтығы сақталатын сусымалы қатты материалдың қасиеттерін сипаттайтын параметрлер мәнінің бір жинағы үшін анықталуы тиіс. 1991-4 ҚР ҚН EN сәйкес бункерде қысымдарды есептеу параметрлер мәнінің бес жинағы үшін орындалады. Параметрлер қатарына жатады: ішкі сүйкелу коэффициенті, бүйірлік қысым коэффициенті, бункердің қабырғасына сүйкелу коэффициенті. Жинақтардың әрқайсысында параметрлер қысымның қандай түрі бұның салдарынан артатынына байланысты жоғарғы немесе төменгі мәнді қабылдауы мүмкін.

2 ЕСКЕРТПЕ Бірдей әрекет етуші есептік кернеулер пластикалық шекті күй бойынша көтергіш қасиетті тексеру үшін анықталатын кезде, сусымалы материалдың түсіру жағдайларында максималды ішкі қысымды беретін және 1991-4 ҚР ҚН EN сәйкес жергілікті бүйір жүктемелерді ескерумен параметрінің мәндерін таңдау қажет.

3 ЕСКЕРТПЕ Бірдей әрекет етуші есептік кернеулер орнықтылықты жою бойынша көтергіш қасиетті тексеру үшін анықталатын кезде, сусымалы материалдың түсіру жағдайларында максималды осьтік қысуды беретін және 1991-4 ҚР ҚН EN сәйкес жергілікті бүйір жүктемелерді ескерумен параметрінің мәндерін таңдау қажет. Алайда егер ішкі қысым орнықтылықты жою кезінде көтергіш қасиетті арттыруға әкелсе, түсіруден осьтік күштерімен бірге толтырудан қысымды ғана ескеру қажет. Бұл қысымның қолайлы мәні толтырудан қысымның мәндеріне дейін жергілікті төмендеуі мүмкіндігімен туындаған, бұнымен қоса осьтік қысу күштері түсіру жағдайлары үшін анықталады.

5.3.2.2.2 Егер қабықша қырында есептік кернеулерді анықтау үшін қабықшалардың мембраналы (сәтсіз) теориясы қолданылса, әрбір нүктеде қабықшаның көтергіш қасиеті ең үлкен қысымдарды қабылдау үшін жеткілікті болуы тиіс.

5.3.2.2.3 Кішігірім аудандағы қысым мембраналы теория бойынша анықталатынға карағанда азырақ бірдей әрекеттесуші мембраналық кернеулерді туғызатындықтан, неғұрлым үнемді жобалық шешімге жету үшін 1993 -1-6 ҚР ҚН EN ережесін қолдануға болады. 1993-1-6 ҚР ҚН EN-де қабықшаларды есептеудің келесі әдістеріне талаптар анықталған: кернеулер бойынша есеп, тікелей есеп, сандық компьютерлік есеп.

5.3.2.2.4 Егер есептеу мембраналы теория бойынша орындалса, бірдей әрекет етуші кернеулердің  $n_{x,Ed}$ ,  $n_{\theta,Ed}$  және  $n_{x\theta,Ed}$  алынған екі өлшемді өрісі есептік баламалы (келтірілген) кернеулермен сипатталады:

$$\sigma_{e,Ed} = \frac{1}{t} \cdot \sqrt{n_{x,Ed}^2 + n_{\theta,Ed}^2 - n_{x,Ed} \cdot n_{\theta,Ed} + 3 \cdot n_{x\theta,Ed}^2} \quad (5.1)$$

8.3.2.2.5 Егер есептеу қабықшалардың (LA) сәттік серпінді теориясы бойынша орындалса, бірдей әрекет етуші негізгі кернеулердің  $n_{x,Ed}$ ,  $n_{\theta,Ed}$ ,  $n_{x\theta,Ed}$ ,  $m_{\theta,Ed}$ ,  $m_{x\theta,Ed}$  алынған екі өлшемді өрісі бірдей әрекет етуші кернеулердің фиктивті құраушыларына:

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{n_{x,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x,Ed}}{t^2/4}, \quad \sigma_{\theta,Ed} = \frac{n_{\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{\theta,Ed}}{t^2/4}, \quad (5.2)$$

$$\tau_{x\theta,Ed} = \frac{n_{x\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x\theta,Ed}}{t^2/4}, \quad (5.3)$$

және фон Мизес фонының баламалы (келтірілген) есептік кернеулеріне өзгеруі мүмкін:

$$\sigma_{e,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{\theta,Ed} + 3 \cdot \tau_{x\theta,Ed}^2} \quad (5.4)$$

ЕСКЕРТПЕ Жоғарыда келтірілген ұғымдар (Илюшин аққыштығы критерийі) жобалау кезінде пайдалану үшін жеңілдетілген баламалы кернеулерді береді.

### 5.3.2.3 Илемдік бойынша шекті күй

5.3.2.3.1 Пластиналардың көтергіш қасиетін тексеру мына формула бойынша анықталатын дәнекерленген, сол секілді болттық құрылымдар үшін  $f_{e,Rd}$  баламалы есептік кедергілесумен бірдей әрекет етуші мембраналы кернеулерді салыстыру арқылы жүзеге асырылады:

$$f_{e,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.5)$$

5.3.2.3.2 Дәнекерленген құрылымдардың айқастыра жалғауларының көтергіш қасиеті фиктивті берік критерийі бойынша тексерілуі тиіс:

$$f_{e,Rd} = \frac{j \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.6)$$

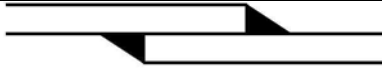
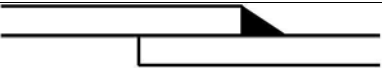
мұндағы  $j$  - жалғау тиімділігі коэффициенті.

5.3.2.3.3 Үздіксіз бұрыштың жіктерімен қосылу тиімділігінің коэффициент  $j = j_i$  ретінде қабылдануы тиіс. Бір жақты бұрыштық жіктерімен айқастыру жалғау, егер 1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.4 Тармағының көрінісінде  $\sigma_{e,Ed}$  мәннің 20 %-дан артығы айқастыра жалғау



иілуші сәттер беретін болса, қолданылмауы тиіс. Әр түрлі типті қосылыстар үшін ұсынылатын  $j_i$  мәндер төменде келтірілген кестеде болады.

**Айқастыра жалғаулардың тиімділік коэффициенті  $j$**

Жалғау түрі	Эскиз	Мәні $j_i$
Екі жақты дәнекерленген айқастыра жалғау		$J_1 = 1.0$
Бір жақты дәнекерленген айқастыра жалғау		$J_2 = 0.35$

5.3.2.3.4 Болттық жалғауларымен құрылымдарда нетто қимасы бойынша қосылыстың көтергіш қасиеті бірдей әрекет етуші мембраналы кернеулердің терминдерінде келесідей анықталуы тиіс

— меридиональды бағытта көтергіш қасиеті

$$n_{x,Rd} = f_u \cdot t / \gamma_{M2} \quad (5.7)$$

— айналма бағытта көтергіш қасиеті та

$$n_{\theta,Rd} = f_u \cdot t / \gamma_{M2} \quad (5.8)$$

— жанама кернеулер бойынша көтергіш қасиеті

$$n_{x\theta,Rd} = 0,57 \cdot f_y \cdot t / \gamma_{M0} \quad (5.9)$$

мұндағы  $f_u$  - созу кезіндегі есептік беріктік (уақытша кедергі);

$f_u$  - аққыштық шегі бойынша есептік беріктік;

$\gamma_{M0} = 1,0$  және  $\gamma_{M2} = 1,25$  - жеке сенімділік коэффициенттері.

5.3.2.3.5 Болттық жалғауларды есептеу 1993 ҚР ҚН EN-1-8 немесе 1993-1-3 ҚР ҚН EN талаптарына сәйкес орындалуы тиіс. Тесіктердің әсері кернеулі күйге – созуға, қысуға немесе жылжуға байланысты сәйкес талаптарды қолданумен 1993-1-1 ҚР ҚН EN-де қолданумен ескерілуі тиіс.

5.3.2.3.6 Қосылған бөлшектерден жергілікті жүктемелер болған кезде көтергіш қасиеті 1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.4.6 Тармағы бойынша анықталуы тиіс.

5.3.2.3.7 Құрылымның барлық нүктелерінде есептік кернеулер келес шартты қанағаттандыруы тиіс:

$$\sigma_{e,Ed} \leq f_{e,Rd} \quad (5.10)$$

5.3.2.3.8 Құрылымның барлық нүктелерінде бірдей әрекет етуші есептік кернеулер келес шартты қанағаттандыруы тиіс:

$$n_{x,Ed} \leq n_{x,Rd} \quad (5.11)$$

$$n_{\theta,Ed} \leq n_{\theta,Rd} \quad (5.12)$$

$$n_{x\theta,Ed} \leq n_{x\theta,Rd} \quad (5.13)$$

#### 5.3.2.4 Осьтік қысу кезінде орнықтылықты жою

5.3.2.4.1 Осы тік қысу болған кезде есептік көтергіш қасиеті орнықтылықты жойған кезде қабықшаның барлық нүктелерінде анықталуы тиіс. Бұнымен қоса құрылымдар дайындауға шектік сапаның алдын ала жазылған тобының, кепілденген ішкі қысымның қарқындылығының  $p$  және шеңбер бойынша біркелкі таралған қысушы кернеудің мәндері қолданылуы тиіс. Есептеу кезінде қабықша қабырғасының барлық бөліктерін қарастыру қажет. Орнықтылыққа есептеулер кезінде қысушы мембраналы күштер есептік шамалардың теріс мәндерін алуды болдырмау үшін «+» белгісімен қабылдануы тиіс.

5.3.2.4.2 Құрылыс құрылымдарын дайындауға шек сапасының алдын ала жазылған деңгейлері 8.2 Кестеге сәйкес қабылдануы тиіс.

**5.1 Кесте - Дайындауға шек сапасының топтары**

Құрылыс құрылымдарын дайындауға шектің сапасы	Сапа параметрі, $Q$	Сенімділік тобы бойынша шектеулер
Стандартты	16	Егер бункер 1 зардаптар тобы үшін ережелерге есептелген болса міндетті
Жоғары	25	
Ерекше	40	Егер бункер тек 3 зардаптар тобы үшін ережелерге есептелген болса жол беріледі

ЕСКЕРТПЕ Дайындауға шек сапасының әр түрлі топтары үшін шектердің мәндеріне қойылатын талаптар 1993-1-6 ҚР ҚН EN-де және 1090 ҚР ҚН EN –де келтірілген.

5.3.2.4.3  $w_{ok}$  жетілмегендік амплитудасының репрезентативті мәнін мына формуламен анықтау қажет:

$$w_{ok} = \frac{t}{Q} \cdot \sqrt{\bar{r}} \quad (5.14)$$

5.3.2.4.4 Қысым жоқ болған жағдайларда  $\alpha_0$  жетілмегендік болған кезде берік төмендетуші коэффициентті мына формуламен анықтау қажет:

$$\alpha_0 = \frac{0.62}{1 + 1.91 \cdot \psi \cdot \left(\frac{w_{ok}}{t}\right)^{1.44}} \quad (5.15)$$

Бұл формулада  $\psi$  кернеулерінің біркелкіліксіздік параметрі шеңбер бойынша біркелкі қысқан жағдайда 1 тең, біркелкі емес қысқан жағдайда параметрдің мәнін 5.3.2.4.8 Тармағы бойынша қабылдау қажет.

5.3.2.4.5 Егер бункерде ішкі қысым бар болса,  $\alpha_0$  жетілмегендік болған кезде берік төмендетуші коэффициентті  $p$  жергілікті ішкі қысымның мәндері бойынша анықталатын,  $\alpha_{pe}$  және  $\alpha_{pp}$ , екі мөлшерінің мәндерінен ең кіші деп қабылдау қажет. 1 зардаптар тобы үшін ережелерге сәйкес есептелген бункерлер үшін  $\alpha$  берік төмендетуші коэффициенттің мәні  $\alpha_0$  мәнінен аспауы тиіс.

5.3.2.4.6 Жетілмегендік және  $\alpha_{pe}$  қысым болған кезде берік төмендетуші коэффициентті жергілікті ішкі қысымның ең кіші кепілденген мәні бойынша анықтау қажет. Ішкі қысым берілген есептік нүктеде қабылданады және осьтік қысу әсерімен сүйемелденеді.

$$\alpha_{pe} = \alpha_0 + (1 - \alpha_0) \cdot \left( \frac{\bar{p}_s}{\bar{p}_s + \frac{0.3}{\sqrt{\alpha_0}}} \right) \quad (5.16)$$

мұндағы  $p_s$  - жергілікті ішкі қысымның минималды сенімді есептік мәні (1991-4 ҚР ҚН EN 5 Бөлімін қараңыз):

$$\bar{p}_s = \frac{p_s \cdot r}{t \cdot \sigma_{x,Rcr}} \quad (5.17)$$

мұндағы  $\sigma_{x,Rcr}$  - берік кезеңдегі орнықтылықты жоюдың шекті кернеулері (5.28 Формуласын қараңыз).

5.3.2.4.7  $\alpha_{pp}$  жетілмегендік болған кезде иілімді төмендетуші коэффициент қарастырылатын нүктеде ең үлкен жергілікті қысым бойынша қабылданады және осьтік қысу әсерімен сүйемелденеді:

$$\alpha_{pp} = \left\{ 1 - \left( \frac{\bar{p}_s}{\bar{\lambda}_x^2} \right)^2 \right\} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{1.12 + s^{3/2}} \right] \cdot \left[ \frac{s^2 + 1.21 \cdot \bar{\lambda}_x^2}{s \cdot (s + 1)} \right] \quad (5.18)$$

мұндағы

$$\bar{p}_g = \frac{p_g}{\sigma_{x,Rcr}} \cdot \frac{r}{t} \quad (5.19)$$

$$s = \left( \frac{1}{400} \right) \cdot \left( \frac{r}{t} \right) \quad (5.20)$$

$$\bar{\lambda}_x^2 = \frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}} \quad (5.21)$$

мұндағы  $p_g$  - жергілікті ішкі қысымның ең үлкен есептік мәні (1991-4 ҚР ҚН EN 5 Бөлімін қараңыз).

5.3.2.4.8 Шеңбер бойынша қысудың осьтік кернеу біркелкіліксіздіктерінің әсерін осьтік қысушы кернеулердің таралуынан туындайтын, берік кернеулердің сызықтық таралуы бойынша анықтау қажет  $\psi$  кернеулердің біркелкіліксіздіктері параметрімен ескеру қажет. Осьтік мембраналы қысатын кернеулерді берілген деңгейде айналма бағытта таратуды 1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.2 Суретіне сәйкес өзгерту қажет. Берілген осьтік координатамен неғұрлым шиеленіске нүктеде  $\sigma_{x,Ed}$  осьтік мембраналы есептік қысатын кернеулердің мәні  $\sigma_{x0,Ed}$  белгіленеді.

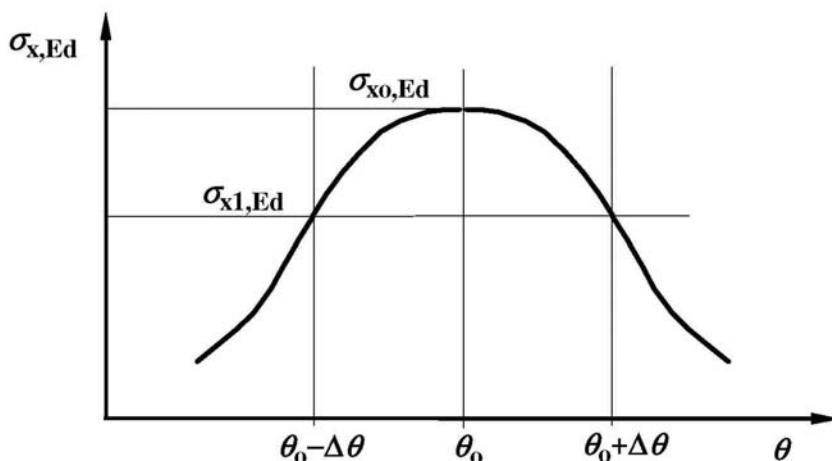
Шеңбер бойынша бірінші нүктеден шығатын осьтік тік координатамен екінші нүктеде қысатын осьтік есептік мембраналы кернеулердің есептік осьтік қысушы мембраналы кернеулердің мәнін  $\sigma_{x1,Ed}$  деп алу қажет:

$$y = r \cdot \Delta\theta = 4 \cdot \sqrt{r \cdot t} \quad (5.22)$$

5.3.2.4.9 Егер кернеулердің қатынасы

$$s = \left( \frac{\sigma_{x1,Ed}}{\sigma_{x0,Ed}} \right) \quad (5.23)$$

$0,3 < s < 1,0$  диапазонда болса, екінші нүктенің орнын анықтауға арналған жоғарыда келтірілген формула дұрыс болып табылады. Егер  $s$  мәні көрсетілген диапазонның шегінен тыс болса,  $s \approx 0,5$  болатындай  $r \cdot \Delta\theta$  басқа мәнді қабылдау қажет. Одан арғы есептеулер  $s$  и  $\Delta\theta$  мәндердің алынған жұбы үшін келтіріледі.



**5.2 Сурет – Айналма бағытта осьтік жергілікті бірдей әрекет етуші мембраналы кернеулердің таралу идеализациясы**

5.3.2.4.10 Кернеулер бөлінуінің баламалы гармоникасы  $j$  мына формуламен анықталады:

$$j = 0.25 \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} \cdot \arccos \cdot \left( \frac{\sigma_{x1,Ed}}{\sigma_{x0,Ed}} \right) \quad (5.24)$$

$\psi$  кернеулердің біркелкіліксіздік параметрі мына формуламен анықталады:

$$\psi = \frac{1 - b_1 \cdot j}{1 + b_2 \cdot j} \quad (5.25)$$

мұндағы

$$b_1 = 0.5 \cdot \sqrt{\frac{t}{r}} \quad (5.26)$$

$$b_2 = \frac{(1 - b_1)}{\psi_b} - 1 \quad (5.27)$$

мұндағы  $\psi_b = 0,4$  - жалпы иілу жағдайдарында кернеулердің біркелкіліксіздік параметрінің мәні.

5.3.2.4.11 Орнықтылық бойынша қабықшаның көтергіш қасиеті жетілмегендіктер мен біркелкі емес қысылу кезінде баламалы гармониканың  $j$  мәні біркелкі қысу жағдайларында көтергіш қасиеттен төмен емес болып шығады,  $j_\infty = 1/b_1$  анықталады. Егер  $j > j_\infty$  болса,  $j = j_\infty$  деп қабылдау қажет.

5.3.2.4.12 Жазық айқастыра жалғауларды пайдаланған кезде табақтардың қосылу торабында осьтік тік күштердің эксцентриситеті туындайды. Бұл жағдайда 5.3.2.4.4 – 5.3.2.4.7 Тармақтары бойынша анықталатын  $\alpha$  мәні  $\alpha_L$  дейін азайтылуы тиіс, егер

пластиналардың орта бетінің эксцентриситеті  $0,5 \cdot t$  асса, ал жалғастыру орнында табақтардың қалыңдығының өзгеруі  $0,25 \cdot t$  аспаса, мұндағы  $t$  — жалғаудағы неғұрлым жұқа табақтың қалыңдығы. Егер эксцентриситет бұл мәннен аз болса немесе қалыңдықтардың айырмасы жоғарыда келтірілген мәннен жоғары болса,  $\alpha$  мәнін  $\alpha_L = 0,7\alpha$  дейін азайту қажет, мұнда  $\alpha$  орнына  $\alpha_0$ , және  $\alpha_{pe}$  немесе  $\alpha_{pp}$  қойылады.

ЕСКЕРТПЕ Орнықтылық жойылуының шекті кернеулері айқастыра жалғаудағы төменгі табақтың жетілмегендік тікелей жалғаудың үстінде орын алған кезде, неғұрлым жұқа табақта орнықтылық жойылуы бөлігінің құрылуын болдырмас үшін жеткілікті қалыңдығы жоқ кезде ғана төмендейді.

5.3.2.4.13 Изотропты қабырғаның орнықтылық жойылуының шеті кернеулері мына формуламен анықталады:

$$\sigma_{x,Rcr} = \frac{E}{\sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot \frac{t}{r} = 0.605 \cdot E \cdot \frac{t}{r} \quad (5.28)$$

5.3.2.4.14 Орнықтылық жойылуының шекті кернеулерінің сипаттамалық мәні 1993-4- ҚР ҚН EN 5.3.2.4.4 – 5.3.2.4.8 Тармақтарында көрсетілген сәйкес  $a$  мәнінің көмегімен мына формуламен анықталады:

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x \cdot f_y \quad (5.29)$$

ЕСКЕРТПЕ Орындылық жойылуының шекті кернеулерінің сипаттамалық және есептік мәндері үшін қолданылатын  $\sigma_{Rk}$  және  $\sigma_{Rd}$  арнайы белгілер қабықшалардың құрылымдары үшін 1993-1-6 ҚР ҚН EN талаптарына сәйкес келеді және 1993-1-1 ҚР ҚН EN-дегі белгілеулерден ерекшеленеді.

5.3.2.4.15  $\chi_x$  орнықтылық төмендеу коэффициенті  $\lambda_x$  қабықшаның салыстырмалы икемділігіне байланысты келесі формулалар бойынша анықталуы тиіс:

$$\chi_x = 1 \quad \text{если} \quad \bar{\lambda}_x \leq \bar{\lambda}_0 \quad (5.30)$$

$$\chi_x = 1 - \beta \cdot \left( \frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta \quad \text{если} \quad \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_p \quad (5.31)$$

$$\chi_x = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_x^2} \quad \text{если} \quad \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}_x \quad (5.32)$$

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}}} \quad (5.33)$$

мұндағы:

$$\bar{\lambda}_0 = 0.2 \quad (5.34)$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} \quad (5.35)$$

мұндағы  $\alpha$  -  $\alpha_0$ ,  $\alpha_{pe}$ ,  $\alpha_{pp}$  шамасы ретінде анықталады  $\alpha_L$ , сәйкесінше.

$\beta = 0,6$ ;

$$\eta = 1,0.$$

5.3.2.4.16 Орнықтылықтың жойылуы кезінде есептік мембраналы кернеулер мына формуламен анықталады:

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1} \quad (5.36)$$

мұндағы  $\gamma_{M1}$  - 1993-4-1 ҚР ҚН EN 2.9.2 Тармағы бойынша анықталады.

5.3.2.4.17 Есептік бірдей әрекет етуші кернеулер үшін қабықшаның барлық нүктелерінде мына шарт орындалуы тиіс:

$$n_{x,Ed} \leq t \cdot \sigma_{x,Rd} \quad (5.37)$$

5.3.2.4.18 Егер қабырғаның табақтары айқастыра жалғанса және жалғау 1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.3.2.4.18 Тармағында нұсқауларға қанағаттандырса, максималды мүмкін жетілмегендікті өлшеуді айқастыра жалғауға кесе көлденең жүргізбеу қажет.

5.3.2.4.19 Жергілікті тіректің үстінде осьтік қысудың әсерімен қабықшаның орнықтылығын есептеу, кронштейн аймағында (мысалы, конвейер жетегін ұстап тұру үшін) және тесіктің жанында 1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.6 Тармағындағы нұсқауларға сәйкес орындалуы тиіс.

### 5.3.2.5 Ішкі қысымның, ішкі вакуум мен желдің әсерімен орнықтылықты жою

5.3.2.5.1 Орнықтылықты бағалау есептік көтергіш қасиеттің төмендегі бағалауларын қолданған кезде орындалуы мүмкін 1993 -1-6 ҚР ҚН EN талаптарына сәйкес орындалуы тиіс.

5.3.2.5.2 Цилиндр қабықшаның төменгі шеті тік жылжуларға жол бермес үшін сенімді бекітілуі тиіс (1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.4.7 Тармағын қараңыз).

5.3.2.5.3 Желдің немесе бункердің қабырғасының ішінара вакуумының әсерімен қатандық қырларының немесе қабырға қалыңдығының немесе шекаралық жағдайлардың өзгеру орындары арасында болатын бөліктерге бөлінуі тиіс.

5.3.2.5.4 Орнықтылықты тексеру әрбір бөлік немесе бөліктер тобы үшін орындалуы тиіс, мұнда ең жұқа бөліктен басталып, басқаларын біртіндеп қосып, орнықтылықты жою болуы мүмкін. Бұл тексерулерден орнықтылықты жою өтетін ең төмен қысым таңдалады.

5.3.2.5.5 Критическое наружное давление орнықтылық жойылуының изотропты қабырғаның мына формуламен анықталады:

$$p_{n,Rcru} = 0.92 \cdot C_b \cdot C_w \cdot E \cdot \left(\frac{r}{l}\right) \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{2.5} \quad (5.38)$$

мұндағы  $t$  - қабырғаның ең жұқа қабырғасының қалыңдығы;

$l$  - қатандық сақиналарының немесе бөлік шекараларының арасындағы қашықтық;

$C_b$  - сыртқы қысымның әсерімен бойлық иілу коэффициенті;

$C_w$  - желдік қысымның таралу коэффициенті.

5.3.2.5.6  $C_b$  коэффициенті 1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.2 Кестесі бойынша қабықшаның жоғарғы шегінің шекаралық жағдайлары бойынша анықталуы тиіс.

**5.2 Кесте – Сыртқы қысым кезінде  $C_b$  бойлық иілу коэффициентінің мәндері**

Қабықшаның жоғарғы шегінің шекаралық жағдайлары	Төбе қабырғамен толықтай жалғанған (кесілмейтін жалғау)	Жоғарғы шегіндегі сақина 1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.3.2.5.12 – 5.3.2.5.14 тармақтарын қанағаттандырады	Жоғарғы шегіндегі сақина 1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.3.2.5.12 – 5.3.2.5.14 тармақтарын қанағаттандырмайды
$C_b$	1,0	1,0	0,6

5.3.2.5.7 Егер бункер жақын орналасқан бункерлер тобында болса, бункердің желдік жағына қысымға қатысты желдік қысымның таралу коэффициентін  $C_w = 1,0$  деп алу қажет.

5.3.2.5.8 Егер бункер жеке тұратын болып табылса және тек желдік жүктеменің әсерінде болса, бункердің желдік жағына қысымға қатысты желдік қысымның таралу коэффициентін келесілерден ең үлкен ретінде алу қажет:

$$C_w = \frac{2,2}{\left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{C_b \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}}\right)} \quad (5.39)$$

$$C_w = 1,0 \quad (5.40)$$

5.3.2.5.9 Егер бункер жеке тұратын болып табылса және тек желдік жүктеме мен желдік вакуумның әсерінде болса,  $C_w$  мәні 1,0-ден және туындайтын әрбір көздің сыртқы қысымының мәндеріне пропорционал 1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.3.2.5 (8) Тармағында келтірілген есептік мәннен сызықтық комбинация ретінде анықталуы тиіс.

5.3.2.5.10 Максималды есептік сыртқы қысым желдің және/немесе ішінара вакуумның әсерімен мына формуламен анықталады:

$$p_{n,Rd} = \alpha_n \cdot p_{n,Rcru} / \gamma_{M1} \quad (5.41)$$

мұндағы  $\alpha_n = 0,5$  - жетілмегендік болған кездегі берік төмендетуші коэффициент;

$\gamma_{M1} = 1,1$  - орнықтылықты есептеу кезіндегі жеке сенімділік коэффициенті.

5.3.2.5.11 Орнықтылықты қамтамасыз ету үшін көтергіш қасиеті келесі шартты қасиетті қанағаттандыруы тиіс:

$$p_{n,Ed} \leq p_{n,Rd} \quad (5.42)$$

мұндағы  $p_{n,Ed}$  - желдің және/немесе ішінара вакуумның максималды сыртқы қысымының есептік мәні.

5.3.2.5.12 Цилиндрдың жоғарғы шегі сақиналы қырмен сенімді бекітілген ретінде қарастырылуы үшін, сақиналы қыр (сақина) беріктік пен қатаңдық бойынша талаптарды қанағаттандыруы тиіс. Егер есептің сандық әдістері қолданылмаса, айналма (сақина) күштің және айналма иілуші сәттің есептік мәнін сақиналы қырдағы тік оське қатысты мына формулалар бойынша анықтау қажет:

$$N_{\theta,Ed} = 0,5 \cdot r \cdot L \cdot p_{n,Ed} \quad (5.43)$$

$$M_{\theta,Ed} = M_{\theta,Edo} + M_{\theta,Edw} \quad (5.44)$$

$$M_{\theta,Edo} = 0,0033 \cdot p_{nS1} \cdot r^2 \cdot L \cdot \left( \frac{p_{nS1}}{p_{nS1} - p_{n,Edu}} \right) \quad (5.45)$$

$$M_{\theta,Edw} = 0.17 \cdot p_{n,Edw} \cdot r^2 \cdot L \cdot \left( \frac{p_{n,Edu}}{p_{nS1} - p_{n,Edu}} \right) \quad (5.46)$$

$$p_{nS1} = \frac{6 \cdot E \cdot I_z}{r^3 \cdot L} \quad (5.47)$$

мұндағы  $p_{n,Edu}$  - жел мен ішінара вакуумның сыртқы қысымының біркелкі құраушының есептік мәні;

$p_{n,Edw}$  - стагнация нүктесіндегі желдік қысымның есептік мәні;

$p_{nS1}$  - сақинадағы иілуші сәтті есептеуге арналған қысым;

$M_{\theta,Edo}$  - шеңберден ауытқумен туындаған иілуші сәттің есептік мәні;

$M_{\theta,Edw}$  - желдің әсерінен иілуші сәттің есептік мәні;

$I_z$  - айналма бағытта иілу үшін сақина ауданының инерция сәті;

$L$  - қабықша қабырғасының жалпы биіктігі;

$t$  - қабықшаның ең жұқа белдігінің қалыңдығы.

5.3.2.5.13 Егер цилиндрдың жоғарғы шегінде сақина суықтай майыстырылған профильдерден орындалса, 1993-4-1 ҚР ҚН EN (5.45) Формуласымен анықталатын  $M_{\theta,Edo}$  мәні 15-ке арттырылуы тиіс.

5.3.2.5.14 Тік осіне қатысты цилиндрдың жоғарғы шегінде сақинаның  $EI_z$  иілуші қатандығы (айналма бағытта иілу) келесілердің ең үлкен мәнінен жоғары болуы тиіс:

$$EI_{z,min} = k_1 \cdot E \cdot L \cdot t^3 \quad (5.48)$$

және

$$EI_{z,min} = 0.08 \cdot C_w \cdot E \cdot r \cdot t^3 \cdot \sqrt{(r/t)} \quad (5.49)$$

мұндағы  $C_w$  - 8.3.2.5.7 Тармағы мен 8.3.2.5.8 Тармағы бойынша анықталатын жел қысымының таралу коэффициенті  $k_1 = 0,10$ .

### 5.3.2.6 Мембраналық жылжу

5.3.2.6.1 Егер бункер қабырғасының үлкен бөліші жылжитын жүктеменің әсерімен болса (эксцентриситетпен толтыру кезіндегідей, сейсмикалық жүктеме кезінде және т.б.) мембраналы жанама кернеулерден орнықтылықты жою бойынша көтергіш қасиеті әрбір жазық деңгееде қабықшаның бұралу жағдайы ретіндегідей қабылдануы тиіс. Есептеулерде жылжу кезіндегі осьтік діріл ескерілген.

5.3.2.6.2 Изотропты қабырғаның орнықтылық жойылуының шекті жанама кернеуі мына формуламен анықталады:

$$\tau_{\theta,Rcr} = 0.75 \cdot E \cdot \left( \frac{l}{l} \right)^{0.5} \cdot \left( \frac{t}{r} \right)^{1.25} \quad (5.50)$$

мұндағы  $t$  - ең жұқа орындағы қабырға қалыңдығы;

$l$  - қатаңдық сақиналарының немесе немесе бөлік шекараларының арасындағы қашықтық;

5.3.2.6.3 Қатаңдық сақинасы жылжу кезінде орнықтылық жойылу аймағының шекарасы болып табылса, шеңбер бойымен иілу үшін оське қатысты оның  $EI_z$  иілу қатандығы мынадан кем болмауы тиіс:

$$EI_{z,min} = k_s \cdot E \cdot t^3 \cdot \sqrt{r \cdot l} \quad (5.51)$$



мұндағы  $l$  және  $t$  - мәндер 1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.3.2.6.2 Тармағы бойынша орнықтылық жойылуының неғұрлым шекті нысаны ретінде қабылданады;

$$k_s = 0,10.$$

5.3.2.6.4 Егер жанама кернеулер  $\tau$  құрылымның биіктігі бойынша сызықтық өзгертін болса, ең үлкен жанама кернеулермен нүктедегі шекті жанама кернеулер дейін арттырылуы мүмкін:

$$\tau_{x\theta,Rcr} = 1.4 \cdot E \cdot \left(\frac{r}{l_0}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{1.25} \quad (5.52)$$

мұндағы  $l_0$  мына формуламен анықталады:

$$l_0 = \frac{\tau_{x\theta,Ed,max}}{\left(\frac{d\tau_{x\theta,Ed}}{dx}\right)} \quad (5.53)$$

мұндағы  $d\tau_{x\theta,Ed}/dx$  - учаске бойынша орташаланған биіктігі бойынша жанама кернеулердің өзгеруінің осьтік градиенті;

$\tau_{x\theta,Ed,max}$  - жанама кернеулердің максималды мәні.

Егер  $l_0$  ұзындығы құрылымның биіктігінен асса, бұл ережені қолданбау қажет, ал қабықшаны 1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.3.2.6.2 Тармағына сәйкес біркелкі мембраналы жанама кернеулер кезіндегідей қарастыру қажет.

5.3.2.6.5 Егер жергілікті жанама кернеулер жергілікті тіректермен және тірек осьтік қырлармен туындаса, орнықтылық жойылуының шекті жанама кернеулері келесі формула бойынша ең үлкен кернеулермен қабықша мен қырдың жалғанған жерінде анықталады:

$$\tau_{x\theta,Rcr} = 1.4 \cdot E \cdot \left(\frac{r}{l_0}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{1.25} \quad (5.54)$$

ондағы  $l_0$  былайша анықталады:

$$l_0 = \frac{\tau_{x\theta,Ed,max}}{\left(\frac{d\tau_{x\theta,Ed}}{dy}\right)} \quad (5.55)$$

мұндағы  $d\tau_{x\theta,Ed}/dy$  - учаске бойынша орталанған қырдан қашықтықтың өзгеруіне байланысты шеңбер бойынша жанама кернеулердің өзгеру градиенті;

$\tau_{x\theta,Ed,max}$  - бұл жанама кернеулердің максималды мәні.

5.3.2.6.6 Орнықтылық жойылуының есептік кернеулері жанама кернеулердің әсер етуі кезінде келесі шамалардың ең кіші мәні ретінде анықталады:

$$\tau_{x\theta,Rd} = \alpha_t \cdot \tau_{x\theta,Rcr} / \gamma_{M1} \quad (5.56)$$

және

$$\tau_{x\theta,Rd} = 0.57 \cdot f_y / \gamma_{M1} \quad (5.57)$$

мұндағы  $\alpha_t$  - жетілмегендік болған кездегі берік төмендетуші коэффициент;

$\gamma_{M1} = 1,1$  - жеке сенімділік коэффициенті;

$$\alpha_t = 0,80.$$

5.3.2.6.7 Есептік бірдей әрекет етуші кернеулер үшін құрылымның барлық нүктелерінде мына шарт орындалуы тиіс:

$$n_{x\theta,Ed} \leq t \cdot \tau_{x\theta,Rd} \quad (5.58)$$

**5.3.2.7 Меридиональды қысудың арасындағы, айналма бағытта және мембраналы жылжудың арасындағы өзара әрекеттестік**

5.3.2.7.1 Бункер қабырғасындағы кернеулі күй қысушы мембраналы кернеулер мен жанама кернеулерден басқа кернеулердің едәуір құраушыларын қамтыған кезде, ҚР ҚН EN 1993 -1-6 талабына сүйену қажет.

5.3.2.7.2 Егер біреуден басқа, есептік кернеудің барлық құраушылары бойлық иілу кезінде сәйкес есептік кедергіден 20 %- дан аспаса, мұндай өзара әрекеттестікке жол беріледі.

**5.3.2.8 Қажу, LS4**

5.3.2.8.1 3 зардаптар тобының бункерлері үшін 1993-1-6 ҚР ҚН EN талаптарын басшылыққа алу қажет.

5.3.2.8.2 2 зардаптар тобының бункерлерінде, егер бункерді пайдаланудың есептік мерзімі ішінде толтыру және түсіру циклдары саны  $N_f = 10000$  асса, төзімділікке тексеру жүргізілуі тиіс.

**5.3.2.9 Циклдық илемдік, LS2**

5.3.2.9.1 3 зардаптар тобының бункерлері үшін ҚР ҚН EN 1993 -1-6 талаптарына сүйену қажет. Циклдық илемдік нәтижесінде мүмкін қағылуды тексеру үздіксіздікті бұзу нүктесінде, жергілікті сақиналы қатандық қырларының жанында және қабықшадағы қосымша элементтердің бекітілу жанында жүргізілуі тиіс.

5.3.2.9.2 Басқа зардаптар тобының бункерлерінде циклдық илемдікке тексеру жүргізілмеуі мүмкін.

**5.3.3 Тік қатандық қырларымен изотропты қабырғалар**

**5.3.3.1 Жалпы ереже**

5.3.3.1.1 Мұндағы изотропты қабырға тік қатандық қырларымен бекітіледі (стрингерлермен), қабырға мен қырда тік қысушы кернеулерді анықтаған кезде ішкі қысымның нәтижесінде қабырғаның қысқару деформацияларының үйлесімділік әсерін ескеру қажет.

5.3.3.1.2 Есептік бірдей әрекет етуші кернеулерді, көтергіш қасиетті анықтау және оны тексеру бұл жерде баяндалған қосымша ережелерді ескерумен 1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.3.2 Тармағына сәйкес орындалуы тиіс.

**5.3.3.2 Илемдік бойынша шекті күй**

5.3.3.2.1 Тік жіктердің ажырауына көтергіш қасиеті изотропты қабықша үшін секілді анықталауы тиіс (1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.3.2 Тармағын қараңыз).

5.3.3.2.2 Қосылу құрылымы айналма созылудың күштерін қабылдау үшін қатандық қырын қамтитын жерде, бұл созылудың әсері қырдағы кернеуді анықтаған және айналма созылудың әсері кезінде беріктікті тексеру кезінде ескерілуі тиіс.

### **5.3.3.3 Осьтік қысудың әсері кезінде орнықтылықтың жойылуы**

5.3.3.3.1 Қабырға қатандық қырларысыз қабырға үшін осьтік қысудан орнықтылық жойылуының критерийі бойынша есептеледі, егер қаттылық қабырғаларының қадамы  $2 \cdot \sqrt{g \cdot t}$  асатын болса, мұндағы  $t$  - жергілікті қабырға қалыңдығы

5.3.3.3.2 Егер тік қатандық қырлары  $2 \cdot \sqrt{g \cdot t}$  кем емес қадамымен орналасса, барлық қабырғаның орнықтылығын 5.3.3.3.1 Тармағы бойынша, немесе 1993 -1-6 ҚР ҚН EN талаптарына сәйкес тұтастай құрылымның жаһандық есептік есептеуінің негізінде анықтау қажет.

5.3.3.3.3 Осьтік өысу кезінде қатандық қырларының өзінің орнықтылығы қырлардың құрылымдың шешіміне байланысты 1993-1-1 ҚР ҚН EN немесе 1993-1-3 ҚР ҚН EN (суықтай иілген элементтер) немесе ҚР ҚН EN 993-1-5 ережелерінің негізінде анықталуы тиіс.

5.3.3.3.4 Есептеу кезінде қабықша қабырғасына қатысты қатандық қырының эксцентриситетін ескеру қажет.

### **5.3.3.4 Сыртқы қысымның, ішінара вакуумның немесе желдік әсері кезінде орнықтылықтың жойылуы**

5.3.3.4.1 Қабырға қатандық қырларсыз қабырға сияқты, ссыртқы қысымның әрекетін кезінде орнықтылықты жоюдың сол қағидаты бойынша есептелуі тиіс.

5.3.3.4.2 Егер одан да дәлдірек есептеулер талап етілсе, қатандық қырлардың қималарының ауданы қабықшаның баламалы қалыңдығына кіргізіледі, сонда орнықтылықты жою кернеулерді  $C_{\varphi} = C_{\theta} = E \cdot t$  және  $C_{\varphi\theta} = 0,38 \cdot E \cdot t$  болған кезде 8.3.4.5 Тармағының негізінде анықтауға болады.

### **5.3.3.5 Мембраналық жылжу**

5.3.3.5.1 Егер бункер қабырғасының үлкен бөлігі жылжитатын жүктеменің (эксцентриситетпен толтырған кездегі, сейсмикалық жүктеме және т.б. сияқты) әсерінде болса мембраналық жанама кернеулерден орнықтылықты жою бойынша көтергіш қасиеті қатандық қырларсыз изотропты қабырғалар үшін сияқты анықталуы тиіс (5.3.2.6 Тармағын қар.), сонда көтергіш қасиеттің мәні қатандық қырлардың әсерін ескеру нәтижесінде көбейтілуі мүмкін.

Жылжу кезінде қабықшаның баламалы ұзындығы  $l$  келесі өлшемдердің ең төмен мән ретінде қабылдануы мүмкін:

- сақиналы қатандық қырлардың арасындағы арақашықтық;
- цилиндрдің шеттері арасындағы арақашықтық;

— тік қатаңдық қырлардың арасындағы горизонталь бойынша еселенген арақашықтық, әр қатаңдық қырдың тік жазықта (айналма өсіне қатысты) иілу кезінде июші қаттылығы  $EI_y$  келесіден төмен емес шартымен:

$$EI_{y,\min} = k_s \cdot E \cdot t^3 \cdot \sqrt{r \cdot l} \quad (5.59)$$

мұнда  $l$  және  $t$  мәндері орнықтылықты жоюдың одан да сыншы нысаны үшін сияқты қабылданады;

$$k_s = 0,10.$$

5.3.3.5.2 Егер жеке қатаңдық қыры қабықшаның үстінгі шетінің бағытында күрт өнделсе, қатаңдық қырдағы әрекет ететін күш  $4,0 \cdot \sqrt{r \cdot t}$  аспайтын ұзындықта қабықша бойынша үлестіріледі.

5.3.3.5.3 Егер қатаңдық қырлар 5.3.3.5 (2) Тармағында көрсетілгендей өнделсе, немесе қабықшаға жергілікті күштерді жіберу үшін қолданылса, қаттылық қыры мен қабықша арасындағы жылжу күшін жіберген кездегі көтергіш қасиеті жанама кернеулерді сызықтық үлестіру үшін 5.3.2.6 Тармағында келтірілген мәндерден аспауы тиіс.

### 5.3.4 Көлденең кеңірдектелген қабырғалар

#### 5.3.4.1 Жалпы ереже

5.3.4.1.1 Барлық есептеулер жамылғыларды және тозуға рұқсаттың ескеруісіз табақшалардың қалыңдығымен орындалуы тиіс.

5.3.4.1.2 Қабырғаның кеңірдектелген табақшасының минималды қалыңдығы болат 1993-1-3 ҚР ҚН EN талаптарына сәйкес келуі тиіс. Бұрандама қосылыстары бар құралымдарда бұрандамалардың диаметрі М8 аз болмауы тиіс.

5.3.4.1.3 Егер цилиндрлік қабырға көлденең кеңірдектері және қабырғаға бекітілген тік қатаңдық қырлары бар кеңірдектелген табақшадан жасалса, кеңірдектелген қабырға тік жүктемені көтергіш ретінде қарастырылуы тиіс, егер қабырға ортотропты қабықша ретінде қабылданбаса (5.3.4.3.3 Тармағын қар.).

5.3.4.1.4 Ерекше назарды қатаңдық қырлар мен қаптау арасындағы қосу элементтердің қабырғаға перпендикулярлы меридиональды жазықтықтағы иілісті қабылдау үшін жеткілікті өлшемдердің болғанын қамтамасыз етуге аударған жөн, өйткені қырлардың иілгіш кесілмейтіндігі сыртқы қысымның, желдің әрекетін кезінде, сонымен қатар сусымалы сақталатын материалдың қозғалуы кезінде орынқтылықты қамтамасыз ету үшін қажет.

5.3.4.1.5 Егер қабырға тік қатаңдық қырлармен бекітілген болса, қаптау табақшалары мен қатаңдық қырлар арасындағы қосқыш элементтердің өлшемдері сақталатын материалдан қатаңдық қырларға әрекет ететін жанама жүктемдерді (үйкеліс күшін) жіберуге жеткілікті болуы тиіс. Қаптау табақшаларының қалыңдығы қосқыш элементтердің жергілікті бұзылуы болмайтындай тааңдалуы тиіс, сонымен қатар қосылыстардың кеңірдектелген табақшаларға беріктігінің төменбеуін ескеру қажет.

5.3.4.1.6 Есептік тең әсерлі кернеулерді, көтергіш қасиетті анықтау және оны тексеру 5.3.2 Тармағына сәйкес, 5.3.4.1.1 – 5.3.4.1.5 Тармақтарында айтылған қосымша ережелердің ескеруімен орындалуы тиіс.

ЕСКЕРТПЕ Бункерлердің кеңірдектелген қабықшаларды есептеу туралы толығырақ ақпарат D Қосымшасында келтірілген анықтамалық деректерде берілген.

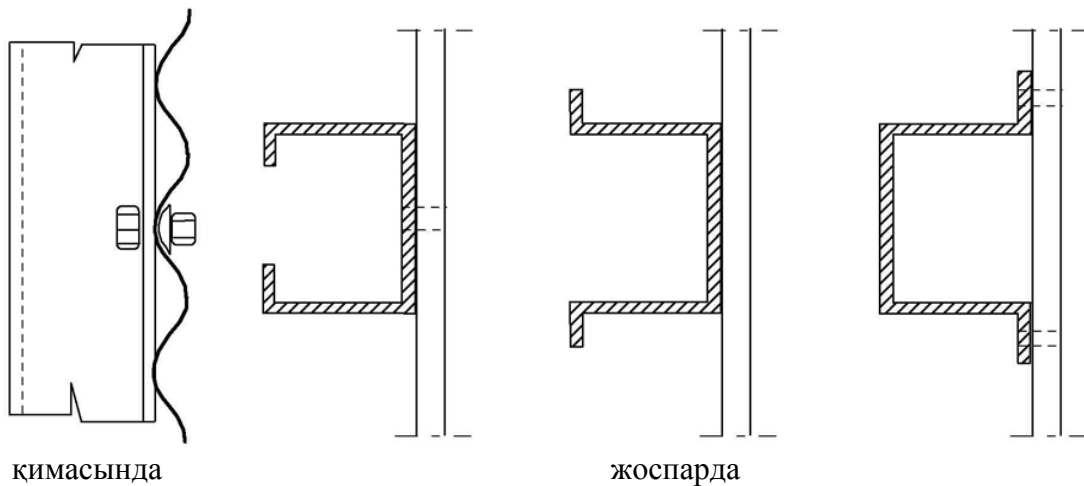
### 5.3.4.2 Икемділік бойынша шекті күй

5.3.4.2.1 Жеке панельдерді қосу үшін бұрандамалар 1993 ҚР ҚН EN-1-8 талаптарын қанағаттандыруы тиіс.

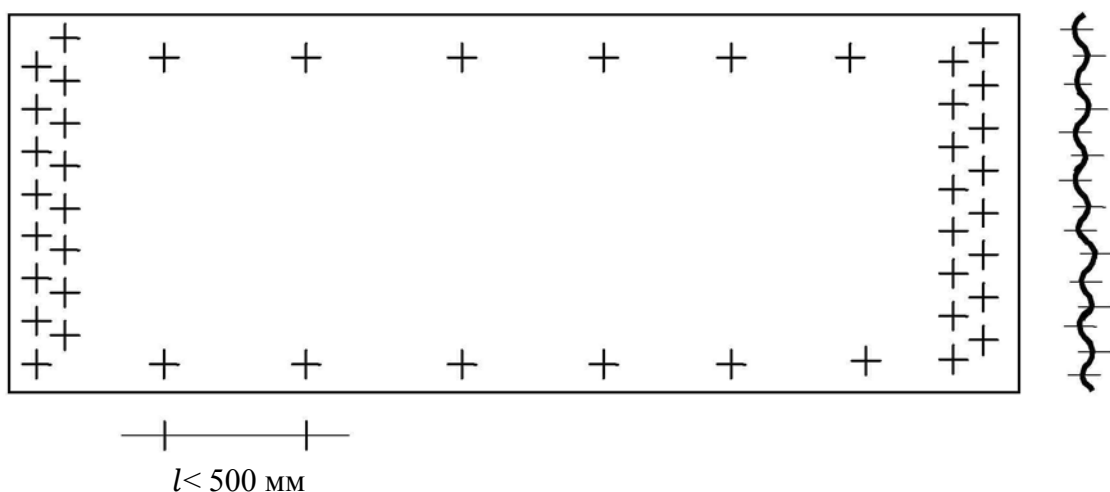
5.3.4.2.2 Панельдерді өзара бекіту элементтері созылудағы немесе қысудағы қосылыстар үшін 1993-1-3 ҚР ҚН EN талаптарына сәйкес келуі тиіс.

5.3.4.2.3 Шеңбердің периметрі бойынша панельдерді бекітудің көршілес элементтердің арасындағы қадам шеңбердің  $3^\circ$  аспауы тиіс.

Тік қатандық қырларды қабырғада орналастыру әдістері осы нұсқаулықтың 8.3 Суретінде көрсетілген. Панельдердің қосылыстарындағы бұрандамалардың типтік орналасуы 1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.4 Суретінде көрсетілген.



5.3 Сурет – Көлденең кеңірдектер бар қабықшаларда тік қатандық қырларды орналастыру сұлбалары



5.4 Сурет – Бункердің кеңірдектелген панелінде бұрандамаларды орналастыру сұлбасы

5.3.4.2.4 Егер қабырғада люктер, есіктер, транспортердің шнектері және басқа құрылғылар үшін өтпелі тесіктер жасалса, бұл жерлерде қатаңдыққа сәйкессіздікпен ассоциацияланатын жергілікті кернеудің шоғырландыру факторлары жергілікті үзіліске әкелмейтінін кепілдеу үшін қалыңдығы көбірек кеңірдектелген табақша пайдалануы тиіс.

#### 5.3.4.3 Өстік қысудың әрекеті кезіндегі орнықтылықты жою

##### 5.3.4.3.1 Жалпы ереже

5.3.4.3.1.1 Өстік қысу кезіндегі есептік көтергіш қасиеті шеңбер бойынша қысу кернеулерді біркелкі үлестірген кезде кепілденген ішкі қысымның  $p$  мәнін қолданумен құрылыс құралымдарды жасауға рұқсат ету сапалардың алдын ала жазылған тобы үшін анықталуы тиіс.

5.3.4.3.1.2 Егер жазық кеңірдектелген қабырға тік қатаңдық қырларымен бекітілген болса, қабырғаның орынқтылығын есептеу екі баламалы әдістердің біреуімен орындалуы тиіс:

а) 5.3.4.3.3 Тармағына сәйкес баламалы ортотропты қабықшаның орынқтылығын жоюды есептеу, егер қатаңдық қырлар арасындағы көлденең бойынша арақашықтық 8.3.4.3.3 2) Тармағының талаптарын қанағаттандырмаса;

б) 5.3.4.3.4 Тармағының талаптарына сәйкес кеңірдектелген қабырға қысудың өстік күштерін қабылдамайды, бірақ қырлар үшін бекітуді қамтамасыз етеді болжамда қатаңдықтың жеке қырларының орынқтылығын жоюын есептеу, егер көлденең бойынша қаттылық қабырғаларының қадамы 5.3.4.3.3(2) Тармағының талаптарын қанағаттандырмаса.

##### 5.3.4.3.2 Қатаңдық қырларсыз қабырға

1) Егер кеңірдектелген қабықшаның тік қатаңдық қырлары болмаса, иілімділік кезеңіндегі жергілікті орнықтылықты жою бойынша көтергіш қабілеттің сипаттамалық мәнін келесі мәндердің ең үлкенін сияқты анықтаған жөн:

$$n_{x,Rk} = \frac{t^2 \cdot f_y}{2 \cdot d} \quad (5.60)$$

және

$$n_{x,Rk} = R_\phi \cdot \frac{t}{r} \cdot f_y \quad (5.61)$$

мұнда  $t$  - табақшаның қалыңдығы;

$d$  - кеңірдектің жотасы мен ойпаты арасындағы арақашықтық;

$R_\phi$  - кеңірдектің жергілікті қисықтығы (4.2 Суретін қар.);

$r$  - цилиндрдің радиусы.

Иілімділік кезеңіндегі жергілікті орнықтылықты жою бойынша көтергіш қасиеті  $n_{x,Rk}$  ішкі қысымнан  $p_n$  тәуелсіз қабылданады.

ЕСКЕРТПЕ Иілімділік кезеңіндегі жергілікті орнықтылықты жою бойынша көтергіш қасиеті – бұл үзіліске немесе бұратылуға кеңірдектің көтергіш қасиеті.

2) Иілімділік кезеңіндегі жергілікті орнықтылықты жою бойынша көтергіш қасиетінің есептік мәнін кеелсі формула анықтаған жөн:

$$n_{x,Rd} = \alpha_x \cdot n_{x,Rk} / \gamma_{M0} \quad (5.62)$$

мұнда  $\alpha_x = 0,80$  - жетілмегендік болған кезде орнықтылықты жоюдың серпінді төмендетуші коэффициенті;

$\gamma_{M0} = 1,0$  - жеке сенімділік коэффициенті.

3) Құралымның барлық нүктелерінде есептік бірдей әрекет етуші кернеулер келесі шартты қанағаттандыруы тиіс:

$$n_{x,Ed} \leq n_{x,Rd} \quad (5.63)$$

#### 5.3.4.3.3 Қатандық қырлары ыар қабырға ортотропты қабықша ретінде

1) Егер қабырға ортотропты қабықша ретінде қарастырылса (1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.3.4.3.1 Тармағындағы (а) әдісі), әртүрлі өстерге қатысты қаптаманың қаттылығы 1993-4-1 ҚР ҚН EN 4.4 Тармақ бойынша анықталуы тиіс. Қырлардың есебімен нәтижелі қаталдығы біркелкі үлестірілген деп есептеледі. Қабықшаның баламала орта беті жетілмегендік амплитудасы өлшенетін орталық өсі ретінде алынуы тиіс (1993-4-1 ҚР ҚН EN 4.2 Суретін қар.).

2) Горизонтальдар бойынша қатандық қырлар арасындағы арақашықтық  $d_s$  келесіден аспауы тиіс  $d_{s,max}$ :

$$d_{s,max} = k_{dx} \cdot \left( \frac{r^2 \cdot D_y}{C_y} \right)^{0.25} \quad (5.64)$$

мұнда  $D_y$  - кеңірдектерге параллельді қаптаудың ең жіңішке табақшаларының енінің бірлігіне иілгіш қаталдығы;

$C_y$  - кеңірдектерге параллельді қаптаудың ең жіңішке табақшаларының енінің бірлігіне созылу кезіндегі қатандық;

$r$  - цилиндрдің радиусы.

$k_{dx} = 7,4$ .

3) Орнықтылықты жоюдың сыншыл кернеулердің тең әсерлісі  $n_{x,Rcr}$  ортотропты қабықшаның шеңбер ұзындығының бірлігіне (5.3.4.3.1 Тармағындағы (а) әдісі) бункердің әр есептік деңгейінде төмендегі мәнді толқындардың сыншыл айналма саны  $j$  және орнықтылықты жоюдың учаскесінің биіктігі  $l_i$  бойынша минималдандыру арқылы анықталуы тиіс:

$$n_{x,Rcr} = \frac{1}{j^2 \cdot \omega^2} \cdot \left( A_1 + \frac{A_2}{A_3} \right) \quad (5.65)$$

$$A_1 = j^4 \cdot [\omega^4 \cdot C_{44} + 2 \cdot \omega^2 \cdot (C_{45} + C_{66}) + C_{55}] + C_{22} + 2 \cdot j^2 \cdot C_{25} \quad (5.66)$$

мына болған кезде:

$$\begin{aligned} A_2 = & 2 \cdot \omega^2 \cdot (C_{12} + C_{33}) \cdot (C_{22} + j^2 \cdot C_{25}) \cdot (C_{12} + j^2 \cdot \omega^2 \cdot C_{14}) \\ & - (\omega^2 \cdot C_{11} + C_{33}) \times \\ & \times (C_{22} + j^2 \cdot C_{25})^2 - \omega^2 \cdot (C_{22} + \omega^2 C_{33}) \cdot (C_{12} + j^2 \cdot \omega^2 \cdot C_{14})^2 \end{aligned} \quad (5.67)$$

$$A_3 = (\omega^2 \cdot C_{11} + C_{33}) \cdot (C_{22} + C_{25} + \omega^2 \cdot C_{33}) - \omega^2 \cdot (C_{12} + C_{33})^2 \quad (5.68)$$

олардың:

$$\begin{aligned} C_{11} &= C_\phi + \frac{E \cdot A_s}{d_s} & C_{12} &= \nu \cdot \sqrt{C_\phi \cdot C_\theta} \\ C_{14} &= e_s \cdot E \cdot A_s / (r \cdot d_s) & C_{22} &= C_\theta + E \cdot A_r / d_r \\ C_{25} &= \frac{e_r \cdot E \cdot A_r}{r \cdot d_r} & C_{33} &= C_{\phi\theta} \\ C_{44} &= \frac{\left[ D_\phi + \frac{EI_s}{d_s} + \frac{E \cdot A_s \cdot e_s^2}{d_s} \right]}{r^2} & C_{45} &= \frac{\nu \cdot \sqrt{D_\phi \cdot D_\theta}}{r^2} \\ C_{55} &= \frac{\left[ D_\theta + \frac{E \cdot I_r}{d_r} + \frac{E \cdot A_r \cdot e_r^2}{d_r} \right]}{r^2} & C_{66} &= \frac{\left[ D_{\phi\theta} + 0.5 \cdot \left( \frac{G \cdot I_{ts}}{d_s} + \frac{G \cdot I_{tr}}{d_r} \right) \right]}{r^2} \\ \omega &= \frac{\pi \cdot r}{j \cdot l_i} \end{aligned}$$

мұнда  $l_i$  - тік бағытта орнықтылықты жоюдың мүмкін нысанның толқын ұзындығының жартысы;

$A_s$  - бойлық (тік) қатандық қырдың (стрингердің) көлденең қимасының ауданы;

$I_s$  - тік жазықта иілу кезінде айналма өсіне қатысты бойылық қатандық қырдың инерция сәті;

$d_s$  - тік қатандық қырлар арасындағы арақашықтық;

$I_{ts}$  - бойлық қатандық қырды біркелкі бұрайдың тұрақтысы;

$e_s$  - орта бетіне қатысты бойылық қатандық қырдың сыртқа бағытталған эксцентриситеті;

$A_r$  - сақиналы қатандық қырдың көлденең қимасының ауданы;

$I_r$  - иілу кезінде айналма бағыттағы (жазық бетте) тік өсіне қатысты сақиналы қатандық қырдың инерция сәті;

$d_r$  - сақиналы қатандық қырлардың арасындағы арақашықтық;

$I_{tr}$  - орта бетіне қатысты сақиналы қатандық қырының біркелкі бұралуының тұрақтысы;

$e_r$  - орта бетіне қатысты сақиналы қатандық қырының сыртқа бағытталған эксцентриситеті;

$C_\phi$  - осьтік бағытта жік созылуы кезіндегі қатандық (4.4.5 және 4.4.7 Тармақтарын қараңыз);

$C_\theta$  - айналма бағытта жік созылуы кезіндегі қатандық (4.4.5 және 4.4.7 Тармақтарын қараңыз);

$D_\phi$  - осьтік бағытта қаптаудың иілуші қатандығы (4.4.6 және 4.4.7 Тармақтарын қараңыз);

$D_\theta$  - айналма бағытта қаптаудың иілуші қатандығы (4.4.6 және 4.4.7 Тармақтарын қараңыз);

$D_{\phi\theta}$  - бұралу кезінде қаптаудың бұралуына иілуші қатандық (4.4.6 және 4.4.7 Тармақтарын қараңыз);

$r$  - бункердің радиус.



1 ЕСКЕРТПЕ Жоғарыда келтірілген қатаңдық қырларының геометриялық сипаттамалары ( $A$ ,  $I$ ,  $I_t$  және т.б.) қатаңдық қырының өзінің қимасына ғана жатады, яғни қабырға учаскелерін қамтитын есептік қима қарастырылмауы тиіс.

2 ЕСКЕРТПЕ Орнықтылық жойылуының төменгі шекарасы ретінде қатаңдық қырының қаптау қалыңдығы немесе көлденең қимасы өзгертін нүктелерді қабылдау қажет. Бұл нүктелерде әрбір қима үшін орнықтылықты жеке тексеру қажет.

4) Ортотропты қабықшаның  $n_{x,Rd}$  орнықтылығы бойынша есептік көтергіш қасиетін (1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.3.4.3.1 Тармағындағы (а) тәсілі) келесілерлен ең кіші ретінде анықтау қажет:

$$n_{x,Rd} = \alpha_x \cdot n_{x,Rcr} / \gamma_{M1} \quad (5.69)$$

және

$$n_{x,Rd} = A_{eff} \cdot f_y / (d_s \cdot \gamma_{M0}) \quad (5.70)$$

мұндағы  $\alpha_x$  - жетілмегендік болған кездегі орнықтылық жойылуының берік төмендетуші коэффициенті;

$d_s$  - бойлық қатаңдық қырлары арасындағы қашықтық;

$A_{eff}$  — бойлық қатаңдық қырының есептік көлденең қима ауданы;

$\gamma_{M0} = 1,0$  және  $\gamma_{M1} = 1,1$  - жеке сенімділік коэффициенттері;

$\alpha_x = 0,80$

5) Құрылымның барлық нүктелерінде сыртқы жүктемеден есептік бірдей әрекет етуші кернеулер үшін көтергіш қасиетті қамтамасыз ету шарты орындалуы тиіс:

$$n_{x,Ed} \leq n_{x,Rd} \quad (5.71)$$

#### 5.3.4.3.4 Осьтік қысу күштерін толықтай қабылдайтын қатаңдық қырларымен қабырға

1) Кеңірдектелген қаптай осьтік қысу күштерін қабылдамайды деп алынса (1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.3.4.3.1 Тармағындағы (б) тәсілі), бұл қаптау тек қабырға жазығында орнықтылық жойылуынан бойлық қабырғаларды бекітуді қамтамасыз ететінін білдіреді. Орнықтылық бойынша көтергіш қасиеті бұл жағдайда екі баламалы тәсілдің біреуімен анықталады:

а) қабырғаға перпендикуляр бағытта орнықтылыққа қаптаудың қолдаушы әсері ескерілмесе;

б) қабырғаға перпендикуляр бағытта орнықтылыққа қаптаудың қолдаушы әсері ескерілсе.

2) 1 Тармағы бойынша (а) тәсілін қолданған кезде жеке қатаңдық қырының көтергіш қасиеті орталықтан тыс қысу болған кездегі көтергіш қасиеті ретінде қабылдануы мүмкін. Орнықтылық бойынша есептік көтергіш қасиеті  $N_{b,Rd}$  мына формуламен анықталады

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (5.72)$$

мұндағы  $A_{eff}$  - қатаңдық қырының есептік көлденең қима ауданы.

Төмендетуші коэффициентті  $\chi$  қиманың пішініне байланыссыз орнықтылық жойылуының  $s$  қисығын пайдаланумен бункердің қабырғасына перпендикуляр (шеңбер оське қатысты) орнықтылық жойылуының иілуші түрі үшін 1993-1-1 ҚР ҚН EN бойынша анықтау қажет (жетілмегендіктер коэффициенті  $\alpha = 0,49$ ). Төмендетуші коэффициентті  $\chi$  анықтау үшін қолданылатын қысылған тіреудің есептік ұзындығы көршілес сақиналы қатандық қырлары арасындағы қашықтыққа тең деп алынады.

3) Егер қабырғамен жасалатын орнықтылық жойылуынан қатандық қырының берік бекітілуі есепке алынса, келесі шарттар орындалуы тиіс:

а) берік бекітуді қамтамасыз ететін қабырға бөлігінің ұзындығы қырларда қабырғаның топсалы бекітілуімен, есептік қырға жанасатын екі қатандық қырлары арасында қабырғаның ұзындығына тең болуы тиіс (1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.5 Суретін қараңыз);

б) сақталатын сусымалы материалдың ілінісу күшінің нәтижесіндегі мүмкін қатандық есепте ескерілуі тиіс.

4) Егер неғұрлым дәл сандық есептеулер орындалмаса, орнықтылық жойылуының шекті күшін (көтергіш қасиеті)  $N_{b,Rd}$  келесі формулалар бойынша екі мәннен ең кіші ретінде, барлық деңгейлерде көлденең қима бойынша қысу кернеулерінің біркелкіліксіздігіне қарай анықтау қажет:

$$N_{b,Rd} = 2 \cdot \frac{\sqrt{E I_y \cdot K}}{\gamma_{M1}} \quad (5.73)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (5.74)$$

мұндағы  $E I_y$  - қабырға жазығынан иілу кезінде қатандық қырының иілуші қатандығы ( $\text{Нмм}^2$ );

$K$  – тік қатандық қырлары арасындағы аралықта табақтық қаптаудың иілуші қатандығы (қабырға иіктігінің мм- не Н/мм) (8.5 Суретті қараңыз);

$A_{eff}$  - қатандық қырының есептік көлденең қима ауданы.

5)  $K$  қабықша табағының иілуші қатандығы келесі мүмкіндерге байланысты анықталуы тиіс: қаптау аралығы есептелетін қырға жанасатын қатандық қырлары арасындағы қашықтыққа тең; табақтың шеттері қатандық қырларына еркін сүйенілген (1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.5 Суретті қараңыз).  $K$  мәнін бағалауды мына формуламен орындауға болады:

$$K = k_s \cdot \frac{D_y}{d_s^3} \quad (5.75)$$

мұндағы  $D_y$  - айналма бағытта иілу кезінде табақтық қаптаудың иілуші қатандығы;

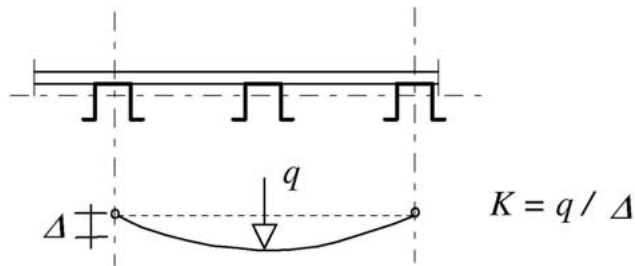
$d_s$  - қатандықтың тік қырлары арасындағы қашықтық.

$k_s = 6$ .

Егер кеңірдектің доға тәрізді немесе синусоидты конфигурациясы болса,  $D_y$  мәнін 4.4.6 Тармағы бойынша қабылдауға болады. Егер басқа қимады кеңірдектер қолданылса айналма бағытта, майысатын иілу кезіндегі қаттылық бастапқы қағидалардың негізінде анықталуы тиіс.

6) Қатандық қырының барлық нүктелерінде орнықтылық бойынша есептік көтергіш қасиеті (шекте күштің мәні) мына шартты қанағаттандыруы тиіс:

$$N_{b,Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (5.76)$$



**5.5 Сурет - Орнықтылық жойылуынан қаптаумен қатаңдық қырын бекіту деңгейін анықтау**

#### **5.3.4.4 Қатаңдық қырларының жергілікті, деформациялық және иілуші айналушы бұзылуы**

Қатаңдық қырларының көтергіш қасиеті жергілікті және деформациялық бұзылулары кезінде, сондай-ақ орнықтылық жойылуының иілуші айналушы пішіні кезінде 1993-1-3 ҚР ҚН EN- ге сәйкес анықталуы тиіс (суықтай майысқан құрылымдар).

#### **5.3.4.5 Сыртқы қысымның, ішінара вакуумның немесе желдің әсері кезінде орнықтылықты жою**

5.3.4.5.1 Баламалы мембраналы және иілуші сәттерді 4.4 Тармағына сәйкес анықтау қажет.

5.3.4.5.2 Сақиналы және бойлық қатаңдық қырларының иілу кезіндегі және созу кезіндегі параметрлері, сондай-ақ сыртқа бағытталған қабықша қабырғасының орта бетіне қатысты ортасының жылжу эксцентриситеті қатаңдық қырлары арасындағы  $d_s$  қашықтықтың негізінде анықталуы тиіс.

5.3.4.5.3 Көлденең жазықтықта  $d_s$  қатаңдық қырларының арасындағы қашықтық мына формуламен анықталатын  $d_s$  мәнінен аспауы тиіс:

$$d_{s,max} = k_{d\theta} \cdot \left( \frac{r^2 \cdot D_y}{C_y} \right)^{0.25} \quad (5.77)$$

мұндағы  $D_y$  - қаптаудағы ең жұқа табақтың, кеңірдектеріне параллель ен бірлігіне иілуші қатаңдық;

$C_y$  - қаптаудағы ең жұқа табақтың, кеңірдектеріне параллель ен бірлігіне созылу кезіндегі қатаңдық;

$r$  - цилиндрдың радиусы.

$k_{d\theta} = 7,4$ .

5.3.4.5.4 Біркелкі ішкі қысым үшін орнықтылық жойылуының шекті кернеулері  $p_{n,Rcru}$  шеңбер толқындық санға  $j$  қатысты келесі ұғымды минималдау арқылы анықталуы тиіс (шеңбер бойынша орнықтылық жойылуының толқындар саны):

$$p_{n,Rcru} = \frac{1}{r \cdot j^2} \cdot \left( A_1 + \frac{A_2}{A_3} \right) \quad (5.78)$$

$$A_1 = j^4 \cdot [\omega^4 \cdot C_{44} + 2 \cdot \omega^2 \cdot (C_{45} + C_{66}) + C_{55}] + C_{22} + 2 \cdot j^2 \cdot C_{25} \quad (5.79)$$

кезінде:

$$A_2 = 2 \cdot \omega^2 \cdot (C_{12} + C_{33}) \cdot (C_{22} + j^2 \cdot C_{25}) \cdot (C_{12} + j^2 \cdot \omega^2 \cdot C_{14}) - (\omega^2 \cdot C_{11} + C_{33}) \times \quad (5.80)$$

$$\times (C_{22} + j^2 C_{25})^2 - \omega^2 \cdot (C_{22} + \omega^2 \cdot C_{33}) \cdot (C_{12} + j^2 \cdot \omega^2 \cdot C_{14})^2$$

$$A_3 = (\omega^2 \cdot C_{11} + C_{33}) \cdot (C_{22} + C_{25} + \omega^2 \cdot C_{33}) - \omega^2 \cdot (C_{12} + C_{33})^2 \quad (5.81)$$

кезінде:

$$C_{11} = C_\phi + \frac{E \cdot A_s}{d_s} \quad C_{12} = v \cdot \sqrt{C_\phi \cdot C_\theta}$$

$$C_{14} = \frac{e_s \cdot E \cdot A_s}{r \cdot d_s} \quad C_{22} = C_\theta + \frac{E \cdot A_r}{d_r}$$

$$C_{25} = \frac{e_r \cdot E \cdot A_r}{r \cdot d_r} \quad C_{33} = C_{\phi\theta}$$

$$C_{44} = \frac{\left[ D_\phi + \frac{E \cdot I_s}{d_s} + \frac{E \cdot A_s \cdot e_s^2}{d_s} \right]}{r^2} \quad C_{45} = \frac{v \cdot \sqrt{D_\phi \cdot D_\theta}}{r^2}$$

$$C_{55} = \frac{\left[ D_\theta + \frac{E \cdot I_r}{d_r} + \frac{E \cdot A_r \cdot e_r^2}{d_r} \right]}{r^2} \quad C_{66} = \frac{\left[ D_{\phi\theta} + 0.5 \cdot \left( \frac{G \cdot I_{ts}}{d_s} + \frac{G \cdot I_{tr}}{d_r} \right) \right]}{r^2}$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot r}{j \cdot l_i}$$

мұндағы —  $l_i$ ,  $r$ ,  $A_s$ ,  $I_s$ ,  $I_{ts}$ ,  $d_s$ ,  $e_s$ ,  $A_r$ ,  $I_r$ ,  $I_{tr}$ ,  $d_r$  және  $e_r$  1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.3.4.3.3

3 Тармағында анықталған мәндері бар.

5.3.4.5.5 Егер қатандық қырлары немесе табақтық қаптау қабырға биіктігімен өзгерсе, ең әлсіреген учаскені анықтау үшін  $l_i$  орнықтылық жойылуының аймақ ұзындығымен бірнеше мүмкін учаскелерді қарастыру қажет. Бұнымен қоса орнықтылық жойылуы учаскесінің жоғарғы шегі ең жұқа табақтық қаптаумен аймақтың ұшында болатынын ескеру қажет.

ЕСКЕРТПЕ Егер неғұрлым қалың қаптауымен аймақ ең жұқа қаптаумен аймақтан жоғары орналасса, орнықтылық жойылуының ықтимал учаскесінің жоғарғы шегі не ең жұқа аймақтың төбесінде, немесе қабырғаның төбесінде қалуы мүмкін.

5.3.4.5.6 Егер неғұрлым дәл есептеулер орындалмаса, жоғарыда келтірілген есептеулерде алынған қалыңдық табақтың қаптаудың ең жұқа бөлігінің қалыңдығына қабылдануы тиіс.

5.3.4.5.7 Егер бункердің қақпағы болмаса және онда желдің әсерінен орнықтылықты жою мүмкін болса, жоғарыда келтірілген есептеулерде алынған қысымның мәні 0,6 коэффициентіне көбейту арқылы азайтылуы тиіс.

5.3.4.5.8 Қабырға үшін орнықтылық жойылуының есептік кернеулері  $C_b = C_w = 1,0$  және  $\alpha_n = 0,5$  кезінде 1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.3.2.5 Тармағында келтірілген әдістеме бойынша анықталуы тиіс, орнықтылық жойылуының  $p_{n,Rcr}$  шекті мәні 1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.3.4.5.4 Тармағынан алынуы тиіс.

#### **5.3.4.6 Мембраналы жанама кернеулер**

Мембраналы жанама кернеулердің әсері кезінде қабықшаның орнықтылығы 1993 -1-6 ҚР ҚН EN 8.5 Тармақ ережелерін қолданумен анықталуы тиіс.

#### **5.3.5 Сақиналы қатандық қырларымен тік кеңірдектелген қабырғалар**

##### **5.3.5.1 Жалпы ереже**

5.3.5.1.1 Егер цилиндр қабырға тігінен орналасқан кеңірдекпен кеңірдектелген табактан дайындалған болса, келесі екі шарт орындалуы тиіс:

- а) кеңірдектелген қабырға көлденең күштерді қабылдамайды деп алынады.
- б) кеңірдектелген табактық қаптаудың аралығы көршілес сақиналы қырлардың орталары арасындағы қашықтық болып табылады, бұнымен қоса қаптау кесілмеген болып алынады.

5.3.5.1.2 Қаптау бөліктерінің жалғаулары өзара иілу кезінде есептеуде қабылданған қаптаудың келісілмеушілігін қамтамасыз ететіндей есептелуі тиіс.

5.3.5.1.3 Сусымалы қатты материалдың қабырғаға үйкелу күшінің әсерімен туындайтын қабырғадағы осьтік қысу күшін есептеу кезінде кеңірдек профилінің пішінін ескерумен, бункердің толық шеңбері ескерілуі тиіс.

5.3.5.1.4 Егер кеңірдектелген қаптау базада тірек бекітуге дейін жетсе, радиусты бекітумен шекаралық жағдайлардың болжамында бекіту жанында қаптаудың жергілікті икемділігі ескерілуі тиіс.

5.3.5.1.5 Есептік бірдей әрекет етуші кернеулерді және көтергіш қасиетті анықтау, сондай-ақ көтергіш қасиетті тексеруді орындау 5.3.2 Тармағына сәйкес, бірақ 5.3.5.2 – 5.3.5.5 Тармақтарында баяндалған қосымша ережелерді ескерумен анықталуы тиіс.

##### **5.3.5.2 Илемдік бойынша шекті күй**

5.3.5.2.1 Илемдік бойынша шекті күйді тексерген кезде кеңірдектелген қабырға жазық айналма күштерді қабылдамайды деп алынады.

5.3.5.2.2 Сақиналы қатандық қырлары арасындағы қашықтық сақиналарды орнату жерлеріндегі қабырға кесілмейтін деген болжамға сүйеніп, кеңірдектелген кескіннің көлденең қимасының иілуіне есептің негізінде, және әр түрлі мөлшерлері бар сақиналы қырлардың тарамдалған әр түрлі деформацияларын ескерумен анықталады. Иілуден кернеулер осьтік қысу кезінде орнықтылықты тексеру кезінде осьтік қысудан кернеумен қосылуы тиіс.

ЕСКЕРТПЕ Тік жазықтықта иілуге қаптауды есептеуді қаптауды сақиналарды орнату жерлерінде берік тіреулерге кесілмейтін арқалық ретінде қарастыра отырып орындауға болады. Әрбір тіреудің сұйықтығы тарамдалған жүктемелердің әсері кезінде сақинаның қатандығы бойынша анықталады.

5.3.5.2.3 Көлденең күштерді қабылдауға есептелген сақиналы қатаңдық қырларының мөлшерлері қырдың қимасына байланысты 1993-1-1 ҚР ҚН EN немесе 1993-1-3 ҚР ҚН EN талаптарына сәйкес келуі тиіс.

#### **5.3.5.3 Осы тік қысу кезінде орнықтылықты жою**

Қабырға иілуіндегі орнықтылық жойылуының шекті кернеулері 1993-1-3 ҚР ҚН EN ережелерін қолданумен анықталуы тиіс (суықтай бүгілген кескіндер үшін). Кеңірдектелген қаптаудың көлденең қимасы сақиналы қатаңдық қырлары арасындағы тіреудің қимасы ретінде қарастырылуы тиіс. Тіреудің есептік ұзындығын көршілес сақиналардың көлденең қимасының ауырлық орталықтары арасындағы қашықтықтан кем алмау қажет.

#### **5.3.5.4 Сыртқы қысымнан, ішінара вакуумнан немесе желден орнықтылықтың жойылуы**

Сыртқы қысымның әсері кезінде есептік расчетная көтергіш қасиеті көлденең кеңірдектелген бункерлердегідей (1993-4-1 ҚР ҚН EN 5.3.4.5 Тармағын қараңыз), бірақ 1993-4-1 ҚР ҚН EN 4.4.7 Тармағында белгіленгендей кеңірдектің бағдарлануының өзгерісін ескерумен анықталуы тиіс.

#### **5.3.5.5 Мембраналы жанама кернеулер**

Мембраналы жанама кернеулердің әсері кезінде көтергіш қасиеті көлденең кеңірдектерімен (5.3.4.6 Тармақты қараңыз) бункерлердегідей анықталуы тиіс.

1 МЫСАЛ Бункердің изотропты қабырғасын есептеу

1 Бастапқы деректер

1.1 Бункердің параметрлері

Радиусы  $r = 2,25\text{ м}$ , құйғыш конусының төбесіндегі жарты бұрыш  $\beta = 30^\circ$ ; цилиндр бөліктің биіктігі  $h_c = 6,5\text{ м}$ , бункер диаметрі  $d_c = 2 \cdot r = 2 \times 2,25 = 4,5\text{ м}$ . Бункердің сұлбасы 1 Суретте келтіріледі.

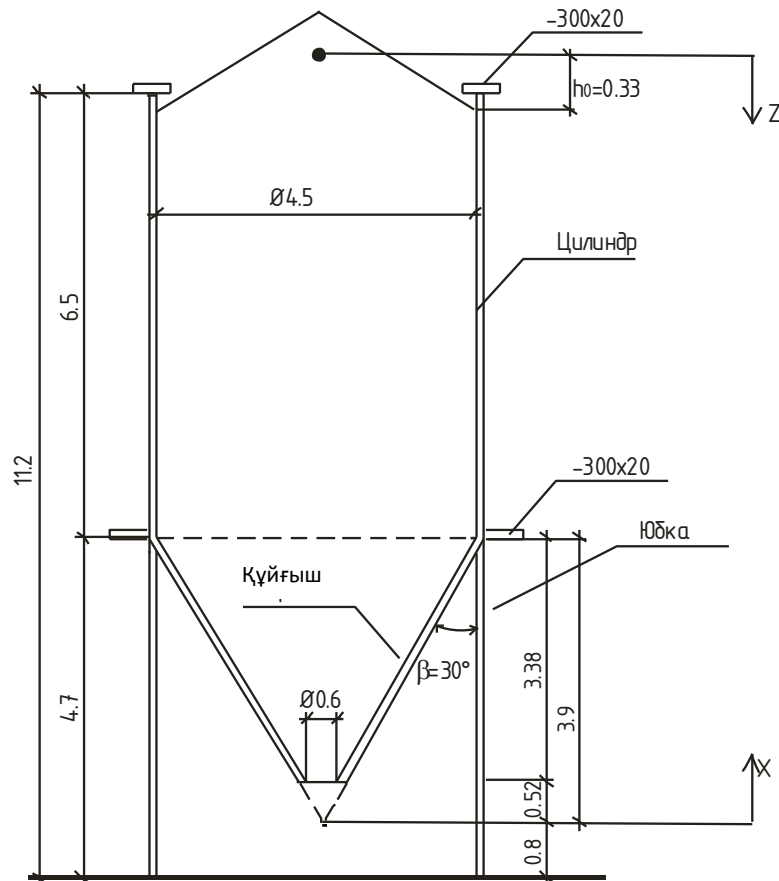
Бункердің ішкі көлденең қимасының ауданы  $A = \pi \cdot r^2 = 3,14 \times 2,25^2 = 15,904\text{ м}^2$ .

Силостың көлденең қимасының периметрі  $U = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \times 3,14 \times 2,25 = 14,137\text{ м}$ .

Толтыру асимметриясының коэффициенті  $e_f = 0,1 \cdot d_c = 0,1 \times 4,5 = 0,45$ .

Шығыс тесіктің асимметрия коэффициенті  $e_0 = 0 \cdot d_c = 0$ .

Бункер құрылымдарының материалы  $f_y = \delta_T = 235\text{ Н/мм}^2$  (МПа) аққыштық шегімен және  $f_u = \delta_B = 360\text{ Н/мм}^2$  (МПа) уақыттық кедергілесумен МемСТ 27772-88 бойынша С236 болат.



1 Сурет – Бункердің сұлбасы

## 1.2 Бункердің сипаттамалары

- көлемі 124 м<sup>3</sup>;
- сыйымдылығы – 205 т;
- зардаптар тобы – 1993-4-1 ҚР ҚН EN бойынша 2 ;
- бункер – о 1991-4 ҚР ҚН EN бойынша орта икемділікті;
- жауапкершілік тобы – 1991-4 ҚР ҚН EN бойынша 2.

## 2 Жүктемелер жинау

## 2.1 Жүктемелерді есептеу шарттары:

а) Түсірілетін материалдың ағыны ішінде болатындықтан – тік қабырғаларға түсіру қысымын ескермейміз (ҚР ҚН EN 1991-4 3.3 (4) Тармағы). ҚР ҚН EN 1991-4 5.3.2.1(3),(4) Тармағы бойынша жүк түсірі қысымы (ҚР ҚН EN 1991-4 5.82 және 5.83 Формула):

$$p_{he} = C_h \cdot p_{hf} ;$$

$$p_{we} = C_w \cdot p_{wf} .$$

б) Түсіру симметриялы – толтыру эксцентриситетін ескермейміз.

в) Түсіру тесігі симметриялы – түсіру эксцентриситетін ескермейміз.

г) Силосқа сүйенетін жабдық орнатылмаған.

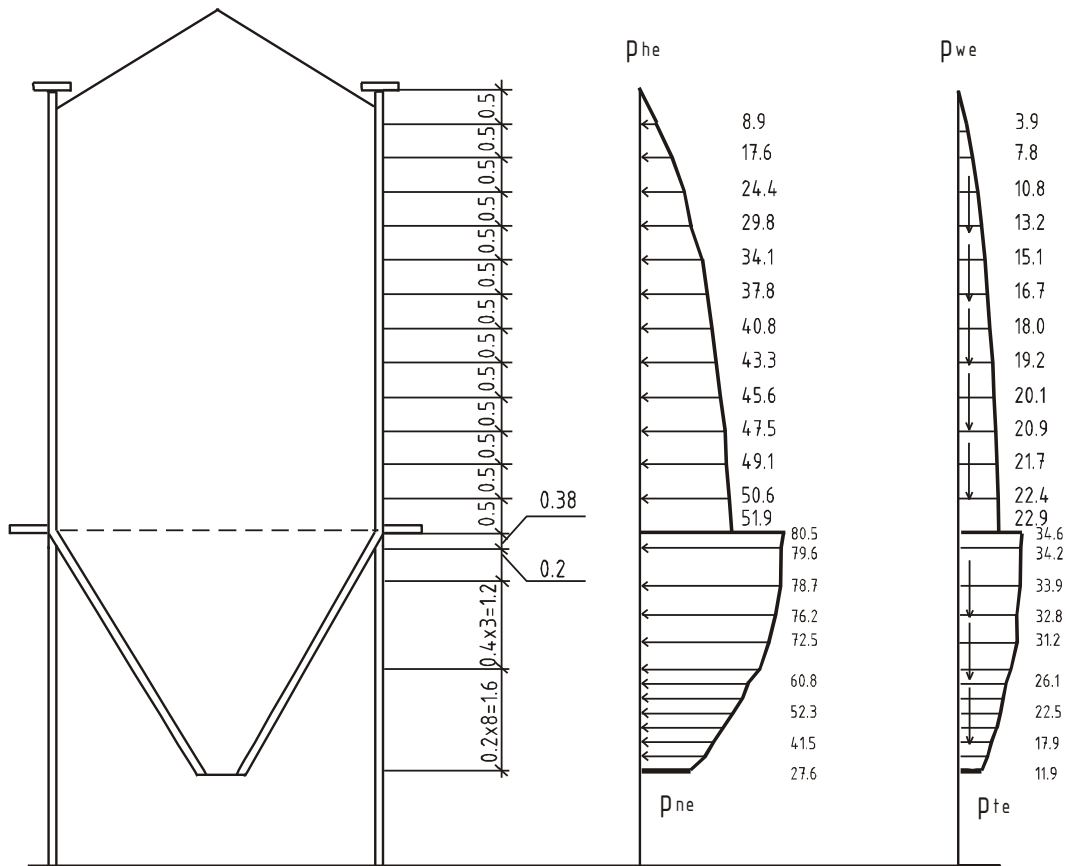
д) Бункер жайдан тыс орнаалқан – желдің қысымын ескереміз.

е) Құйғыш түрі – домалақ.

## 2.2 Қысымдарды есептеу

Қалыпты және жанама қысымдарды есептеу 5 жүктеме режимдері үшін 1991-4 ҚР ҚН EN бойынша орындалған. Ең үлкен қысымдарды цилиндр бөлік пен құйғыш үшін сәйкесінше, 1 және 3 режимдері жасайды. Қысымдарды есептеу нәтижелері 2 Суретте және 1 мен 2 Кестелерінде

берілген, бункер 2 жауапкершілікті топтан болғандықтан, 1991-4 ҚР ҚН EN 5.2.3 Тармағы бойынша бүйірлік жергілікті жүктеме ескерілген.



2 Сурет– Қабырға мен құйғышқа есептік қысым (жүктеме режим 1)

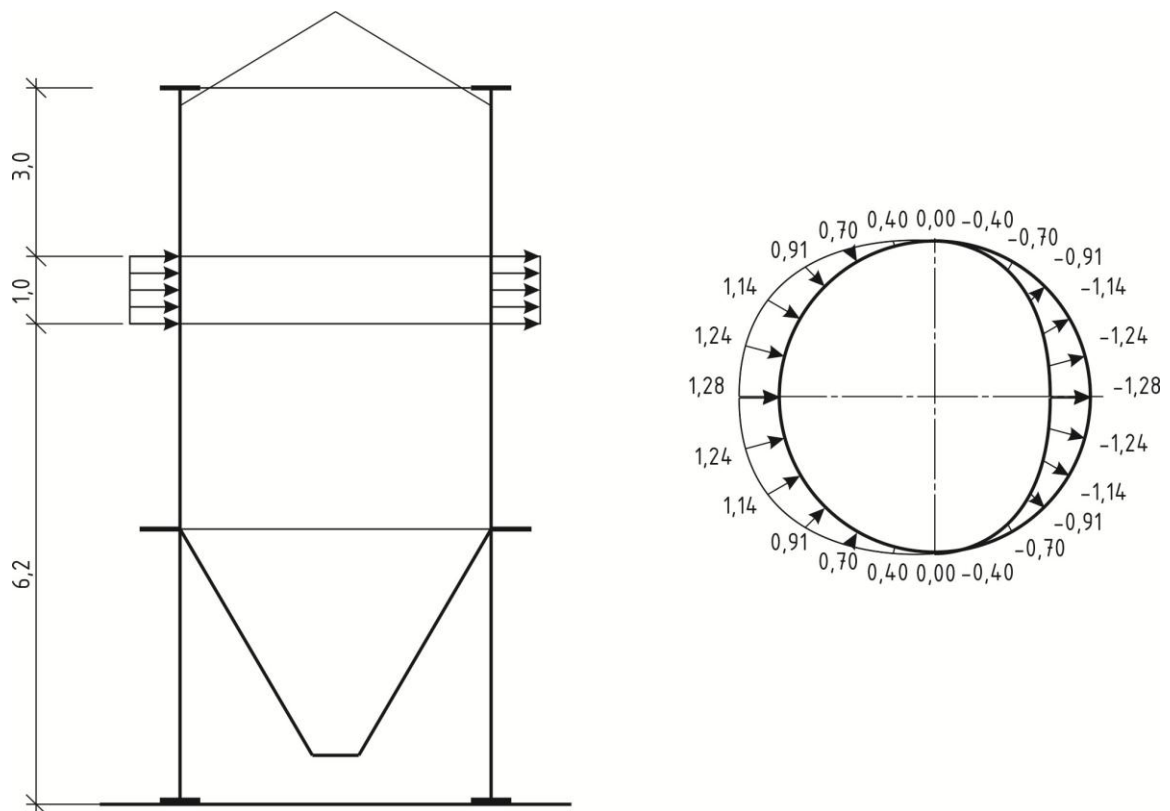
1 Кесте– Бункер қабырғасына қысымның сипаттамалық мәндері , кПа

		Цилиндрдың жоғарғы шетінен қашықтық							
Құр.	Қысым	0,50	1,50	2,50	3,50	4,00	5,00	6,00	6,50
Жүктеме режим 1									
2	Phe	5,93	16,25	22,76	27,18	28,89	31,64	33,73	34,59
	Pwe	2,62	7,19	10,06	12,02	12,78	13,99	14,91	15,30
Жүктеме режим 3									
2	Phe	4,26	12,51	18,34	22,65	24,40	27,32	29,64	30,63
	Pwe	1,89	5,53	8,11	10,01	10,79	12,08	13,11	13,54



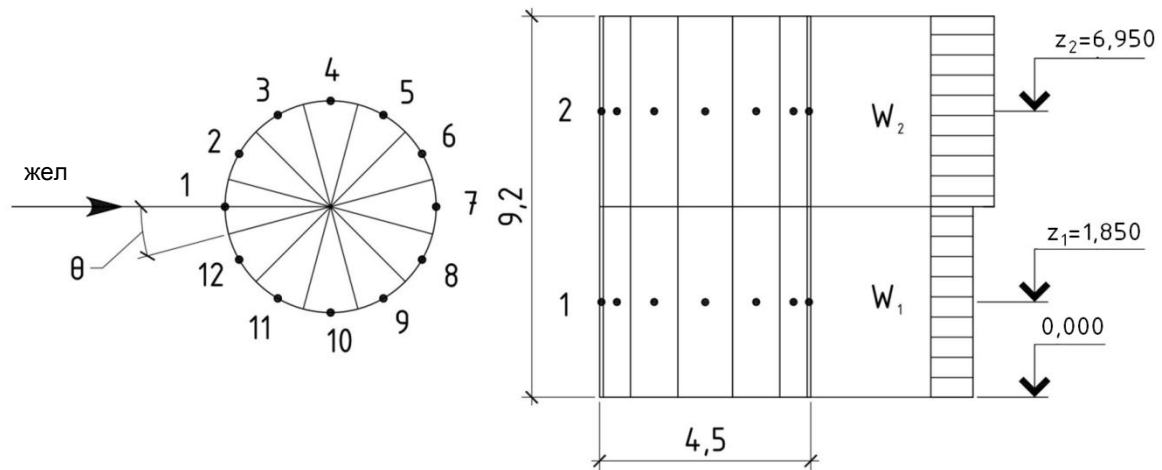
2 Кесте – Бункер қабырғасына қысымның сипаттамалық мәндері , кПа

		Құйғыш төменінен қашықтық							
Құр.	Қысым	0,00	0,40	0,80	1,00	1,60	2,00	2,80	3,38
		Жүктеме режим 1							
2	Pne	18,41	27,69	34,89	37,89	44,96	48,34	52,49	53,65
	Pte	7,92	11,91	15,00	16,29	19,33	20,78	22,57	23,06
		Жүктеме режим 3							
2	Pne	23,37	35,56	45,27	49,42	59,60	64,79	72,09	75,20
	Pte	10,05	15,29	19,46	21,25	25,62	27,85	30,99	32,33

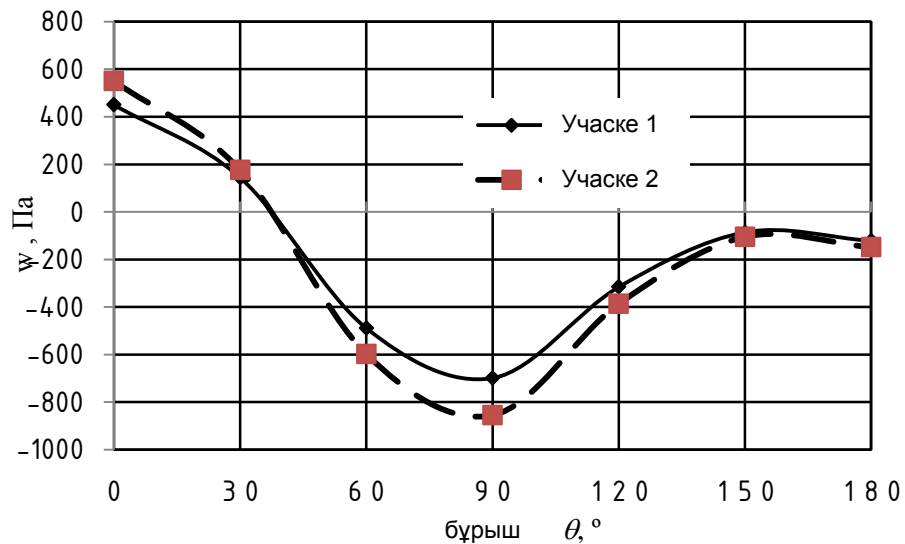


3 Сурет – Еспетік жартылай тегіс бетті жүктің сұлбасы, кПа

2.2.3 Желдік жүк ҚР ҚН EN 1993-4-1 С Қосымшасы бойынша анықталады. 4,5 Суретте желдің жүктің мағынасы және қосымша сұлбасы



4 Сурет – Желдік жүктің қосымша сұлбасы



5 Сурет – бункердің шеңбері бойынша желдік жүктің сипаттама мағынасы

1.3 Сақталатын сусымалы материалдың қасиеттері.

1.3.1 Материалдың сипаттамалары.

1.3.1.1 Бункерді толтыру материалы– цемент.

1.3.1.2 Материалдың сипаттамалары EN 1991-4 ҚР ҚН EN-ң Е Қосымшасы бойынша алынған.

1.3.1.3 Көлемдік салмағы:

– орта мәні  $\gamma_1 = 13 \text{ кН/м}^3$ ;

– жоғарғы мәні  $\gamma_u = 16 \text{ кН/м}^3$ .

1.3.1.4 Табиғи қисаю бұрышы  $\phi_r = 24^\circ$ .

1.3.1.5 Ішкі сүйкелу бұрышы:

– сипаттамалық мәні  $\phi_{im} = 30^\circ$ ;

– өту коэффициенті  $a_\phi = 1,22$ .

1.3.1.6 Бүйірлік қысым коэффициенті:

– сипаттамалық мәні  $K_m = 0,54$ ;

– өту коэффициенті  $a_K = 1,2$ .

1.3.1.7 Сүйкелу коэффициенті:

– сипаттамалық мәні  $\mu_m = 0,46$ ;

– өту коэффициенті  $a_\mu = 1,07$ .

1.3.1.8 Бүйірлік жүктеменің әсер ету коэффициенті  $C_{op} = 0,5$ .

1.3.2 1991-4 ҚР ҚН EN бойынша әр түрлі жүктеу режимдері үшін материал параметрлерінің сипаттамалық мәні.

1991-4 ҚР ҚН EN 3.1 Кестесіне сәйкес сипаттамалардың әр түрлі есептік мәндерімен сусымалы материалдың әсер етуінің 5 жүктеме режимдері қабылданған

1.3.2.1 Жүктеме режим 1.

Тік қабырғаға минималды қалыпты қысым

$$\mu_1 = \frac{\mu_m}{a_\mu} = \frac{0,46}{1,07} = 0,43$$

$$K_1 = K_m \cdot a_K = 0,54 \times 1,2 = 0,648$$

$$\phi_{i1} = \frac{\phi_{im}}{a_\phi} = \frac{30}{1,22} = 24,59^\circ$$

1.3.2.2 Жүктеме режим 2.

Тік қабырғаға максималды сүйкелу күштері

$$\mu_2 = \mu_m \cdot a_\mu = 0,46 \times 1,07 = 0,492$$

$$K_2 = K_m \cdot a_K = 0,54 \times 1,2 = 0,648$$

$$\phi_{i2} = \frac{\phi_{im}}{a_\phi} = \frac{30}{1,22} = 24,59^\circ$$

1.3.2.3 Жүктеме режим 3.

Құйғышқа максималды тік қысым

$$\mu_3 = \frac{\mu_m}{a_\mu} = \frac{0,46}{1,07} = 0,43$$

$$K_3 = \frac{K_m}{a_K} = \frac{0,54}{1,2} = 0,45$$

$$\phi_{i3} = \phi_{im} \cdot a_\phi = 30 \times 1,22 = 36,6^\circ$$

1.3.2.4 Жүктеме режим 4.

Толтырылған бункерде құйғыш қабырғасына максималды қысым

$$\mu_4 = \mu_m \cdot a_\mu = 0,46 \times 1,07 = 0,492$$

$$K_4 = \frac{K_m}{a_K} = \frac{0,54}{1,2} = 0,45$$

$$\phi_{i4} = \frac{\phi_{im}}{a_\phi} = \frac{30}{1,22} = 24,59^\circ$$

1.3.2.5 Жүктеме режим 5.

Толтырылған бункерді босатқан кезде құйғыш қабырғасына максималды қысым

$$\mu_5 = \frac{\mu_m}{a_\mu} = \frac{0,46}{1,07} = 0,43$$

$$K_5 = K_m \cdot a_K = 0,54 \times 1,2 = 0,648$$

$$\phi_{i5} = \phi_{im} \cdot a_\phi = 30 \times 1,22 = 36,6^\circ$$

1.3.2.6 Барлық есептік жағдайлар үшін көлемдік салмағы максималды деп алынады.

2 Жүктемелер жинау

2.1 Жүктемелерді есептеу шарттары:

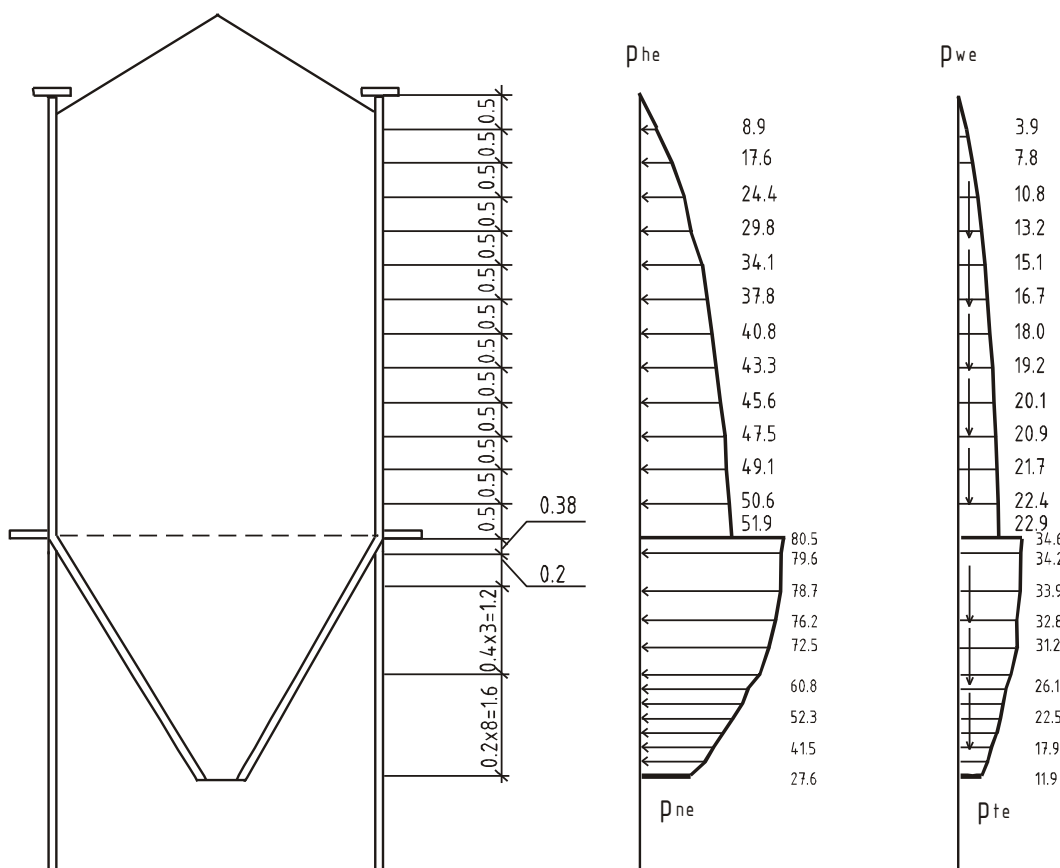
а) Түсірілетін материалдың ағыны ішінде болатындықтан – тік қабырғаларға түсіру қысымын ескермейміз.

б) Түсіру симметриялы– толтыру эксцентриситетін ескермейміз.

- в) Түсіру тесігі симметриялы – түсіру эксцентриситетін ескермейміз.
- г) Силосқа сүйенетін жабдық орнатылмаған.
- д) Бункер жайдан тыс орнаалсаң – желдің қысыны ескереміз.
- е) Құйғыш түрі – домалақ.

## 2.2 Қысымдарды есептеу

Қалыпты және жанама қысымдарды есептеу 5 жүктеме режимдері үшін 1991-4 ҚР ҚН ЕН бойынша орындалған. Ең үлкен қысымдарды цилиндр бөлік пен құйғыш үшін сәйкесінше, 1 және 3 режимдері жасайды. Қысымдарды есептеу нәтижелері 2 Суретте және 1 мен 2 Кестелерінде берілген, бункер 2 жауапкершілікті топтан болғандықтан, 1991-4 ҚР ҚН ЕН 5.2.3 Тармағы бойынша бүйірлік жергілікті жүктеме ескерілген.



2 Сурет– Қабырға мен құйғышқа есептік қысым (жүктеме режим 1)

1 Кесте– Бункер қабырғасына қысымның сипаттамалық мәндері , кПа

		Цилиндрдың жоғарғы шетінен қашықтық							
Құр.	Қысым	0,50	1,50	2,50	3,50	4,00	5,00	6,00	6,50
		Жүктеме режим 1							
2	Phe	5,93	16,25	22,76	27,18	28,89	31,64	33,73	34,59
	Pwe	2,62	7,19	10,06	12,02	12,78	13,99	14,91	15,30
		Жүктеме режим 3							
2	Phe	4,26	12,51	18,34	22,65	24,40	27,32	29,64	30,63
	Pwe	1,89	5,53	8,11	10,01	10,79	12,08	13,11	13,54

**2 Кесте – Бункер қабырғасына қысымның сипаттамалық мәндері , кПа**

		Құйғыш төменінен қашықтық							
Құр.	Қысым	0,00	0,40	0,80	1,00	1,60	2,00	2,80	3,38
		Жүктеме режим 1							
2	Pne	18,41	27,69	34,89	37,89	44,96	48,34	52,49	53,65
	Pte	7,92	11,91	15,00	16,29	19,33	20,78	22,57	23,06
		Жүктеме режим 3							
2	Pne	23,37	35,56	45,27	49,42	59,60	64,79	72,09	75,20
	Pte	10,05	15,29	19,46	21,25	25,62	27,85	30,99	32,33

**2.3 Жүктемелердің үйлесуі**

Әсерлердің есептік комбинациялары мен  $\psi_{o,i}$  коэффициенттері 1991-4 ҚР ҚН EN негізінде алынған (3 Кестені қараңыз).  $\gamma_F$  жүктеме бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенттері 1990 ҚР ҚН EN А Қосымшасының негізінде анықталған.

**3 Кесте – Әсерлердің есептік комбинациялары**

Белгі ленуі	Жүктемелер құрамы	Жүктеме түрі	Жүктеме бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенттері $\gamma_F$	$\psi_{o,i}$
D	Сусымалы материалды түсіру	Q1	1,50	—
	Меншікті салмақ	G	1,35	—
	Жел	Q2	1,5	1,0
WF	Жел	Q1	1,5	—
	Меншікті салмақ	G	1,35	—
	Сусымалы материалды толтыру	Q2	1,5	1,0
WE	Жел	Q1	1,50	—
	Меншікті салмақ	G	1,35	—
	Сусымалы материалды толтыру жоқ	Q2	0,0	0,0

ЕСКЕРТПЕ Кестедегі белгілеулер: G – тұрақты жүктеме, Q1 – негізгі ауыспалы жүктеме, Q2 – ілеспе ауыспалы жүктеме (ауыспалы жүктеме 2).

Есептік күш салудың мәні мына формуламен анықталады (6.9б) 1990 ҚР ҚН EN

$$N_p = \gamma_G \cdot N_G + \gamma_{Q1} \cdot N_{Q1} + \gamma_{Q2} \cdot N_{Q2} \cdot \psi_{o,2}$$

мұндағы  $N_G$  – тұрақты жүктемеден күш салу;

$N_{Q1}$  – негізгі ауыспалы жүктемеден күш;

$N_{Q2}$  – ілеспе ауыспалы жүктемеден күш;

$\gamma_G, \gamma_{Q1}, \gamma_{Q2}, \psi_{o,2}$  – жүктемелер бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенттері.

3 Бірдей әрекет етуші кернеулерді есептеу

3.1 Бірдей әрекет етуші кернеулерді анықтау үшін МКЭ қолданумен домалақ бункерді кеңістіктік есептеу

Бункер 1993-4-1 ҚР ҚН ЕН бойынша 2 жауапкершілік тобына жататындықтан, кернеулерді есептеу қабықшалардың сәттік теориясы бойынша сандық әдістермен орындалған. Бункердің есептік сұлбасы өзара 3.7 м (1 Суретті қараңыз) белгісінде жалғанатын, үш құрылымдық элементтерден (цилиндр, құйғыш және юбка) тұратын кеңістіктік жұқа қабырғалы құрылымды ұсынады. Бункер қабықшасы элементтерін модельдеу КЭ 44 қолданумен жүргізілген (ПК Liga-да қабықшаның әмбебап төрт бұрышты соңғы элементі).

–1 үйлесім – «тұрақты + №1 жүктемелер нұсқасы + жартылай үстірт жүктеме + жел».

–2 үйлесім – «тұрақты + 3 жүктемелер нұсқасы + жартылай үстірт жүктеме + жел».

–3 үйлесім – «тұрақты + жел».

Бункер элементтерінде кернеуді анықтау әрбір үйлесім үшін жүргізілген, бұнымен қоса жүктемелер үйлесімдер коэффициенттерімен бірге бір уақытта берілген.

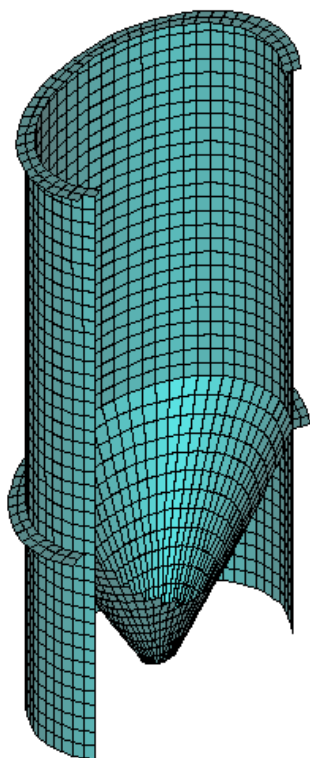
1 үйлесім бойынша бункердің деформацияланған сұлбасы 7 Суретте келтірілген, 2 үйлесім бойынша – 8 Суретте, 3 үйлесім бойынша - 9 Суретте. Бүйірлік жүктеменің әсерінен бункердің деформацияланған сұлбасы 10 Суретте берілген, желдік жүктеме әсерінен – 11 Суретте.

Статикалық есептеу нәтижелері бойынша қалыпты кернеулер мен бункер элементтерінде иілу сәттері алынған.

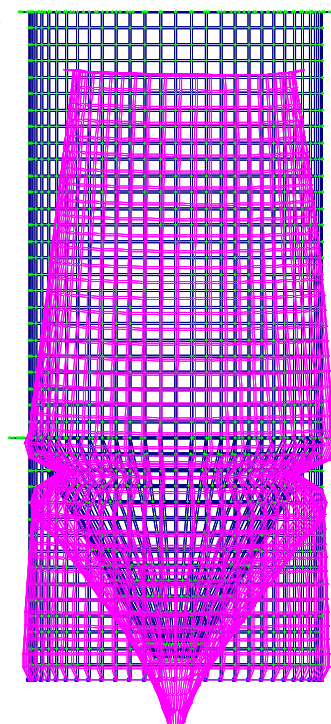
Бірінші есептік үйлесімнің жүктеме әсерінен цилиндр қабырғасына қалыпты сақиналы кернеулердің таралуы - 12а Суретте, екінші есептік үйлесімнен таралу 12б Суретте келтірілген. Бірінші есептік үйлесімнің жүктеме әсерінен цилиндр қабырғасына қалыпты меридиональды кернеулердің таралуы - 13а Суретінде, екінші есептік үйлесімнен таралу - 13б Суретте, үшінші есептік үйлесімнен таралу 13в Суретте келтірілген келтірілген. Статикалық есептеу нәтижелері бойынша қабықшадағы қалыпты кернеулер МПа- мен алынған.

### 3.2 Есептің нәтижесі

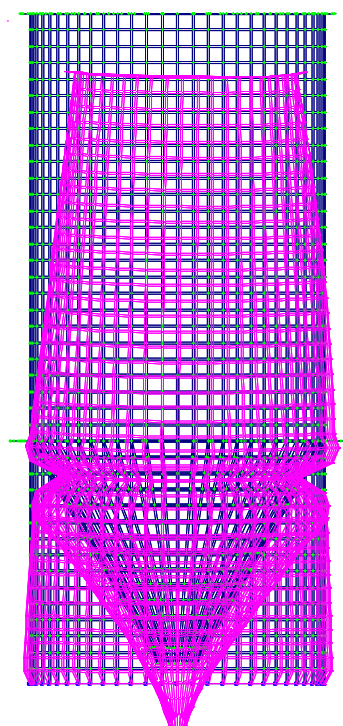
Статикалық есеп кезінде алынған кернеу мәндерінен (кернеулердің мәндері қабырғаның берілген қалыңдықтары үшін МПа- мен алынған) әрі қарай бункер элементтерінің беріктігі мен орнықтылығын тексеру үшін қолданылатын есептік кернеу мәндеріне өту үшін 4, 5 және 6 Кестелері қалыптастырылған. Көрсетілген кестелерге бункер элементтерінің есептік учаскелеріне максималды кернеулер жазылған. Нәтижелері кернеулерден қабықшаның нақты қалыңдығы кезінде қабықша қалыңдығы сантиметріне кернеулер өту арқылы, қабықшаның кернеулі күйінің құраушылары түрінде берілген.



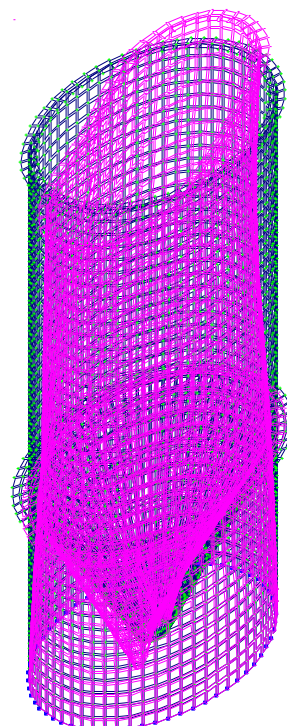
6 Сурет – Бункердің есептік моделінің бөлігі



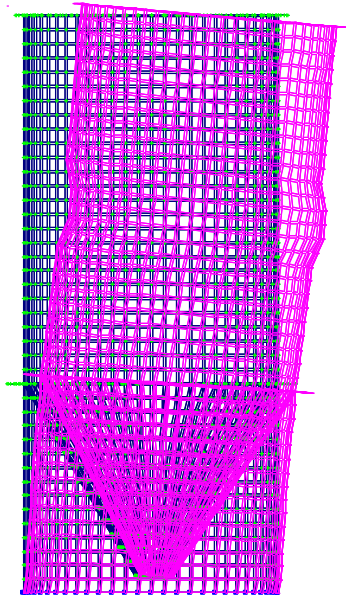
7 Сурет– бункердің жүктемелердің бірінші үйлесуінен деформацияланған күйі



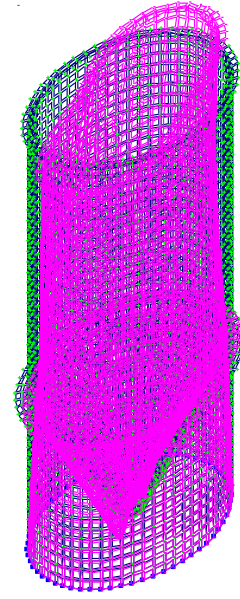
8 Сурет – бункердің жүктемелердің екінші үйлесуінен деформацияланған күйі



9 Сурет – бункердің жүктемелердің үшінші үйлесуінен деформацияланған күйі

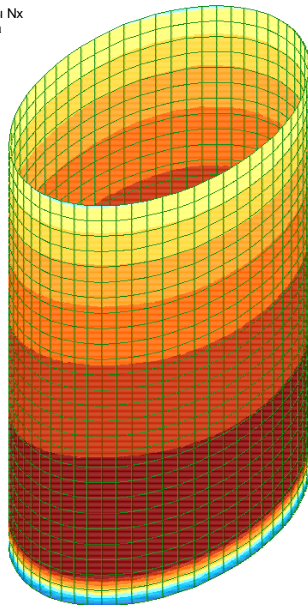
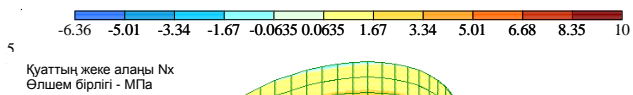


10 Сурет – бункердің «Бүйірлік жүктемеден» деформацияланған күйі

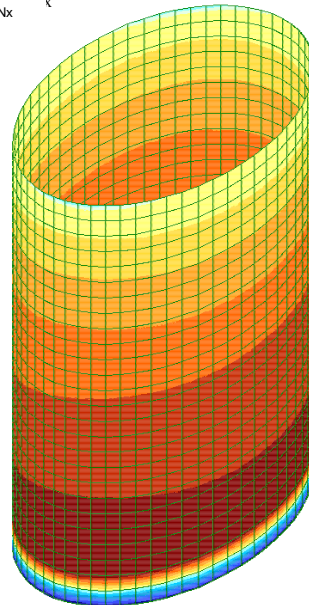
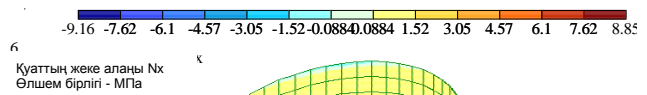


11 Сурет – бункердің желдік жүктемеден деформацияланған күйі (солға- оңға)

а)



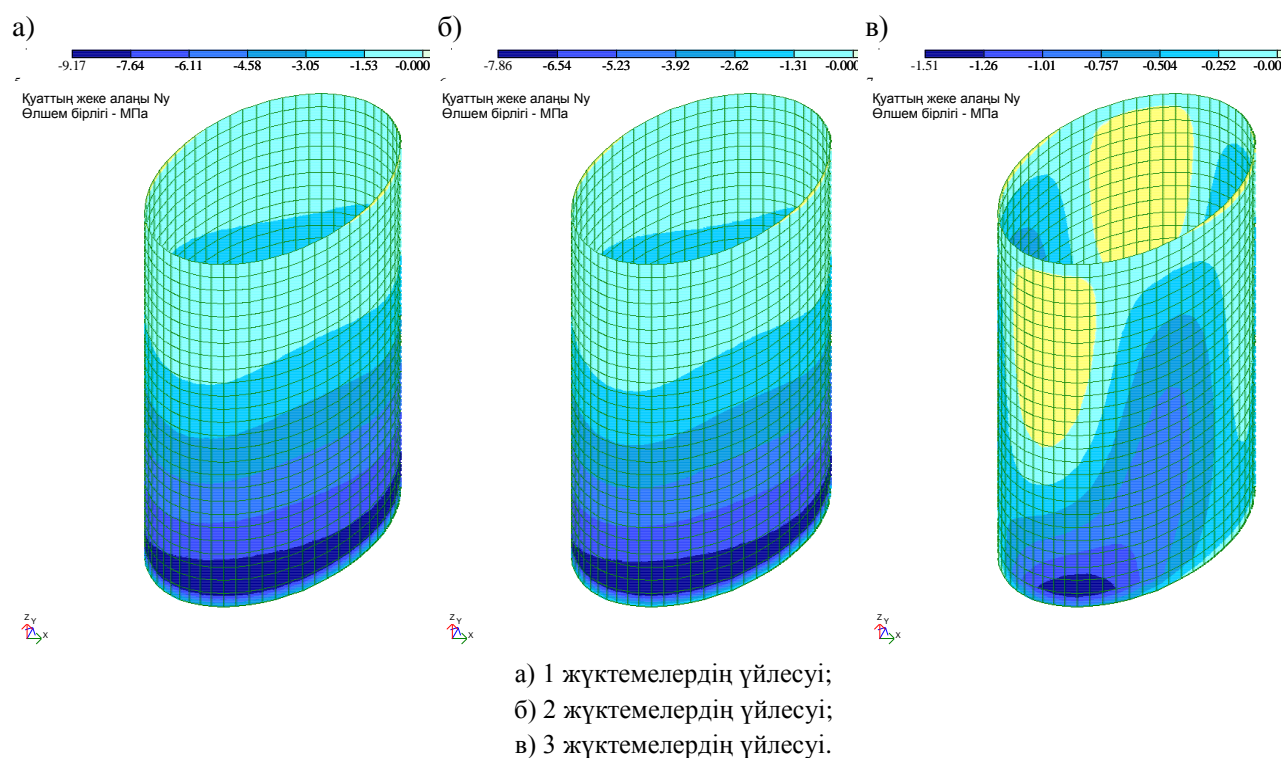
б)



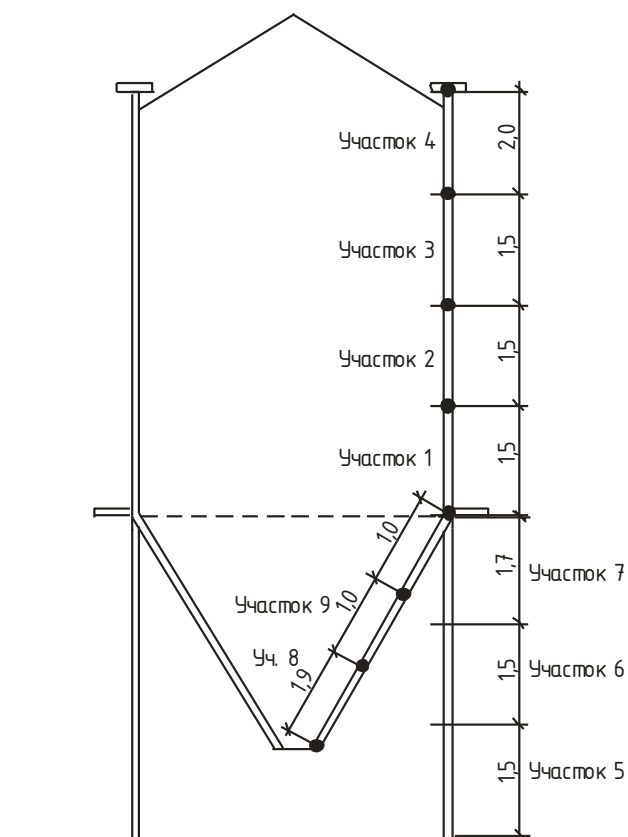
- а) 1 жүктемелердің үйлесуі;  
б) 2 жүктемелердің үйлесуі.

12 Сурет – Цилиндр қабырғасында сақиналы қалыпты кернеулердің таралуы  $p_0$ , МПа





13 Сурет – Цилиндр қабырғасында меридиональды қалыпты кернеулердің таралуы  $\sigma_x$ , МПа:



14 Сурет – Бункер учаскелерінің орналасу сұлбасы

**5 Кесте –2 үйлесім бойынша есептік кернеулер**

учаске №	Кернеуленген күйдің құраушылары					
	$n_{\theta,Ed}$	$m_{\theta,Ed}$	$n_{x,Ed}$	$m_{x,Ed}$	$n_{x\theta,Ed}$	$m_{x\theta,Ed}$
	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см
4	0,521	0,001	0,160	0,001	0,031	$1,3 \times 10^{-4}$
3	0,780	0,001	0,368		0,022	$7,3 \times 10^{-4}$
2	0,928	0,001	0,631	$4,0 \times 10^{-4}$	0,050	$1,1 \times 10^{-4}$
1	1,146	0,011	0,975	0,039	0,069	$3,3 \times 10^{-4}$

**6 Кесте –3 үйлесім бойынша есептік кернеулер**

Учас ке №	Меридиональды кернеу, $n_{x,Ed}$ кН/см
4	0,079
3	0,100
2	0,110
1	0,193

4, 5, 6 Кестелерде келтірілген кернеуленген жағдайдағы құраушылар:

$n_{x,Ed}$  - шеңбер ұзындығының бірлігіне есептік тең әсерлі меридиональды мембраналық қалыпты кернеулер;

$n_{\theta,Ed}$  - қабықша биіктігінің бірлігіне есептік тең әсерлі сақиналы мембраналық кернеулер;

$n_{x\theta,Ed}$  - қабықша енінің бірлігіне есептік тең әсерлі мембраналық жанама кернеулер;

$m_{x,Ed}$  - шеңбер ұзындығының бірлігіне есептік меридиональды июші сәт;

$m_{\theta,Ed}$  - жазық беттегі қабықша биіктігінің бірлігіне есептік сақиналы июші сәт;

$m_{x\theta,Ed}$  - қабықша енінің бірлігіне есептік көлденең айналу сәті;

4 Цилиндрлік қабырғаны есептеу

4.1 Иілімділіктің шекті күйі бойынша есептеу, немесе беріктікке есептеу

4.1.1 Есептеу әдістемесі.

а) Есептеу қабықшалардың сәттік серпінді теориясы бойынша жасалғандықтан (LA), шыққан тең әсерлі негізгі кернеулердің екі өлшемді өрісі тең әсерлі кернеулердің жалған құраушыға айналады (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.2) және (5.3) Формулалары):

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{n_{x,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x,Ed}}{t^2/4}, \quad \sigma_{\theta,Ed} = \frac{n_{\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{\theta,Ed}}{t^2/4}, \quad \tau_{x\theta,Ed} = \frac{n_{x\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x\theta,Ed}}{t^2/4}$$

мұнда  $n_{x,Ed}$  - шеңбер ұзындығының бірлігіне есептік тең әсерлі меридиональды мембраналық қалыпты кернеулер;

$n_{\theta,Ed}$  - қабықша биіктігінің бірлігіне есептік тең әсерлі сақиналы мембраналық кернеулер;

$n_{x\theta,Ed}$  - қабықша енінің бірлігіне есептік тең әсерлі мембраналық жанама кернеулер;

$m_{x,Ed}$  - шеңбер ұзындығының бірлігіне есептік меридиональды июші сәт;

$m_{\theta,Ed}$  - жазық беттегі қабықша биіктігінің бірлігіне есептік сақиналы июші сәт;

$m_{x\theta,Ed}$  - қабықша енінің бірлігіне есептік көлденең айналу сәті.

б) фон Мизестің келтірілген есептік кернеулерді анықтау (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.4) Формуласы):

$$\sigma_{e,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{\theta,Ed} + 3 \cdot \tau_{x\theta,Ed}^2}$$

в) п құралымдар үшін баламалы есептік кедергі (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.5) Формуласы):

$$f_{e,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

мұнда  $\gamma_{M0}$  - иімділіктің шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M0} = 1,00$ .

г) келтірілген тең әсерлі кернеулер бойынша көтергіш қасиетін тексеру (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.10) Формуласы):

$$\sigma_{e,Ed} \leq f_{e,Rd}$$

д) жеке тең әсерлілер бойынша көтергіш қасиеттер

— меридиональды бағыттағы көтергіш қасиеті (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.7) Формуласы):

$$n_{x,Rd} = f_u \cdot t / \gamma_{M2}$$

— айналма бағыттағы көтергіш қасиеті (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.8) Формуласы):

$$n_{\theta,Rd} = f_u \cdot t / \gamma_{M2}$$

— жанама кернеулер бойынша көтергіш қасиеті (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.9) Формуласы):

$$n_{x\theta,Rd} = 0,57 \cdot f_y \cdot t / \gamma_{M0}$$

е) жеке тең әсерлілер бойынша тексеру (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.11) және (5.13) Формулалары):

$$n_{x,Ed} \leq n_{x,Rd}, \quad n_{\theta,Ed} \leq n_{\theta,Rd}, \quad n_{x\theta,Ed} \leq n_{x\theta,Rd}$$

4.1.2 Учаскелерді есептеу.

4.1.2.1 4 учаске

а) тең әсерлі кернеулердің жалған құраушылары:

$$\sigma_{x,Ed4} = \frac{n_{x,Ed4}}{t_4} + \frac{m_{x,Ed4}}{t_4^2/4} = \frac{0,192}{0,6} + \frac{0,01}{0,6^2/4} = 0,431 \text{ кН/см}^2$$

$$\sigma_{\theta,Ed4} = \frac{n_{\theta,Ed4}}{t_4} + \frac{m_{\theta,Ed4}}{t_4^2/4} = \frac{0,658}{0,6} + \frac{0,01}{0,6^2/4} = 1,208 \text{ кН/см}^2$$

$$\tau_{x\theta,Ed4} = \frac{n_{x\theta,Ed4}}{t_4} + \frac{m_{x\theta,Ed4}}{t_4^2/4} = \frac{0,031}{0,6} + \frac{1,3 \times 10^{-3}}{0,6^2/4} = 0,066 \text{ кН/см}^2$$

б) фон Мизестің келтірілген есептік кернеулерді анықтау:

$$\sigma_{e,Ed4} = \sqrt{\sigma_{x,Ed4}^2 + \sigma_{\theta,Ed4}^2 - \sigma_{x,Ed4} \cdot \sigma_{\theta,Ed4} + 3 \cdot \tau_{x\theta,Ed4}^2}$$

$$\sigma_{e,Ed4} = \sqrt{0,431^2 + 1,208^2 - 0,431 \times 1,208 + 3 \times 0,066^2} = 1,06 \text{ кН/см}^2$$

в) дәнекерленген құралымдар үшін баламалы есептік кедергі:

$$f_{e,Rd4} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1} = 23,5 \text{ кН/см}^2$$

мұнда  $\gamma_{M0}$  – иімділіктің шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M0} = 1,00$ ;

$f_y$  - кабықша қабырғасы табақшасының аққыштық шегі,  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

г) келтірілген тең әсерлі кернеулер бойынша көтергіш қасиетін тексеру:

$$\sigma_{e,Ed4} \leq f_{e,Rd4} \quad 1,06 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \quad \text{Шарт орындалды.}$$

д) жеке тең әсерлілер бойынша көтергіш қасиеттер

— меридиональды бағыттағы көтергіш қасиеті:

$$n_{x,Rd4} = \frac{f_u \cdot t_4}{\gamma_{M2}} = 36 \times 0,6 / 1,25 = 17,28 \text{ кН/см}$$

— айналма бағыттағы көтергіш қасиеті:

$$n_{\theta,Rd4} = f_u \cdot \frac{t_4}{\gamma_{M2}} = 36 \times 0,6 / 1,25 = 17,28 \text{ кН/см}$$

— жанама кернеулер бойынша көтергіш қасиеті:

$$n_{x\theta,Rd4} = 0,57 \cdot f_y \cdot \frac{t_4}{\gamma_{M0}} = 0,57 \times 23,5 \times 0,6/1 = 8,04 \text{ кН/см}$$

мұнда  $f_u$  – созылу беріктігінің шегі,  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ ;

$\gamma_{M0}, \gamma_{M2}$  – жеке сенімділік коэффициенттері,  $\gamma_{M0} = 1$ ,  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

е) жеке тең әсерлілер бойынша тексеру:

$$n_{x,Ed4} \leq n_{x,Rd4}, \quad 0,192 < 17,28 \text{ Шарт орындалды}$$

$$n_{\theta,Ed4} \leq n_{\theta,Rd4}, \quad 0,658 < 17,28 \text{ Шарт орындалды}$$

$$n_{x\theta,Ed4} \leq n_{x\theta,Rd4}, \quad 0,031 < 8,04 \text{ Шарт орындалды}$$

#### 4.1.2.2 3 учаске

а) тең әсерлі кернеулердің жалған құраушылары:

$$\sigma_{x,Ed3} = \frac{n_{x,Ed3}}{t_3} + \frac{m_{x,Ed3}}{t_3^2/4} = \frac{0,446}{0,7} + \frac{0,01}{0,7^2/4} = 0,719 \text{ кН/см}^2$$

$$\sigma_{\theta,Ed3} = \frac{n_{\theta,Ed3}}{t_3} + \frac{m_{\theta,Ed3}}{t_3^2/4} = \frac{0,932}{0,7} + \frac{0,01}{0,7^2/4} = 1,413 \text{ кН/см}^2$$

$$\tau_{x\theta,Ed3} = \frac{n_{x\theta,Ed3}}{t_3} + \frac{m_{x\theta,Ed3}}{t_3^2/4} = \frac{0,022}{0,7} + \frac{7,3 \times 10^{-4}}{0,7^2/4} = 0,037 \text{ кН/см}^2$$

б) фон Мизестің келтірілген есептік кернеулерді анықтау:

$$\sigma_{e,Ed3} = \sqrt{\sigma_{x,Ed3}^2 + \sigma_{\theta,Ed3}^2 - \sigma_{x,Ed3} \cdot \sigma_{\theta,Ed3} + 3 \cdot \tau_{x\theta,Ed3}^2}$$

$$\sigma_{e,Ed3} = \sqrt{0,719^2 + 1,413^2 - 0,719 \times 1,413 + 3 \times 0,037^2} = 1,22 \text{ кН/см}^2$$

в) дәнекерленген құралымдар үшін баламалы есептік кедергі:

$$f_{e,Rd3} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1} = 23,5 \text{ кН/см}^2$$

мұнда  $\gamma_{M0}$  – иімділіктің шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M0} = 1,00$ ;

$f_y$  – қабықша қабырғасы табақшасының аққыштық шегі,  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

г) келтірілген тең әсерлі кернеулер бойынша көтергіш қасиетін тексеру:

$$\sigma_{e,Ed3} \leq f_{e,Rd3} \quad 1,22 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \quad \text{Шарт орындалды}$$

д) жеке тең әсерлілер бойынша көтергіш қасиеттер

– меридиональды бағыттағы көтергіш қасиеті:

$$n_{x,Rd3} = f_u \cdot t_3 / \gamma_{M2} = 36 \times 0,7 / 1,25 = 20,16 \text{ кН/см}$$

– айналма бағыттағы көтергіш қасиеті:

$$n_{\theta,Rd3} = \frac{f_u \cdot t_3}{\gamma_{M2}} = 36 \times 0,7 / 1,25 = 20,16 \text{ кН/см}$$

– жанама кернеулер бойынша көтергіш қасиеті:

$$n_{x\theta,Rd3} = 0,57 \cdot f_y \cdot \frac{t_3}{\gamma_{M0}} = 0,57 \times 23,5 \times 0,7/1 = 9,38 \text{ кН/см}$$

мұнда  $f_u$  – созылу беріктігінің шегі,  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ ;

$\gamma_{M0}, \gamma_{M2}$  – жеке сенімділік коэффициенттері,  $\gamma_{M0} = 1$ ,  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

е) жеке тең әсерлілер бойынша тексеру:

$$n_{x,Ed3} \leq n_{x,Rd3}, \quad 0,446 < 20,16 \text{ Шарт орындалды.}$$

$$n_{\theta,Ed3} \leq n_{\theta,Rd3}, \quad 0,932 < 20,16 \text{ Шарт орындалды}$$

$$n_{x\theta,Ed3} \leq n_{x\theta,Rd3}, \quad 0,022 < 9,38 \text{ Шарт орындалды.}$$

#### 4.1.2.3 2 учаске

а) тең әсерлі кернеулердің жалған құраушылары:

$$\sigma_{x,Ed2} = \frac{n_{x,Ed2}}{t_2} + \frac{m_{x,Ed2}}{t_2^2/4} = \frac{0,715}{0,7} + \frac{0,01}{0,7^2/4} = 1,154 \text{ кН/см}^2$$

$$\sigma_{\theta,Ed2} = \frac{n_{\theta,Ed2}}{t_2} + \frac{m_{\theta,Ed2}}{t_2^2/4} = \frac{1,074}{0,7} + \frac{0,01}{0,7^2/4} = 1,616 \text{ кН/см}^2$$

$$\tau_{x\theta,Ed2} = \frac{n_{x\theta,Ed2}}{t_2} + \frac{m_{x\theta,Ed2}}{t_2^2/4} = \frac{0,05}{0,7} + \frac{1,1 \times 10^{-3}}{0,7^2/4} = 0,08 \text{ кН/см}^2$$

б) фон Мизестің келтірілген есептік кернеулерді анықтау:

$$\sigma_{e,Ed2} = \sqrt{\sigma_{x,Ed2}^2 + \sigma_{\theta,Ed2}^2 - \sigma_{x,Ed2} \cdot \sigma_{\theta,Ed2} + 3 \cdot \tau_{x\theta,Ed2}^2}$$

$$\sigma_{e,Ed2} = \sqrt{1,154^2 + 1,616^2 - 1,154 \times 1,616 + 3 \times 0,08^2} = 1,44 \text{ кН/см}^2$$

в) дәнекерленген құралымдар үшін баламалы есептік кедергі:

$$f_{e,Rd2} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1} = 23,5 \text{ кН/см}^2$$

мұнда  $\gamma_{M0}$  – иімділіктің шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M0} = 1,00$ ;

$f_y$  – қабықша қабырғасы табақшасының аққыштық шегі,  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

г) келтірілген тең әсерлі кернеулер бойынша көтергіш қасиетін тексеру:

$$\sigma_{e,Ed2} \leq f_{e,Rd2} \quad 1,44 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \quad \text{Шарт орындалды.}$$

д) жеке тең әсерлілер бойынша көтергіш қасиеттер

— меридиональды бағыттағы көтергіш қасиеті:

$$n_{x,Rd2} = f_u \cdot t_2 / \gamma_{M2} = 36 \times 0,7 / 1,25 = 20,16 \text{ кН/см}$$

— айналма бағыттағы көтергіш қасиеті:

$$n_{\theta,Rd2} = f_u \cdot t_2 / \gamma_{M2} = 36 \times 0,7 / 1,25 = 20,16 \text{ кН/см}$$

— жанама кернеулер бойынша көтергіш қасиеті:

$$n_{x\theta,Rd2} = 0,57 \cdot f_y \cdot t_2 / \gamma_{M0} = 0,57 \times 23,5 \times 0,7 / 1 = 9,38 \text{ кН/см}$$

мұнда  $f_u$  – созылу беріктігінің шегі,  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ ;

$\gamma_{M0}, \gamma_{M2}$  – жеке сенімділік коэффициенттері,  $\gamma_{M0} = 1, \gamma_{M2} = 1,25$ .

е) жеке тең әсерлілер бойынша тексеру:

$$n_{x,Ed2} \leq n_{x,Rd2}, \quad 0,751 < 20,16 \quad \text{Шарт орындалды.}$$

$$n_{\theta,Ed2} \leq n_{\theta,Rd2}, \quad 1,074 < 20,16 \quad \text{Шарт орындалды}$$

$$n_{x\theta,Ed2} \leq n_{x\theta,Rd2}, \quad 0,05 < 9,38 \quad \text{Шарт орындалды.}$$

#### 4.1.2.4 1 учаске

а) тең әсерлі кернеулердің жалған құраушылары:

$$\sigma_{x,Ed1} = \frac{n_{x,Ed1}}{t_1} + \frac{m_{x,Ed1}}{t_1^2/4} = \frac{0,744}{0,8} + \frac{0,08}{0,8^2/4} = 1,43 \text{ кН/см}^2$$

$$\sigma_{\theta,Ed1} = \frac{n_{\theta,Ed1}}{t_1} + \frac{m_{\theta,Ed1}}{t_1^2/4} = \frac{1,258}{0,8} + \frac{0,08}{0,8^2/4} = 2,072 \text{ кН/см}^2$$

$$\tau_{x\theta,Ed1} = \frac{n_{x\theta,Ed1}}{t_1} + \frac{m_{x\theta,Ed1}}{t_1^2/4} = \frac{0,069}{0,8} + \frac{3,3 \times 10^{-3}}{0,8^2/4} = 0,107 \text{ кН/см}^2$$

б) фон Мизестің келтірілген есептік кернеулерді анықтау:

$$\sigma_{e,Ed1} = \sqrt{\sigma_{x,Ed1}^2 + \sigma_{\theta,Ed1}^2 - \sigma_{x,Ed1} \cdot \sigma_{\theta,Ed1} + 3 \cdot \tau_{x\theta,Ed1}^2}$$

$$\sigma_{e,Ed1} = \sqrt{1,43^2 + 2,072^2 - 1,43 \times 2,072 + 3 \times 0,107^2} = 1,84 \text{ кН/см}^2$$

в) дәнекерленген құралымдар үшін баламалы есептік кедергі:

$$f_{e,Rd1} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1} = 23,5 \text{ кН/см}^2$$

мұнда  $\gamma_{M0}$  - иімділіктің шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M0} = 1,00$ ;  
 $f_y$  - қабықша қабырғасы табақшасының аққыштық шегі,  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

г) келтірілген тең әсерлі кернеулер бойынша көтергіш қасиетін тексеру:

$$\sigma_{e,Ed1} \leq f_{e,Rd1} \quad 1,84 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \quad \text{Шарт орындалды}$$

д) жеке тең әсерлілер бойынша көтергіш қасиеттер

- меридиональды бағыттағы көтергіш қасиеті:

$$n_{x,Rd1} = f_u \cdot t_1 / \gamma_{M2} = 36 \times 0,8 / 1,25 = 23,04 \text{ кН/см}$$

- айналма бағыттағы көтергіш қасиеті:

$$n_{\theta,Rd1} = f_u \cdot t_1 / \gamma_{M2} = 36 \times 0,8 / 1,25 = 23,04 \text{ кН/см}$$

- жанама кернеулер бойынша көтергіш қасиеті:

$$n_{x\theta,Rd1} = 0,57 \cdot f_y \cdot t_1 / \gamma_{M0} = 0,57 \times 23,5 \times 0,8 / 1 = 10,72 \text{ кН/см}$$

мұнда  $f_u$  — созылу беріктігінің шегі,  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ ;

$\gamma_{M0}, \gamma_{M2}$  — жеке сенімділік коэффициенттері,  $\gamma_{M0} = 1$ ,  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

е) жеке тең әсерлілер бойынша тексеру:

$$n_{x,Ed1} \leq n_{x,Rd1}, \quad 0,744 < 23,04 \quad \text{Шарт орындалды}$$

$$n_{\theta,Ed4} \leq n_{\theta,Rd4}, \quad 1,258 < 23,04 \quad \text{Шарт орындалды}$$

$$n_{x\theta,Ed4} \leq n_{x\theta,Rd4}, \quad 0,069 < 10,72 \quad \text{Шарт орындалды}$$

4.2 Орнықтылықтың жойылуының шекті күйі бойынша есептеу, немесе орнықтылыққа есептеу

#### 4.2.1 Бастапқы шарттар

Жасауға жіберу сапасы – стандартты, сапа параметрі  $Q = 16$  1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.1 Кестесі бойынша.

Қабықша бойынша қатандықтың сақиналы мен көлденең қырлары – жоқ.

#### 4.2.2 Ішкі қысым болған кезде орнықтылыққа есептеу әдістемесі

а) жетілмегендік амплитудасының репрезентативті мәні  $w_{ok}$  (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.14) Формуласы):

$$w_{ok} = \frac{t}{Q} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}$$

б) жетілмегендік болған кездегі серпінді төмендету коэффициенті  $\alpha_0$  қысым болмаған жағдайда (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.15) Формуласы):

$$\alpha_0 = \frac{0.62}{1 + 1,91 \cdot \psi \cdot \left(\frac{w_{ok}}{t}\right)^{1.44}}$$

мұнда кернеулердің әркелкілік параметрі  $\psi = 1$ , өйткені шеңбер бойынша біркелкі қысу жағдайы бар.

в) жетілмегендік болған кездегі серпінді төмендету және қысым коэффициенті  $\alpha_{pe}$  келесі тәртіпте анықталады

– серпінді кезеңдегі орнықтылықтың жойылудың шекті кернеулері (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.28) Формуласы):

$$\sigma_{x,Rcr} = \frac{E}{\sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot \frac{t}{r} = 0,605 \cdot E \cdot \frac{t}{r}$$

– осы есептеу нүктесіндегі жергілікті ішкі қысымның ең төмен кепілді мәні (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.17) Формуласы):

$$\bar{p}_s = \frac{p_s \cdot r}{t \cdot \sigma_{x,Rcr}}$$

мұнда  $p_s$  - осы есептеу нүктесіндегі жергілікті ішкі қысым 1 Кесте бойынша алынады.

– серпінді төмендету коэффициентінің мәні (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.16) Формуласы)

$$\alpha_{pe} = \alpha_0 + (1 - \alpha_0) \cdot \left( \frac{\bar{p}_s}{\bar{p}_s + \frac{0.3}{\sqrt{\alpha_0}}} \right)$$

г) жетілмегендік болған кездегі иілімді төмендету коэффициенті келесі тәртіпте анықталады:

– қарастырылатын нүктедегі ең үлкен жергілікті қысым, 1 Кесте немесе 2 Сурет бойынша анықталады (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.19) Формуласы):

$$\bar{p}_g = \frac{p_g}{\sigma_{x,Rcr}} \cdot \frac{r}{t}$$

мұнда  $p_g$  - осы есептік нүктедегі жергілікті ішкі қысымның ең үлкен есептік мәні, 1 Кесте бойынша 1,5 коэффициентімен алынады.

– параметр (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.20) Формуласы):

$$s = \left( \frac{1}{400} \right) \cdot \left( \frac{r}{t} \right)$$

– шартты икемділіктің шаршысы (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.21) Формуласы):

$$\bar{\lambda}_x^2 = \frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}}$$

– коэффициенттің мәні (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.18) Формуласы):

$$\alpha_{pp} = \left\{ 1 - \left( \frac{\bar{p}_s}{\bar{\lambda}_x^2} \right)^2 \right\} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{1.12 + s^{3/2}} \right] \cdot \left[ \frac{s^2 + 1.21 \cdot \bar{\lambda}_x^2}{s \cdot (s + 1)} \right]$$

д) бункерде ішкі қысым болғандықтан, жетілмегендік болған кездегі серпінді төмендету коэффициентін  $\alpha$   $\alpha_{pe}$  және  $\alpha_{pp}$ , екі шаманың мәндерінен ең төменгісі сияқты, бірақ  $\alpha_0$  төмен емес алған жөн.

е) орнықтылықты төмендету коэффициенті  $\chi_x$  қабықшаның салыстырмалы икемділігінің функциясы сияқты анықталады  $\lambda_x$  (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.30) және (5.35) Формулалары):

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}}}, \quad \bar{\lambda}_0 = 0.2, \quad \bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}}$$

$$\chi_x = 1 \quad \text{если} \quad \bar{\lambda}_x \leq \bar{\lambda}_0$$

$$\chi_x = 1 - \beta \cdot \left( \frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta \quad \text{если} \quad \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_p$$

$$\chi_x = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_x^2} \quad \text{если} \quad \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}_x$$

Мұнда -  $\beta = 0.6$  және  $\eta = 1.0$ .

ж) орнықтылықтың жойылуының шекті кернеулердің сипатты мәні (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.29) Формуласы):

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x \cdot f_y$$

з) орнықтылық жойылған кезде есептік мембраналық кернеулер (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.36) Формуласы):

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1}$$

мұнда  $\gamma_{M1}$  - орнықтылықтың шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M1} = 1.10$  1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің 5.9.2.2 Тармағы бойынша.

и) қабықша орнықтылығын тексеру (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.37) Формуласы):

$$n_{x,Ed} \leq t \cdot \sigma_{x,Rd}$$

4.2.3 Қабықша учаскелерін есептеу

4.2.3.1 4 учаске

а) жетілмегендік амплитудасының репрезентативті мәні  $w_{ok}$ :

$$w_{ok4} = \frac{t_4}{Q} \cdot \sqrt{\frac{r}{t_4}} = \frac{0,6}{16} \cdot \sqrt{\frac{225}{0,6}} = 0,73 \text{ см}$$

б) жетілмегендік болған кездегі серпінді төмендету коэффициенті  $\alpha_0$  қысым болмаған жағдайда:

$$\alpha_{04} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot \psi \cdot \left(\frac{w_{ok4}}{t_4}\right)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \times 1 \times \left(\frac{0,73}{0,6}\right)^{1,44}} = 0,176$$

мұнда кернеулердің әркелкілік параметрі  $\psi = 1$ , өйткені шеңбер бойынша біркелкі қысу жағдайы бар.

в) жетілмегендік болған кездегі серпінді төмендету және қысым коэффициенті  $\alpha_{pe}$  келесі тәртіпте анықталады:

– серпінді кезеңдегі орнықтылықтың жойылудың шекті кернеулері:

$$\sigma_{x,Rcr4} = \frac{E}{\sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot \frac{t_4}{r} = 0,605 \cdot E \cdot \frac{t_4}{r} = 0,605 \times 2,06 \times 10^4 \times \frac{0,6}{225} = 33,23 \text{ кН/см}^2$$

– осы есептеу нүктесіндегі жергілікті ішкі қысымның ең төмен кепілді мәні:

$$\bar{p}_{s4} = \frac{p_{s4} r}{t_4 \cdot \sigma_{x,Rcr4}} = \frac{23,48 \times 10^{-4} \times 225}{0,6 \times 33,23} = 0,026$$

мұнда  $p_s$  - осы есептеу нүктесіндегі жергілікті ішкі қысым 1 Кесте бойынша алынады,  $p_{s4} = 23,48 \times 10^{-4} \text{ кН/см}^2$ .

– серпінді төмендету коэффициентінің мәні:

$$\alpha_{pe4} = \alpha_{04} + (1 - \alpha_{04}) \cdot \left( \frac{\bar{p}_{s4}}{\bar{p}_{s4} + \frac{0,3}{\sqrt{\alpha_{04}}}} \right) = 0,176 + (1 - 0,176) \times \left( \frac{0,026}{0,026 + \frac{0,3}{\sqrt{0,176}}} \right) = 0,206$$

г) жетілмегендік болған кездегі иілімді төмендету коэффициенті:

– қарастырылатын нүктедегі ең үлкен жергілікті қысым, 1 Кесте немесе 2 Сурет бойынша анықталады,  $p_{g4} = 44,64 \times 10^{-4} \text{ кН/см}$ :

$$\bar{p}_{g4} = \frac{p_{g4}}{\sigma_{x,Rcr4}} \cdot \frac{r}{t_4} = \frac{44,64 \times 10^{-4}}{33,23} \times \frac{225}{0,6} = 0,05$$

– параметр:

$$s_4 = \left( \frac{1}{400} \right) \cdot \left( \frac{r}{t_4} \right) = \left( \frac{1}{400} \right) \times \left( \frac{225}{0,6} \right) = 0,938$$

– шартты икемділіктің шаршысы:

$$\bar{\lambda}_{x4}^2 = \frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr4}} = \frac{23,5}{33,23} = 0,707$$

– коэффициенттің мәні:

$$\alpha_{pp4} = \left\{ 1 - \left( \frac{\bar{p}_{s4}}{\bar{\lambda}_{x4}^2} \right)^2 \right\} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + s_4^{3/2}} \right] \cdot \left[ \frac{s_4^2 + 1,21 \cdot \bar{\lambda}_{x4}^2}{s_4 \cdot (s_4 + 1)} \right]$$



$$\alpha_{pp4} = \left\{ 1 - \left( \frac{0,026}{0,707} \right)^2 \right\} \times \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + 0,938^{3/2}} \right] \times \left[ \frac{0,938^2 + 1,21 \times 0,707}{0,938 \times (0,938 + 1)} \right] = 0,483$$

д) т. к.  $\alpha_{04} < \alpha_{pe} < \alpha_{pp4}$  то  $\alpha_4 = 0,206$ .

е) орнықтылықты төмендету коэффициенті  $\chi_x$  қабықшаның салыстырмалы икемділігінің функциясы сияқты анықталады  $\lambda_x$ :

$$\bar{\lambda}_{x4} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr4}}} = \sqrt{\frac{23,5}{33,23}} = 0,841; \quad \bar{\lambda}_0 = 0,2 \text{ и } \bar{\lambda}_{p4} = \sqrt{\frac{\alpha_4}{1 - \beta}} = \sqrt{\frac{0,206}{1 - 0,6}} = 0,717$$

мұнда -  $\beta = 0,6$ .

$$\text{т. к. } \bar{\lambda}_{p4} \leq \bar{\lambda}_{x4} \text{ то } \chi_{x4} = \frac{\alpha_4}{\bar{\lambda}_{x4}^2} = \frac{0,206}{0,707} = 0,291$$

ж) орнықтылықтың жойылуының шекті кернеулердің сипатты мәні:

$$\sigma_{x,Rk4} = \chi_{x4} \cdot f_y = 0,291 \times 23,5 = 6,842 \text{ кН/см}^2$$

з) орнықтылық жойылған кезде есептік мембраналық кернеулер:

$$\sigma_{x,Rd4} = \frac{\sigma_{x,Rk4}}{\gamma_{M1}} = \frac{6,842}{1,1} = 6,22 \text{ кН/см}^2$$

мұнда  $\gamma_{M1}$  - орнықтылықтың шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M1} = 1,10$  1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.9.2.2 Тармағы бойынша.

и) қабықша орнықтылығын тексеру:

$$n_{x,Ed4} \leq t_4 \cdot \sigma_{x,Rd4}$$

$$t_4 \cdot \sigma_{x,Rd4} = 0,6 \times 6,22 = 3,73 \frac{\text{кН}}{\text{см}}$$

$$0,192 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < 3,73 \frac{\text{кН}}{\text{см}} \quad \text{Шарт орындалды}$$

#### 4.2.3.2 3 учаске

а) жетілмегендік амплитудасының репрезентативті мәні  $w_{ok}$ :

$$w_{ok3} = \frac{t_3}{Q} \cdot \sqrt{\frac{r}{t_3}} = \frac{0,7}{16} \times \sqrt{\frac{225}{0,7}} = 0,784 \text{ см}$$

б) жетілмегендік болған кездегі серпінді төмендету коэффициенті  $\alpha_0$  қысым болмаған жағдайда:

$$\alpha_{03} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot \psi \cdot \left( \frac{w_{ok3}}{t_3} \right)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \times 1 \times \left( \frac{0,784}{0,7} \right)^{1,44}} = 0,191$$

мұнда кернеулердің әркелкілік параметрі  $\psi = 1$ , өйткені шеңбер бойынша біркелкі қысу жағдайы бар.

в) жетілмегендік болған кездегі серпінді төмендету және қысым коэффициенті  $\alpha_{pe}$  – серпінді кезеңдегі орнықтылықтың жойылудың шекті кернеулері:

$$\sigma_{x,Rcr3} = \frac{E}{\sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot \frac{t_3}{r} = 0,605 \cdot E \cdot \frac{t_3}{r} = 0,605 \times 2,06 \times 10^4 \times \frac{0,7}{225} = 38,77 \text{ кН/см}^2$$

– осы есептеу нүктесіндегі жергілікті ішкі қысымның ең төмен кепілді мәні:

$$\bar{p}_{s3} = \frac{p_{s3} \cdot r}{t_3 \cdot \sigma_{x,Rcr3}} = \frac{33,97 \times 10^{-4} \times 225}{0,7 \times 38,77} = 0,028$$

мұнда  $p_{s3}$  - осы есептеу нүктесіндегі жергілікті ішкі қысым 1 Кесте бойынша алынады,  $p_{s3} = 33,97 \times 10^{-4} \text{ кН/см}^2$ .

– серпінді төмендету коэффициентінің мәні:

$$\alpha_{\text{рез}} = \alpha_{03} + (1 - \alpha_{03}) \cdot \left( \frac{\bar{p}_{s3}}{\bar{p}_{s3} + \frac{0,3}{\sqrt{\alpha_{03}}}} \right) = 0,191 + (1 - 0,191) \times \left( \frac{0,028}{0,028 + \frac{0,3}{\sqrt{0,191}}} \right) = 0,223$$

г) жетілмегендік болған кездегі иілімді төмендету коэффициенті:

– қарастырылатын нүктедегі ең үлкен жергілікті қысым, 1 Кесте немесе 2 Сурет бойынша анықталады,  $p_{g3} = 61,16 \times 10^{-4}$  кН/см:

$$\bar{p}_{g3} = \frac{p_{g3}}{\sigma_{x,Rcr3}} \cdot \frac{r}{t_3} = \frac{61,16 \times 10^{-4}}{38,77} \times \frac{225}{0,7} = 0,051$$

– параметр:

$$s_3 = \left( \frac{1}{400} \right) \cdot \left( \frac{r}{t_3} \right) = \left( \frac{1}{400} \right) \times \left( \frac{225}{0,7} \right) = 0,804$$

– шартты икемділіктің шаршысы:

$$\bar{\lambda}_{x3}^2 = \frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr3}} = \frac{23,5}{38,77} = 0,606$$

– коэффициенттің мәні:

$$\alpha_{pp3} = \left\{ 1 - \left( \frac{\bar{p}_{s3}}{\bar{\lambda}_{x3}^2} \right)^2 \right\} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + s_3^{3/2}} \right] \cdot \left[ \frac{s_3^2 + 1,21 \cdot \bar{\lambda}_{x3}^2}{s_3 \cdot (s_3 + 1)} \right]$$

$$\alpha_{pp3} = \left\{ 1 - \left( \frac{0,028}{0,606} \right)^2 \right\} \times \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + 0,804^{3/2}} \right] \times \left[ \frac{0,804^2 + 1,21 \times 0,606}{0,804 \times (0,804 + 1)} \right] = 0,434$$

д) т. к.  $\alpha_{03} < \alpha_{\text{рез}} < \alpha_{pp3}$  то  $\alpha_3 = 0,223$ .

е) Орнықтылықты төмендету коэффициенті  $\chi_x$  қабықшаның салыстырмалы икемділігінің функциясы сияқты анықталады  $\lambda_x$ :

$$\bar{\lambda}_{x3} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr3}}} = \sqrt{\frac{23,5}{38,77}} = 0,779; \bar{\lambda}_0 = 0,2 \text{ и } \bar{\lambda}_{p3} = \sqrt{\frac{\alpha_3}{1 - \beta}} = \sqrt{\frac{0,223}{1 - 0,6}} = 0,746$$

мұнда  $\beta = 0,6$ .

$$\text{т. к. } \bar{\lambda}_{p3} \leq \bar{\lambda}_{x3} \text{ то } \chi_{x3} = \frac{\alpha_3}{\bar{\lambda}_{x3}^2} = \frac{0,223}{0,606} = 0,367$$

мұнда  $\beta = 0,6$ .

ж) орнықтылықтың жойылуының шекті кернеулердің сипатты мәні:

$$\sigma_{x,Rk3} = \chi_{x3} \cdot f_y = 0,367 \times 23,5 = 8,632 \text{ кН/см}^2$$

з) орнықтылық жойылған кезде есептік мембраналық кернеулер:

$$\sigma_{x,Rd3} = \frac{\sigma_{x,Rk3}}{\gamma_{M1}} = \frac{8,632}{1,1} = 7,84 \text{ кН/см}^2$$

мұнда  $\gamma_{M1}$  - орнықтылықтың шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M1} = 1,10$  1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.9.2.2 Тармағы бойынша.

и) қабықша орнықтылығын тексеру:

$$n_{x,Ed3} \leq t_3 \cdot \sigma_{x,Rd3}$$

$$t_3 \cdot \sigma_{x,Rd3} = 0,7 \times 7,84 = 5,49 \frac{\text{кН}}{\text{см}}$$

$$0,446 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < 5,49 \frac{\text{кН}}{\text{см}}$$

4.2.3.3 2 учаске

а) жетілмегендік амплитудасының репрезентативті мәні  $w_{ok}$ :

$$w_{ok2} = \frac{t_2}{Q} \cdot \sqrt{\frac{r}{t_2}} = \frac{0,7}{16} \times \sqrt{\frac{225}{0,7}} = 0,784 \text{ см}$$

б) жетілмегендік болған кездегі серпінді төмендету коэффициенті  $\alpha_0$  қысым болмаған жағдайда:

$$\alpha_{02} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot \psi \cdot \left(\frac{w_{ok2}}{t_2}\right)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \times 1 \times \left(\frac{0,784}{0,7}\right)^{1,44}} = 0,191$$

мұнда кернеулердің әркелкілік параметрі  $\psi = 1$ , өйткені шеңбер бойынша біркелкі қысу жағдайы бар.

в) жетілмегендік болған кездегі серпінді төмендету және қысым коэффициенті  $\alpha_{pe}$  келесі тәртіпте анықталады

– серпінді кезеңдегі орнықтылықтың жойылудың шекті кернеулері:

$$\sigma_{x,Rcr2} = \frac{E}{\sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot \frac{t_2}{r} = 0,605 \cdot E \cdot \frac{t_2}{r} = 0,605 \times 2,06 \times 10^4 \times \frac{0,7}{225} = 38,77 \text{ кН/см}^2$$

– осы есептеу нүктесіндегі жергілікті ішкі қысымның ең төмен кепілді мәні:

$$\bar{p}_{s2} = \frac{p_{s2} \cdot r}{t_2 \cdot \sigma_{x,Rcr2}} = \frac{40,98 \times 10^{-4} \times 225}{0,7 \times 38,77} = 0,034$$

мұнда  $p_{s2}$  - осы есептеу нүктесіндегі жергілікті ішкі қысым 1 Кесте бойынша алынады,  $p_{s2} = 40,98 \times 10^{-4} \text{ кН/см}^2$ .

– серпінді төмендету коэффициентінің мәні:

$$\alpha_{pe2} = \alpha_{02} + (1 - \alpha_{02}) \cdot \left( \frac{\bar{p}_{s2}}{\bar{p}_{s2} + \frac{0,3}{\sqrt{\alpha_{02}}}} \right) = 0,191 + (1 - 0,191) \times \left( \frac{0,034}{0,034 + \frac{0,3}{\sqrt{0,191}}} \right) = 0,229$$

г) жетілмегендік болған кездегі иілімді төмендету коэффициенті келесі тәртіпте анықталады:

– қарастырылатын нүктедегі ең үлкен жергілікті қысым, 1 Кесте немесе 2 Сурет бойынша анықталады,  $p_{g2} = 71,18 \times 10^{-4} \text{ кН/см}$ :

$$\bar{p}_{g2} = \frac{p_{g2}}{\sigma_{x,Rcr2}} \cdot \frac{r}{t_2} = \frac{71,18 \times 10^{-4}}{38,77} \times \frac{225}{0,7} = 0,059$$

– параметр:

$$s_2 = \left( \frac{1}{400} \right) \cdot \left( \frac{r}{t_2} \right) = \left( \frac{1}{400} \right) \times \left( \frac{225}{0,7} \right) = 0,804$$

– шартты икемділіктің шаршысы:

$$\bar{\lambda}_{x2}^2 = \frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr2}} = \frac{23,5}{38,77} = 0,606$$

– коэффициенттің мәні:

$$\alpha_{pp2} = \left\{ 1 - \left( \frac{\bar{p}_{s2}}{\bar{\lambda}_{x2}^2} \right)^2 \right\} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + s_2^{3/2}} \right] \cdot \left[ \frac{s_2^2 + 1,21 \cdot \bar{\lambda}_{x2}^2}{s_2 \cdot (s_2 + 1)} \right]$$

$$\alpha_{pp2} = \left\{ 1 - \left( \frac{0,034}{0,606} \right)^2 \right\} \times \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + 0,804^{3/2}} \right] \times \left[ \frac{0,804^2 + 1,21 \times 0,606}{0,804 \times (0,804 + 1)} \right] = 0,433$$

д) т. к.  $\alpha_{02} < \alpha_{pe2} < \alpha_{pp2}$  то  $\alpha_2 = 0,229$ .

е) орнықтылықты төмендету коэффициенті  $\chi_x$  қабықшаның салыстырмалы икемділігінің функциясы сияқты анықталады  $\lambda_x$ :

$$\bar{\lambda}_{x2} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr2}}} = \sqrt{\frac{23,5}{38,77}} = 0,779; \bar{\lambda}_0 = 0,2 \text{ и } \bar{\lambda}_{p2} = \sqrt{\frac{\alpha_2}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0,229}{1-0,6}} = 0,756$$

мұнда:  $\beta = 0,6$ .

$$\text{т. к. } \bar{\lambda}_{p2} \leq \bar{\lambda}_{x2} \text{ то } \chi_{x2} = \frac{\alpha_2}{\bar{\lambda}_{x2}^2} = \frac{0,229}{0,606} = 0,378$$

ж) орнықтылықтың жойылуының шекті кернеулердің сипатты мәні:

$$\sigma_{x,Rk2} = \chi_{x2} \cdot f_y = 0,378 \times 23,5 = 8,875 \text{ кН/см}^2$$

з) орнықтылық жойылған кезде есептік мембраналық кернеулер:

$$\sigma_{x,Rd2} = \frac{\sigma_{x,Rk2}}{\gamma_{M1}} = \frac{8,875}{1,1} = 8,06 \text{ кН/см}^2$$

мұнда  $\gamma_{M1}$  - орнықтылықтың шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M1} = 1,10$  1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің 5.9.2.2 Тармағы бойынша.

и) қабықша орнықтылығын тексеру:

$$n_{x,Ed2} \leq t_2 \cdot \sigma_{x,Rd2}$$

$$t_2 \cdot \sigma_{x,Rd2} = 0,7 \times 8,06 = 5,64 \frac{\text{кН}}{\text{см}}$$

$$0,751 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < 5,64 \frac{\text{кН}}{\text{см}}$$

#### 4.2.3.4 1 учаске

а) жетілмегендік амплитудасының репрезентативті мәні  $w_{ok}$ :

$$w_{ok1} = \frac{t_1}{Q} \cdot \sqrt{\frac{r}{t_1}} = \frac{0,8}{16} \cdot \sqrt{\frac{225}{0,8}} = 0,839 \text{ см}$$

б) жетілмегендік болған кездегі серпінді төмендету коэффициенті  $\alpha_0$  қысым болмаған жағдайда:

$$\alpha_{01} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot \psi \cdot \left(\frac{w_{ok1}}{t_1}\right)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \times 1 \cdot \left(\frac{0,839}{0,8}\right)^{1,44}} = 0,204$$

мұнда кернеулердің әркелкілік параметрі  $\psi = 1$ , өйткені шеңбер бойынша біркелкі қысу жағдайы бар.

в) жетілмегендік болған кездегі серпінді төмендету және қысым коэффициенті  $\alpha_{pe}$  келесі тәртіпте анықталады

– серпінді кезеңдегі орнықтылықтың жойылудың шекті кернеулері:

$$\sigma_{x,Rcr1} = \frac{E}{\sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot \frac{t_1}{r} = 0,605 \cdot E \cdot \frac{t_1}{r} = 0,605 \times 2,06 \times 10^4 \times \frac{0,8}{225} = 44,31 \text{ кН/см}^2$$

– осы есептеу нүктесіндегі жергілікті ішкі қысымның ең төмен кепілді мәні:

$$\bar{p}_{s1} = \frac{p_{s1} \cdot r}{t_1 \cdot \sigma_{x,Rcr1}} = \frac{45,95 \times 10^{-4} \times 225}{0,8 \times 44,31} = 0,029$$

мұнда  $p_{s1}$  - осы есептеу нүктесіндегі жергілікті ішкі қысым 1 Кесте бойынша алынады,  $p_{s1} = 45,95 \times 10^{-4} \text{ кН/см}^2$ .

– серпінді төмендету коэффициентінің мәні:

$$\alpha_{pe1} = \alpha_{01} + (1 - \alpha_{01}) \cdot \left( \frac{\bar{p}_{s1}}{\bar{p}_{s1} + \frac{0,3}{\sqrt{\alpha_{01}}}} \right) = 0,204 + (1 - 0,204) \times \left( \frac{0,029}{0,029 + \frac{0,3}{\sqrt{0,204}}} \right) = 0,237$$

г) жетілмегендік болған кездегі иілімді төмендету коэффициенті келесі тәртіпте анықталады:  
 – қарастырылатын нүктедегі ең үлкен жергілікті қысым, 1 Кесте немесе 2 Сурет бойынша анықталады,  $p_{g1} = 77,84 \times 10^{-4}$  кН/см:

$$\bar{p}_{g1} = \frac{p_{g1}}{\sigma_{x,Rcr1}} \cdot \frac{r}{t_1} = \frac{77,84 \times 10^{-4}}{44,31} \times \frac{225}{0,8} = 0,049$$

– параметр:

$$s_1 = \left( \frac{1}{400} \right) \cdot \left( \frac{r}{t_1} \right) = \left( \frac{1}{400} \right) \times \left( \frac{225}{0,8} \right) = 0,703$$

– шартты икемділіктің шаршысы:

$$\bar{\lambda}_{x1}^2 = \frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr1}} = \frac{23,5}{44,31} = 0,53$$

– коэффициенттің мәні:

$$\alpha_{pp1} = \left\{ 1 - \left( \frac{\bar{p}_{s1}}{\bar{\lambda}_{x1}^2} \right)^2 \right\} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + s_1^{3/2}} \right] \cdot \left[ \frac{s_1^2 + 1,21 \cdot \bar{\lambda}_{x1}^2}{s_1 \cdot (s_1 + 1)} \right]$$

$$\alpha_{pp1} = \left\{ 1 - \left( \frac{0,029}{0,53} \right)^2 \right\} \times \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + 0,703^{3/2}} \right] \times \left[ \frac{0,703^2 + 1,21 \times 0,53}{0,703 \times (0,703 + 1)} \right] = 0,393$$

д) т. к.  $\alpha_{01} < \alpha_{pe1} < \alpha_{pp1}$  то  $\alpha_1 = 0,237$ .

е) орнықтылықты төмендету коэффициенті  $\chi_x$  қабықшаның салыстырмалы икемділігінің функциясы сияқты анықталады  $\lambda_x$ :

$$\bar{\lambda}_{x1} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr1}}} = \sqrt{\frac{23,5}{44,31}} = 0,728; \bar{\lambda}_0 = 0,2 \text{ и } \bar{\lambda}_{p1} = \sqrt{\frac{\alpha_1}{1 - \beta}} = \sqrt{\frac{0,237}{1 - 0,6}} = 0,77$$

мұнда  $\beta = 0,6$ .

$$\text{т. к. } \bar{\lambda}_{p1} \leq \bar{\lambda}_{x1} \text{ то } \chi_{x1} = \frac{\alpha_1}{\bar{\lambda}_{x1}^2} = \frac{0,237}{0,728} = 0,444$$

ж) орнықтылықтың жойылуының шекті кернеулердің сипатты мәні:

$$\sigma_{x,Rk1} = \chi_{x1} \cdot f_y = 0,444 \times 23,5 = 10,433 \text{ кН/см}^2$$

з) орнықтылық жойылған кезде есептік мембраналық кернеулер:

$$\sigma_{x,Rd1} = \frac{\sigma_{x,Rk1}}{\gamma_{M1}} = \frac{10,433}{1,1} = 9,48 \text{ кН/см}^2$$

мұнда  $\gamma_{M1}$  - орнықтылықтың шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M1} = 1,10$  1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.9.2.2 Тармағы бойынша.

и) қабықша орнықтылығын тексеру:

$$n_{x,Ed1} \leq t_1 \cdot \sigma_{x,Rd1}$$

$$t_1 \cdot \sigma_{x,Rd1} = 0,8 \times 9,48 = 7,59 \frac{\text{кН}}{\text{см}}$$

$$0,744 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < 7,59 \frac{\text{кН}}{\text{см}} \quad \text{Шарт орындалды}$$

4.2.4 Желдің қысымы кезіндегі бос бункердің орнықтылығына есептеу әдістемесі

а) изотропты қабырғаның орнықтылығы жойылуының шекті сыртқы қысымы 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.38) Формула бойынша анықталады:

$$p_{n,Rcru} = 0,92 \cdot C_b \cdot C_w \cdot E \cdot \left( \frac{r}{l} \right) \cdot \left( \frac{t}{r} \right)^{2,5}$$

мұнда  $t$  - қабырғаның ең жіңішке бөлігінің қалыңдығы (см);

$r = 225$  см – бункердің радиусы;

$l = 650$  см - қаттылық сақиналары мен сегмент шекаралары арасындағы арақашықтық;

$E = 2,06 \times 10^4 \text{ кН/см}^2$  – болап серпіндігінің модулі;

$C_b$  - сыртқы қысымның әсерінен бойлық ию коэффициенті;

1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.2 Кесте бойынша коэффициент  $C_b = 1,0$ , өйткені жоғарғы бөліктегі сақина 5.3.2.5 (12) Тармақтарына сәйкес келеді – 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (14) Формуласы.

$C_w$  - жел қысымын үлестіру коэффициенті.

Бункер жеке тұрғандықтан және тек қана желді жүктеудің әсерінде болғандықтан, бункердің желдетілген жағындағы қысымына қатысты жел қысымын үлестіру коэффициенті 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (8) Формуланың Тармағынан алынған ең үлкен мәні ретінде алынады:

$$C_w = \max \left\{ \frac{2,2}{\left( 1 + 0,1 \cdot \sqrt{C_b \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}} \right)}; \right. \\ \left. 1,0; \right.$$

б) желдің және/немесе вакуумның әсерінен болған максималды есептік сыртқы қысым 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.41) Формуласы бойынша анықталады:

$$p_{n,Rd} = \frac{\alpha_n \cdot p_{n,Rcru}}{\gamma_{M1}}$$

мұнда  $\alpha_n$  - жетілмегендік болған кездегі серпінді төмендету коэффициенті,  $\alpha_n = 0,5$  1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (10) Формуланың 5.3.2.5 Тармағы бойынша.

$\gamma_{M1}$  - орнықтылықтың шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M1} = 1,10$  1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.9.2.2 Тармағы бойынша.

в) орнықтылықты қамтамасыз ету үшін көтергіш қасиеті келесі шартты қанағаттандыруы тиіс:

$$p_{n,Ed} \leq p_{n,Rd}$$

мұнда  $p_{n,Ed}$  - желдің максималды сыртқы қысымының есептік мәні.

4.2.5 Участкелер бойынша орнықтылықты есептеу

4.2.5.1 1 учаске

Жел қысымының үлестіру коэффициентін анықтаймыз,  $C_w$ :

$$C_w = \max \left\{ \frac{2,2}{\left( 1 + 0,1 \cdot \sqrt{C_b \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}} \right)} = \frac{2,2}{\left( 1 + 0,1 \times \sqrt{1 \times \frac{225}{650} \times \sqrt{\frac{225}{0,8}}} \right)} = 1,773; \right. \\ \left. 1,0; \right.$$

$C_w = 1,773$  аламыз;

Изотропты қабырғаның орнықтылығы жойылуының шекті сыртқы қысымын анықтаймыз:

$$p_{n,Rcru} = 0,92 \cdot C_b \cdot C_w \cdot E \cdot \left( \frac{r}{l} \right) \cdot \left( \frac{t}{r} \right)^{2,5} = \\ = 0,92 \times 1 \times 1,773 \times 2,06 \times 10^4 \times \left( \frac{225}{650} \right) \times \left( \frac{0,8}{225} \right)^{2,5} = 8,767 \times 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$$

Жел әсерінен максималды есептік сыртқы қысымды анықтаймыз:

$$p_{n,Rd} = \frac{\alpha_n \cdot p_{n,Rcru}}{\gamma_{M1}} = \frac{0,5 \times 8,767 \times 10^{-3}}{1,1} = 3,985 \times 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$$

1 мысал бойынша есептен,  $p_{n,Ed} = 1,08 \times 10^{-4} \text{ кН/см}^2$

Осылайша

$$p_{n,Ed} = 1,08 \times 10^{-4} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < p_{n,Rd} = 3,985 \times 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$$

Желдің әсерінен бос бункердің орнықтылығы 1 учаскеде қамтамасыз етілген.

#### 4.2.5.2 2 және 3 учаскелері

Жел қысымының үлестіру коэффициентін анықтаймыз,  $C_w$ :

$$C_w = \max \left\{ \frac{2,2}{\left( 1 + 0,1 \cdot \sqrt{C_b \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}} \right)} = \frac{2,2}{\left( 1 + 0,1 \times \sqrt{1 \times \frac{225}{650} \times \sqrt{\frac{225}{0,7}}} \right)} = 1,761; \right. \\ \left. 1,0; \right.$$

$C_w = 1,761$  аламыз;

Изотропты қабырғаның орнықтылығы жойылуының шекті сыртқы қысымын анықтаймыз:

$$p_{n,Rcru} = 0,92 \cdot C_b \cdot C_w \cdot E \cdot \left( \frac{r}{l} \right) \cdot \left( \frac{t}{r} \right)^{2,5} = \\ = 0,92 \times 1 \times 1,761 \times 2,06 \times 10^4 \times \left( \frac{225}{650} \right) \times \left( \frac{0,7}{225} \right)^{2,5} = 6,238 \times 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$$

Жел әсерінен максималды есептік сыртқы қысымды анықтаймыз:

$$p_{n,Rd} = \frac{\alpha_n \cdot p_{n,Rcru}}{\gamma_{M1}} = \frac{0,5 \times 6,238 \times 10^{-3}}{1,1} = 2,835 \times 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$$

1 мысал бойынша есептен,  $p_{n,Ed} = 1,32 \times 10^{-4} \text{ кН/см}^2$

Осылайша

$$p_{n,Ed} = 1,32 \times 10^{-4} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < p_{n,Rd} = 2,835 \times 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$$

Желдің әсерінен бос бункердің орнықтылығы 2 және 3 учаскелерінде қамтамасыз етілген.

#### 4.2.5.3 4 учаске

Жел қысымының үлестіру коэффициентін анықтаймыз,  $C_w$ :

$$C_w = \max \left\{ \frac{2,2}{\left( 1 + 0,1 \cdot \sqrt{C_b \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}} \right)} = \frac{2,2}{\left( 1 + 0,1 \times \sqrt{1 \times \frac{225}{650} \times \sqrt{\frac{225}{0,6}}} \right)} = 1,748; \right. \\ \left. 1,0; \right.$$

$C_w = 1,748$  аламыз;

Изотропты қабырғаның орнықтылығы жойылуының шекті сыртқы қысымын анықтаймыз:

$$p_{n,Rcru} = 0,92 \cdot C_b \cdot C_w \cdot E \cdot \left( \frac{r}{l} \right) \cdot \left( \frac{t}{r} \right)^{2,5} = \\ = 0,92 \times 1 \times 1,748 \times 2,06 \times 10^4 \times \left( \frac{225}{650} \right) \times \left( \frac{0,6}{225} \right)^{2,5} = 4,21 \times 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$$

Жел әсерінен максималды есептік сыртқы қысымды анықтаймыз:

$$p_{n,Rd} = \frac{\alpha_n \cdot p_{n,Rcru}}{\gamma_{M1}} = \frac{0,5 \times 4,21 \times 10^{-3}}{1,1} = 1,914 \times 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$$

1 мысал бойынша есептен,  $p_{n,Ed} = 1,32 \times 10^{-4} \text{ кН/см}^2$

Осылайша

$$p_{n,Ed} = 1,32 \times 10^{-4} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < p_{n,Rd} = 1,914 \times 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$$

Желдің әсерінен бос бункердің орнықтылығы 4 учаскеде қамтамасыз етілген.

4.2.6 Жанама кернеулерді ескеріп орнықтылықтың есептелуі орындалмаған, өйткені жүктеулердің маңызды асимметриясы жоқ (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.3.2.6 Тармағын қар.).

4.2.7 Мерициональды қысылудың және мембраналық жылжумен айналма бағытта қысылу арасындағы өзара әрекеттесуді ескерумен орнықтылықты есептеу орындалмаған, өйткені жүктеулердің маңызды асимметриясы жоқ (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.3.2.7 Тармағын қар.).

4.3 Қажу бойынша шекті күйді тексеруді орындау талап етілмейді, өйткені бункер зардаптардың 2 тобына жатады (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.3.2.8 Тармағын қар.).

4.4 Аз циклды қажу бойынша шекті күйді тексеруді орындау талап етілмейді, өйткені бункер зардаптардың 2 тобына жатады (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.3.2.9 Тармағын қар.).

4.5 Пайдаланушылық жарамдылықтың шекті күйін тексеру

4.5.1 Жазық бойынша жалпы ауытқу:

– шекті мәні (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.90) Формуласы)

$$w_{\max} = k_{d2} \cdot H = 0,02 \times 11200 = 224 \text{ мм}$$

мұнда  $H = 11200 \text{ мм}$  - іргеден шатырға дейін өлшенген құралымның биіктігі.

$k_{d2} = 0,02$ . – 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.6.2 Тармағы бойынша.

– майысудың есептік мәні 2 Тармақ бойынша статикалық есептің негізінде анықталған:

жүктеулердің үйлесуі 1 –  $w_1 = 0,453 \text{ мм}$ ;

жүктеулердің үйлесуі 2 –  $w_2 = 0,444 \text{ мм}$ .

– шекті күйді тексеру:

$$w_1 = 0,453 \text{ мм} < 224 \text{ мм}$$

Қорытынды: горизонталь бойынша жалпы ауытқу жіберілетін ауытқудан аспайды.

4.5.2 Желдің әсерінен жергілікті тарамдаған майысу (көлденең қиманың шеңберден ауытқуы)

– шекті мәні 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.91) және (5.92) Формулалардың ең кішкентайы сияқты алынады :

$$w_{r,\max} = k_{d3} \cdot r = 0,05 \times 2250 = 112,5 \text{ мм}$$

$$w_{r,\max} = k_{d4} \cdot t = 20 \times 6 = 120 \text{ мм}$$

мұнда  $t = 6 \text{ мм}$  — қабықша қабырғасындағы ең жіңішке бөлігінің жергілікті қалыңдығы.

$k_{d3} = 0,05$  – 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (3) Формуласының 5.6.2 Тармағы бойынша.

$k_{d4} = 20$  – 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (3) Формуласының 5.6.2 Тармағы бойынша.

– майысудың есептік мәні 2 тармақ бойынша статикалық есептің негізінде 3 жүктеулердің үйлесуі үшін анықталған –  $w_r = 0,619 \text{ мм}$ .

– шекті күйді тексеру:

$$w_r = 0,619 \text{ мм} < 112,5 \text{ мм}$$

Қорытынды: жергілікті тарамдаған майысу шекті жіберілетін мәннен аспайды.

## **5.4 Цилиндрлік қабырғалардың тірегіне қойылатын арнайы талаптар**

### **5.4.1 Толығымен арқалық торға тірелген немесе орнатылған түбі бар қабықша**

5.4.1.1 Егер цилиндрлік қабықша негізінің жаппай тірегі болса (жазық негізге), қабықшаның қабырғасында, 1991-4 ҚР ҚН EN 5 Бөлімінде айтылғандай, симметриялы емес және жергілікті бүйірлік жүктеулердің әрекеттерінен ғана күштер және сәттер пайда болады.



5.4.1.2 Қатандық қыры бар қабырға қолданылса, онда тік қатандық қырлар базаға толығымен тірелуі және тірек сақинасына қосылуы тиіс.

#### 5.4.2 Юбкаға тірелетін қабықша

5.4.2.1 Қабықша юбкаға тірелген кезде (5.6 Суретті қар.), юбка келесі шарттардың біреуін қанағаттандырса, қабықша біркелкі тірелген деп есептеуге болады:

- а) юбканың өзі толығымен және біркелкі іргеге тіреледі;
- б) юбканың қалыңдығы қабықша қалыңдығынан кем дегенде 20 %-ға қалын және юбка мен оған жалғасатын сөрелердің өлшемін анықтау үшін, 8 тарауда келтірілген, сақиналы арқалықтарды есептеу әдістемелер қолданылады.

5.4.2.2 Юбкалар ішкі қысымның қолайлы әсерісіз қабырғаны өстік қысудың күштерін қабылдауға есептелуі тиіс.

#### 5.4.3 Цилиндрлік қабырғаның жалғасатын ұстынға тірелуі

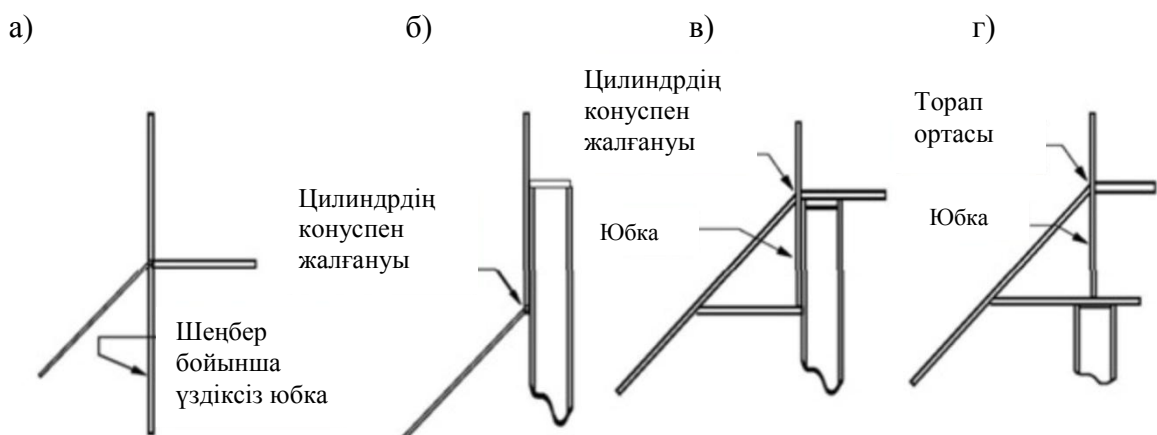
5.4.3.1 Егер қабықша цилиндрдің қабырғасына бекітілетін жеке ұстындарға тірелсе (5.6, б Суретті қар.), бұл тіреулерден жинақталған күштердің болуы 2 және 3 зардаптар тобының бункерлердің қабықшасында ішкі күштерді анықтаған кезде ескерілуі тиіс.

5.4.3.2 Ұстыны бекіту ұзындығы 5.4.6 Тармағына сәйкес анықталуы тиіс.

5.4.3.3 Тірек қырдың ұзындығы қырға жалғасатын элементтерді жылжитқан кезде орнықтылықтың жойылуының шекті күйін ескеріп таңдалуы тиіс (5.3.2.6 Тармағын қар.).

#### 5.4.4 Жеке тіректердегі цилиндрлік қабықша

5.4.4.1 Егер қабықша жеке ұстындарға немесе тіректерге тірелсе, бұл тіректерден жинақталған күштердің болуы бункерлердің қабықшасындағы ішкі күштерді анықтаған кезде ескерілуі тиіс. Жинақталған күштердің болуын 5.4.4.2 және 5.4.4.3 тармақтарының талаптарын орындаған кезде ескермеуге болады.



а) юбканың қабықшасына тірелу; б) ұстындарды цилиндрлік қабықшаға бекіту; в) ұстын эксцентриситеті бар юбкаға бекітілген; г) юбканың немесе цилиндрдің ұстындарының орналасуы

### 5.6 Сурет – Шұңғымасы бар бункер тірегінің әртүрлі сұлбалары

5.4.4.2 Егер қабықшаның есептелуі өстік-симметриялы жүктеу кезінде қабықшалардың мембраналық теориясы бойынша ғана орындалса, төмендегі келесі төрт қағидаттарының барлығы қанағаттандырылуы тиіс:

а) радиустың қалыңдыққа арақатынасы  $r/t$  мына  $(r/t)_{\max}$  көп болмауы тиіс.

б) қабықша қабырғасынан төмен тіректің эксцентриситеті  $k_1 t$  көп болмауы тиіс.

в) цилиндрлік қабырға өтпелі түйінде қабырғасының қалыңдығы  $k_2 \cdot t$ -нан төмен емес құруы тиіс шұңғымамен қатты қосылуы тиіс.

г) әр тіректің ені  $k_3 \cdot \sqrt{r \cdot t}$  аз болмауы тиіс.

Параметрлердің мәндері  $(r/t)_{\max} = 400$ ;  $k_1 = 2,0$ ;  $k_2 = 1,0$ ;  $k_3 = 1,0$  құрайды.

5.4.4.3 Егер қабықшаның есептелуі егер қабықшаның есептелуі өстік-симметриялы жүктеу кезінде қабықшалардың мембраналық теориясы бойынша ғана орындалса, төмендегі қағидаттарының біреуі орындалуы тиіс:

а) қабықшаның үстінгі шетінің шекаралық жағдайлары шатыры бар қабықшамен жеткілікті берік қосылу арқылы дөңгелек болып қалуы тиіс (яғни қабықшаның үстінгі шетінің шеңбер формасы өзгермеуі тиіс;

б) қабықшаның үстінгі шетінің шекаралық күйіндегі июші қаттылығы  $EI_z$  үстінгі сақинаны, (5.82) Формула бойынша анықталатын, сақинаның жазықтықта июі  $EI_{z,\min}$  көп майысқан кезде, орнату арқылы дөңгелек болып қалуы тиіс

$$EI_{z,\min} = k_s \cdot E \cdot r \cdot t^3 \quad (5.82)$$

мұнда  $t$  - қабырғаның ең жіңішке бөлігінің қалыңдығы;

$k_s = 0,1$ .

в) Қабықшаның биіктігі  $L$  мына  $L_{s,\min}$  мәнінен төмен болмауы тиіс, ол келесі формула бойынша анықталады:

$$L_{s,\min} = k_L \cdot r \cdot \sqrt{\left(\frac{r}{t}\right) \cdot \frac{1}{n \cdot (n^2 - 1)}} \quad (5.83)$$

мұнда  $n$  - қабықша шеңберінің периметрі бойынша орналасқан тіректердің саны.

$k_L = 4,0$ .

5.4.4.4 Егер қабықшалардың сызықтық майысу теориясы (сәтсіз теориясы) немесе есептеудің дәлірек сандық әдісі қолданылса, тіректер үстіндегі жоғары жергілікті кернеулердің әсері, 5.3.2.4 Тармағында толық қарастырылғандай, өстік қысу кезінде орнықтылық жойылудың шекті күйін тексеруге қосылуы тиіс.

5.4.4.5 Қабықшаларға арналған тіректердің 8.4.5 Тармағының немесе 8.4.6 Тармағының ережелерін қанағаттандыратын өлшемдері болуы тиіс.

### 5.4.5 Шұңғыма астында орналасқан ұстындарға тірелген бункер

5.4.5.1 Бункерді шұңғыма астында тіректері бар сияқты қарастырған жөн, егер тіреу элементі қимасының ауырлық орталығының үстіндегі тік сызық қабықша қалыңдығынан  $t$  асатын мәнде тіректен жоғары орналасқан цилиндрлік қабықшаның орта бетіне қатысты бункердің ішінде орналса.

5.4.5.2 Шұңғыма астында орналасқан тіректерге тірелген бункер шұңғымаларды есептеу бойынша 6 тараудың талаптарын қанағаттандыруы тиіс.

5.4.5.3 Шұңғыма астында орналасқан тіректерге тірелген бункерді есептеу, қабықшалардың сызықтық ию теориясы бойынша немесе дәлірек санды әдісті қолданумен орындалуы тиіс. Шұңғыманың үстінгі бөлігінде пайда болатын тіректердің июінің жергілікті әсерлері және меридиональды қысу иімділік бойынша шекті күйді, сол секілді орнықтылық бойынша шекті күйді тексеру кезінде есептерде ескерілуі тиіс. Мұндай тексерулер ҚР ҚН EN 1993-1-6 6 және 8 Бөлімдерінің талаптарына сәйкес орындалуы тиіс.

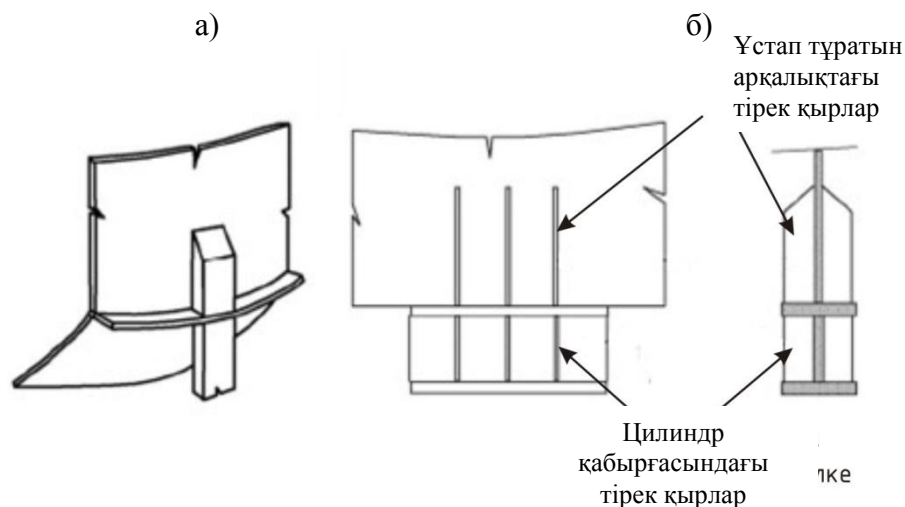
#### 5.4.6 Жергілікті тіректердің элементтері және цилиндрлік қабырғаларға күшті жіберуге арналған қырлар

##### 5.4.6.1 Цилиндрдің қабырғасынан төмен жергілікті тіректер

5.4.6.1.1 Цилиндр қабырғасының астындағы тіреу түйіндердің элементтерінің өлшемдері цилиндр қабырғасында және тіреу элементтерінде қайтымсыз жергілікті деформациялардың құрылуысыз көтергіш құралымдарына есептік күш жіберетіндей таңдалуы тиіс. Ол үшін тіреу түйінде арнайы тік және көлденең қырлар орнатады, олар күш береді және цилиндрдің тік қабырғалары мен көтергіш құралымдардың жүктерін жеңілдетеді.

5.4.6.1.2 Тіректер элементтерінің өлшемдері цилиндрдің шетін тік, сақиналы және меридиональды бағытта бұрап кетуінен бекітуін қамтамасыз етуі тиіс. Тіреу түйіндерінің кейбір құрылымдық шешімдері 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.7 Суретінде көрсетілген.

5.4.6.1.3 Тіректі бекіту ұзындығы жанама кернеулердің әрекеті кезіндегі тірекке жалғасатын қабырғаның орнықтылық шекті күйін ескерумен таңдалуы тиіс (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.3.2.6 Тармағын қар.).



а) өтпелі сақиналы қырдың деңгейінде ұстынға жергілікті тіреу;

б) үлкен тіреу күш салынған кезде цилиндрлік қабырғаларына тіреу қырларын орналастыру мүмкіндіктері

### 5.7 Сурет - Әдеттегі тіреу түйіндердің құрылымдық шешімдері

5.4.6.1.4 Егер жеке тіректер сақиналы арқалықсыз қолданылса, әр тіректің үстіндегі қатандық қырлары:

- а) немесе шатырдың салбырағанына дейін қабықшаға қосылуы;
- б) немесе қабықшаға  $L_{min}$  аз емес арақашықтықта қосылуы тиіс, бұл арақашықтық келесі формула бойынша анықталады:

$$L_{min} = 0.4 \cdot r \cdot \sqrt{\left(\frac{r}{t}\right) \cdot \frac{1}{n \cdot (n^2 - 1)}} \quad (5.84)$$

мұнда  $n$  - қабықша шеңберінің периметрі бойынша орналасқан тірек тіреулерінің саны.

### 5.4.6.2 Цилиндрлік қабырғаларға күш жіберуге арналған жергілікті қырлар

5.4.6.2.1 Жергілікті тірек қырлардың өлшемдері цилиндр қабырғасында және тіреу элементтерінде қайтымсыз жергілікті деформациялардың құрылуысыз цилиндрдің қабырғасына есептік күш жіберетіндей таңдалуы тиіс.

5.4.6.2.2 Тіреу қырды қабықшаға бекіту ұзындығы қырға жалғасатын учаскелерінде жанама кернеулердің әрекетінен қабықша орнықтылығын есептеуді ескерумен алынуы тиіс.

5.4.6.2.3 Тіреу қырларды жобалаған кезде оларды цилиндр қабырғасының жергілікті тарамдаған деформациясын болдырмау үшін айналып кетуден бекітіп қою қажет. Қажет болған жағдайда тарамдаған деформацияларды болдырмау үшін қаттылық сақиналары қолданылуы тиіс.

**ЕСКЕРТПЕ** Жергілікті қырлар арқылы қабықшаға күш жіберу түйіннің мүмкін құрылымдық шешімдері 5.8 Суретінде көрсетілген.

а)



б)



- а) жергілікті қыр цилиндрлік қабырғаға сақинасыз қосылған; б) тарамдаған жылжуларды болдырмауға арналған қаттылық сақиналары бар жергілікті қыр.

### 5.8 Сурет – Тіреу қырлардың құрылымдық шешімдері

### 5.4.7 Бункер базасын анкерлік бекіту

5.4.7.1 Анкерлік бекітуді есептеген кезде қабықша қабырғаларына шеңбер бойынша нақты әсерлердің әркелкілігін ескерген жөн. Ерекше назарды жел жүктеулерді қабылдау үшін анкерлердің жоғары көтергіш қасиеттерін қамтамасыз ету қажеттілігіне аударған жөн.

ЕСКЕРТПЕ Анкерлерде пайда болатын күштер әдетте төмендетіледі, егер бункер иелетін консолды арқалық ретінде қарастырылса.

5.4.7.2 Анкерлер арасындағы арақашықтық 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 8.5.3 Тармағы бойынша тірек сақинасын есептеуден алынатын мәннен аспауы тиіс.

5.4.7.3 Егер сандық әдістерді қолданумен мұқият есептеулер жүргізілмесе, онда анкерлік бекітудің шеңбер бірлігіне  $n_{x,Ed}$  жергілікті жұлып алу күшін қабылдау үшін жеткілікті көтергіш қасиеті болуы тиіс:

$$n_{x,Ed} = p_{n,Ed} \cdot \left(\frac{L^2}{2r}\right) \cdot \left[ C_1 + \sum_{m=2}^M m^2 \cdot C_m \cdot \left\{ 1 - \frac{3}{4} \left( \frac{a_1}{a_2 + a_3} \right) \right\} \right] \quad (5.85)$$

мұнда

$$a_1 = 1 + 10.4 \cdot \left( \frac{r}{m \cdot L} \right)^2 \quad (5.86)$$

$$a_2 = 1 + 7.8 \cdot \left( \frac{r}{m \cdot L} \right)^2 \quad (5.87)$$

$$a_3 = 3 \cdot \frac{r^3 \cdot t}{I_z} \cdot \left( \frac{r}{L} \right)^3 \cdot \left( \frac{1}{m^4 \cdot (m^2 - 1)^2} \right) \quad (5.88)$$

мұнда  $p_{n,Edw}$  - жел болған кезде тоқырау нүктесіндегі қысымның есептік мәні;  
 $L$  - цилиндрлік қабықша қабырғасының жалпы биіктігі;  
 $t$  - цилиндрлік қабықша қабырғасының орташа қалыңдығы;  
 $I_z$  - цилиндрдің үстінгі жиегіндегі оның тік өсіне қатысты сақина қимасының инерция сәті (айналма бағыттағы ию);

$C_m$  - жел қысымын шеңбер бойынша үйлесімді үлестіру коэффициенттері;

$M$  - жел қысымын үлестірудегі жоғары гармоникасы.

ЕСКЕРТПЕ Ерекше шарттарға сәйкес келетін жел қысымын үйлесімді үлестіру коэффициенттерінің мәндері  $C_m$ . Бұдан әрі 1 және 2 топты бункерлер үшін қарапайым ұсыныстар келтірілген:  $M = 4$ ,  $C_1 = +0,25$ ,  $C_2 = +1,0$ ,  $C_3 = +0,45$  және  $C_4 = -0,15$ . 3 топтың бункерлері үшін  $C$  қосымшасында ұсынылған дәлдірек үлестіру коэффициенттер ұсынылады, атап айтқанда: оқшауланған бункерлер үшін  $M = 4$  және топтармен орналасқан бункерлер үшін  $M = 10$ .

2 МЫСАЛ Бункердің тіреу құрылымдарын есептеу (юбкалар)

1 Бастапқы деректер

1 мысал бойынша есептеу шарттары және бункердің геометриялық өлшемдері.

Бункерді тіреу диаметрі 4,5 м цилиндрлік юбкаға периметр бойынша іске асырылады.

2 Жүктеулерді жинау (1 мысалды қар.).

3 Статикалық есеп

1 мысал бойынша есептік нәтижелер қабылданды.

3.1 Есептеуді орындау шарттары және жеке жүктеулер мен үйлесулер бойынша бункердің деформацияланған сұлбалары (1 мысалды қар.).

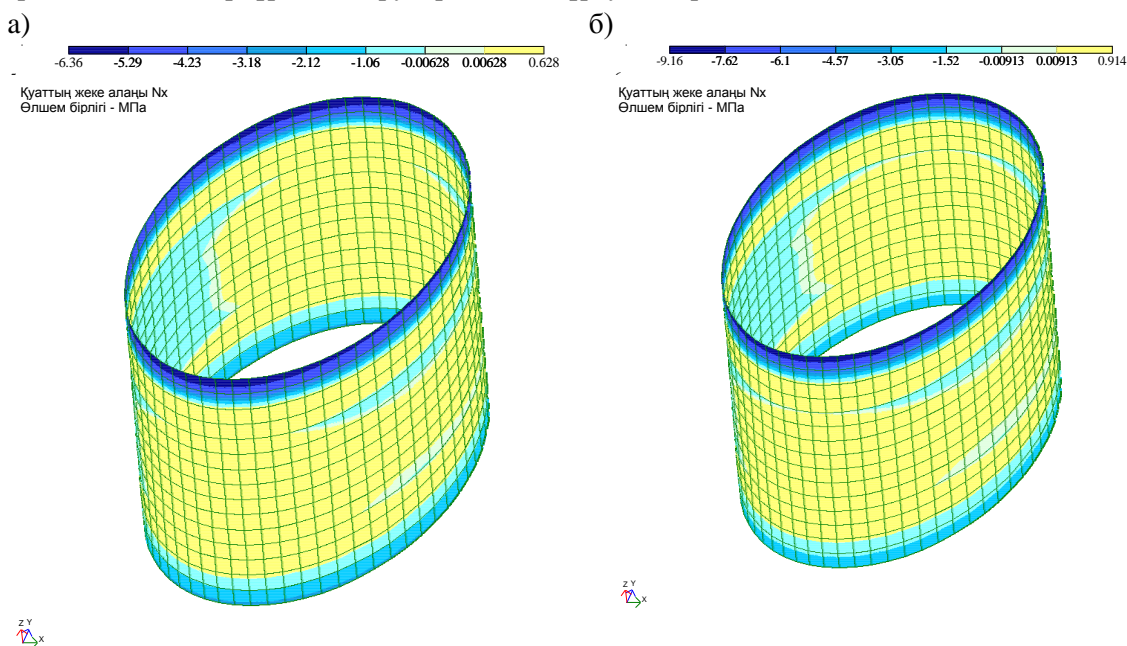
3.2 Юбканы есептеу нәтижелері.

Статикалық есептеулердің нәтижелері бойынша қалыпты кернеулер мен бункер юбкасының элементтерінде июші сәттер шыққан.

Қалыпты сақиналы кернеулерді юбка қабырғаларына бірінші есептік үйлесудің жүктеулерінің әрекеттерінен үйлестіруі 1а Суретте көрсетілген, екінші есептік үйлесуден – 1б Суретінде көрсетілген. Қалыпты меридиональды кернеулерді шұңғыма қабырғаларына бірінші есептік үйлесудің жүктеулерінің әрекеттерінен үйлестіруі 2а Суретте көрсетілген, екінші есептік үйлесуден – 2б Суретінде, үшінші есептік үйлесуден – 2в Суретінде көрсетілген. Қабықшадағы қалыпты кернеулер статикалық есептердің нәтижелері бойынша МПа-да алынған.

Статикалық есеп кезінде алынған кернеулердің мәндерінен (кернеулердің мәндері қабырғаның тапсырылған қалыңдығы үшін МПа-да алынған) әрі қарай бункер элементтерінің беріктігі мен орнықтылығын тексеру үшін қолданылатын кернеулердің есептік мәндеріне ауысу үшін 1, 2 және 3 Кестелер құрылған. Көрсетілген кестелерге бункер элементтерінің есептік учаскелеріндегі максималды кернеулер жазылған. Нәтижелер қабықшаның нақты қалыңдығы кезіндегі кернеулерден қабықшаның бір сантиметр ұзындығына кернеулерге ауысу арқылы қабықшаның кернеуленген жағдайының құрауыштары түрінде ұсынылған.

Бункер қабықшаның элементтеріндегі кернеулер үш есептік үйлесімділіктер үшін бөлек келтірілген, өйткені әртүрлі тексерулерде ҚҚС құрауыштары сәйкес келмейді.



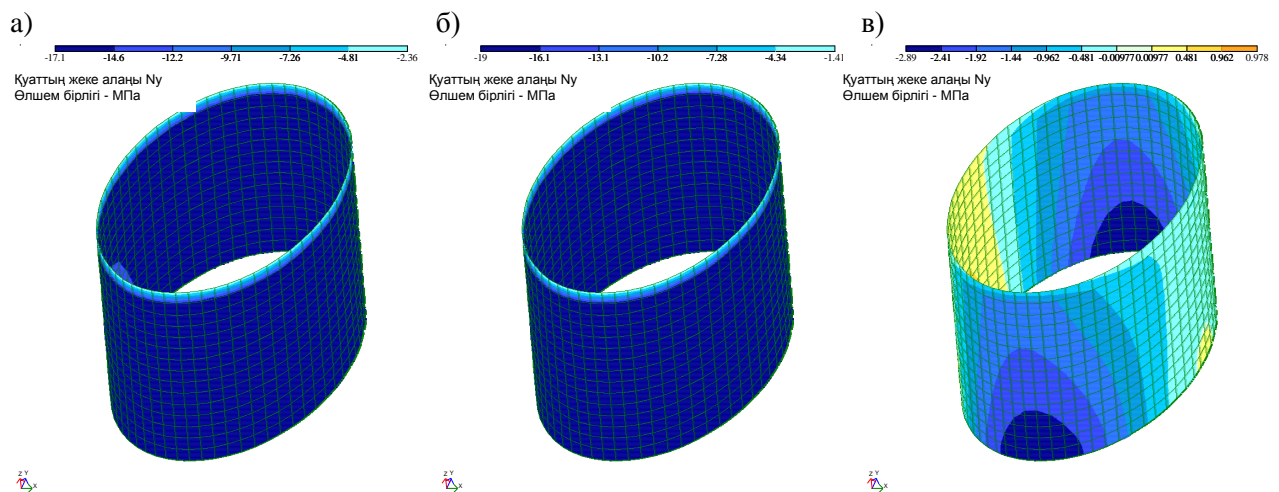
а) жүктеулердің үйлесуі 1;

б) жүктеулердің үйлесуі 2.

1 Сурет – Сақиналы қалыпты кернеулерді  $p_0$  юбка қабырғасында үйлестіру, МПа

1 Кесте – 1 үйлесімдік бойынша есептік кернеулер

Учаскенің	Кернеуленген жағдайдағы құраушылар					
№	$n_{\theta,Ed}$	$m_{\theta,Ed}$	$n_{x,Ed}$	$m_{x,Ed}$	$n_{x0,Ed}$	$m_{x0,Ed}$
	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см
7	1,534	0,010	2,603	0,010	0,001	$3,7 \times 10^{-4}$
6	0,018	0,0005	2,661	$5,0 \times 10^{-4}$	0,055	$1,4 \times 10^{-4}$
5	0,392	0,003	2,731	0,003	0,071	$3,0 \times 10^{-4}$



- а) жүктеулердің үйлесуі 1;  
 б) жүктеулердің үйлесуі 2;  
 в) жүктеулердің үйлесуі 3.

2 Сурет – Меридиональды қалыпты кернеулерді  $n_x$  юбка қабырғасында үлестіру, МПа

2 Кесте – 2 үйлесімдік бойынша есептік кернеулер

Учаскенің	Кернеуленген жағдайдағы құраушылар					
№	$n_{\theta,Ed}$	$m_{\theta,Ed}$	$n_{x,Ed}$	$m_{x,Ed}$	$n_{x0,Ed}$	$m_{x0,Ed}$
	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см
7	1,989	0,013	2,922	0,040	0,041	$3,7 \times 10^{-4}$
6	0,018	$3,0 \times 10^{-4}$	2,974	$2,0 \times 10^{-4}$	0,055	$1,4 \times 10^{-4}$
5	0,437	0,003	3,04	0,010	0,071	$3,0 \times 10^{-4}$

3 Кесте – 2 үйлесімдік бойынша есептік кернеулер

Учаскенің №	Меридиональды кернеу, $n_x$ кН/см
7	0,304
6	0,370
5	0,463

1 Кестеде, 2 Кестеде және 3 Кестеде келтірілген кернеуленген жағдайдың құраушыларына түсініктемелер (1 мысалды қар.).

4 Цилиндрлік юбканы есептеу

4.1 Иімділіктің шекті күйі бойынша есептеу, немесе беріктікке есептеу

4.1.1 Есептеу әдістемесі.

Есептеу әдістемесін (1 мысал 4.1.1 Тармағын қар.).

4.1.2 Учаскелерді есептеу.

7 учаске

а) тең әсерлі кернеулердің жалған құраушылары (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.2) және (5.3)

Формулалары):

$$\sigma_{x,Ed7} = \frac{n_{x,Ed7}}{t_7} + \frac{m_{x,Ed7}}{t_7^2/4} = \frac{2,603}{1} + \frac{0,1}{1^2/4} = 3,003 \text{ кН/см}^2$$

$$\sigma_{\theta,Ed7} = \frac{n_{\theta,Ed7}}{t_7} + \frac{m_{\theta,Ed7}}{t_7^2/4} = \frac{1,534}{1} + \frac{0,1}{1^2/4} = 1,934 \text{ кН/см}^2$$

$$\tau_{x\theta,Ed7} = \frac{n_{x\theta,Ed7}}{t_7} + \frac{m_{x\theta,Ed7}}{t_7^2/4} = \frac{0,001}{1} + \frac{3,7 \times 10^{-3}}{1^2/4} = 0,016 \text{ кН/см}^2$$

б) фон Мизестің келтірілген есептік кернеулерді анықтау (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.4)

Формуласы):

$$\sigma_{e,Ed7} = \sqrt{\sigma_{x,Ed7}^2 + \sigma_{\theta,Ed7}^2 - \sigma_{x,Ed7} \cdot \sigma_{\theta,Ed7} + 3 \cdot \tau_{x\theta,Ed7}^2}$$

$$\sigma_{e,Ed7} = \sqrt{3,003^2 + 1,934^2 - 3,003 \times 1,934 + 3 \times 0,016^2} = 2,637 \text{ кН/см}^2$$

в) дәнекерленген құралымдар үшін баламалы есептік кедергі (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.5)

Формуласы):

$$f_{e,Rd4} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1} = 23,5 \text{ кН/см}^2$$

мұнда  $\gamma_{M0}$  - иімділіктің шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M0} = 1,00$ ;

$f_y$  - қабықша қабырғасы табақшасының аққыштық шегі,  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

г) келтірілген тең әсерлі кернеулер бойынша көтергіш қасиетін тексеру (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.10) Формуласы):

$$\sigma_{e,Ed7} \leq f_{e,Rd7} \quad 2,637 \text{ кН/см}^2 < 23,5 \text{ кН/см}^2 \quad \text{Шарт орындалды}$$

д) жеке тең әсерлілер бойынша көтергіш қасиеттер

— меридиональды бағыттағы көтергіш қасиеті (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.7) Формуласы):

$$n_{x,Rd7} = f_u \cdot t_7 / \gamma_{M2} = 36 \times 1 / 1,25 = 28,8 \text{ кН/см}$$

— айналма бағыттағы көтергіш қасиеті (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.8) Формула):

$$n_{\theta,Rd7} = f_u \cdot t_7 / \gamma_{M2} = 36 \times 1 / 1,25 = 28,8 \text{ кН/см}$$

— жанама кернеулер бойынша көтергіш қасиеті (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.9) Формуласы):

$$n_{x\theta,Rd7} = 0,57 \cdot f_y \cdot t_7 / \gamma_{M0} = 0,57 \times 23,5 \times 1 / 1 = 13,4 \text{ кН/см}$$

мұнда  $f_u$  — созылу беріктігінің шегі,  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ ;

$\gamma_{M0}$ ,  $\gamma_{M2}$  — жеке сенімділік коэффициенттері,  $\gamma_{M0} = 1$ ,  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

е) жеке тең әсерлілер бойынша тексеру (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.11) - (5.13)

Формулалары):

$$n_{x,Ed7} \leq n_{x,Rd7}, \quad 2,603 < 28,8 \quad \text{Шарт орындалды}$$

$$n_{\theta,Ed7} \leq n_{\theta,Rd7}, \quad 1,534 < 28,8 \quad \text{Шарт орындалды}$$

$$n_{x\theta,Ed7} \leq n_{x\theta,Rd7}, \quad 0,001 < 13,4 \quad \text{Шарт орындалды}$$

б учаске



а) тең әсерлі кернеулердің жалған құраушылары (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.2) және (5.3) Формулалары):

$$\begin{aligned}\sigma_{x,Ed6} &= \frac{n_{x,Ed6}}{t_6} + \frac{m_{x,Ed6}}{t_6^2/4} = \frac{2,661}{1} + \frac{0,005}{1^2/4} = 2,681 \text{ кН/см}^2 \\ \sigma_{\theta,Ed6} &= \frac{n_{\theta,Ed6}}{t_6} + \frac{m_{\theta,Ed6}}{t_6^2/4} = \frac{0,018}{1} + \frac{0,005}{1^2/4} = 0,038 \text{ кН/см}^2 \\ \tau_{x\theta,Ed6} &= \frac{n_{x\theta,Ed6}}{t_6} + \frac{m_{x\theta,Ed6}}{t_6^2/4} = \frac{0,055}{1} + \frac{1,4 \times 10^{-4}}{1^2/4} = 0,061 \text{ кН/см}^2\end{aligned}$$

б) фон Мизестің келтірілген есептік кернеулерді анықтау (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.4) Формуласы):

$$\begin{aligned}\sigma_{e,Ed6} &= \sqrt{\sigma_{x,Ed6}^2 + \sigma_{\theta,Ed6}^2 - \sigma_{x,Ed6} \cdot \sigma_{\theta,Ed6} + 3 \cdot \tau_{x\theta,Ed6}^2} \\ \sigma_{e,Ed6} &= \sqrt{2,681^2 + 0,038^2 - 2,681 \times 0,038 + 3 \times 0,061^2} = 2,66 \text{ кН/см}^2\end{aligned}$$

в) дәнекерленген құралымдар үшін баламалы есептік кедергі (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.5) Формуласы):

$$f_{e,Rd6} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1} = 23,5 \text{ кН/см}^2$$

мұнда  $\gamma_{M0}$  - иімділіктің шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M0} = 1,00$ ;

$f_y$  - қабықша қабырғасы табақшасының аққыштық шегі,  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

г) келтірілген тең әсерлі кернеулер бойынша көтергіш қасиетін тексеру (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.10) Формуласы):

$$\sigma_{e,Ed6} \leq f_{e,Rd6} \quad 2,66 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \quad \text{Шарт орындалды}$$

д) жеке тең әсерлілер бойынша көтергіш қасиеттер

— меридиональды бағыттағы көтергіш қасиеті (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.7) Формуласы):

$$n_{x,Rd6} = f_u \cdot t_6 / \gamma_{M2} = 36 \times 1 / 1,25 = 28,8 \text{ кН/см}$$

— айналма бағыттағы көтергіш қасиеті (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.8) Формуласы):

$$n_{\theta,Rd6} = f_u \cdot t_6 / \gamma_{M2} = 36 \times 1 / 1,25 = 28,8 \text{ кН/см}$$

— жанама кернеулер бойынша көтергіш қасиеті (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.9) Формуласы):

$$n_{x\theta,Rd6} = 0,57 \cdot f_y \cdot t_6 / \gamma_{M0} = 0,57 \times 23,5 \times 0,7 / 1 = 13,4 \text{ кН/см}$$

мұнда  $f_u$  — созылу беріктігінің шегі,  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ ;

$\gamma_{M0}, \gamma_{M2}$  — жеке сенімділік коэффициенттері,  $\gamma_{M0} = 1$ ,  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

е) жеке тең әсерлілер бойынша тексеру (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.11) - (5.13) Формулалары):

$$n_{x,Ed6} \leq n_{x,Rd6}, \quad 2,661 < 28,8 \quad \text{Шарт орындалды.}$$

$$n_{\theta,Ed6} \leq n_{\theta,Rd6}, \quad 0,018 < 28,8 \quad \text{Шарт орындалды}$$

$$n_{x\theta,Ed6} \leq n_{x\theta,Rd6}, \quad 0,055 < 13,4 \quad \text{Шарт орындалды}$$

5 учаске

а) тең әсерлі кернеулердің жалған құраушылары (1993-4-1 ҚР ҚН ЕН-нің (5.2) және (5.3) Формулалары):

$$\begin{aligned}\sigma_{x,Ed5} &= \frac{n_{x,Ed5}}{t_5} + \frac{m_{x,Ed5}}{t_5^2/4} = \frac{2,731}{1} + \frac{0,03}{1^2/4} = 2,851 \text{ кН/см}^2 \\ \sigma_{\theta,Ed5} &= \frac{n_{\theta,Ed5}}{t_5} + \frac{m_{\theta,Ed5}}{t_5^2/4} = \frac{0,392}{1} + \frac{0,03}{1^2/4} = 0,512 \text{ кН/см}^2 \\ \tau_{x\theta,Ed5} &= \frac{n_{x\theta,Ed5}}{t_5} + \frac{m_{x\theta,Ed5}}{t_5^2/4} = \frac{0,071}{1} + \frac{3 \times 10^{-3}}{1^2/4} = 0,083 \text{ кН/см}^2\end{aligned}$$

б) фон Мизестің келтірілген есептік кернеулерді анықтау (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.4) Формуласы):

$$\sigma_{e,Ed5} = \sqrt{\sigma_{x,Ed5}^2 + \sigma_{\theta,Ed5}^2 - \sigma_{x,Ed5} \cdot \sigma_{\theta,Ed5} + 3 \cdot \tau_{x\theta,Ed5}^2}$$

$$\sigma_{e,Ed5} = \sqrt{2,851^2 + 0,512^2 - 2,851 \times 0,512 + 3 \times 0,083^2} = 2,63 \text{ кН/см}^2$$

в) дәнекерленген құралымдар үшін баламалы есептік кедергі (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.5) Формуласы):

$$f_{e,Rd5} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1} = 23,5 \text{ кН/см}^2$$

мұнда  $\gamma_{M0}$  - иімділіктің шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M0} = 1,00$ ;

$f_y$  - қабықша қабырғасы табақшасының аққыштық шегі,  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

г) келтірілген тең әсерлі кернеулер бойынша көтергіш қасиетін тексеру (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.10) Формуласы):

$$\sigma_{e,Ed5} \leq f_{e,Rd5} \quad 2,63 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \quad \text{Шарт орындалды}$$

д) жеке тең әсерлілер бойынша көтергіш қасиеттер

— меридиональды бағыттағы көтергіш қасиеті (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.7) Формуласы):

$$n_{x,Rd5} = f_u \cdot t_5 / \gamma_{M2} = 36 \times 1 / 1,25 = 28,8 \text{ кН/см}$$

— айналма бағыттағы көтергіш қасиеті (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.8) Формуласы):

$$n_{\theta,Rd5} = f_u \cdot t_5 / \gamma_{M2} = 36 \times 1 / 1,25 = 28,8 \text{ кН/см}$$

— жанама кернеулер бойынша көтергіш қасиеті (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.9) Формуласы):

$$n_{x\theta,Rd5} = 0,57 \cdot f_y \cdot t_5 / \gamma_{M0} = 0,57 \times 23,5 \times 1 / 1 = 13,4 \text{ кН/см}$$

мұнда  $f_u$  — созылу беріктігінің шегі,  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ ;

$\gamma_{M0}, \gamma_{M2}$  — жеке сенімділік коэффициенттері,  $\gamma_{M0} = 1$ ,  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

е) жеке тең әсерлілер бойынша тексеру (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.11) – (5.13) Формуалары):

$$n_{x,Ed5} \leq n_{x,Rd5}, \quad 2,713 < 28,8 \quad \text{Шарт орындалды.}$$

$$n_{\theta,Ed5} \leq n_{\theta,Rd5}, \quad 0,392 < 28,8 \quad \text{Шарт орындалды}$$

$$n_{x\theta,Ed5} \leq n_{x\theta,Rd5}, \quad 0,071 < 13,4 \quad \text{Шарт орындалды.}$$

4.2 Юбканың цилиндрлік қабықшасының орнықтылығын тексеру.

Дайындауға жіберу сапасы – стандартты сапа параметрі  $Q = 16$  1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.1 Кестесі бойынша.

Қабықша бойынша сақиналы және көлденең қаттылық қырлары – жоқ.

а) жетілмегендік амплитудасының репрезентативті мәні  $w_{ok}$  (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.14) Формуласы):

$$w_{ok} = \frac{t}{Q} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{1}{16} \times \sqrt{\frac{225}{1}} = 0,938 \text{ см}$$

б) жетілмегендік болған кездегі серпінді төмендету коэффициенті  $\alpha_0$  қысым болмаған жағдайда (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.15) Формуласы):

$$\alpha_0 = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot \psi \cdot \left(\frac{w_{ok}}{t}\right)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \times 1 \times \left(\frac{0,938}{1}\right)^{1,44}} = 0,226$$

мұнда кернеулердің әркелкілік параметрі  $\psi = 1$ , өйткені шеңбер бойынша біркелкі қысу жағдайы бар.

в) серпінді кезіндегі орнықтылықтың жойылудың шекті кернеулері (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.28) Формуласы):

$$\sigma_{x,Rcr} = \frac{E}{\sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot \frac{t}{r} = 0,605 \cdot E \cdot \frac{t}{r} = 0,605 \times 2,06 \times 10^{-4} \times \frac{1}{225} = 55,39 \text{ кН/см}^2$$

е) орнықтылықты төмендету коэффициенті  $\chi_x$  қабықшаның салыстырмалы икемділігінің функциясы сияқты анықталады  $\lambda_x$  (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.30) – (5.35) Формулалары):

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}}} = \sqrt{\frac{23,5}{55,39}} = 0,651; \quad \bar{\lambda}_0 = 0,2 \text{ и } \bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_0}{1 - \beta}} = \sqrt{\frac{0,226}{1 - 0,6}} = 0,752$$

$$\text{т. к. } \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_p \text{ то } \chi_x = 1 - \beta \cdot \left( \frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta = 1 - 0,6 \times \left( \frac{0,651 - 0,2}{0,752 - 0,2} \right)^1 = 0,509$$

мұнда -  $\beta = 0,6$  және  $\eta = 1,0$ .

ж) орнықтылықтың жойылуының шекті кернеулердің сипатты мәні (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.29) Формуласы):

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x \cdot f_y = 0,509 \times 23,5 = 11,97 \text{ кН/см}^2$$

з) орнықтылық жойылған кезде есептік мембраналық кернеулер (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.36) Формуласы):

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1} = 11,97 / 1,1 = 10,88 \text{ кН/см}^2$$

мұнда  $\gamma_{M1}$  – орнықтылықтың шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M1} = 1,10$  1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.9.2.2 Тармағы бойынша.

и) қабықша орнықтылығын тексеру (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.37) Формуласы):

Барлық ұзындық бойынша юбканың қалыңдығы бірдей болғандықтан, есептік тең әсерлі меридиональды мембраналық кернеулерді  $n_{x,Ed}$  5, 6 және 7 учаскелеріндегі максималды мәндеріне тең қылып аламыз,  $n_{x,Ed} = 2,731 \text{ кН/см}$ .

$$n_{x,Ed} \leq t \cdot \sigma_{x,Rd}$$

$$t \cdot \sigma_{x,Rd} = 1 \times 10,88 = 10,88 \text{ кН/см}$$

$$2,731 \text{ кН/см} < 10,88 \text{ кН/см} \text{ Шарт орындалды}$$

#### 4.3 Юбканың іргесіндегі тіреу сақинасы

а) Анкерлік бұрандамалардың немесе анкерлерді бекітудің басқа нүктелердің арасындағы шеңбердің периметрі бойынша аралық  $4 \cdot \sqrt{r \cdot t}$  аспауы тиіс, мұнда  $t$  — бұл қабықша табақшасының жергілікті қалыңдығы.

юбканың шеңберінің ұзындығын анықтаймыз:

$$l_{окр} = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \times 3,14 \times 225 = 1,414 \times 10^3 \text{ см}$$

Бекітпелер арасындағы сегменттің шекті жіберілетін ұзындығын анықтаймыз:

$$l_{segm,max} = 4 \cdot \sqrt{r \cdot t} = 4 \times \sqrt{225 \times 1} = 60 \text{ см}$$

мұнда  $t = 1 \text{ см}$  - юбка қабырғасының қалыңдығы.

$r = 225 \text{ см}$  – юбка іргесінің радиусы.

анкерлік бұрандамалар арасындағы учаскелердің минималды санын анықтаймыз:

$$n_{a,min} = \frac{l_{окр}}{l_{segm,max}} = \frac{1,414 \times 10^3}{60} = 23,56$$

тіректер санын қабылдаймыз  $n_a = 24$ .

сонда тірек учаскелердің арасындағы арақашықтық:

$$l_{segm} = \frac{l_{окр}}{n_a} = \frac{1,414 \times 10^3}{24} = 58,905 \text{ см}$$

құрайды.

б) Бункердің іргесіндегі тіреу сақинасының тік өсінің айналасында (айналма бағыттағы көлденең июге қарсы тұру үшін) июші қаттылығы  $EI_z$  келесі мәнмен ұсынылған (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (8.54) Формуласы)  $EI_{z,min}$  минималды мәнінен көп болуы тиіс:

$$EI_{z,min} = k \cdot E \cdot r \cdot t^3 = 0,10 \times 2,06 \times 10^4 \times 225 \times 1^3 = 4,635 \cdot 10^5 \text{ кН} \cdot \text{см}^2$$

мұнда  $t = 1$  см, іргесінің тіреу сақинасымен межелес белдеу қабырғасының қалыңдығы ретінде алынады.

$$k = 0,10.$$

Табақшадан жасалған тіреу сақинасын аламыз  $b_{op} = 20$  см,  $t_{op} = 2$  см, сонда тіреу сақинаының июші қаттылығы тік өсінің айналасында келесіні құрайды:

$$EI_z = E \frac{t_{op} \cdot b_{op}^3}{12} = 2,06 \times 10^4 \times \frac{2 \times 20^3}{12} = 2,747 \times 10^7 \text{ кН} \cdot \text{см}^2$$

Шартты тексеру:

$$EI_z = 2,747 \times 10^7 \text{ кН} \cdot \text{см}^2 > EI_{z,min} = 4,635 \times 10^5 \text{ кН} \cdot \text{см}^2$$

Шарт орындалып жатыр. Тіреу сақинаының июші қаттылығы минималды шекті жіберілетін қаттылықтан жоғары.

#### 4.4 Анкерлік бекіткіш

Егер сандық әдістерді қолданумен мұқият есептеулер жүргізілмесе, онда анкерлік бекітудің шеңбер бірлігіне  $p_{x,Ed}$  жергілікті жұлып алу күшін қабылдау үшін жеткілікті көтергіш қасиеті болуы тиіс (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (5.85) – (5.88) Формулалар бойынша):

$$\begin{aligned} p_{x,Ed} &= p_{n,Edw} \cdot \left( \frac{L^2}{2r} \right) \cdot \left[ C_1 + \sum_{m=2}^M m^2 \cdot C_m \left\{ 1 - \frac{3}{4} \left( \frac{a_1}{a_2 + a_3} \right) \right\} \right] = \\ &= 0,43 \times 10^{-4} \times \left( \frac{370^2}{2 \times 225} \right) \left[ 0,25 + 4^2 \times (0,25 + 1 + 0,45 - 0,15) \left\{ 1 - \frac{3}{4} \left( \frac{1,24}{1,18 + 0,1} \right) \right\} \right] \\ &= 0,092 \frac{\text{кН}}{\text{см}} \end{aligned}$$

мұнда:

$$a_1 = 1 + 10,4 \cdot \left( \frac{r}{m \cdot L} \right)^2 = 1 + 10,4 \times \left( \frac{225}{4 \times 370} \right)^2 = 1,24$$

$$a_2 = 1 + 7,8 \cdot \left( \frac{r}{m \cdot L} \right)^2 = 1 + 7,8 \times \left( \frac{225}{4 \times 370} \right)^2 = 1,18$$

$$a_3 = 3 \cdot \frac{r^3 \cdot t}{I_z} \cdot \left( \frac{r}{L} \right)^3 \left( \frac{1}{m^4 \cdot (m^2 - 1)^2} \right) = 3 \times \frac{225^3 \times 1}{1, (3) \times 10^3} \left( \frac{225}{370} \right)^3 \left( \frac{1}{4^4 \times (4^2 - 1)^2} \right) = 0,1$$

мұнда  $p_{n,Edw} = 0,43 \times 10^{-4}$  кН/см<sup>2</sup> - статикалық есептен анықталған, жел болған кезде тоқырау нүктесіндегі қысымның есептік мәні;

$L = 370$  см - цилиндрлік қабықша қабырғасының жалпы биіктігі;

$t = 1$  см - цилиндрлік қабықша қабырғасының орташа қалыңдығы;

$I_z$  - цилиндрдің үстінгі жиегіндегі оның тік өсіне қатысты сақина қимасының инерция сәті (айналма бағыттағы ию):

$$I_z = \frac{t_{op} b_{op}^3}{12} = \frac{2 \cdot 20^3}{12} = 1,333 \cdot 10^3 \text{ см}^4.$$

$a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  коэффициенттердің мағыналары  $m = 2$ ,  $m = 3$ ,  $m = 4$  үшін келесі кестеде келтірілген.

$m$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$m^2 C_m \left\{ 1 - \frac{3}{4} \left( \frac{a_1}{a_2 + a_3} \right) \right\}$
2	1,96	1,72	40,03	3,86
3	1,43	1,32	1,11	2,27
4	1,24	1,18	0,10	-0,656

$n_{x,Ed}$  үзілетін күштер ұзындықтың шеңберіне қатынасы:

$$n_{x,Ed} = p_{n,Edw} \left( \frac{L^2}{2r} \right) \left[ C_1 + \sum_{m=2}^M m^2 C_m \left\{ 1 - \frac{3}{4} \left( \frac{a_1}{a_2 + a_3} \right) \right\} \right] =$$

$$= 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \frac{370^2}{2 \cdot 225} \right) [0,25 + (3,86 + 2,27 - 0,656)] = 0,216 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

Мұндағы  $p_{n,Edw} = 0,825 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5 = 1,24 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2$  – желдік қысымның есептік мағынасы (Мысалдағы 5 Суретті қар.).

$C_m$  – желдік қысымның шеңбер бойынша үйлестіру коэффициенті; бункер 2 классқа жатқандықтан, келесі мағыналар қабылданған

$C_1 = +0,25$ ,  $C_2 = +1,0$ ,  $C_3 = +0,45$  и  $C_{x4} = -0,15$  (НП.2.29 бойынша).

$M$  – желдік қысымдағы бөлген кездегі жоғарғы үйлесу,  $M = 4$  (НП.2.29 бойынша).

Бір бұрандама қабылдайтын күшті анықтаймыз:

$$N_1 = \frac{n_{x,Ed} \cdot l_{segm}}{j} = \frac{0,216 \cdot 58,91}{2} = 6,362 \text{ кН},$$

мұндағы  $j = 2$  – учаскедегі анкерлі бұрандамалар саны.

Анкерлі бұрандамалардың есептік кедергісі:

$$f_y = \frac{f_{yb}}{\gamma_{M2}} = \frac{19}{1,25} = 15,2 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

мұндағы  $f_{yb} = 19 \text{ кН/см}^2$  – диаметр кем дегенде 2 см болған кездегі анкерлік бұрандаманың беріктігі (іргетас бұрандамаларын ГОСТ 535 Ст3кп2-И болаттан бойынша қабылдаймыз).

$\gamma_{M5} = 1,25$  – салмақ түсіретін қабілеттілігі бар бұрандаманың жеке коэффициенті (ҚР ҚН EN 1993-1-8 2.1 Кесте).

Анкерлік бұрандаманың талап етілетін ауданы:

$$A_b = \frac{N_1}{f_y} = \frac{6,61}{15,2} = 0,438 \text{ см}^2.$$

СТ СЭВ 182-75 бойынша диаметрі 2 см ауданы  $A_b = 2,45 \text{ см}^2$  анкерлік бұрандаманы қабылдаймыз.

## 5.5 Цилиндрлік қабырғалардағы тесіктердің құралымдық шешімдері

### 5.5.1 Жалпы ережелер

Бункердің қабырғасындағы тесіктер тесіктің қасында бекітілетін тік және көлденең қаттылық қырлармен күшейтілуі тиіс. Егер тесік пен қаттылық қыр арасында қабықша қабырғасының учаскесі орналасса, оны есептеу кезінде ескермеген жөн.

### 5.5.2 Тік бұрышты тесіктер

5.5.2.1 Тік бағыттағы тік бұрышты тесіктің периметрі бойынша күшейту өлшемі (5.9 Суретін қар.) қаттылық қырларының көлденең қималарының ауданы қабырғаның кесілген бөлігінің көлденең қимасының ауданынан аз емес болатындай, бірақ бұл алаңнан аз дегенде екі есе аспайтындай болуы тиіс.

5.5.2.2 Көлденең бойынша күшейту өлшемі қаттылық қырлардың көлденең қимасының ауданы қабырғаның кесілген бөлігінің көлденең қимасының ауданынан аз болмайтындай болуы тиіс.

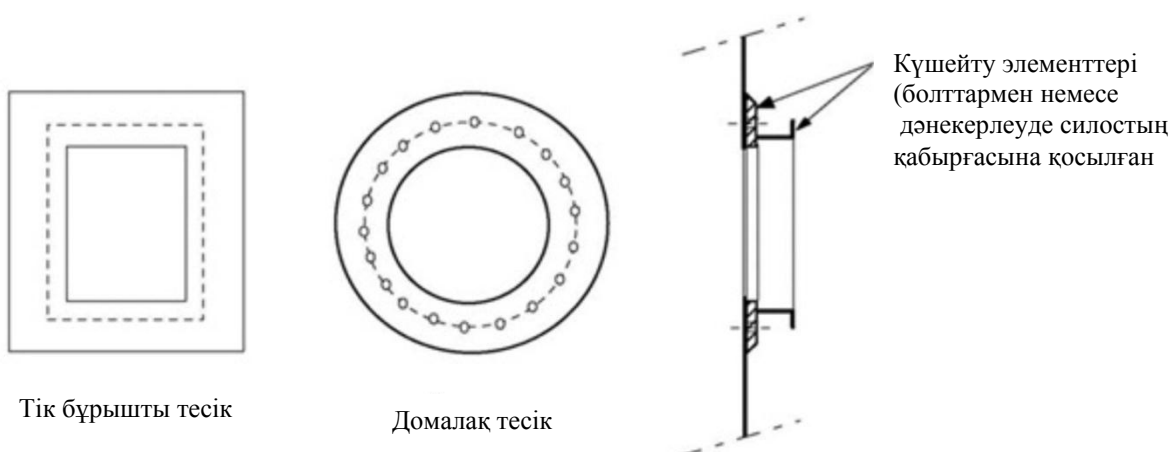
5.5.2.3 Тең әсерлі мембраналық кернеулердің бағыттарына перпендикулярлы қаттылық қырлардың июші қаттылығы тесіктің орталық сызығында орналасқан және тесіктің болуынан шыққан тең әсерлі кернеулер бағытындағы қабықша қабырғасының салыстырмалы  $\delta$  мына  $\delta_{\max}$  шамадан көп болмауы тиіс, ол келесі формула бойынша анықталады:

$$\delta_{\max} = k_{d1} \cdot \sqrt{\frac{t}{r}} \cdot d \quad (5.89)$$

мұнда  $d$  - тең әсерлі кернеулердің бағытына перпендикулярлы өлшенген тесіктің ені.  
 $k_{d1} = 0,02$  (НП.2.30).

5.5.2.4 Тік күшейткіш қаттылық қырлар тесіктің үстінгі және астыңғы шегінен  $2\sqrt{rt}$  шамасынан көп шығауы тиіс.

5.5.2.5 Қабықша қаттылық қабырғалардың ұштарына жалғасатын аймақтарда қабырға орнықтылығының жергілікті жойылуын болдырмайтындай, жергілікті жүктеулер үшін 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.4.5 және 5.4.6 Тармақтарының ережелерін қолданумен есептелуі тиіс.



**5.9 Сурет – Бункер қабырғаларында тесіктерді күшейту үшін қырларды әдеттегі орналастыру сұлбалары**

## 5.6 Пайдаланушылық жарамдылығы бойынша шекті күйлер

### 5.6.1 Негізгі ережелер

5.6.1.1 Цилиндрлік бункерлердің табақша қабырғаларының пайдаланушылық жарамдылығы бойынша шекті күйлер ретінде келесіні қабылдаған жөн:

— құралымды тиімді пайдалануға қолайсыз әсер ететін деформациялар немесе майысулар;

— көтергіш, сол секілді екінші кезектегі құрылымдық элементтердің зақымдануын болдыратын деформациялар, майысулар, дірілдер немесе тербелістер.

5.6.1.2 Деформациялар, майысулар және дірілдер жоғарыда көрсетілген критерийлерді қанағаттандыру үшін шектелуі тиіс (шекті мәндері болуы тиіс).

5.6.1.3 Әр пайдалану саласы үшін нақты шекті мәндер жобалық ұйымның, тапсырыс берушінің және тиісті қадағалау органның арасында сақталатын қатты материалдардың пайдалану саласы мен табиғатын ескерумен келісілуі тиіс.

### 5.6.2 Ауытқулар

5.6.2.1 Горизонталь бойынша жалпы ауытқудың шекті мәні келесі формула бойынша анықталады:

$$w_{\max} = k_{d2} \cdot H \quad (5.90)$$

мұнда  $H$  - іргеден шатырға дейін өлшенген құралымның биіктігі.

ЕСКЕРТПЕ  $k_{d2}$  мәні ұлттық қосымшада берілуі мүмкін.  $k_{d2} = 0,02$  (МҚ2.31).мәні ұсынылады.

5.6.2.2 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.6.2 (2) Тармағына сәйкес, желдің әсерінен жергілікті тарамдаған майысудың шекті мәні (көлденең қиманың шеңберден ауытқуы) келесі мәндердің ең азы ретінде қабылдауы тиіс:

$$w_{r,\max} = k_{d3} \cdot r \quad (5.91)$$

$$w_{r,\max} = k_{d4} \cdot t \quad (5.91)$$

мұнда  $t$  - қабықша қабырғасындағы ең жіңішке бөлігінің жергілікті қалыңдығы.

ЕСКЕРТПЕ  $k_{d3}$  және  $k_{d4}$  мәндері ұлттық қосымшада берілуі мүмкін.  $k_{d3} = 0,05$  және  $k_{d4} = 20$  (МҚ.2.32) мәндер ұсынылады.

## 6 КОНУСТЫҚ ШҰҢҒЫМАЛАРДЫ ЖОБАЛАУ

### 6.1 Есептеу негіздері

#### 6.1.1 Жалпы ережелер

6.1.1.1 Конустық шұңғымалардың өлшемдерін 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің бөлімнің талаптарына сәйкес көтергіш қасиеттің шекті күйлері бойынша негізгі есептік талаптар орындалатындай тағайындаған жөн.

6.1.1.2 Конустық қабықшалардың сенімділігін бағалауы ҚР ҚН EN 1993-1-6 ережелеріне сәйкес жүргізілуі тиіс.

### **6.1.2 Шұңғыманың қабырғаларын есептеу**

6.1.2.1 Шұңғыманың конустық қабырғасының өлшемдері қызмет ету мерзім бойы келесімен қамтамасыз етілгеніне тексерілуі тиіс:

— ішкі қысымның және қабырғаға үйкелесі күштің әсерінен жарылуға көтергіш қасиеті;

— ауыспалы аймақта иілген кезде жергілікті аққыштық бойынша көтергіш қасиеті;

— қажу қирауы бойынша көтергіш қасиеті;

— түйіндердің және қосылыстардың көтергіш қасиеті;

— жүк түсіру құрылғылардан және механизмдерден көлденең жүктеулер кезінде орнықтылықты жою бойынша көтергіш қасиеті;

— жергілікті кернеулер кезіндегі көтергіш қасиеті.

6.1.2.2 Қабықшаның қабырғасы ҚР ҚН EN 1993-1-6 талаптарына сәйкес есептелуі тиіс, 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 6.3 – 6.5 Тармақтарын орындаған кезде қабырға бұл стандарттың талаптарына да сәйкес келетін жағдайлардан басқа.

6.1.2.3 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 6.3 – 6.5 Тармақтарының ережелері  $\beta$  0° -дан 70° дейін сүйір ұштың жартылай бұрышымен (қабырғаның тікке ылдийі) шұңғымаларға ғана қолданылуы мүмкін.

6.1.2.4 1 зардаптар тобының бункерлер шұңғымалары үшін қажудың және аз циклді қажудың шекті күйлері бойынша тексерулерді жүргізбеуге болады, егер келесі шарттар орындалатын болса

а) ауыспалы аймақтағы үзіліске есептеу өзгертілген жеке қауіпсіздік коэффициентін қолданумен еорындалған  $\gamma_{M0} = \gamma_{M0g} = 1,4$  (МҚ.2.33);

б) ауыспалы түйінге жалғасатын аймақта меридиональды қаттылық қабырғалары немесе жеке тіреу түйіндері жоқ.

### **6.2 Шұңғыма қабықшамының нысандары арасындағы айырмашылықтар**

1) Майысқан болат табақшалардан жасалған шұңғыманың қабырғасы изотропты деп аталады.

2) Сыртқы қаттылыққабырғалары бар шұңғыманың қабырғасы «сыртқы күшейткіші бар қабырға» деп аталады.

3) Бірден көп жүк түсіру тесігі бар шұңғыма көп каналды деп аталады.

4) Тіректерге немесе тіреулерге дискретті сүйенетін бункердің бөлігі болып табылатын шұңғыма «дискретті сүйелген» деп аталады.



### **6.3 Конустық шұңғымалардың көтергіш қасиеті**

#### **6.3.1 Жалпы ережелер**

6.3.1.1 Конустық шұңғыма ҚР ҚН EN 1993-1-6 талаптарына сәйкес келуі тиіс. Бұл тараптар 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 6.3 Тармағына сәйкес есептік көтергіш қасиетті бағалаудың әдістерін қолданған кезде орындалады.

6.3.1.2 Ерекше назарды бункердің әртүрлі бөліктері жүкті тиген жіне түсірген кезде қысымның әртүрлі эпюраларының әрекеттерінен максималды күшті сезе алу мүмкіндігіне аудару қажет.

6.3.1.3 Шұңғыма элементтеріндегі тең әсерлі кернеулер, жалпы жағдайда, қабықшаның мембраналық теориясы бойынша анықталады. Жүктеудің әртүрлі эпюралары туралы қосымша ақпарат және сол кезде пайда болатын мембраналық теориясы бойынша тең әсерлі қабықшалардың есептелуі 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің В қосымшасында ұсынылған.

#### **6.3.2 Дәнекерленген немесе бұрандалы қосылыстарда қаттылық қырларсыз изотропты қабырғасы бар шұңғымалар**

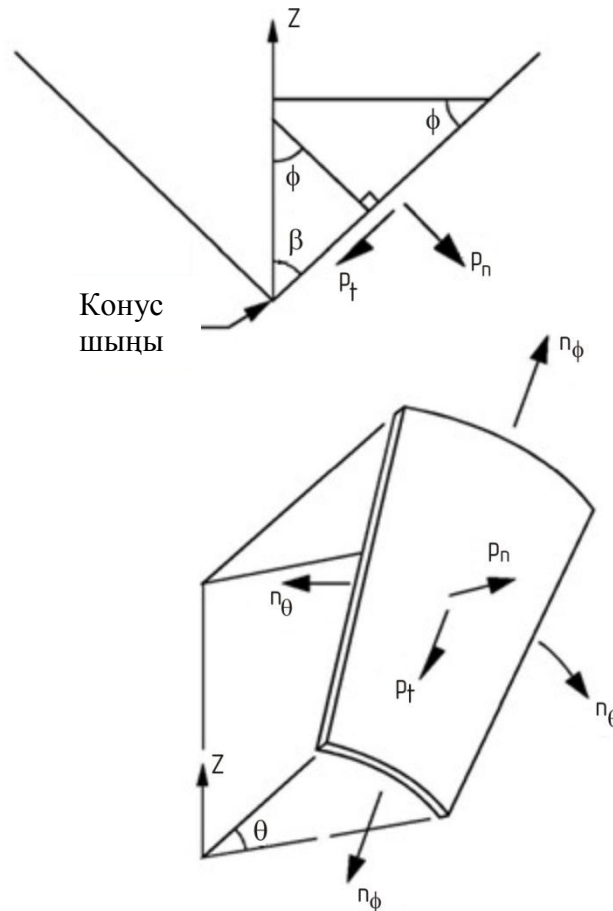
##### **6.3.2.1 Жалпы ережелер**

Конустық шұңғыма тіреу күштерінен меридиональды және айнала реакциялардың өзара байланысын ескерумен қабықша ретінде қарастырылуы тиіс.

##### **6.3.2.2 Пластикалық механизм немесе шұңғыма қабықшасының үзілісі**

6.3.2.2.1 Үзіліске беріктікті есептеу шұңғыманың қабырғада әртүрлі өзгеретін қысым эпюралары бар жүктеулерге шалдығуы мүмкін екені ескерілуі тиіс. Аошақтық кезінде бұзылу қабырғаға оңай таратылатындықтан, және жалпы жағдайда, тұтқыр болмайтын, шұңғыманың әр нүктесінің максималды есептік әсерін қабылдау үшін жеткілікті көтергіш қасиеті болуы тиіс.

6.3.2.2.2 Конустық шұңғыманың меридианы бойымен дәнекерленген және бұрандама қосулардың әр нүктесінің толтыру және түсіру шарттарына сәйкес келетін қысымның нәтижесінде пайда болатын максималды мембраналық күштерді қабылдау үшін жеткілікті өлшемдері болуы тиіс.



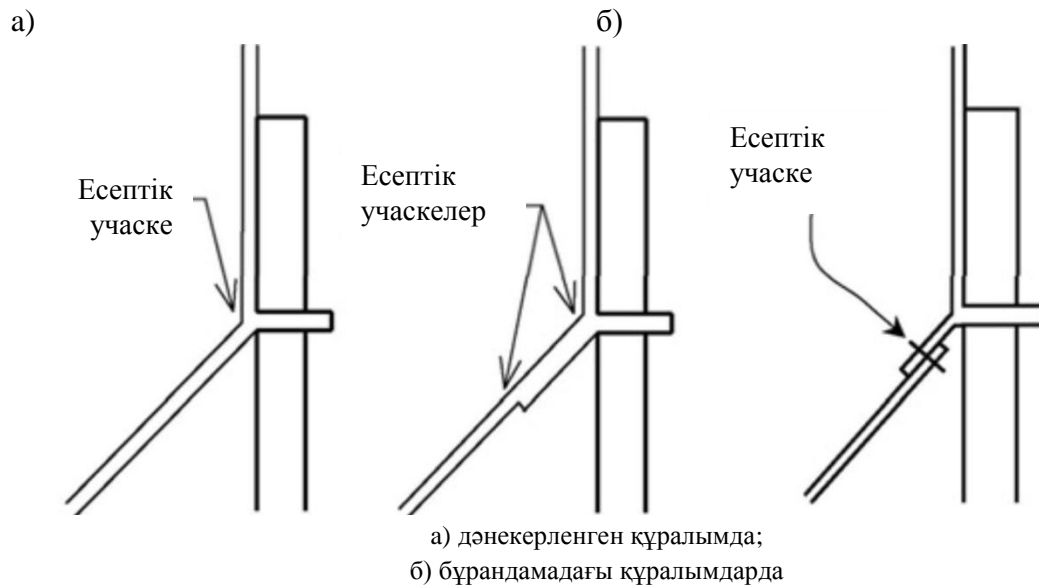
**6.1 Сурет – Шұңғыма қабықшасының сегменті**

6.3.2.2.3 Құйғыштың шеңберінің бойымен бағытталған дәнекерленген немесе бұрандама қосулардың мұндай қосудан төмен салынуы мүмкін қатты материалдардың максималды жалпы салмағын көтере алатын пропорциялары болуы тиіс.

ЕСКЕРТПЕ Материалдардың салмағы ҚР ҚН EN 1991-4 бойынша анықталады.

### 6.3.2.3 Ауыспалы қосылыстағы үзіліс

6.3.2.3.1 Ауыспалы қосуда шұңғыманы қосудың айналма түйіні жүктеулердің мүмкін әркелкілігін ескерумен шұңғыма ұстайтын максималды меридиональды жүктеуді қабылдауға есептелуі тиіс.



**6.2 Сурет – Құйғыштың ауыспалы қосылысы: үзілу ықтималдығы**

6.3.2.3.2 Ауырпалық күшінен және сақталып жатқан материалдың ағысынан жүктеулер ғана қарастырылған кезде шеңбер бірлігіне меридиональды күш  $n_{\phi h, Ed, s}$  статикалық тепе-теңдік шартынан анықталады (қосылыстың ауданына бөлінген материалдың салмағы). Меридиональды күш 1991-4 ҚР ҚН EN-НІҢ бойынша анықталған симметриялық қысым нәтижесінде жіберіледі, және өтпелі қосылыс арқылы жіберіледі. Шеңбер бірлігіне жергілікті меридиональды күштің есептік мәні  $n_{\phi h, Ed}$  жүктеудің әркелкілігін ескеруімен келесі формула бойынша анықталады:

$$n_{\phi h, Ed} = g_{asym} \cdot n_{\phi h, Ed, s} \quad (6.1)$$

мұнда  $n_{\phi h, Ed, s}$  - жүктеулердің симметриялық шартынан алынған шұңғыманың үстінгі бөлігіндегі шеңбер ұзындығының бірлігіне меридиональды мембраналық күшінің есептік мәні (ҚР ҚН EN 1993-4-1 В қосымшасы);

$g_{asym} = 1,2$  - ассиметриялық нәтижесіндегі кернеуді көбейту коэффициенті.

6.3.2.3.3 Егер дискреттік тіреулерден, түсіру құрылғылар мен механизмдерден, материалдың қысымынан және т.б. симметриялық емес және жинақталған күштер бар болса, зардаптардың 2 тобының бункерлерінде шұңғыманың есептелуі қабықшалардың сәттік теориясы бойынша орындалуы тиіс. Есептеу негізінде шұңғымадан өтпелі қосылысқа жіберілетін шеңбер ұзындығының бірлігіне меридиональды күштердің максималды жергілікті мәндер анықталады.

6.3.2.3.4 Шұңғыманың өтпелі қосылыстағы көтергіш қасиеті  $n_{\phi h, Rd}$  келесі формула бойынша анықталады:

$$n_{\phi h, Rd} = k_r \cdot t \cdot f_u / \gamma_{M2} \quad (6.2)$$

мұнда  $f_u$  - созу кезіндегі беріктік шегі.

$k_r = 0,90$  (МҚ.2.35).

### 6.3.2.4 Қалындықты өзгерту учаскелерінде немесе өтпелі қосылыстарда иілімділік бойынша беріктікті тексеру

6.3.2.4.1 Иілімді механизм бойынша бұзылған кездегі шұңғыманың көтергіш қасиеті конустың үстінгі шегінде немесе табақша қалыңдығының өзгеру нүктесінде тең әсерлі меридиональды мембраналық кернеулер бойынша анықталады  $n_{\phi}$ .

6.3.2.4.2 есептік көтергіш қасиеті  $n_{\phi,Rd}$  келесі формула бойынша анықталады

$$n_{\phi,Rd} = \frac{\left( \frac{r \cdot t \cdot f_y}{r - 2.4 \cdot \sqrt{\frac{r \cdot t}{\cos \beta}} \cdot \sin \beta} \right) \cdot \left( \frac{0.91 \cdot \mu + 0.27}{\mu + 0.15} \right)}{\gamma_{Mo}} \quad (6.3)$$

мұнда  $t$  - қабырғаның жергілікті қалыңдығы;

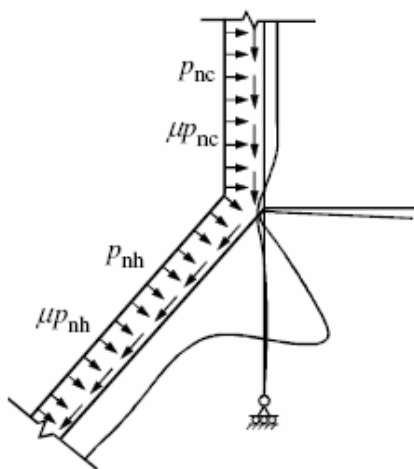
$r$  - иілімді механизмнің жоғарғы нүктедегі шұңғыманың радиусы (шұңғыманың үстінгі шетінен немесе табақша қалыңдығы өзгерудің үстінгі нүктесінде);

$\beta$  - шұңғыманың жартылай бұрышы;

$\mu$  - материалдың шұңғыма қабырғасына максималды үйкеліс коэффициенті.

6.3.2.4.3 Қабықшаның барлық есептік нүктелерінде есептегіш көтергіш қасиеті шартын қанағаттандыруы тиіс:

$$n_{\phi,Ed} \leq n_{\phi,Rd} \quad (6.4)$$



6.3 Сурет – Конустық шұңғыманың иілімді бұзылуы

### 6.3.2.5 Өтпелі қосылыстың аймағындағы жергілікті ию

6.3.2.5.1 Аз циклді қажуды және қажу бұзылуды болдырмау үшін шұңғыма бірлесе деформациясынан (цилиндрдің және конустың) және тепе-тендік жағдайларынан пайда болатын шұңғыманың үстінгі бөлігіндегі күрт майысуға төзе алатындай жобалануы тиіс.

6.3.2.5.2 Зардаптардың 1 тобының бункерлері үшін бұл талапты орындамауға болады.

6.3.2.5.3 Егер құралымның ақырғы элементтер әдісімен есептелуі орындалмаса, шұңғыманың үстінгі бөлігіндегі июдің жергілікті кернеуінің мәні келесі төмендегі әдістеме бойынша анықталуы тиіс.

6.3.2.5.4 Сақиналы қырға өтпелі түйінде әрекет ететін есептік тарамдаған күшті  $F_{e,Ed}$  және сәтті  $M_{e,Ed}$  формулалар бойынша анықтаған жөн:

$$F_{e,Ed} = n_{\phi h,Ed} \cdot \sin \beta - F_h - F_c \quad (6.5)$$

$$M_{e,Ed} = F_c \cdot x_c - F_h \cdot x_h \quad (6.6)$$

келесі болған кезде:

$$F_c = 2 \cdot x_c \cdot p_{nc} \quad (6.7)$$

$$F_h = 2 \cdot x_h \cdot (0.82 - 0.15 \cdot \mu \cdot \cot \beta) \cdot p_{nh} \quad (6.8)$$

$$x_c = 0.39 \cdot \sqrt{r \cdot t_c} \quad (6.9)$$

$$x_h = 0.39 \cdot \sqrt{\frac{r \cdot t_h}{\cos \beta}} \quad (6.10)$$

мұнда  $t_h$  - шұңғыма қабырғасының жергілікті қалыңдығы;

$t_c$  - өтпелі қосылыстағы цилиндр қабырғасының жергілікті қалыңдығы;

$r$  - өтпелі қосылыстың радиусы (шұңғыманың үстінгі бөлігінде);

$\beta$  - шұңғыманың жартылай бұрышы;

$\mu$  - материалдың шұңғыма қабырғасына максималды үйкеліс коэффициенті.

$n_{\phi h,Ed}$  - шұңғыманың үстінгі бөлігінде тең әсерлі меридиональды мембраналық кернеулердің есептік мәні;

$p_{nh}$  - шұңғымаға тікелей өтпелі қосылыспен қалыпты қысымның жергілікті мәні;

$p_{nc}$  - цилиндрге тікелей өтпелі қосылыспен қалыпты қысымның жергілікті мәні.

6.3.2.5.5 Шұңғыманың үстінгі бөлігіндегі июдін жергілікті кернеулері  $\sigma_{b\phi h,Ed}$  келесі формула бойынша анықталады:

$$\sigma_{b\phi h,Ed} = \left(\frac{6}{\Delta}\right) \cdot \{(a_2 - 2 \cdot a_1 \cdot \eta) \cdot M_{e,Ed} - \rho \cdot (a_3 - a_2 \cdot \eta) \cdot F_{e,Ed}\} - \left(\frac{6}{t_h^2}\right) \cdot F_h \cdot x_h \quad (6.11)$$

келесі болған кезде:

$$\Delta = 2 \cdot a_1 \cdot a_3 - a_2^2 \quad (6.12)$$

$$\rho = 0.78 \cdot \sqrt{r} \quad (6.13)$$

$$\eta = \sqrt{t_h \cdot \cos \beta} \quad (6.14)$$

$$a_1 = t_s^{3/2} + t_c^{3/2} + \frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos \beta}} + \frac{A_{ep}}{\rho} \quad (6.15)$$

$$a_2 = t_s^2 - t_c^2 + t_h^2 \quad (6.16)$$

$$a_3 = t_s^{5/2} + t_c^{5/2} + t_h^{5/2} \cdot \sqrt{\cos \beta} \quad (6.17)$$

мұнда  $t_h$  - шұңғыма қабырғасының жергілікті қалыңдығы;

$t_c$  - цилиндрдің өтпелі қосылыстағы қабырғасының жергілікті қалыңдығы;

$t_s$  - өтпелі қосылыстан төмен қабырға қалыңдығының жергілікті юбкасы;

$A_{ep}$  - өтпелі қосылыста сақиналы қырдың көлденең қимасының ауданы (жалғасатын қабықша сегменттерінің аудандарын ескермей);

$r$  - өтпелі қосылыстың радиусы (шұңғыманың үстінгі бөлігінде).

### 6.3.2.6 Дискретті тіректерге тірелген бункердің құрамына кіретін шұңғымалар

6.3.2.6.1 Бункер жеке тіректерге немесе ұстындарға тірелген кезде өтпелі қосылыста сақиналы арқалықтың салыстырмалы қаталдығын, шұңғымада меридиональды мембраналық кернеулердің әркелкілігін анықтаған кезде цилиндрдің және шұңғыманың қабырғасын ескерген жөн.

6.3.2.6.2 Зардаптардың 1 тобының бункерлерінде бұл талапты орындамауға болады.

6.3.2.6.3 Шұңғыма 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 6.3.2.3 және 6.3.2.4 Тармақтарына сәйкес тіректерге жалғасатын шұңғыманың үстінгі бөлігіндегі жергілікті меридиональды созу күштерінің ең үлкен мәндеріне тозе алатындай жобалануы тиіс.

### 6.3.2.7 Шұңғыма қабырғаларының орнықтылығының жойылуы

6.3.2.7.1 Зардаптардың 1 тобының бункерлерінде шұңғыма қабырғаларының орнықтылығын тексермеуге болады.

6.3.2.7.2 Шұңғыманың көтергіш қасиеті орнықтылығы жойылған кезде түсіру құрылғылардың және механизмдердің жазық күштерінен немесе симметриялық емес тік әсерлерден тексерілуі тиіс.

6.3.2.7.3 Шұңғыманың үстінгі бөлігінде орнықтылық жойылған кезде шұңғыманың көтергіш қасиеті  $n_{\phi h, Rd}$  келесі формула бойынша анықталады

$$n_{\phi h, Rd} = 0,06 \cdot \alpha_{xh} \cdot E \cdot \left( \frac{t_h^2}{r} \right) \cdot \cos \beta / \gamma_{M1} \quad (6.18)$$

мұнда  $\alpha_{xh} = 0,1$  - орнықтылық жойылған кезде жетілмегендік коэффициенті;

$t_h$  - шұңғыма қабырғасының жергілікті қалыңдығы;

$r$  - өтпелі қосылыстағы шұңғыманың радиусы;

$\gamma_{M1} = 1,10$ .

(6.18) Формуласы бойынша анықталған  $n_{\phi, Rd}$  мәні келесіден аспауы тиіс

$$n_{\phi, Rd} = t_h \cdot f_y / \gamma_{M1}$$

6.3.2.7.4 Шұңғыманың үстінгі бөлігіндегі меридиональды күш мына шартты қанағаттандыруы тиіс:

$$n_{\phi h, Ed} \leq n_{\phi h, Rd} \quad (6.19)$$

3 МЫСАЛ Бункердің конустық құйғышын есептеу

1 Бастапқы деректер

1.1 Есептеу үшін бастапқы деректер (1 мысалды қар.). Шұңғыманың сұлбасы 1 мысалдың 1 Суретінде келтірілген.

1.2 Есептеу шарттары:

а) 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 6.3 – 6.5 Тармақтарындағы ережелерді қолдануға рұқсат етіледі, өйткені шұңғыма ұшының жартылай бұрышы  $0^\circ < \beta = 30^\circ < 70^\circ$ ;

б) шұңғыманың қабырғасы – изотропты қатандық қырларысыз.

2 Жүктеулерді жинау (1 мысалды қар.).

3 Статикалық есеп (1 мысалды қар.).

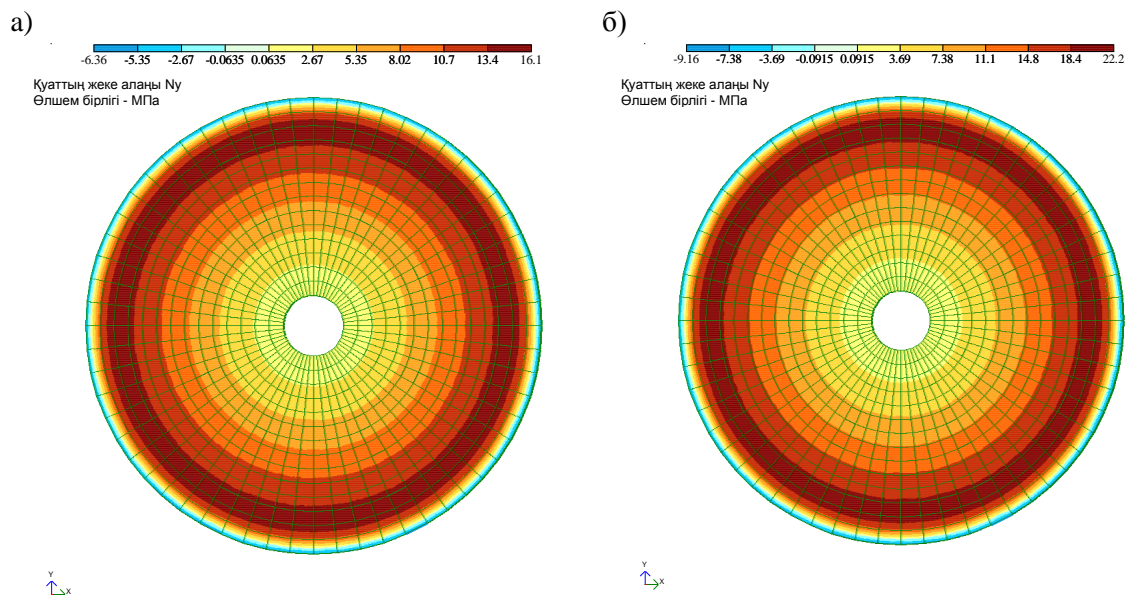
3.1 Бункердің деформацияланған сұлбасы (1 мысалды қар.).

3.2 Есептеу нәтижелері

Статикалық есептің нәтижелері бойынша бункер шұңғымасының элементтерінде қалыпты кернеулер және июші сәттер шығарылған.

Шұңғыма қабырғаларына бірінші есептік үйлесімнің жүктеу әрекеттерінен қалыпты сақиналы кернеулерді үлестіруі 1а Суретте көрсетілген, екінші есептік үйлесуден – 1б Суретінде көрсетілген. Қалыпты меридиональды кернеулерді шұңғыма қабырғаларына бірінші есептік үйлесудің жүктеулер әрекеттерінен үлестіруі 2а Суретте көрсетілген, екінші есептік үйлесуден – 2б Суретінде, үшінші есептік үйлесуден – 2в Суретінде көрсетілген. Қабықшадағы қалыпты кернеулер статикалық есептердің нәтижелері бойынша МПа-да алынған.

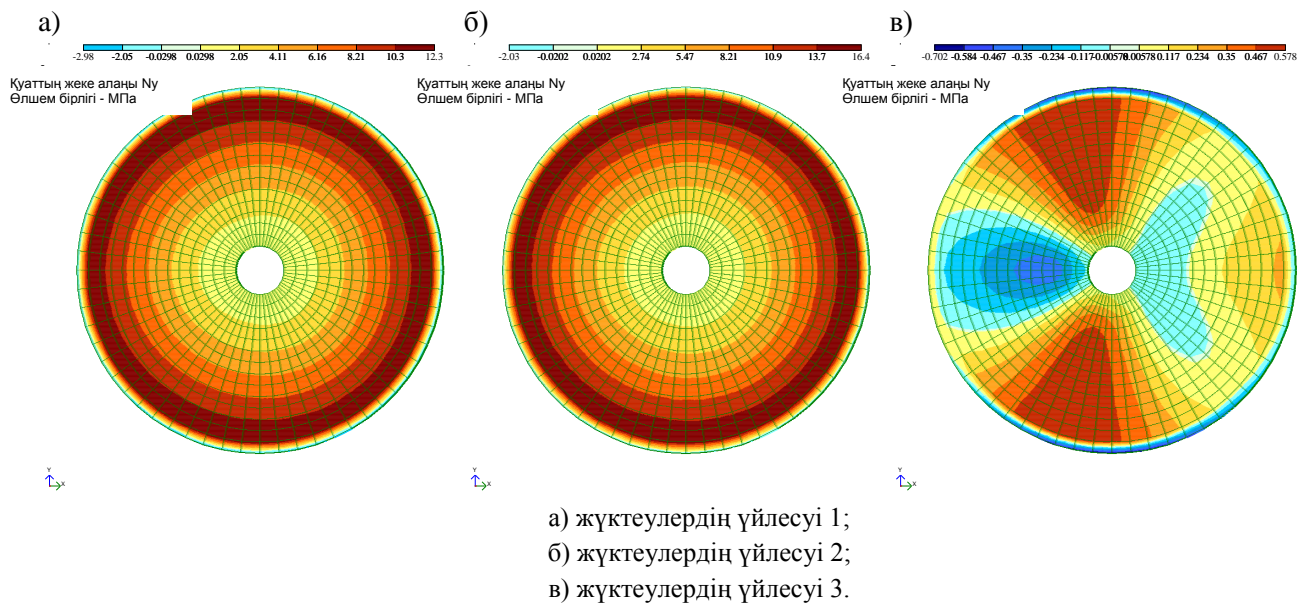
Статикалық есеп кезінде алынған кернеулердің мәндерінен (кернеулердің мәндері қабырғаның тапсырылған қалыңдығы үшін МПа-да алынған) әрі қарай бункер элементтерінің беріктігі мен орнықтылығын тексеру үшін қолданылатын кернеулердің есептік мәндеріне ауысу үшін 1, 2 және 3 Кестелер құрылған. Көрсетілген кестелерге бункер элементтерінің есептік учаскелеріндегі максималды кернеулер жазылған. Нәтижелер қабықшаның нақты қалыңдығы кезіндегі кернеулерден қабықшаның бір сантиметр ұзындығына кернеулерге ауысу арқылы қабықшаның кернеуленген жағдайының құрауыштары түрінде ұсынылған. Бункер қабықшаның элементтеріндегі кернеулер үш есептік үйлесімділіктер үшін бөлек келтірілген, өйткені әртүрлі тексерулерде ҚҚС құрауыштары сәйкес келмейді.



а) жүктеулердің үйлесуі 1;

б) жүктеулердің үйлесуі 2.

**1 Сурет – Қалыпты сақиналы кернеулерді  $p_0$  шұңғыма қабырғаларына үлестіру, МПа**



**2 Сурет – Меридиональды қалыпты кернеулерді  $n_x$  шұңғыма қабырғаларында үлестіру, МПа**

**1 Кесте – 1 үйлесім бойынша есептік кернеулер**

Учаскенің	Кернеуленген жағдайдағы құраушылар					
№	$n_{\theta,Ed}$	$m_{\theta,Ed}$	$n_{x,Ed}$	$m_{x,Ed}$	$n_{x\theta,Ed}$	$m_{x\theta,Ed}$
	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см
10	2,041	0,050	1,524	0,170	0,006	$2,7 \times 10^{-3}$
9	1,554	0,010	1,165	$4,0 \times 10^{-3}$	0,005	$2,2 \times 10^{-3}$
8	0,943	0,140	0,663	0,100	0,020	0,020

**2 Кесте – 2 үйлесім бойынша есептік кернеулер**

Учаскенің	Кернеуленген жағдайдағы құраушылар					
№	$n_{\theta,Ed}$	$m_{\theta,Ed}$	$n_{x,Ed}$	$m_{x,Ed}$	$n_{x\theta,Ed}$	$m_{x\theta,Ed}$
	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см
10	2,839	0,070	2,037	0,220	0,060	$2,7 \times 10^{-3}$
9	2,110	0,010	1,531	$5,0 \times 10^{-3}$	0,050	$2,2 \times 10^{-3}$
8	1,246	0,140	0,858	0,110	0,200	0,020

**3 Кесте – 3 үйлесім бойынша есептік кернеулер**

Учаскенің №	Меридиональды кернеу, $n_{x,Ed}$ кН/см
10	0,070
9	0,064
8	0,068



1 Кестеде, 2 Кестеде және 3 Кестеде келтірілген кернеуленген жағдайдың құраушыларына түсініктемелер (1 мысалды қар.).

4 Конустық шұңғыманың қабықшасын есептеу

4.1 Өтпелі түйінді үзіліске беріктігін есептеу

– шеңбердің бірлігіне жергілікті меридиональды күші  $n_{\phi h, Ed}$  жүктеудің әркелкілігін ескерумен (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (6.1) Формуласы бойынша):

$$n_{\phi h, Ed} = g_{asym} \cdot n_{\phi h, Ed, s} = 1,2 \times 2,037 = 2,444 \frac{\text{кН}}{\text{см}}$$

мұнда  $n_{\phi h, Ed, s}$  - симметриялық жүктеу кезінде шыққан шұңғыма ұшындағы шеңбердің бірлігіне меридиональды мембраналық күштің есептік мәні,

$$n_{\phi h, Ed, s} = n_{\phi, Ed} = 2,037 \frac{\text{кН}}{\text{см}}$$

$g_{asym}$  - кернеудің ассиметриялылығын үлкейту коэффициенті.  $g_{asym} = 1,2$ .

– өтпелі қосылыстағы есептік кедергісі (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (6.2) Формуласы бойынша):

$$n_{\phi h, Rd} = \frac{k_r \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \times 1 \times 36}{1,25} = 25,92 \frac{\text{кН}}{\text{см}}$$

мұнда  $f_u$  - үзіліске беріктіктің шегі.

$$f_u = 36 \text{ кН/см}^2;$$

$k_r = 0,90$  1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 6.3.2.4 Тармағы бойынша;

$\gamma_{M2}$  - үзіліске беріктіктің шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M2} = 1,25$ ;

$t = 1 \text{ см}$  – шұңғыма қабырғасының қалыңдығы.

– беріктікті тексеру:

$$n_{\phi h, Ed} = 2,444 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < n_{\phi h, Rd} = 25,92 \frac{\text{кН}}{\text{см}}$$

Қорытынды: өтпелі түйінің үзіліске беріктігі қамтамасыз етілген.

$$n_{\phi, Rd} = \frac{\left( \frac{rtf_y}{r - 2,4 \sqrt{\frac{rt}{\cos \beta}} \cdot \sin \beta} \right) \left( \frac{0,91\mu + 0,27}{\mu + 0,15} \right)}{\gamma_{M0}} =$$

$$= \frac{\left( \frac{225 \cdot 1,0 \cdot 23,5}{225 - 2,4 \sqrt{\frac{225 \cdot 1}{\cos 30^\circ}} \cdot \sin 30^\circ} \right) \left( \frac{0,91 \cdot 0,43 + 0,27}{0,43 + 0,15} \right)}{1,00} = 29,32 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

мұнда  $t = 1 \text{ см}$  - қабырғаның жергілікті қалыңдығы;

$r = 225 \text{ см}$  - беріктікті тексерудің ең жоғары нүктесіндегі – шұңғыма ұшындағы радиус;

$\beta = 30^\circ$  - шұңғыманың жартылай бұрышы;

$\mu$  - хоппер қабырғасына үйкеліс коэффициенті. Цемент үшін қабырғаға үйкелу мәнін ең үлкен мән бойынша аламыз  $\mu = \mu_m \cdot a_\mu = 0,46 \times 1,07 = 0,492$ , мұнда мәндер  $\mu_m$  и  $a_\mu$  1991-4 ҚР ҚН EN-НІҢ, Е қосымшасы бойынша белгіленген.

$\gamma_{M0}$  - иімділіктің шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті,  $\gamma_{M0} = 1,00$ .

$f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$  – аққыштық шегі бойынша есептік кедергі.

– көтергіш қасиетін тексеру:

$$n_{\phi, Ed} = 2,037 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < n_{\phi, Rd} = 29,32 \frac{\text{кН}}{\text{см}}$$

Қорытынды: иілімділік механизмі бойынша көтергіш қасиеті қамтамасыз етілген.

4.3 Өтпелі қосылыс аймағында жергілікті ию кезінде беріктікті тексеру

а) шұңғыма ұшындағы тең әсерлі меридиональды мембраналық кернеулердің есептік мәні:  $n_{\phi h, Ed} = 2,444 \text{ кН/см}$  - статикалық есептен алынады.

б) тиімді тарамдаған күшті  $F_{e, Ed}$  және сәтті  $M_{e, Ed}$  анықтау үшін параметрлер (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (6.7) – (6.10) Формулалары бойынша) анықталған:

$$x_c = 0,39 \cdot \sqrt{r \cdot t_c} = 0,39 \times \sqrt{225 \times 0,8} = 5,232 \text{ см}$$

$$x_h = 0,39 \cdot \sqrt{\frac{r \cdot t_h}{\cos \beta}} = 0,39 \times \sqrt{\frac{225 \times 1}{\cos 30^\circ}} = 6,286 \text{ см}$$

$$F_c = 2x_c p_{nc} = 2 \cdot 5,232 \cdot 4,594 \cdot 10^{-3} = 0,048 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

$$F_h = 2x_h (0,82 - 0,15 \mu \operatorname{ctg} \beta) p_{nh} = 2 \cdot 6,286 \cdot (0,82 - 0,15 \cdot 0,43 \cdot \operatorname{ctg} 30^\circ) \cdot 11,28 \cdot 10^{-3} = 0,10 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

мұнда  $t_h = 1,0 \text{ см}$  - хоппер қабырғасының жергілікті қалыңдығы;

$t_c = 0,8 \text{ см}$  - өтпелі қосылыс аймағында цилиндр қабырғасының жергілікті қалыңдығы;

$r = 225 \text{ см}$  - өтпелі қосылыстың радиусы (хоппердің үстінгі бөлігінде);

$\beta = 30^\circ$  - хоппердің ұшындағы толық емес бұрышы;

$\mu$  - хоппер қабырғасына үйкеліс коэффициенті;

$p_{nh}$  - хопперге тікелей өтпелі қосылыстың астында қалыпты қысымның жергілікті шамасы,

$p_{nh} = p_{ne} \cdot \gamma_Q = 7,52 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 = 11,28 \cdot 10^{-3} \text{ кН/см}^2$  - статикалық есептен анықталған;

$p_{nc}$  - цилиндрге тікелей өтпелі қосылыстың астында қалыпты қысымның жергілікті шамасы,

$p_{nc} = p_{ne} \cdot \gamma_Q = 3,063 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 = 4,594 \cdot 10^{-3} \text{ кН/см}^2$ ; - статикалық есептен анықталған;

в) өтпелі сақинаға әсер ететін тиімді тарамдаған күш (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (6.5) Формуласы бойынша):

$$F_{e, Ed} = n_{\phi h, Ed} \sin \beta - F_h - F_c = 2,444 \cdot \sin 30^\circ - 0,10 - 0,048 = 1,074 \frac{\text{кН}}{\text{см}}.$$

г) өтпелі сақинаға әсер ететін тиімді сәт (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 6.6 Формуласы бойынша):

$$M_{e, Ed} = F_c x_c - F_h x_h = 0,048 \cdot 5,232 - 0,10 \cdot 6,286 = -0,38 \frac{\text{кН}}{\text{см}} \cdot \text{см}$$

д) шұңғыманың үстінгі бөлігінде июдін жергілікті кернеуін анықтау үшін параметрлер (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (6.12) – (6.17) Формулалар бойынша анықталған):

$$\rho = 0,78 \cdot \sqrt{r} = 0,78 \times \sqrt{225} = 11,7 \text{ см}^{1/2}$$

$$\eta = \sqrt{t_h \cdot \cos \beta} = \sqrt{1 \times \cos 30^\circ} = 0,931 \text{ см}^{1/2}$$

$$a_1 = t_s^{3/2} + t_c^{3/2} + \frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos \beta}} + \frac{A_{ep}}{\rho} = 1^{3/2} + 0,8^{3/2} + \frac{1^{3/2}}{\sqrt{\cos 30^\circ}} + \frac{60}{11,7} = 7,918 \text{ см}^{3/2}$$

$$a_2 = t_s^2 - t_c^2 + t_h^2 = 1^2 - 0,8^2 + 1^2 = 1,36 \text{ см}^2$$

$$a_3 = t_s^{5/2} + t_c^{5/2} + t_h^{5/2} \sqrt{\cos \beta} = 1^{5/2} + 0,8^{5/2} + 1^{5/2} \times \sqrt{\cos 30^\circ} = 2,503 \text{ см}^{5/2}$$

$$\Delta = 2 \cdot a_1 \cdot a_3 - a_2^2 = 2 \times 7,918 \times 2,503 - 1,36^2 = 37,79 \text{ см}^4$$

мұнда  $t_h = 1,0 \text{ см}$  - хоппер қабырғасының жергілікті қалыңдығы;

$t_c = 0,8 \text{ см}$  - өтпелі қосылыс аймағында цилиндр қабырғасының жергілікті қалыңдығы;

$t_s = 1,0 \text{ см}$  - өтпелі қосылыстан төмен қабырға қалыңдығының жергілікті юбкасы;

$A_{ep}$  - өтпелі қосылыс аймағында сақинаның көлденең қимасының ауданы (қабықшаның межелес сегменттерінің нақты әсерін ескеруісіз),  $A_{ep} = b_p \cdot t_p = 30 \times 2 = 60 \text{ см}^2$ ;

$r = 225 \text{ см}$  - өтпелі қосылыстың радиусы (хоппердің үстінгі бөлігінде);

е) шұңғыманың үстінгі бөлігіндегі июдің жергілікті кернеулері (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (6.11) Формуласы бойынша):

$$\begin{aligned}\sigma_{b\phi h,Ed} &= \left(\frac{6}{\Delta}\right) \{(a_2 - 2a_1\eta)M_{e,Ed} - \rho(a_3 - a_2\eta)F_{e,Ed}\} - \left(\frac{6}{t_h^2}\right) F_{e,Ed} x_h = \\ &= \left(\frac{6}{37,79}\right) \{(1,36 - 2 \cdot 7,918 \cdot 0,931)(-0,38) - 11,7 \cdot (2,503 - 1,36 \cdot 0,931) \cdot 1,074\} - \\ &\quad - \left(\frac{6}{1,0^2}\right) \cdot 1,074 \cdot 6,286 = -42,16 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}\end{aligned}$$

ж) беріктікті тексеру:

$$|\sigma_{b\phi h,Ed}| = 43,601 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} > \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1,0} = 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$$

мұнда  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$  – аққыштық шегі бойынша есептік кедергі.

$\gamma_{M0} = 1,0$  - иімділіктің шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті.

Өтпелі қосылыс аймағында жергілікті ию кезіндегі беріктік қамтамасыз етілмеген.

Қорытынды: жергілікті аймақта шұңғыманың қалыңдығын  $n$  шамасына үлкейтеміз:

$$k = \frac{|\sigma_{b\phi h,Ed}|}{\left(\frac{f_y}{\gamma_{M0}}\right)} = \frac{42,16}{\left(\frac{23,5}{1,00}\right)} = 1,79.$$

Жергілікті аймақта қабырғаның қалыңдығын келесіге тең қылып аламыз:

$$t_{hi} \geq k \cdot t_h = 1,79 \cdot 1,0 = 1,79 \text{ см.}$$

4.4 Беріктікке есептеу.

а) есептік тең әсерлі меридиональды кернеулер статикалық есептегі шұңғыманың учаскесі үшін максималды болып алынады:  $n_{\phi h,Ed} = 2,444 \text{ кН/см}$

б) беріктік бойынша көтергіш қасиеті (1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің (6.18) Формуласы):

$$n_{\phi h,Rd} = 0,6\alpha_{xh}E \left(\frac{t_h^2}{r}\right) \frac{\cos \beta}{\gamma_{M1}} = 0,6 \cdot 0,10 \cdot 2,10 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{2,0^2}{225}\right) \frac{\cos 30^\circ}{1,10} = 17,64 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

мұнда  $\alpha_{xh} = 0,10$  - көлденең иілген кезде иілімдік деформациясына сезімділік коэффициенті;

$E = 2,06 \times 10^4 \text{ кН/см}^2$  - болап серпіндігінің модулі;

$t_h = 2,0 \text{ см}$  - хоппер қабырғасының жергілікті қалыңдығы;

$r = 225 \text{ см}$  - өтпелі қосылыстың радиусы (хоппердің үстінгі бөлігінде).

$\gamma_{M1} = 1,10$  - иімділіктің шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті;

тексеру –  $n_{\phi h,Rd}$  мына  $n_{\phi,Rd} = t_h \cdot f_y / \gamma_{M1}$  аспауы тиіс

$$n_{\phi h,Rd} = 17,64 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < n_{\phi,Rd} = \frac{2,0 \cdot 23,5}{1,10} = 42,73 \frac{\text{кН}}{\text{см}}$$

в) Беріктікті тексеру:

$$\begin{aligned}n_{\phi h,Ed} &\leq n_{\phi h,Rd} \\ n_{\phi h,Ed} &= 2,444 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < n_{\phi h,Rd} = 17,64 \frac{\text{кН}}{\text{см}}\end{aligned}$$

Қорытынды: беріктік бойынша көтергіш қасиеті қамтамасыз етілген.

## **6.4 Құйғыштардың арнайы құрылымдары**

### **6.4.1 Тіреу құрылымдары**

Шұңғымадан төмен орналасқан дискретті тіреулердің әсерін 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 5.4 Тармағына сәйкес анықтаған жөн. Ұстау құрылғыларды ҚР ҚН EN 1993-1-1 сәйкес есептеген жөн, сонымен қатар бункер мен ұстау құрылғысы арасындағы шекара 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 1.1.4 Тармағына сәйкес анықталады.

### **6.4.2 Ұстындағы шұңғыма**

6.4.2.1 Егер шұңғыманың тұрқысы шұңғыманың үстінгі шетінің жеке тіректерге тіреліп тұрса, шұңғыманың құрылымын ҚР ҚН EN 1993-1-6 жазылған ережелер бойынша қабықшалардың сәталды теориясын қолданумен есептеген жөн.

6.4.2.2 Шұңғыманың құрылымыдық шешімі ұстау құрылымдардан тіреу реакцияларын қабылдауды қамтамасыз етуі тиіс.

6.4.2.3 Шұңғыманың түйіндері және қосылыстары сол қосылыстармен жіберілетін күштерден пайда болатын тең әсерлі кернеулердің ең үлкен жергілікті мәндерге есептелуі тиіс.

6.4.2.4 Орнықтылықтың жойылуы бойынша шұңғыманың көтергіш қасиетінің есептеуін қысу мембаранлық кернеулер пайда болған аймақтарда ҚР ҚН EN 1993-1-6 бойынша орындалады.

### **6.4.3 Симметриялық емес шұңғыма**

Егер шұңғыманың өсі тігінен емес, тікке қатысты  $\omega$  бұрышпен еңкейіп өтсе (осы құралдың 6.4 Суретін қар.), тік еңісі бар, мұндай геометриямен ұқсастандырылған жақтағы жоғарыланған меридиональды кернеулерді бағалаған жөн және дұрыс жергілікті меридиональды кедергіні қамтамасыз ету мақсатымен шаралар қабылдаған жөн.

### **6.4.4 Қаттылық қырлары бар конустар**

6.4.4.1 Қаттылықтың бойлық қырлар шұңғыманың үстінгі бөлігіне сенімді бекітілуі тиіс.

6.4.2.2 Егер шұңғыманың қабырғасы меридиональды қаттылық қырларымен күшейтілген болса, бойлық қырлар мен қабырғалардың деформациясының үйлесімділік әсері есептеуде ескерілуі тиіс. Шұңғыма қабырғасының айналма бағытында созылуы бойлық қаттылық қырлардың қысылуына әкеледі, оны Пуассон коэффициенті арқылы есептеген кезде ескеру қажет.

6.4.2.3 Шұңғыма қабырғаларының табақшаларын қосылуының бірлесе деформациясы нәтижесінде пайда болатын үлкейтілген созу күштерді қабылдау үшін жеткілікті өлшемдеру болуы тиіс.

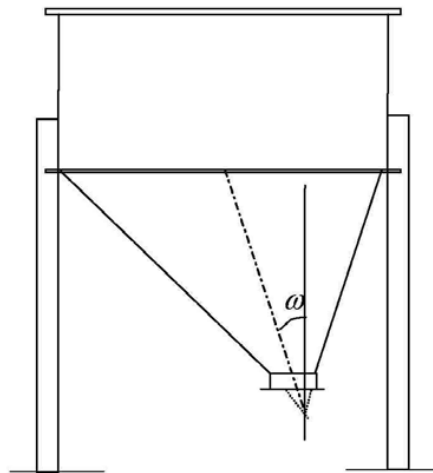
6.4.2.4 Бойлық қаттылық қырдың және қабырғаның бекітпесі олардың арасындағы пайда болатын күштердің әсеріне есептелуі тиіс.

#### 6.4.5 Сегменттерден тұратын конус

6.4.5.1 Егер шұңғыманың конусы еңістері әртүрлі бірнеше сегменттерден тұрса, олар әр сегментке сусымалы қатты материалдардың әсеріне сәйкес келетін құрылымдардың есебіне қосылуы және есептелуі тиіс.

6.4.5.2 Шұңғыма қабырғасының еңкею бұрышы өзгерген жерлерде қажетті көтергіш қасиетті қамтамасыз ету үшін пайда болатын қысу немесе созу айналма кернеулерді анықтаған жөн.

6.4.5.3 Шұңғыма жобасында ылдый өзгерген учаскелерде абразивті тозуы жоғары аймақтар пайда болатынын ескерген жөн.



6.4 Сурет – Цилиндрлік бөлікке бекітілген ұстындары бар симметриялық емес шұңғыма

#### 6.5 Пайдаланушылық жарамдылықтың шекті күйлері

##### 6.5.1 Негізгі ережелер

Егер шұңғымалардың пайдаланушылық жарамдылығын бағалау қағидаттарында қажеттілік туындаса, деформациялардың нақты шекті мәндері жобалық ұйым мен тапсырыс берушінің арасында келісілуге жатады.

##### 6.5.2[6.5.2(1)] Діріл

Жобада пайдалану уақытында шұңғымаға тым артық дірілдің әсеріне шалдықпайтынын кепілдейтін қажетті шаралар қарастырылуы тиіс.

## 7 ДОМАЛАҚ КОНУСТЫҚ ҚАҚПАҚ ҚҰРЫЛЫМДАРЫН ЖОБАЛАУ

### 7.1 Негізгі ережелер

7.1.1 Шатыр құрылымын жобалаған кезде есептеулерде тұрақты, уақытша, технологиялық, апаттық, жел, қар жүктеулерін және жартылай вакуумның әсерін ескеру қажет.

7.1.2 Есептеген кезде сақталып жатқан қатты материалдардың кездейсоқ толып кету немесе сұйықталу нәтижесінде жоғарыға бағытталған күштердің шатырына әсер ету мүмкіндігін ескеру қажет.

### 7.2 Қақпақтың құрылымдың пішіндері арасындағы ерекшеліктер

#### 7.2.1 Терминология

7.2.1 Ұстау арқалықтарсыз немесе сақиналарсыз, майысқан табақшалардан қалыптасқан қабықша түріндегі конустық шатыр қабықша-шатыр немесе ұсталынбайтын шатыр деп аталады.

7.2.2 Қабықша арқалықтармен немесе торлы жүйемен ұсталатын конустық шатыр қаңқа шатыр немесе ұсталатын шатыр деп аталады.

### 7.3 Бункердің домалақ конус қақпақтарының көтергіш қасиеті

#### 7.3.1 Қабықша-шатырлар

7.3.1.1 Күмбез-қабықша түріндегі шатырлар ҚР ҚН EN 1993-1-6 талаптарына сәйкес жобалануы тиіс. Төмендегі ережелерді орындау диаметрі 5 м аспайтын және шатырдың горизонтальға ылдйі  $\varphi$  40° аспайтын конустық шатырлар үшін бұл талаптардың қанағаттандыруын қамтамасыз етеді.

7.3.1.2 Фон Мзестің келтірілген кернеулері мембраналық күштердің және июші сәттердің әрекеттері кезінде келесі мәннен аспауы тиіс:

$$f_{e,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (7.1)$$

мұнда  $\gamma_{M0} = 1,0$  - иімділіктің шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті.

7.3.1.3 Орынқытылықты жойылудың сыншы сыртқы қысымы  $p_{n,Rcr}$  изотропты конустық шатыр үшін мына формула бойынша анықтаған жөн:

$$p_{n,Rcr} = 2.65 \cdot E \cdot \left( \frac{t \cdot \cos \varphi}{r} \right)^{2.43} \cdot (\tan \varphi)^{1.6} \quad (7.2)$$

мұнда  $r$  - шатырдың сыртқы радиусы;

$t$  - қабықша табақшасының ең кішкентай қалыңдығы;

$\varphi$  - конустың жазық бетке ылдйы.

7.3.1.5 Бойылқ ию кезіндегі есептік сыртқы қысым мына формула бойынша анықталуы тиіс:

$$p_{n,Rd} = \frac{\alpha_p \cdot p_{n,Rcr}}{\gamma_{M1}} \quad (7.3)$$

мұнда  $\gamma_{M1} = 1,1$  - орнықтылықтың жойылудың шекті күйі бойынша жеке қауіпсіздік коэффициенті.

$$\alpha_p = 0,20.$$

7.3.1.5 7.1 Тармағында белгіленген әсерлер нәтижесінде пайда болатын шатырға есептік максималды сыртқы қысым келесі шартқа сәйкес келуі тиіс:

$$P_{n,Ed} \leq P_{n,Rd} \quad (7.4)$$

### 7.3.2 Қаңқалы шатырлар

Жабынның табақша қаптауы арқалықтарға немесе торлы жүйеге сүйенетін қаңқалы немесе ұсталынатын шатырларды ҚР ҚН EN 1993-4-2 ережелеріне сәйкес есептеген жіне жобалаған жөн (Резервуарлар).

### 7.3.3 Карнизтік түйін

Шатырдың бункердің тік қабықшасымен қосу түйіннің, сонымен қатар бұл қосылыстағы сақиналы қаттылық қырының есептелуі ҚР ҚН EN 1993-4-2 (Резервуардар) ережелеріне сәйкес орындалуы тиіс.

## 8 ӨТПЕЛІ ҚОСЫЛЫСТАР МЕН САҚИНАЛЫ АРҚАЛЫҚТАРДЫ ЖОБАЛАУ

### 8.1 Негізгі ережелер

#### 8.1.1 Жалпы ережелер

8.1.1.1 Өтпелі түйіндегі болат сақиналы қырдың және сақиналы арқалықтың көтергіш қасиеттің шекті күйлері бойынша барлық негізгі есептік талаптары орындалатындай өлшемдері болуы тиіс.

8.1.1.2 Сақинаның сенімділігінің бағалауы ҚР ҚН EN 1993-1-6 талаптарының негізінде орындалуы тиіс, бұл талаптардың сақталуы осы стандартпен қамтамасыз етілген жағдайлардан басқа.

8.1.1.3 Зардаптардың 1 классының бункерлерінде қажу және аз циклді қажу бойынша шекті күйлерді тексеруді орындамауға болады.

#### 8.1.2 Сақиналы элементін есептеу

8.1.2.1 Сақиналы қыр және сақиналы арқалық қызмет ету мерзімі бойы келесілермен қамтамасыз етілгендеріне тексерілуі тиіс:

— айналма қысудың әрекеті кезіндегі иімділіктің шекті күйі бойынша көтергіш қасиеті;

— айналма қысудың әрекеті кезіндегі орнықтылықтың жойылуы бойынша көтергіш қасиеті;

— қысу немесе созу кернеулердің әрекеттері кезіндегі жергілікті аққыштық бойынша көтергіш қасиеті;

— тіреуден жоғары жергілікті қираулар бойынша көтергіш қасиеті;

— бұру бойынша көтергіш қасиеті;

— түйіндердің және қосылыстардың көтергіш қасиеті.

8.1.2.2 Сақиналы арқалық ҚР ҚН EN 1993-1-6 ережелерін қанағаттандыруы тиіс, бұл стандарттың ережелерін қанағаттандыру 8.2 – 8.5 Тармақтарында көрсетілген шарттарды орындаумен қамтамасыз етілетін жағдайлардан басқа.

8.1.2.3 бункерлер үшін 1 классты циклді созымдылық және көп циклді қажуы қарастырылмайды.

### 8.1.3 Терминология

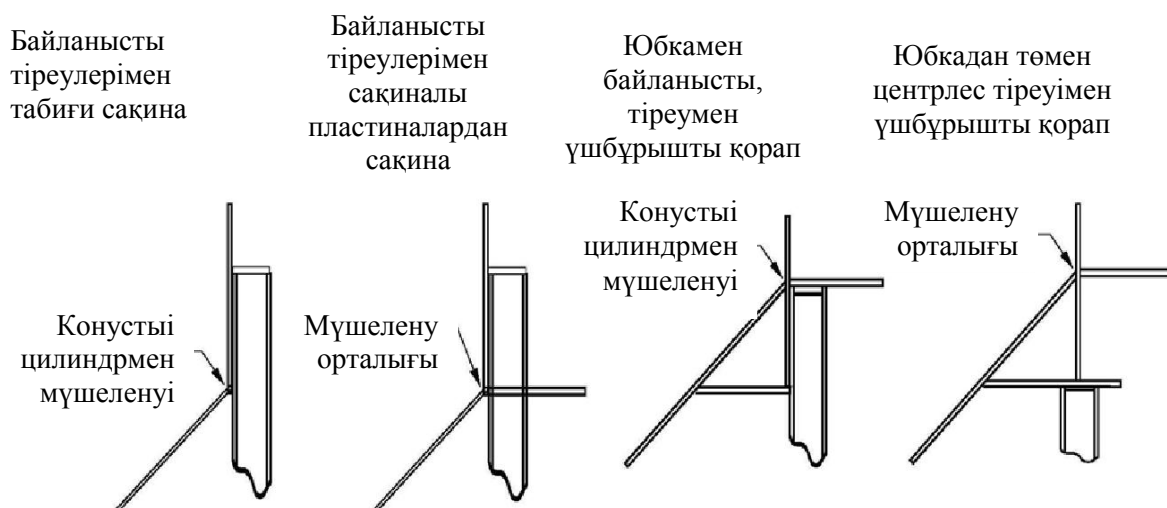
8.1.3.1 Шұңғымадан тек қана тармадалған күштерді қабылдауға арналған сақина өтпелі сақина деп аталады.

8.1.3.2 Әртүрлі элементтер арасындағы (мысалы, цилиндрдің қабырғасы мен дискреттік тіреулер арасындағы) тік күштерді жіберуге арналған сақина сақиналы арқалық деп аталады.

8.1.3.3 Шұңғыманың табақша қабықшасының орташа бетінің және өтпелі қосылыстағы цилиндрлік қабықша қабырғасының орташа бетінің қиылысу нүктесі қосылу орталығы деп аталады және шекті күйлер бойынша тексерулерді орындау үшін санау нүктесі болып табылады.

8.1.3.4 Өтпелі қосылыста белгіленген сақинасы жоқ бункердің (8.1 Суретті қар.), табиғи сақина деп аталатын түйінге жалғасатын қабықшалар элементтерінен тұратын есептік сақинасы бар.

8.1.3.5 Өтпелі қосылыста орналасқан сақиналы табақша сақиналы қыр деп аталады



8.1 Сурет – Сақинаның пішіндері

8.1.3.6 Өтпелі қосылыста сақиналы қаттылық қыры ретінде қолданылатын ыстықтай басылған профиль прокат қимасының сақиналы қыры деп аталады.



8.1.3.7 Өтпелі қосылыстан төмен қабықшаны тіреу үшін бункердің шеңбері бойынша орналасқан басылған болат профилі прокатты қимасының сақиналы арқалығы деп аталады.

8.1.3.8 Егер қабықшаны тіреуге арналған бункердің шеңбері бойынша орналасқан арқалықтың қимасы жеке табақшалардан құрылса, онда ол арқалықтың құраушысы деп аталады.

#### 8.1.4 Қосылыстарды үлгілеу

8.1.4.1 Егер бункер шеңбер бойынша біркелкі тірелсе, сақиналы қырдағы айналма кернеулер қыр бойынша біркелкі үлестіріліп қабылданады.

8.1.4.2 Егер бункер жеке тіректерге немесе ұстындарға тірелсе, өтпелі қосылыстың табақшаларындағы айналма кернеулер табақшалардың майысу салдарынан әр табақшада жеке тарамдап өзгереді.

#### 8.1.5 Сақинаның орналасуына шектеу

8.1.5.1 Өтпелі қосылысқа қатысты тік бойынша сақиналы қырдың эксцентриситеті  $0,2\sqrt{rt}$  аспауы тиіс, мұнда  $t$  - бұл цилиндр қабықшасының қалыңдығы, өйткені эксцентриситет көбейген сайын сақиналы қырдың тиімділігі күрт төмендейді (8.2 Суретті қар.). Эксцентриситеттер үлкен болған кезде ҚР ҚН EN 1993-1-6 сәйкес қабықшада июші сәттердің есептеуін жүргізу қажет.

8.1.5.2 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 8.2 Тармағында келтірілген жеңілдетілген ережелер мына талап орындалған жағдайларда ғана қолданылады.



## 8.2 Сурет – Сақинада және сақина жылжып кеткен кезде жалғасатын қабықшада мембраналық кернеудің өзгеруі

### 8.2 Қосылыстың есебі

Шұңғыманың және бункердің цилиндрлік бөлігінің өтпелі қосылысын есептеуді 8.2 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 8.2 бөлімшенің нұсқаларына сәйкес орындаған жөн.

### 8.3 Көтергіш қасиеті

Өтпелі қосылыстың құрылымдық элементтерінің, сақиналы қырдың және сақиналы арқалықтың көтергіш қасиеті 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 8.3 Тармағына сәйкес анықталуы тиіс.

### 8.4 Шекті күйлер бойынша тексерулер

Өтпелі қосылыстың құрылымдық элементтерінің, сақиналы қырдың және сақиналы арқалықтың шекті күйлер бойынша тексерулер 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 8.4 Тармағына сәйкес анықталуы тиіс.

4 МЫСАЛ Сақиналы арқалықты есептеу

1 Есептеу үшін бастапқы деректер

Бункердің болат конструкциялардың маркасы – S235 EN 10025-2 сипаттамасы бойынша (ҚР ҚН EN 1993-1-1 3.1 Кестесі бойынша):

– аққыштық шегі  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ ;

– уақытша кедергі  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ .

Бункердің сипаттамасы:

– тең қашықтағы жекеленген тіректердің саны:  $j = 4$ ;

– тіректің ауырлық ортасының радиусы  $r_s = 225 \text{ см}$ ;

– цилиндрдің орташа жазығының радиусы  $r = 225,6 \text{ см}$ ;

– цилиндр қабығының ішкі радиусы  $r_c = 225 \text{ см}$ ;

– бұрыш  $Q_0 = \frac{\pi}{j} = 0,785 \text{ радиан}$ ;

– шұңғыманың тікке еңкею бұрышы:  $\beta = 30^\circ$ ;

– арқалықтың барлық биіктігі:  $h_b = 60 \text{ см}$ ;

– шұңғыма қабырғасының қалыңдығы:  $t_h = 1,2 \text{ см}$ ;

– цилиндр қабырғасының қалыңдығы:  $t_c = 1,2 \text{ см}$ ;

– юбка қабырғасының қалыңдығы  $t_s = 1,2 \text{ см}$ ;

– үстінгі қырдың қалыңдығы:  $t_{p1} = 2,0 \text{ см}$ ;

– астыңғы қырдың қалыңдығы:  $t_{p2} = 2,0 \text{ см}$ ;

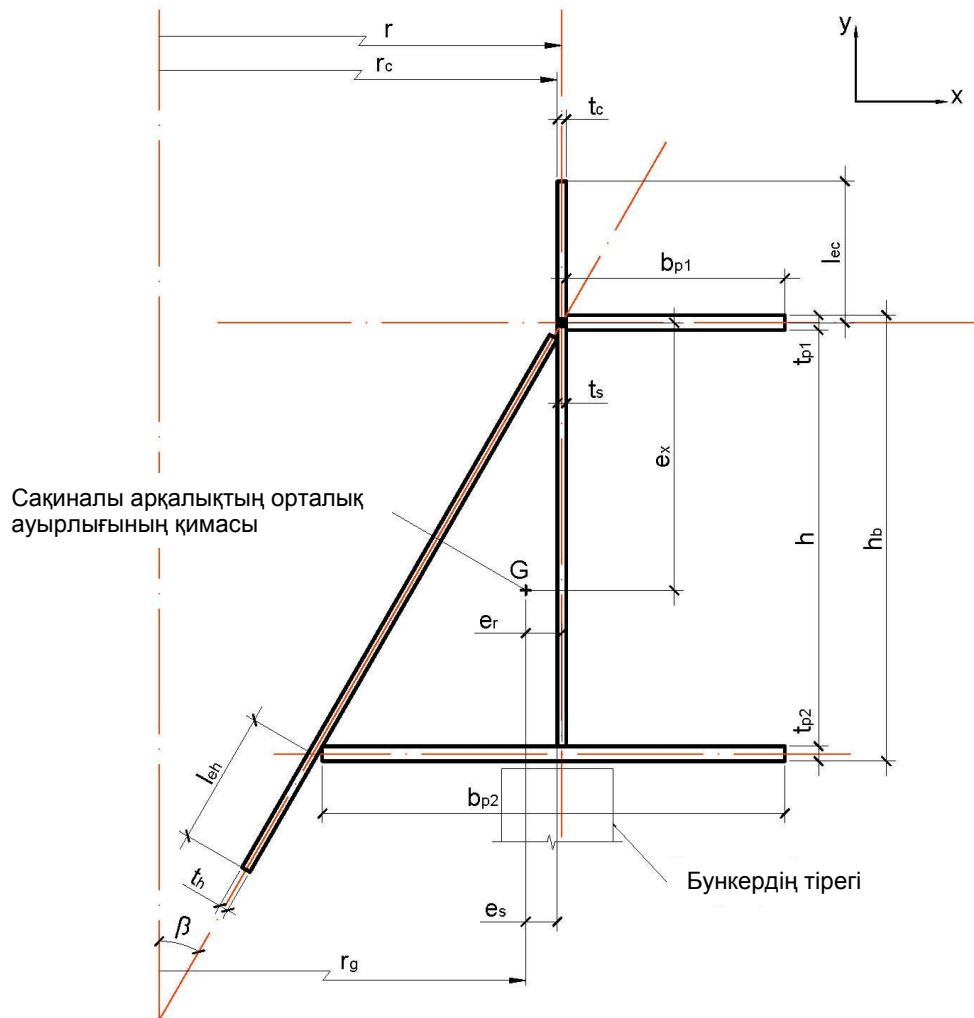
– үстінгі қырдың ені:  $b_{p1} = 30,0 \text{ см}$ ;

– астыңғы қырдың қабырғаның шетінен шығып кету ені:  $b_{p2} = 30,0 \text{ см}$ ;

– астыңғы қырдың ені  $b_{p2} = 30 + 1,2 + 32,22 = 63,42 \text{ см}$ ;

– сақиналы арқалықтың сөрелері арасындағы жарықтағы арақашықтығы  $h = h_b - t_{p1} -$

$$t_{p2} = 60 - 2 - 2 = 56 \text{ см.}$$



1 Сурет – сақиналы арқалықтың қимасы

2 Сақиналы арқалықтың геометриясын анықтау

Арқалықтың жұмысына енгізілген цилиндр қабырғасының биіктігі:

$$h_c = 15 \cdot t_c = 15 \times 1,2 = 18 \text{ см}$$

Арқалық қабырғасының биіктігі (цилиндр қабырғасымен бірлесе):

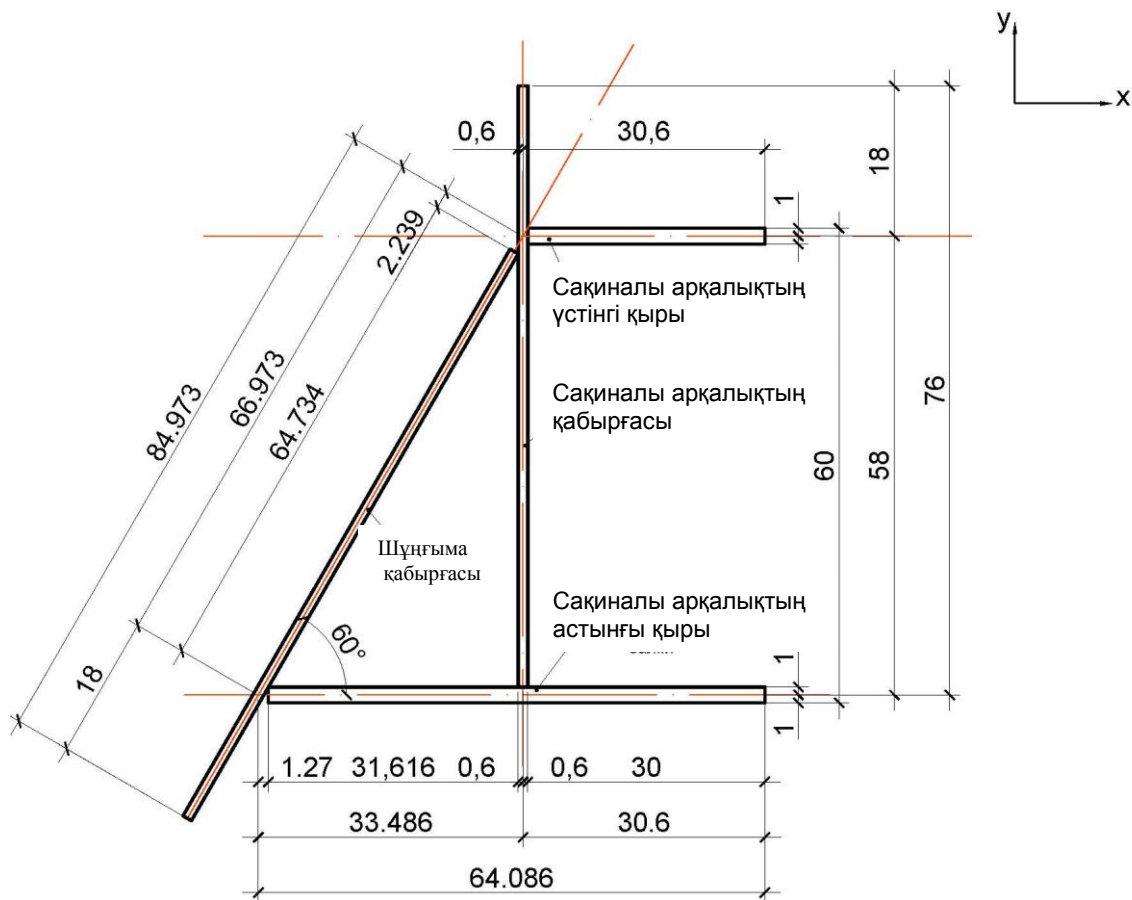
$$h_{cb} = h_b - t_{p2} + h_c = 60 - 2 - 56 = 76 \text{ см}$$

Арқалықтың жұмысына енгізілген шұңғыма қабырғасының ұзындығы (арқалықтан тыс):

$$l_h = 15 \cdot t_h = 15 \times 1,2 = 18 \text{ см}$$

Сақиналы арқалықтың жұмысына енгізілген шұңғыма қабырғасының толық ұзындығы:

$$L_h = \frac{1}{\cos \beta} \cdot \left( h_b - \frac{t_{p1}}{2} - \frac{t_{p2}}{2} \right) + l_{eh} = \frac{1}{\cos 30} \cdot (60 - 1 - 1) + 18,0 = 84,973 \text{ см}$$



**2 Сурет - Сақиналы арқалықтың негізгі элементтері**  
(өлшемдері сантиметрде берілген)

### 3 Сақиналы арқалықтың қимасының геометриялық сипаттамаларын анықтау

### 3.1 Қарапайым қималардың геометриялық сипаттамаларын анықтау

### 3.1.1 Сақиналы арқалықтың қабырғасы

Ауданы:

$$A_c = t_c \cdot h_{cb} = 1,2 \times 76 = 91,2 \text{ cm}^2$$

Инерция сэттері:

$$I_{\text{xoc}} = \frac{t_c}{12} \cdot (h_{cb})^3 = \frac{1,2}{12} \times (76)^3 = 4,39 \cdot 10^4 \text{ cm}^4$$

$$I_{yoc} = \frac{h_{cb}}{12} \cdot (t_c)^3 = \frac{76}{12} \times (1,2)^3 = 10,944 \text{ cm}^4$$

### 3.1.2 Сақиналы арқалықтың үстіңгі қыры

Ауданы:

$$A_{r1} = b_{p1} \cdot t_{p1} = 30,6 \cdot 2 = 61,2 \text{ cm}^2$$

Инерция сәттері:

$$I_{xor1} = \frac{b_{p1}}{12} \cdot (t_{p1})^3 = \frac{30,6}{12} \cdot (2)^3 = 20,4 \text{ cm}^4$$

$$I_{yor1} = \frac{t_{p1}}{12} \cdot (b_{p1})^3 = \frac{2}{12} \cdot (30,6)^3 = 4,78 \cdot 10^3 \text{ cm}^4.$$

### 3.1.3 Сақиналы арқалықтың астыңғы қыры

Ауданы:

$$A_{r2} = b_{p2} \cdot t_{p2} = 64,086 \cdot 2 = 128,172 \text{ см}^2.$$

Инерция сәттері:

$$I_{xor2} = \frac{b_{p2}}{12} \cdot (t_{p2})^3 = \frac{64,086}{12} \cdot 2^3 = 42,724 \text{ см}^4;$$

$$I_{yor2} = \frac{t_{p2}}{12} \cdot (b_{p2})^3 = \frac{2}{12} \cdot 64,086^3 = 4,387 \cdot 10^4 \text{ см}^4.$$

### 3.1.4 Шұңғыманың қабырғасы

Ауданы:

$$A_h = L_h \cdot t_h = 84,973 \cdot 1,2 = 101,968 \text{ см}^2;$$

Инерция сәттері:

$$I_{xoh} = \frac{L_h \cdot t_h}{12} \cdot [L_h^2 \cdot \cos^2 \beta + t_h^2 \cdot \sin^2 \beta] = \frac{84,973 \cdot 1,2}{12} \cdot [84,973^2 \cdot \cos^2 30^\circ + 1,2^2 \cdot \sin^2 30^\circ] = 4,602 \cdot 10^4 \text{ см}^4;$$

$$I_{yoh} = \frac{L_h \cdot t_h}{12} \cdot [L_h^2 \cdot \sin^2 \alpha_1 + t_h^2 \cdot \cos^2 \alpha_1] = \frac{84,973 \cdot 1,2}{12} \cdot [84,973^2 \cdot \sin^2 30^\circ + 1,2^2 \cdot \cos^2 30^\circ] = 1,535 \cdot 10^4 \text{ см}^4.$$

### 3.2 Сақиналы арқалықтың қимасының ауырланған орталығының жағдайын анықтау

Координаталардың қосалқы жүйесінің басы ретінде цилиндр қабырғасының ішкі қырының және шұңғима қабырғасының сыртқы қырының қиылысу нүктесін аламыз.

3.2.1 Арқа элементтердің қималарының ауырланған орталығынан қосалқы жүйенің координаталар басына дейін арақашықтықты анықтаймыз .8.1.3(3) Тармақ СН РК EN 1993-4-1:

– сақиналы арқалықтың қабырғасы

$$A = 76 \cdot 1,2 = 91,2 \text{ см}^2$$

$$x = 0 \text{ см}$$

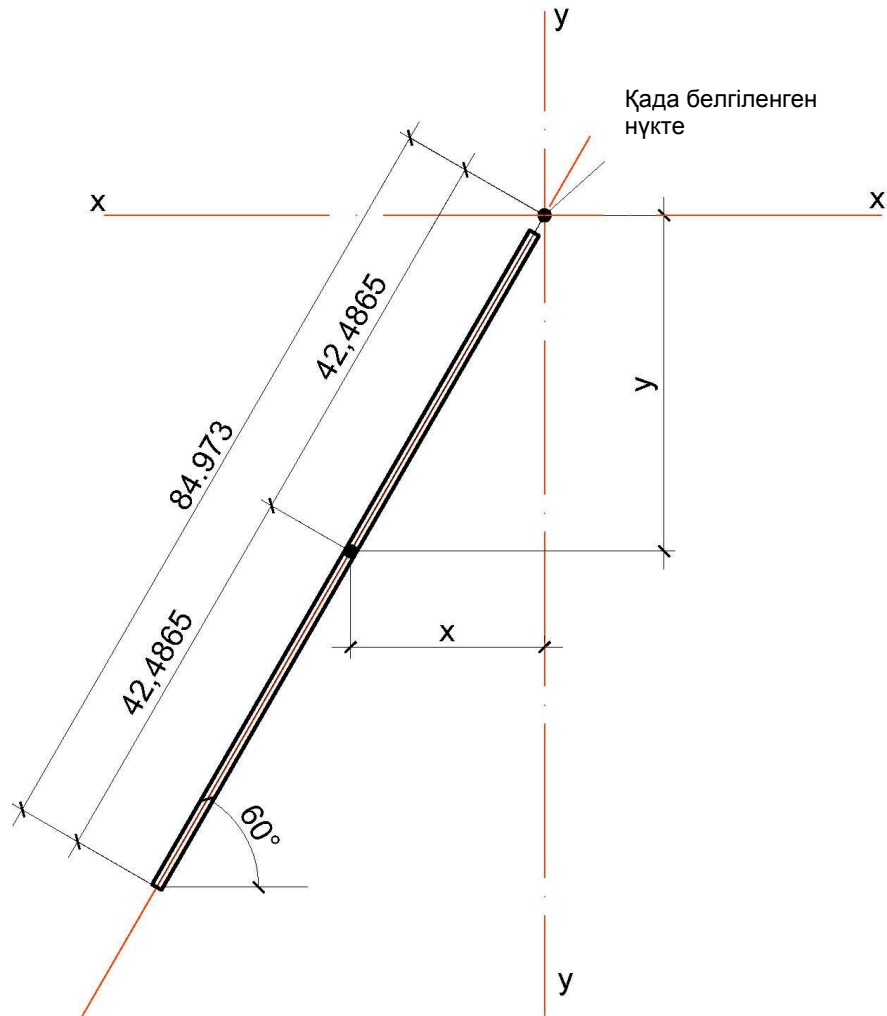
$$y = -\left(\frac{76}{2} - 18\right) = -20 \text{ см}$$

– шұңғының қабырғасы

$$A = 84,973 \cdot 1,2 = 101,968 \text{ см}^2$$

$$x = -(42,4865 \cdot \cos 60^\circ) = -21,243 \text{ см}$$

$$y = -(42,4865 \cdot \sin 60^\circ) = -36,794 \text{ см}$$



**3 Сурет – қада белгіленген нүктеге қатысты есепке алынатын шұңғы қабырғасының координаттары (өлшемдер сантиметрлерде берілген)**

– сақиналы арқалықтың үстінгі қыры

$$A = 30,6 \cdot 2 = 61,2 \text{ см}^2$$

$$x = \frac{30,6}{2} = 15,3 \text{ см}$$

$$y = 0$$

– сақиналы арқалықтың астыңғы қыры

$$A = 64,086 \cdot 2 = 128,172 \text{ см}^2$$

$$x = -\left(\frac{64,086}{2} - 30,6\right) = -1,443 \text{ см}$$

$$y = -58 \text{ см}$$

3.2.2 Ауырлық орталығының координаттарын анықтаймыз:

$$x_k = \frac{91,2 \cdot 0 + 101,968 \cdot (-21,243) + 61,2 \cdot 15,3 + 128,172 \cdot (-1,443)}{91,2 + 101,968 + 61,2 + 128,172} = \frac{-1414,698}{382,54} =$$

$$= -3,698 \text{ см};$$

$$y_k = \frac{91,2 \cdot (-20) + 101,968 \cdot (-36,794) + 61,2 \cdot 0 + 128,172 \cdot (-58)}{91,2 + 101,968 + 61,2 + 128,172} = \frac{-13009,786}{382,54} =$$

$$= -34,009 \text{ см}$$

3.2.3 Сақиналы арқалықтың ауырланған орталығының радиусы

$$r_g = r - |x| = 225,6 - |3,698| = 221,902 \text{ см.}$$

3.2.4 Сақиналы арқалықтың ауырланған орталығына қатысты цилиндрдің тарамдаған эксцентриситеті (оңды, егер ауырланған орталығының радиусы үлкен болса):

$$e_x = y_k = 34,009 \text{ см.}$$

3.2.5 Сақиналы арқалықтың ауырланған орталығына қатысты буындасу орталығының тік эксцентриситеті (оңды, егер ауырланған орталығы буындасу орталығынан төмен орналасса):

$$e_x = -y = 33,057 \text{ см}$$

3.2.6 Сақиналы арқалықтың ауырланған орталығына қатысты тіректің тарамдаған эксцентриситеті (оңды, егер ауырланған орталығының радиусы үлкен болса).

$$e_s = x = -3,098 \text{ см.}$$

3.2.7 Элементтер қимасының ауырланған орталығынан құрамдас қиманың ауырланған орталығына дейін арақашықтықты анықтаймыз.

Көлденең:

– сақиналы арқалықтың қабырғасы

$$x=3,698 \text{ см}$$

$$y=14,009 \text{ см}$$

– шұңғының қабырғасы

$$x=-17,545 \text{ см}$$

$$y=-2,785 \text{ см}$$

– сақиналы арқалықтың үстінгі қыры

$$x=18,998 \text{ см}$$

$$y=34,009 \text{ см}$$

– сақиналы арқалықтың астыңғы қыры

$$x=2,255 \text{ см}$$

$$y=-23,991 \text{ см}$$

3.2.8 Тексеру:

$$S_{xc} = 91,2 \cdot 14,009 + 101,968 \cdot (-2,785) + 61,2 \cdot 34,009 + 128,172 \cdot (-23,991) = 0,016 \text{ см}^3$$

$$S_{yc} = 91,2 \cdot 3,698 + 101,968 \cdot (-17,545) + 61,2 \cdot 18,998 + 128,172 \cdot 2,255 = -0,066 \text{ см}^3$$

Тексеру жүргізіліп жатыр, ауырланған орталығының орналасуы дұрыс анықталды.

3.3 Сақиналы арқалықтың барлық қимасының геометриялық сипаттамаларын анықтау

3.3.1 X және Y өстерге қатысты инерция сәттерін анықтаймыз:

$$I_x = (4,39 \cdot 10^4 + 91,2 \cdot 14,009^2) + (4,602 \cdot 10^4 + 101,968 \cdot 2,785^2) + \left( \frac{20,4 + 61,2 \times}{\times 34,009^2} \right) + (42,724 + 128,172 \cdot 23,991^2) = 253228 \text{ см}^4$$

$$I_y = (10,944 + 91,2 \cdot 3,698^2) + (1,535 \cdot 10^4 + 101,968 \cdot 17,545^2) + (4,78 \cdot 10^3 + 61,2 \cdot 18,998^2) + (4,387 \cdot 10^4 + 128,172 \cdot 2,255^2) = 119387 \text{ см}^4$$

3.3.2 Инерцияның полярлық сәті:

$$I_p = I_x + I_y = 2,532 \cdot 10^5 + 1,194 \cdot 10^5 = 3,726 \cdot 10^5 \text{ см}^4.$$

3.3.3 Кедергі сәттері:

$$W_x = \frac{I_x}{y} = \frac{2,532 \cdot 10^5}{52,009} = 4,868 \cdot 10^3 \text{ см}^2;$$

$$W_y = \frac{I_y}{x} = \frac{1,194 \cdot 10^5}{39,308} = 3,038 \cdot 10^3 \text{ см}^2,$$

мұнда  $x$ ,  $y$  – ауырланған орталығынан қиманың қашықталған нүктелеріне дейін арақашықтық.

2 Суреттегідей сақинанаың орталығынан қиманың ең алыста орналасқан талшықтарына

дейінгі арақашықтығын есептейміз:

– X осі бойынша:

$$x_1 = 30,6 + 3,698 = 34,298 \text{ см}$$

$$x_2 = 84,973 \cdot \cos 60^\circ + 0,6 \cdot \cos 30^\circ - 3,698 = 39,308 \text{ см}$$

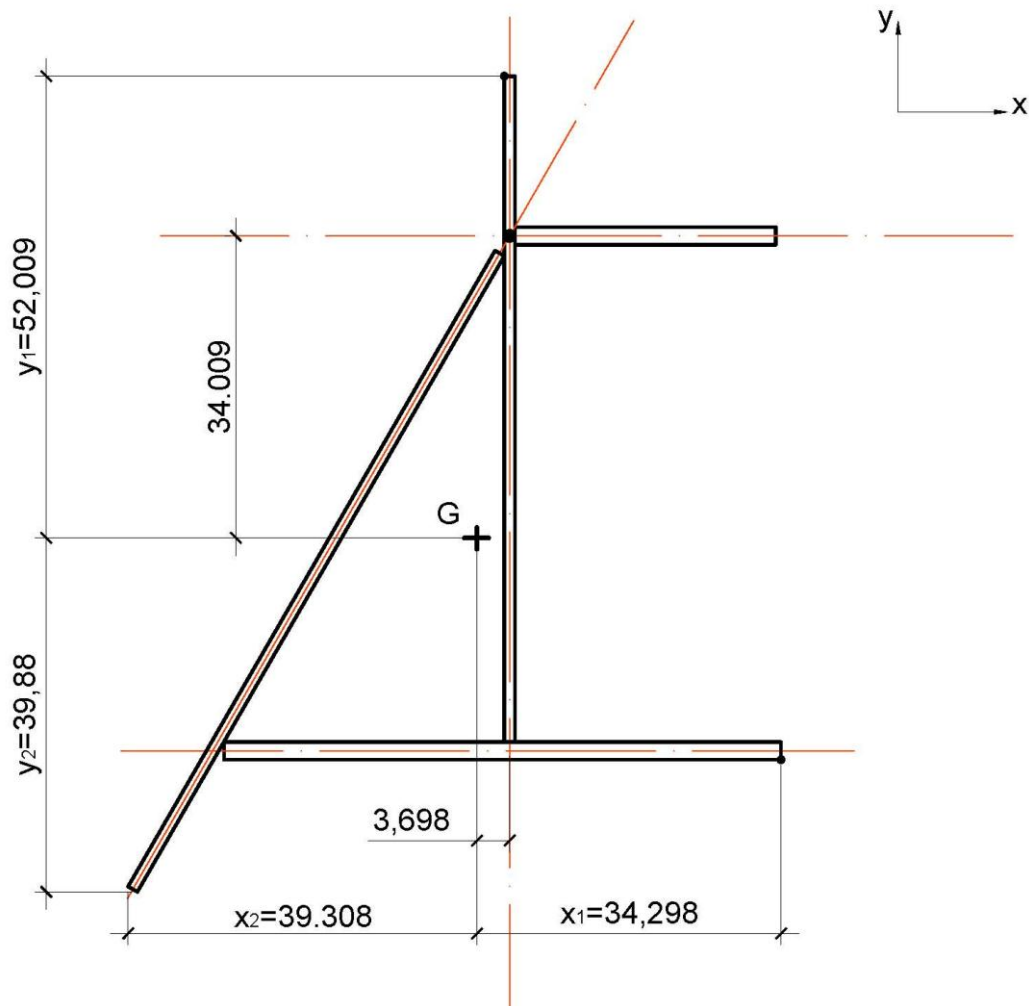
$x = 39,308$  см қабылдаймыз

– Y осі бойынша:

$$y_1 = 34,009 + 18 = 52,009 \text{ см}$$

$$y_2 = 84,973 \cdot \sin 60^\circ + 0,6 \cdot \sin 30^\circ - 34,009 = 39,880 \text{ см}$$

$y = 52,009$  см қабылдаймыз



4 Сурет- Сақинаның қиылыс нүктелер ең алыста орналасқан талшықтарының ара қашықтығы (өлшемдер сантиметрлерде берілген)

3.4 Арқалық элементтерінің баламалы және пайдалы (тиімді) геометриялық сипаттамаларды анықтау ҚР ҚН EN 1993-4-1 8.2.2 (1) ÷ (7) Тармақтары бойынша:

$$t_{eqA} = t_c = 1,2 \text{ см}$$

Қырлар арасындағы учаскеде қабырғаның қалыңдығын аламыз

$$t_s = t_c = 1,2 \text{ см}$$

$$t_{eqB} = \sqrt{t_s^2 + t_h^2} = \sqrt{1,2^2 + 1,2^2} = 1,697 \text{ см}$$



Цилиндр қабықшасының қалыңдығы шұңғыма қабықшасының қалыңдығынан үлкен деп аламыз.

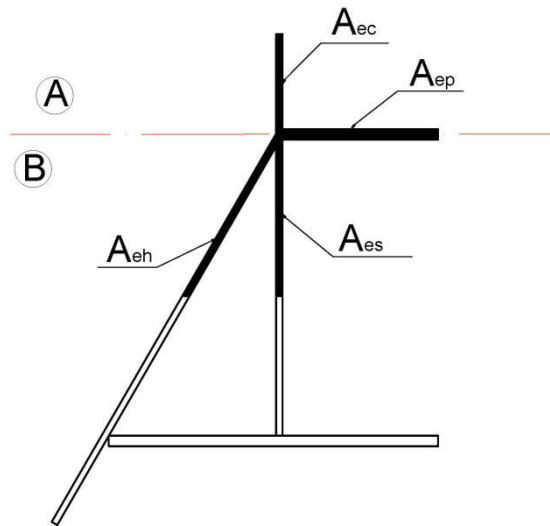
Ең жіңішке баламалы қалыңдықты анықтаймыз:

$$t_{eqthinner} = \min \cdot (t_{eqA}, t_{eqB}) = 1,2 \text{ см}$$

Ең қалын баламалы қалыңдықты анықтаймыз:

$$t_{eqthicker} = \max \cdot (t_{eqA}, t_{eqB}) = 1,697 \text{ см}$$

$$\alpha_2 = \frac{t_{eqthinner}}{t_{eqthicker}} = 0,707 \text{ см}$$



5 Сурет- сегментті қиылыстардың шартты белгілер

А топтағы сегменттің тиімді ұзындығы:

$$l_{e1} = 0,778 \sqrt{\frac{r \cdot t}{\cos \beta}} = 0,778 \sqrt{\frac{225,6 \cdot 1,2}{\cos 30}} = 13,76 \text{ см}$$

Сақиналы арқалықтың үстінгі бөлігінің пайдалы ауданы:

$$A_{ec} = l_{ec} \cdot t_c = 13,76 \cdot 1,2 = 16,51 \text{ см}^2.$$

мұндағы:  $l_{ec} = l_{e1}$

Астыңғы сақиналы қырдың көлденең қимасының жарамды ауданын анықтаймыз

$$A_{es} = 12,33 \cdot 1,2 = 14,796 \text{ см}^2$$

где:  $l_{es} = l_{e2} = 12,33$ .

Шұңғының қабырғасының жарамды ауданы:

$$A_{eh} = 12,33 \cdot 1,2 = 14,796 \text{ см}^2$$

мұндағы:  $l_{eh} = 12,33 \text{ см}^2$

Үстінгі сақиналы қырдың көлденең қимасының жарамды ауданын анықтаймыз:

$$A_{ep} = \frac{b_{p1} \cdot t_{p1}}{1 + 0,8 \cdot \frac{b_{p1}}{r}} = \frac{30,6 \cdot 2}{1 + 0,8 \cdot \frac{30,6}{225,6}} = 55,209 \text{ см}^2.$$

Жалпы жарамды ауданын анықтаймыз:

$$A_{et} = A_{ec} + A_{es} + A_{eh} + A_{ep} = 16,51 + 14,796 + 14,796 + 55,209 = 101,309 \text{ см}^2.$$

4 Арқалықтағы күшті анықтау

4.1 1 Мысал бойынша бункер үшін статистикалық есептердің нәтижелері бойынша бастапқы деректер.

$n_{\phi h, Ed}$  шеңберінің ұзындығының бірлігіне есебімен жүктің әркелкілігінің локальді

меридиональді күштер (3 Мысал, 4.1 Тармақты қар.):

$$n_{\phi hEd} = 2,444 \frac{\text{кН}}{\text{см}}.$$

Цилиндр сегментінің тиімді ұзындығындағы жергілікті қысымы:

Цилиндр сегментінің тиімді ұзындығындағы локальді қысымы (3 Мысал, 4.3б Тармағын қар.):

$$p_{nc} = 4,594 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Шұңғыма сегментінің тиімді ұзындығындағы жергілікті қысымы (3 Мысал, 4.3б Тармағын қар.):

$$p_{nh} = 11,28 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Шұңғыма қабырғасына үйкелеу коэффициенті:

$$\mu = 0,43.$$

Цилиндрдің негізіндегі сығылған мембрана кернеуінің қорытқысының есептік мағынасы (1Мысал 5 Кесте):

$$n_{xc,Ed} = 0,975 \frac{\text{кН}}{\text{см}}.$$

Аққыштық шегі  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

Пластикалық шектік күйі бойынша салмақ түсетін қабілеттілігі үшін жеке коэффициент:  $\gamma_{Mo} = 1,00$  (2.2 Кесте).

Пластикалық шектік күйі бойынша есептік кедергі (ҚР ҚН EN 1993-4-1 8.3.2 (2) Тармақ):

$$f_{p,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{23,5}{1,00} = 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Болаттың серпімділік модулі  $E = 2,10 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$ .

4.2 Арқалықтағы сығылған күш салуын анықтау

Арқалықтағы сығылған күш салуын ҚР ҚН EN 1993-4-1:2007/2011 т. 8.2.3 (3) бойынша:

$$\begin{aligned} N_{\theta,Ed} &= n_{\phi h,Ed} \cdot r \cdot \sin \beta - p_{nc} \cdot r \cdot l_{ec} - p_{nh} \cdot (\cos \beta - \mu \sin \beta) \cdot r_c \cdot l_{eh} = \\ &= 2,444 \cdot 225,6 \cdot \sin 30 - 4,594 \cdot 10^{-3} \cdot 225,6 \cdot 13,76 - 11,28 \cdot 10^{-3} \times \\ &\times (\cos 30 - 0,43 \cdot \sin 30) \cdot 225 \cdot 12,33 = 241,05 \text{ кН}. \end{aligned}$$

4.3 Сақинадағы радиальді көлденең осы бойынша иілу моментін анықтау (ҚР ҚН EN 1993-4-1 8.2.3 (4) Тармақ):

$$\theta_0 = \frac{\pi}{j} = \frac{3,14159}{4} = 0,785 \text{ радиан}.$$

Сақина бойынша иілу моментін үйлестіру:

$$\begin{aligned} M_{r,Ed} &= n_{v,Ed} \cdot (r_g - e_r) \cdot [(r_g - e_s) \cdot \theta_0 \cdot (\sin \theta + \text{ctg } \theta_0 \cos \theta) - r_g + e_r] + \\ &+ n_{r,Ed} \cdot e_x \cdot (r_g - e_r); \end{aligned} \quad (8.19a)$$

$$h_{v,Ed} = n_{xc,Ed} + n_{\phi h,Ed} \cdot \cos \beta; \quad (8.21a)$$

$$h_{r,Ed} = n_{\phi h,Ed} \cdot \sin \beta \quad (8.21б)$$

$$h_{v,Ed} = 0,975 + 2,444 \cdot \cos 30^\circ = 2,064 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

$$h_{r,Ed} = 2,444 \cdot \sin 30^\circ = 1,222 \frac{\text{кН}}{\text{см}} \text{ аламыз.}$$

Тәуелділік анализдан алынған, ас көп иілу моменті пайда болатын бұрыш  $M_{r,Ed}$  от  $\theta$ :  $\theta = 0,79$  радиан. Бұл бұрыш үшін

$$\begin{aligned} M_{r,Ed}(\theta = 0,79) &= 2,064 \cdot (221,902 - (-3,698)) \cdot [(221,902 - (-3,098)) \cdot 0,785 \times \\ &\times (\sin(0,79) + \text{ctg}(0,785) \cdot \cos(0,79)) - 221,902 + (-3,698)] + 1,222 \cdot 34,009 \times \end{aligned}$$

$$\times (221,902 - (-3,698)) = 20682 \text{ кНсм}$$

4.4 Бұрылу моментін анықтау (ҚР ҚН EN 1993-4-1 8.2.3 (4)Тармақ)

Сакина бойынша бұралатын моменттерді үйлестіру:

$$T_{\theta,Ed} = n_{v,Ed}(r_g - e_r)[(r_g - e_s)\theta_0(ctg \theta_0 \sin \theta - \cos \theta) + r_g(\theta_0 - \theta)] \quad (8.19 б)$$

$$n_{v,Ed} = n_{xc,Ed} + n_{\phi h,Ed} \cdot \cos \beta \quad (8.21a)$$

$$n_{v,Ed} = 0.975 + 2.444 \cdot \cos 30^\circ = 2.064 \text{ кН/см аламыз.}$$

Тәуелділік анализдан алынған, ас көп иілу моменті пайда болатын бұрыш  $T_{\theta,Ed}$  от  $\theta$ :  
 $\theta = 1,3$  радиан. Бұл бұрыш үшін

$$T_{\theta,Ed}(\theta = 1.3) = 2,064 \cdot (221,902 - (-3,698)) \cdot [(221,902 - (-3,098)) \times \\ \times 0,785 \cdot (ctg(0,785) \cdot \sin(1,3) - \cos(1,3)) + 221,902 \cdot (0,785 - 1,3)] = 4096 \text{ кНсм}$$

4.5 Сакина тірегі бойынша есептік иілу моментінің максималді мағынасын анықтау (ҚР ҚН EN 1993-4-1 8.2.3 (5)Тармақ):

$$M_{rs,Ed} = n_{v,Ed}(r_g - e_r)[(r_g - e_s)\theta_0 ctg \theta_0 - r_g + e_r] + n_{r,Ed}e_x(r_g - e_r); \quad (8.22)$$

$$n_{v,Ed} = 2,064 \frac{\text{кН}}{\text{см}} \text{ аламыз.}$$

$$n_{r,Ed} = 1,222 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

$$M_{rs,Ed} = 2,064 \cdot (221,902 - (-3,698)) \cdot [(221,902 - (-3,098)) \cdot 0,785 \cdot ctg(0,785) - 221,902 + \\ + (-3,698)] + 1,222 \cdot 34,009 \cdot (221,902 - (-3,698)) = -13363 \text{ кН} \cdot \text{см}$$

4.6 Аралықтың орасындағы радиональді осы бойынша есептік иілу моментінің максималді мағынасын анықтау (ҚР ҚН EN 1993-4-1 8.2.3 Формула):

$$M_{rm,Ed} = n_{v,Ed}(r_g - e_r) \left[ \frac{(r_g - e_s)\theta_0}{\sin \theta_0} - r_g + e_r \right] + n_{r,Ed}e_x(r_g - e_r); \quad (8.23)$$

$$n_{v,Ed} = 2.064 \frac{\text{кН}}{\text{см}} \text{ аламыз.}$$

$$n_{r,Ed} = 1.222 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

$$M_{rm,Ed} = 2,064 \cdot (221,902 - (-3,698)) \cdot [(221,902 - (-3,098)) \cdot 0,785 / \sin(0,785) - 221,902 + \\ + (-3,698)] + 1,222 \cdot 34,009 \cdot (221,902 - (-3,698)) = 20684 \text{ кН} \cdot \text{см}$$

Осы мысалдағы 4.3 Тармағында анықталған, алынған мағына момент мағынасына сәйкес келеді.

5 Салмақ түсетін қабілеттілігінің тексеру

5.1 Екі үдемелі меридиональді кернеуден ең көбін анықтаймыз (ҚР ҚН EN 1993-4-1 8.2.3 (9) Тармақ):

– тіректе:

$$\sigma_{c\theta,Ed1} = \frac{N_{\theta,Ed}}{A_{Et}} + \frac{M_{rs,Ed}}{W_x} = \frac{241,05}{101,309} + \frac{13,363 \cdot 10^3}{4,868 \cdot 10^3} = 5,124 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

– аралықта:

$$\sigma_{c\theta,Ed2} = \frac{N_{\theta,Ed}}{A_{Et}} + \frac{M_{rm,Ed}}{W_x} = \frac{241,05}{101,309} + \frac{20,684 \cdot 10^3}{4,868 \cdot 10^3} = 6,628 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

5.2 Аркалықтың бұралуының кернеуін анықтау.

Бұралу аркалықтың көбінесе тұйықталған қимасын қабылдайды . 5 Суретте келтірілгендей аркалықтың бұрылуынан кернеуді бағалау үшін тұйықталған қимасының геометриялық сипаттамасы анықталады.

Геометриялық сипаттамалардың алынған есебі бойынша:

$$I_x = \left( \frac{1,2 \cdot 58^3}{12} + 1,2 \cdot 58 \cdot 5,009^2 \right) + \left( \frac{33,486 \cdot 2^3}{12} + 33,486 \cdot 2 \cdot 23,991^2 \right) +$$

$$+ \left[ \frac{66,973 \cdot 1,2}{12} \cdot (66,973^2 \cdot \cos^2 30^\circ + 1,2^2 \cdot \sin^2 30^\circ) + 66,973 \cdot 1,2 \cdot 5,009^2 \right] = 84382 \text{ см}^4;$$

$$I_y = \left( \frac{58 + 1,2^3}{12} + 58 \cdot 1,2 \cdot 3,698^2 \right) + \left( \frac{2 \cdot 33,486^3}{12} + 33,486 \cdot 2 \cdot 13,049^2 \right) +$$

$$+ \left[ \frac{66,973 \cdot 1,2}{12} \cdot (66,973^2 \cdot \sin^2 30^\circ + 1,2^2 \cdot \cos^2 30^\circ) + 66,973 \cdot 1,2 \cdot 13,045^2 \right] =$$

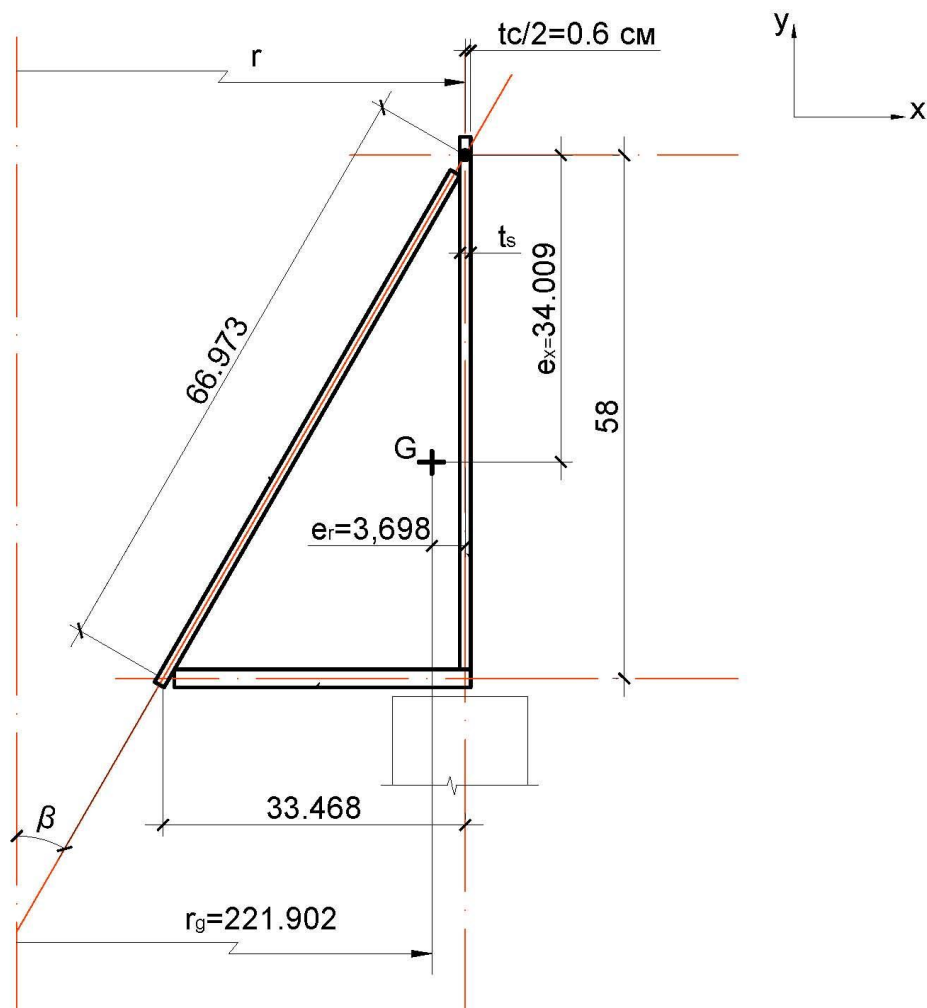
$$= 39815 \text{ см}^4;$$

$$I_p = 84382 + 39815 = 124197 \text{ см}^4;$$

$$W_p = 124197 / 38,248 = 3247 \text{ см}^3.$$

Бұрылған кернеулер құрады:

$$\tau_{T\theta,Ed} = \frac{T_{\theta,Ed}}{W_p} = \frac{4096}{3247} = 1,261 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$



6 Сурет– бұралу керуді тексеру үшін сақиналы арқалықтың қиамсы (өлшемдер сантиметрлерде берілген)

5.3 Созымдылық есебінің негізіндегі салмақ түсетін қабілеттілігін анықтаймыз (ҚР ҚН EN 1993-4-1 8.3.2.3Тармақ). ол үшін табамыз:

$$\alpha = \sqrt{\frac{t_c^2}{t_s^2 + t_h^2}} = \sqrt{\frac{1,2^2}{1,2^2 + 1,2^2}} = 0,707,$$

$$\psi = 0,7 + 0,6 \cdot \alpha^2 - 0,3 \cdot \alpha^3 = 0,7 + 0,6 \cdot 0,707^2 - 0,3 \cdot 0,707^3 = 0,894.$$

– цилиндр үшін:

$$l_{oc} = 0,975 \cdot \sqrt{r \cdot t_c} = 0,975 \cdot \sqrt{225,6 \cdot 1,2} = 16,04 \text{ см};$$

– юбка үшін:

$$l_{os} = 0,975 \cdot \psi \cdot \sqrt{r \cdot t_s} = 0,975 \cdot 0,894 \cdot \sqrt{225,6 \cdot 1,2} = 14,34 \text{ см};$$

– шұңғының сегменті үшін:

$$l_{oh} = 0,975 \psi \sqrt{\frac{r \cdot t_h}{\cos \beta}} = 0,975 \cdot 0,894 \sqrt{\frac{225,6 \cdot 1,2}{\cos 30}} = 15,41 \text{ см}.$$

Сонымен, шұңғының үстінгі бөлігіндегі созымдылық негізіндегі шеңбердің салмақ түсетін қабілеттілігі қабылдайды, ҚР ҚН EN 1993-4-1 (8.27) Формула:

$$n_{\phi h, Rd} = \frac{1}{\sin \beta} \left\{ \left( \frac{A_{ep1} + l_{oc} t_c + l_{os} t_s + l_{oh} t_h}{r} \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} + p_{nc} l_{oc} + p_{nh} (\cos \beta - \mu \sin \beta) l_{oh} \right\} =$$

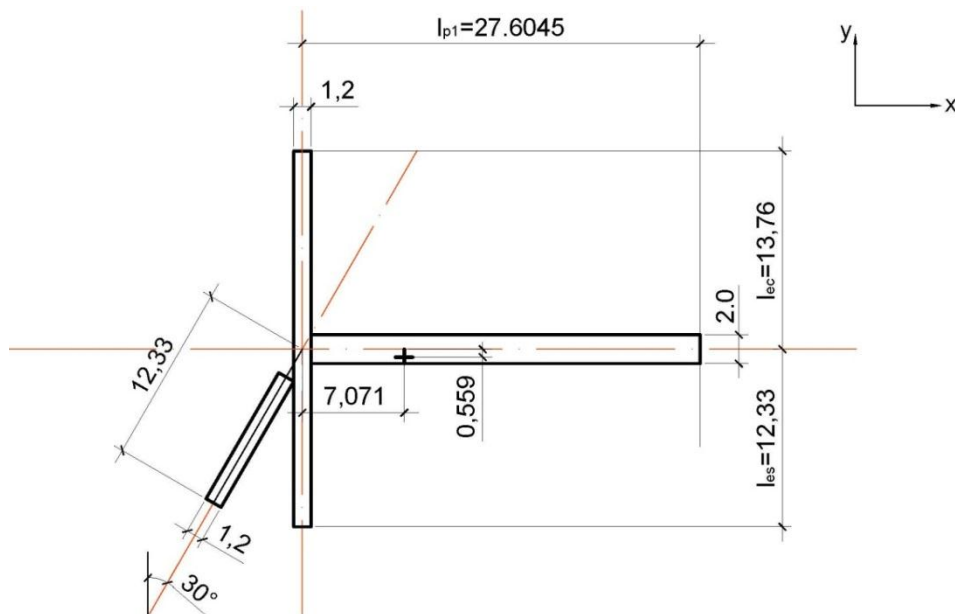
$$= \frac{1}{\sin 30} \times \left\{ \left( \frac{55,209 + 16,04 \cdot 1,2 + 14,34 \cdot 1,2 + 15,41 \cdot 1,2}{225,6} \right) \cdot \frac{23,5}{1} + 4,594 \cdot 10^{-3} \times 16,04 + \right. \\ \left. + 11,28 \cdot 10^{-3} \cdot (\cos 30 - 0,43 \cdot \sin 30) \cdot 15,41 \right\} =$$

$$= 23,32 \text{ кН/см}.$$

5.4 жазықтығының тұрақтылығы бойынша есептік салмақ түсіретін қабілеттілігі ҚР ҚН EN 1993-4-1 (8.30) Формула :

3.4 т. бойынша  $A_{et} = 97,646 \text{ см}^2$  қабылдаймыз;

$$b_{p1} = \frac{A_{ep1}}{t_{p1}} = \frac{55,209}{2} = 27,6045 \text{ см} \text{ қабылдаймыз}.$$



7 Сурет – Жазықтықтың тұрақтылығы бойынша салмақ түсіретін қабілеттілігінің есептеу кезіндегі қиманың ауырлық ортасын анықтау (өлшемдер сантиметрлерде берілген)

$$x = \frac{55,209 \cdot \frac{27,6045}{2} - 14,796 \cdot \frac{12,33}{2} \cdot \sin 30^\circ}{101,309} = 7,071;$$

$$y = \frac{16,51 \cdot \frac{13,76}{2} - 14,796 \cdot \frac{12,33}{2} - 14,796 \cdot \frac{12,33}{2} \cdot \cos 30^\circ}{101,309} = -0,559 \text{ см};$$

$$I_y = \left[ \frac{(12,33 + 13,76) \cdot 1,2^3}{12} + (16,51 + 14,796) \cdot 7,071^2 \right] +$$

$$+ \left[ \frac{2 \cdot 27,6045^3}{12} + 55,209 \cdot 6,731^2 \right] + \left[ \frac{12,33 \cdot 1,2}{12} \cdot (12,33^2 \cdot \sin^2 30^\circ + 1,2^2 \cdot \cos^2 30^\circ) + \right.$$

$$\left. + 14,496 \cdot (3,0825 + 7,071)^2 \right] = 1568,453 + 6007,129 + 1542,639 = 9118,221 \text{ см}^4;$$

$$\sigma_{ip,Rd} = \frac{4EI_y}{A_{et} \cdot r_g^2} \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}} = \frac{4 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 9118,221}{101,309 \cdot 221,902^2} \cdot \frac{1}{1,1} = 139,581 \frac{\text{кН}}{\text{см}^3}$$

$\beta > \beta_{lim}$ ,  $\beta = 30^\circ$ ;  $\beta_{lim} = 20^\circ$  (МҚ 2.38 қар.)

5.5  $\sigma_{o,Rd}$  қабырғалардың тұрақтылығы бойынша есептік салмақ түсетін қабілеттілігі ҚР ҚН EN 1993-4-1 (8.31) Формула:

– цилиндрлердің қабырғалары үшін:

$$\sigma_{op,Rdc} = \frac{1}{\gamma_{M1}} \cdot 4,1(\cos \beta)^{0,4} \cdot \left( \frac{t_c}{r} \right)^{1,5} \cdot \left( \frac{Et_c r_g}{A_{et}} \right) =$$

$$= \frac{1}{1,1} \cdot 4,1(\cos 30^\circ)^{0,4} \cdot \left( \frac{1,2}{225,6} \right)^{1,5} \cdot \left( \frac{2,10 \cdot 10^4 \cdot 1,2 \cdot 221,902}{101,309} \right) = 75,35 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

– шұңғының қабырғалары үшін:

$$r_h = \frac{r_c}{\cos \beta} = \frac{225,0}{\cos 30^\circ} = 259,81 \text{ см},$$

$$\sigma_{op,Rdh} = \frac{1}{\gamma_{M1}} \cdot 4,1(\cos \beta)^{0,4} \cdot \left( \frac{t_h}{r_h} \right)^{1,5} \cdot \left( \frac{Et_h r_g}{A_{et}} \right) =$$

$$= \frac{1}{1,1} \cdot 4,1(\cos 30^\circ)^{0,4} \cdot \left( \frac{1,2}{259,81} \right)^{1,5} \cdot \left( \frac{2,10 \cdot 10^4 \cdot 1,2 \cdot 221,902}{101,309} \right) = 60,968 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

5.6 Бүйірдің тасырауы кезіндегі тұрақтылықтың салмақ түсіруін анықтау (ҚР ҚН EN 1993-4-1 8.3.4.3 Тармақ):

$$\sigma_{op,Rd} = k \cdot E \cdot \frac{t_p}{b} \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}} \quad (8.32)$$

Ол үшін ҚР ҚН EN 1993-4-1 (8.33)–(8.37) Формуласы бойынша табамыз:

$$\eta_c = 0,5 \left\{ \left( \frac{t_c}{t_{p1}} \right)^{5/2} + \left( \frac{t_s}{t_{p1}} \right)^{5/2} + \left( \frac{t_h}{t_{p1}} \right)^{5/2} \right\} = 0,5 \left\{ \left( \frac{1,2}{2,0} \right)^{5/2} + \left( \frac{1,2}{2,0} \right)^{5/2} + \left( \frac{1,2}{2,0} \right)^{5/2} \right\} = 0,418,$$

$$\eta_s = 0,43 + 0,1 \left( \frac{r_c}{20b_{p1}} \right)^2 = 0,43 + 0,1 \left( \frac{225,0}{20 \cdot 27,6045} \right)^2 = 0,447;$$

$$k_c = 1,154 + 0,56 \frac{b_{p1}}{r_c} = 1,154 + 0,56 \cdot \frac{27,6045}{225} = 1,223;$$

$$k_s = 0,385 + 0,452 \sqrt{\frac{b_{p1}}{r_c}} = 0,385 + 0,452 \sqrt{\frac{27,6045}{225}} = 0,543;$$

$$k = \frac{\eta_c k_c + \eta_s k_s}{\eta_c + \eta_s} = \frac{0,418 \cdot 1,223 + 0,447 \cdot 0,543}{0,418 + 0,447} = 0,872.$$

Тұрақтылық бойынша есептік салмақ түсетін қабілеттілігі құрайды, ҚР ҚН EN 1993-4-1 (8.32) Формула:

$$\sigma_{op,Rdr} = kE \left( \frac{t_{p1}}{b_{p1}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}} = 0,872 \cdot 2,10 \cdot 10^4 \cdot \left( \frac{2,0}{27,6045} \right)^2 \cdot \frac{1}{1,10} = 87,386 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

5.7 Шектік жағдай бойынша салмақ түсетін қабілеттілігін тексеру (ҚР ҚН EN 1993-4-1 8.4.2 Тармақ):

а) серпінді кезеңдегі есептеу кезіндегі пластикалық шектік жағдайды тексеру, ҚР ҚН EN 1993-4-1 (8.50) Формула:

$$\sigma_{c\theta,Ed} = \max(\sigma_{c\theta,Ed1}, \sigma_{c\theta,Ed2}) = 6,628 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

$$\sigma_{c\theta,Ed} = 6,628 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \leq f_{p,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1,00} = 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} - \text{шарт орындалды.}$$

мұндағы  $f_{p,Rd}$  – пластикалық шектік жағдайы бойынша кедергінің есептік мағынасы (ҚР ҚН EN 1993-4-1 8.3.2.2(2) Тармақ);

$\gamma_{M0}$  – пластикалық шектік жағдайды бойынша салмақ түсетін қабілеттілігі үшін жеке коэффициенті,  $\gamma_{M0} = 1,00$  (2.2 Кесте);

$f_y$  – аққыштық шегі,  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

б) пластикалық кезеңдегі есесбі кезіндегі пластикалық шектік жағдайы бойынша шұңғының қабырғасының салмақ түсетін қабілеттілігін тексеру, ҚР ҚН EN 1993-4-1 (8.46) Формула :

$$n_{\phi h,Ed} = 2,444 \frac{\text{кН}}{\text{см}} \leq n_{\phi h,Rd} = 23,32 \frac{\text{кН}}{\text{см}} - \text{шарт орындалады.}$$

мұндағы  $n_{\phi h,Ed}$  – шұңғыдағы меридиональді қарапайым бірнеше күштердің қызметін атқарушы кернеу (Мысал 3 4.1а Тармақты қар.).

в) Бұрылу кезіндегі жанама кернеу бойынша салмақ түсетін қабілеттілігін тексеру (Пункта ҚР ҚН EN 1993-4-1 8.2.3 (7) Тармақтардың негізінде):

$$\tau_{T\theta,Ed} = 1,261 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{23,5}{1,00 \cdot \sqrt{3}} = 13,6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} - \text{шарт орындалады.}$$

г) жазықтықтағы тұрақтылық шығынның шектік жағдайын тексеру, ҚР ҚН EN 1993-4-1 (8.51) Формула:

$$\sigma_{c\theta,Ed} = \sigma_{c\theta,Ed2} = 6,628 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \leq \sigma_{ip,Rd} = 139,581 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} - \text{Шарт орындалды}$$

д) жазықтықтағы тұрақтылық шығынның шектік жағдайын тексеру, ҚР ҚН EN 1993-4-1 (8.53) Формула. Минималді салмақ түсетін қабілеттілігі осы мысалдың 5.4 және 5.5 Тармақтарында берілген:

$$\sigma_{op,Rd} = \min(\sigma_{op,Rdc}, \sigma_{op,Rdh}, \sigma_{op,Rdr}) = 60,968 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

Тұрақтылықтың тексеруі:

$$\sigma_{c\theta,Ed} = 6,628 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \leq \sigma_{op,Rd} = 60,968 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} - \text{Шарт орындалды}$$

Барлық шарттар орындалды, сақиналы арқалықтың салмақ түсетін қабілеттілігі қамтамасыз етілді.

## 9 ЖАЗЫҚ БҮЙІРЛІК ҚАБЫРҒАЛАРЫМЕН ТІК БҰРЫШТЫ БУНКЕРЛЕРДІ ЖОБАЛАУ

### 9.1 Негізгі ережелер

9.1.1 Тік бұрышты бункерді негізгі көтергіш элементтері июге жұмыс істейтін қаттылық қырлары бар қорап сияқты немесе маңызды деформациядан кейін пайда болатын мембраналық кернеулер негізгі болып табылатын, жұқа қабырғалы құрылым сияқты есептеген жөн.

9.1.2 Егер қорап июші сәттердің әрекеттеріне есептелсе, түйіндер мен қосылыстар есепте қабылданған қосылыстардың сипаттамалары нақты құрылыста қол жеткізілетіндей жобалануы тиіс.

## 9.2 Құрылымдық пішіндерді жіктеу

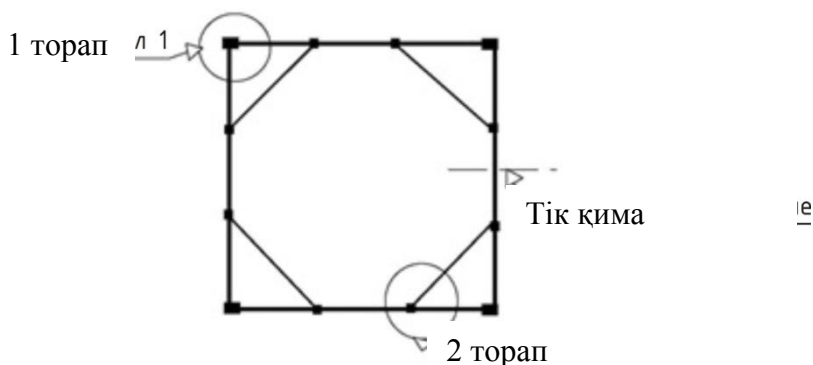
### 9.2.1 Қатайылмаған бункерлер

9.2.1.1 Қаттылық қабырғалары Қатайылмаған жазық болат табақшалардан жасалған құрылым Қатайылмаған қорап деп аталады.

9.2.1.2 Кәртүрлі жазықтарда жатқан табақшалар арасында қосылыстардың бойымен ғана күшейтілген құрылым да Қатайылмаған қорап деп аталады.

### 9.2.2 Қаттылық қырлары бар бункерлер

Табақшаның шегінде қаттылық қырлары бекітілген жазық табақшалардан құрылған құрылым қаттылық қырлары бар қорап немесе бекітілген қорап деп аталады. Қаттылық қырлары айғалма бағытта (жазық қырлар), тік бағытында немесе екі өзара перпендикулярлы бағыттарда орналасуы мүмкін.

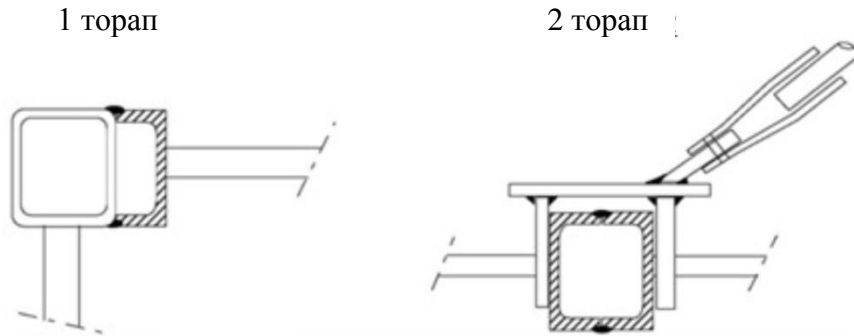


9.1 Сурет – Созылулары бар тік бұрышты қорапты кесігі

### 9.2.3 Созылулары бар бункерлер

Созылулары бар бункерлер шаршы немесе тік бұрышты болуы мүмкін. 3-панельді шаршы (бір секциялы) бункердің типтік құрылымдық элементтері 9.1, 9.2 Суреттерде көрсетілген.





**9.2 Сурет – Тартпа қосылыстарының типтік бөлшектері**

### **9.3 Қатайтылмаған тік қабырғалардың көтергіш қасиеті**

Қатайылмаған тік қабырғалардың көтергіш қасиетін 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 9.3 бөлімшесіне сәйкес анықтаған жөн.

### **9.4 Қаттылық қабырғаларымен кеңірдектелген табақтардан бункер қабырғаларының көтергіш қасиеті**

Қаттылық қабырғаларымен кеңірдектелген табақтардан бункер қабырғаларының көтергіш қасиеті 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 9.4 бөлімшесіне сәйкес анықтаған жөн.

### **9.5 Ішкі созылуларымен бункерлер**

Ішкі созылуларымен бункерлердің көтергіш қасиетін 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 9.5 бөлімшесіне сәйкес анықтаған жөн.

### **9.6 Пирамидальді шұңғылдардың салмақ түсіретін қабілеттілігі**

Пирамидальді шұңғылдардың салмақ түсіретін қабілеттілігін ҚР ҚН EN 1993-4-1 9.6 бөлімшесінен анықтау қажет.

### **9.7 Қорап қабырғаларында тік қаттылық қабырғалары**

9.7.1 Қорап қабырғаларында тік қаттылық қабырғалары келесіні қабылдау үшін есептелуі тиіс:

- тұрақты жүктеулер;
- сусымалы материалдардың қалыпты қысымы;
- материалдың қабырғаға үйкелу күші;
- қақпадан уақытша жүктеулер;
- қатты диафрагмалар ретінде бүйірлік қабырғалардың жұмыс нәтижесінде пайда болатын өстік күштер.

9.7.2 Қаттылық қырлар қимасының ауырланған орталығына қатысты қабырғаға салынған үйкеліс күшінің эксцентриситетін ескермеуге болады.

## 9.8 Пайдаланушылық жарамдылықтың шекті күйлері

### 9.8.1 Негізгі ережелер

9.8.1.1 Тік бұрышты бункердің қабырғалары үшін пайдаланушылық жарамдылықтың шекті күйлері келесілермен қабылданады:

— құрылымның пайдаланушылық жарамдылығына кері әсер ететін деформациялар немесе орын ауыстырулар;

— құрылымның көтергіш немесе екінші кезектегі элементтерінде зақым келтіретін деформациялар, орын ауыстырулар, діріл және тербелістер.

9.8.1.2 Жоғарыда көрсетілген қағидаттарға жауап беретін мәндерімен шектелген деформациялар, ауытқулар және дірілдер.

9.8.1.3 Қолданудың ерекше саласына жауап беретін нақты шекті жобалық ұйымның, тапсырыс берушінің және тиісті қадағалау органның арасында сақталатын қатты материалдардың пайдалану саласы мен табиғатын ескерумен келісілуі тиіс.

### 9.8.2 Ауытқулар

Шеткі деформациялардың мәндері 1993-4-1 ҚР ҚН EN-нің 9.8.2 Тармағында келтірілген.

5 МЫСАЛ Жазық қабырғаларымен тік бұрышты бункерді есептеу

1 Бастапқы деректер

1.1 Бункердің параметрлері

Бункердің болат конструкцияларының маркасы – S235 EN 10025-2 сипаттамалары бойынша (ҚР ҚН EN 1993-1-1 3.1 Кесте):

– аққыштық шегі  $f_y = 235 \text{ Н/мм}^2$ ;

– уақытша кедергі  $f_u = 360 \text{ Н/мм}^2$ .

Жоспардағы қораптың өлшемдері —  $B \times B = 5 \times 5 \text{ м}$ , биіктігі —  $H_c = 2 \text{ м}$ . Конустың ұшындағы пирамидалық шұңғының жартылай бұрышы  $\beta = 40^\circ$ .

Бункердің көлденең қимасының ішкі ауданы  $A = 5 \times 5 = 25 \text{ м}^2$ .

Бункердің көлденең қимасының периметрі  $U = 4 \times B = 4 \times 5 = 20 \text{ м}$ .

Асимметрия толтыруының коэффициенті  $e_f = 0,1 \times B = 0,1 \times 5 = 0,5 \text{ м}$ .

Шығатын саңылаулардың асимметрия коэффициенті  $e_0 = 0 \times B = 0 \text{ м}$ .

Қабырға бетінің категориясы D2.

1.2 Бункердің сипаттамасы

– көлемі —  $74,8 \text{ м}^3$ ;

– сыйымдылығы —  $99 \text{ т}$ ;

– зардаптар тобы — 1993-4-1 ҚР ҚН EN бойынша 1, 2.2 (3)Тармақ;

– бункер — 1991-4 ҚР ҚН EN-нің 1.5.39 т.бойынша аласа бункер;

– жауапкершілік тобы — 1991-4 ҚР ҚН EN-нің 2.5 т.бойынша 1.

## 2 Жүктеулерді жинау

## 2.1 Құйылма материалдың қысымы

## 2.1.1 Жүктеулерді есептеу үшін шарттар:

а) түсірілін материалдың ағыны ішінде болғандықтан – тік қабырғаларға жүктеудің қысымын ескермейміз.

б) симметриялық жүктеу – толтыру эксцентриситетін ескермейміз.

в) түсіру тесік симметриялы – түсіру эксцентриситеті ескерілмейді.

г) силосқа тірелетін жабдық орнатылмаған.

д) бункер жайда орналасқан – қысымды ескермейміз.

е) шұңғыманың түрі – жайпақ. ҚР ҚН EN 1991-4 1.5.35 Тармақ.

## 2.2.2 Қысымның есебі

Осы мысалда вертикальді қабырғалардың және шұңғының қысымын анықтау қарастырылмайды.

ҚР ҚН EN 1991-4 бойынша 5 жағдай үшін қалыпты және жанама қысымдардың анықталуы

– 1 жүк жағдайы – вертикальді қабырғадағы максимальді қалыпты қысым;

– 2 жүк жағдайы – вертикальді қабырғадағы максимальді үйкеліс күші;

– 3 жүк жағдайы – шұңғыдағы максимальді вертикальді қысым;

– 4 жүк жағдайы – Толып тұрған бункердегі шұңғы қабырғасының максимальді қысымы;

– 5 жүк жағдайы – Толып тұрған бункерді жеңілдету кезіндегі шұңғы қабырғасының максимальді қысымы.

Қорап және шұңғы үшін 1 және 3 тәртіп ең көп қысым тудырады. 1 и 2 Кестелерде қысымның есебінің нәтижелері берілген. Бункердің талап ететін классы 1 болғандықтан, жартылай бетті жүк қарастырылмайды.

1 Кесте – Бункердің тік қабырғаға есептік жүктемелеу

Күйі	Қысым	Цилиндрдің үстінгі шетінен арақашықтық									
		0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
		1 жүктеу режимі									
1	Phf	2,52	4,82	6,94	8,88	10,68	12,34	13,88	15,31	16,64	17,88
	Pwf	1,04	2,00	2,87	3,68	4,42	5,10	5,74	6,33	6,88	7,40
		3 жүктеу режимі									
1	Phf	2,06	3,98	5,77	7,44	9,01	10,47	11,85	13,14	14,36	15,51
	Pwf	0,85	1,65	2,39	3,08	3,73	4,33	4,90	5,44	5,94	6,42

2 Кесте – Шұңғыма қабырғасына есептік жүктемелеу

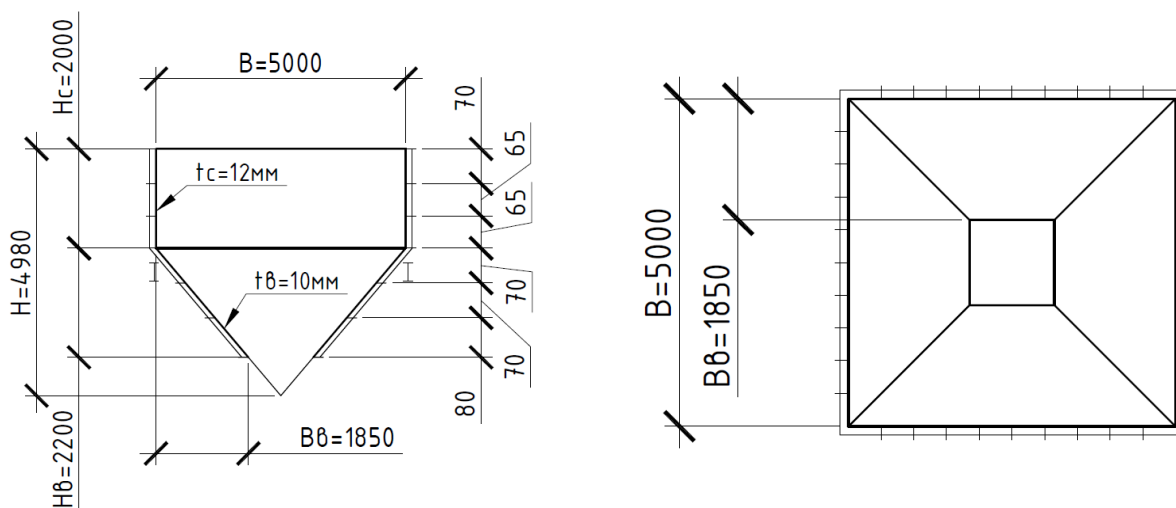
Күйі	Қысым	Шұңғыманың астыңғы шетінен арақашықтық									
		0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,60	1,80	2,20
		1 жүктеу режимі									
1	Pnf	30,89	32,79	33,97	34,60	34,76	34,54	34,00	32,10	30,81	27,64
	Ptf	10,94	11,62	12,04	12,26	12,32	12,24	12,05	11,37	10,92	9,79
		3 жүктеу режимі									
1	Pnf	31,05	32,98	34,19	34,83	35,02	34,82	34,30	32,45	31,17	28,04
	Ptf	11,00	11,69	12,11	12,34	12,41	12,34	12,15	11,50	11,04	9,94

### 3 Призмалық бункердің құрылымын есептеу

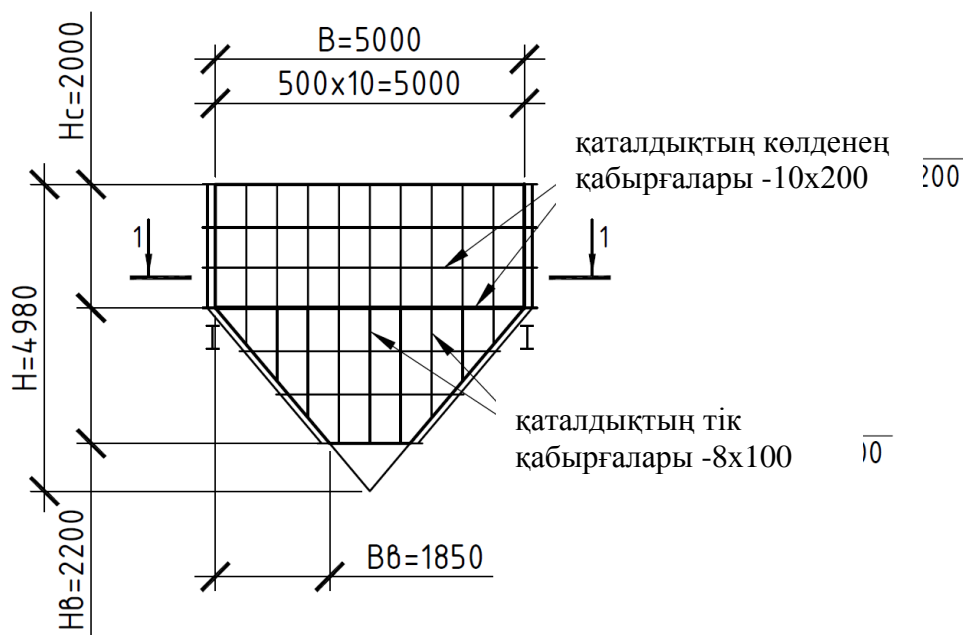
Жазық табақшалардан жасалған призмалық бункердің құрылымын жобалау қажет. Бункер элементтерінің есептелуі екі шекті күй бойынша орындалады. Призмалық бункерлерді есептеу бойынша талаптар келесі нормативтік құжаттарда көрсетілген: 1993-1-1 ҚР ҚН ЕН, 1993-1-7 ҚР ҚН ЕН, 1993-4-1 ҚР ҚН ЕН.

#### 3.1 Бункердің геометриялық сұлбасы және оның есептік параметрлері

Бункердің геометриялық сұлбалары 1 және 2 Суреттерінде көрсетілген.

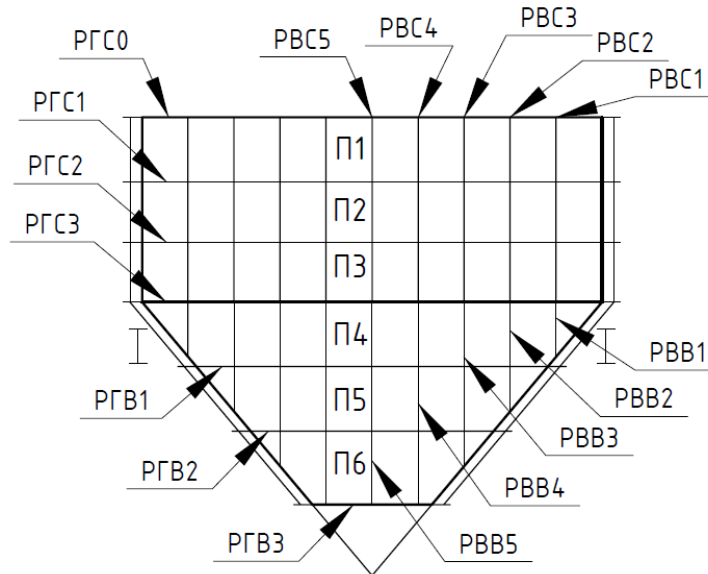


1 Сурет – Призмалық бункердің геометриялық сұлбасы



2 Сурет – Призмалық бункердің қабырғаларының геометриялық сұлбасы.

Призмалық бункердің құрылымы көлденең және тік қаттылық қабырғаларымен бекітілген. Бункердің жеке құрылымдық элементтерінің сұлбасы 3 Суретте көрсетілген.



**3 Сурет – Бункер элементтерін белгілеу сұлбасы**

Бункердің тік қабырғасы үшін есептік жүктемелік режимі ретінде «1 жүктеу режимін» қабылдаймыз. Бункер шұңғымасының қабырғасы үшін есептік жүктемелеу режимі есебінде «3 жүктеу режимін» қабылдаймыз.

Бункер қабырғасының жеке табақшаларының ені жазық бағытта тік қаттылық кырлардың қадамына тең  $b_p = 0,5$  м

Бункердің тік қабырғасының жеке табақшалардың ені тік бағытта  $\alpha_{П1} = 0,7$  м,  $\alpha_{П2} = 0,65$  м,  $\alpha_{П3} = 0,65$  м.

Бункер шұңғымасы қабырғаларының жеке табақшаларының тік бағыттағы ені  $\alpha_{П1} = 0,915$  м,  $\alpha_{П2} = 0,915$  м,  $\alpha_{П3} = 1,040$  м.

Жазық қаттылық қабырғаларының көлденең өлшемдері  $t_{ГР} = 10$  мм,  $b_{ГР} = 200$  мм.

Тік қаттылық қабырғаларының көлденең өлшемдері  $t_{БР} = 8$  мм,  $b_{БР} = 100$  мм.

Болап серпіндігінің модулі  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа.

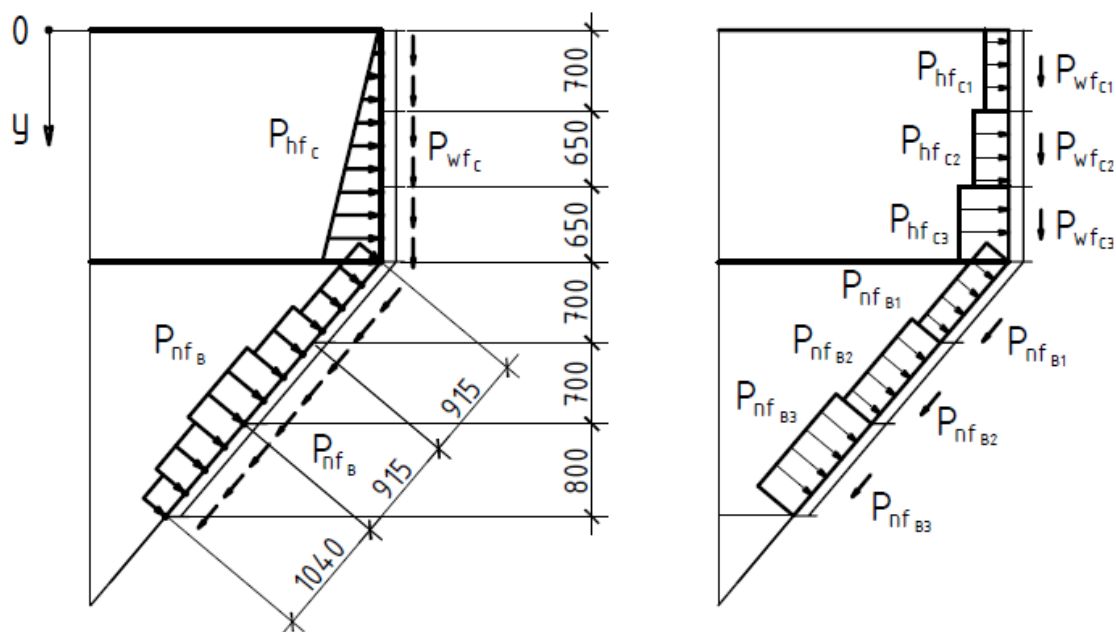
Пуассон Коэффициенті  $\nu = 0,3$ .

Металл конструкция болаты S235 по EN 10025-2 сипаттамаларымен (ҚР ҚН EN 1993-1-1 3.1 Кестесі және ҚР ҚН EN 1993-1-1 МҚ.2.2):

– аққыштық шегі  $f_y = 235$  Н/мм<sup>2</sup>;

– уақытша кедергі  $f_u = 360$  Н/мм<sup>2</sup>.

Бункердің құрылымына жүктемелер. Координаталардың тік өсінің нөлдік нүктесі ретінде бункер қабырғасының үстінгі жиегінің деңгейін аламыз. Координаталар өсі тік астыға бағытталған. Сусымалы материалдан жүктеу бункер бетінің ені бойынша біркелкі үлестірілген. Жүктемелеу қосымшасының сұлбасы 4 Суретінде бейнеленген.



а) бастапқы деректерге сәйкес тік қабырғаларға және шұңғыма қабырғаларына біркелкі үлестірілген жүктеме; б) табақшаларға жүктемелердің есептік сұлбасы.

#### 4 Сурет – Призмалық бункердің құрылымдарына жүктемелер:

##### 3.2.1.1 Жүктемелерді анықтау

Әр пластинаның шегінде біркелкі үлестірілген қысымды анықтаймыз. Қалыпты жүктеме:

$$P_1 = \left[ \left( \frac{P_{hf1} + 0}{2} + \frac{P_{hf1} + P_{hf2}}{2} + \frac{P_{hf2} + P_{hf3}}{2} \right) \times a_{ш1} + \left( \frac{P_{hf3} + \frac{P_{hf3} + P_{hf4}}{2}}{2} \right) \times \frac{a_{ш1}}{2} \right] \times \frac{1}{a_{п1}} = \left[ \left( \frac{2,52 + 0}{2} + \frac{2,52 + 4,82}{2} + \frac{4,82 + 6,94}{2} \right) \times 0,2 + \frac{6,94 + \frac{6,94 + 8,88}{2}}{2} \times \frac{0,2}{2} \right] \times \frac{1}{0,7} = 4,149 \text{ кПа}$$

$$P_2 = \left[ \frac{P_{hf4} + \frac{P_{hf3} + P_{hf4}}{2}}{2} \times \frac{a_{ш1}}{2} + \left( \frac{P_{hf5} + P_{hf4}}{2} + \frac{P_{hf6} + P_{hf5}}{2} \right) \times a_{ш1} + \frac{P_{hf6} + \left( P_{hf6} + \frac{3 \times (P_{hf7} - P_{hf6})}{4} \right)}{2} \times \left( \frac{3}{4} \times a_{ш1} \right) \right] \times \frac{1}{a_{п2}} = \left[ \frac{8,88 + \frac{6,94 + 8,88}{2}}{2} \times \frac{0,2}{2} + \left( \frac{10,68 + 8,88}{2} + \frac{12,34 + 10,68}{2} \right) \times 0,2 + \frac{12,34 + \left( 12,34 + \frac{3 \times (13,88 - 12,34)}{4} \right)}{2} \times \left( \frac{3 \times 0,2}{4} \right) \right] \times \frac{1}{0,65} = 10,82 \text{ кПа};$$

$$P_3 = \left[ \frac{P_{hf7} + \left( P_{hf6} + \frac{3 \times (P_{hf7} - P_{hf6})}{4} \right)}{2} \times \frac{a_{ш1}}{4} + \left( \frac{P_{hf8} + P_{hf7}}{2} + \frac{P_{hf9} + P_{hf8}}{2} + \frac{P_{hf10} + P_{hf9}}{2} \right) \times a_{ш1} \right] \times \frac{1}{a_{п3}} =$$

$$= \left[ \frac{13,88 + \left( 12,34 + \frac{3 \times (13,88 - 12,34)}{4} \right)}{2} \times \frac{0,2}{4} + \left( \frac{15,31 + 13,88}{2} + \frac{16,64 + 15,31}{2} + \frac{17,88 + 16,64}{2} \right) \times 0,2 \right] \times \frac{1}{0,65} = 15,77 \text{ кПа}$$

мұнда  $P_{hfic}$  - тік өске қатысты биіктік бойынша әртүрлі нүктелердегі қалыпты қысымның шамасы, кПа;

$\alpha_{III1}$  – қабықшаның ұзындығы бойынша қысымның қадамы, м.

Тірк арқасы бойынша жүктер (жанама қысым):

$$P_{w1} = \left[ \left( \frac{P_{wf1} + 0}{2} + \frac{P_{wf1} + P_{wf2}}{2} + \frac{P_{wf2} + P_{wf3}}{2} \right) \times a_{III1} + \frac{P_{wf3} + \frac{P_{wf3} + P_{wf4}}{2}}{2} \times \frac{a_{III1}}{2} \right] \times \frac{1}{a_{II1}} = \left[ \left( \frac{1,04 + 0}{2} + \frac{2,00 + 1,04}{2} + \frac{2,87 + 2,00}{2} \right) \times 0,2 + \frac{2,87 + \frac{2,87 + 3,68}{2}}{2} \times \frac{0,2}{2} \right] \times \frac{1}{0,7} = 1,718 \text{ кПа}$$

$$P_{w2} = \left[ \left( \frac{P_{wf4} + \frac{P_{wf3} + P_{wf4}}{2}}{2} \cdot \frac{a_{III1}}{2} \right) + \left( \frac{P_{wf5} + P_{wf4}}{2} + \frac{P_{wf6} + P_{wf5}}{2} \right) \times a_{III1} + \frac{P_{wf6} + \left( P_{wf6} + \frac{3 \times (P_{wf7} - P_{wf6})}{4} \right)}{2} \times \frac{3}{4} \times a_{III1} \right] \times \frac{1}{a_{II2}} = \left[ \left( \frac{3,68 + \frac{2,87 + 3,68}{2}}{2} \times \frac{0,2}{2} \right) + \left( \frac{4,42 + 3,68}{2} + \frac{5,10 + 4,42}{2} \right) \times 0,2 + \frac{5,10 + \left( 5,10 + \frac{3 \times (5,74 - 5,10)}{4} \right)}{2} \times \frac{3}{4} \times 0,2 \right] \times \frac{1}{0,65} = 4,478 \text{ кПа}$$

$$P_{w3} = \left[ \frac{P_{wf7} + \left( P_{wf6} + \frac{3 \times (P_{wf7} - P_{wf6})}{4} \right)}{2} \times \frac{a_{III1}}{4} + \left( \frac{P_{wf8} + P_{wf7}}{2} + \frac{P_{wf9} + P_{wf8}}{2} + \frac{P_{wf10} + P_{wf9}}{2} \right) \times a_{III1} \right] \times \frac{1}{a_{II3}} = \left[ \frac{5,74 + \left( 5,10 + \frac{3 \times (5,74 - 5,10)}{4} \right)}{2} \times \frac{0,2}{4} + \left( \frac{6,33 + 5,74}{2} + \frac{6,88 + 6,33}{2} + \frac{7,40 + 6,88}{2} \right) \times 0,2 \right] \times \frac{1}{0,65} = 6,521 \text{ кПа}$$

мұнда  $P_{wfic}$  – қабықшаның ұзындығы бойынша әртүрлі нүктелердегі қысым шамалары, кПа.

Келтірілген есептерден максималды жүктемелерді ПЗ табақшасы қабылдайтыны көрініп тұр. ПЗ табақшаның қалыңдығынң таңдаын жасаймыз, тік қабырғаның қалған табақшаларының өлшемдерін тең қылып аламыз.

### 3.2.1.2 Пластиналардағы кернеулерді есептеу

Есептеу С.1. 1993-1-7 ҚР ҚН ЕН-нің С.1 Кестесіне сәйкес орындалады, (шекті шарттар: FBC: барлық қабырғалар топсалы бекітулі, MBC: бір қалыпты кернеу және жылжудың кернеулері нөлге тең).

С.1 Кесте бойынша параметрлер:

Табақшаның ең кішкентай өлшемі  $\alpha = b_{\Pi} = 0,5$  тең

Табақшаның ең үлкен өлшемі  $b = \alpha_{\Pi 3} = 0,65$  тең

$\gamma = \frac{b}{\alpha} \gamma = 1,3$  арақатынасы

Параметрі

$$Q = \frac{q_{ed} \cdot a^4}{E \cdot t_c^4},$$

мұндағы  $q_{ed}$  – барлық беті бойынша біркелкі бөлінген жүктің есептік мағынасы.

$q_{ed} = P_{Ed3}$ .

$$Q = \frac{q_{ed} \cdot a^4}{E \cdot t_c^4} = \frac{15,77 \times 10^{-3} \times (0,5)^4}{2,1 \cdot 10^5 \times (0,012)^4} = 0,226$$

ҚР ҚН EN 1993-1-7 C.1 Кестесіне сәйкес коэффициенттерді түзу интерполяция көмегімен анықтаймыз:

$b/a$	$Q$	$k_{w1}$	$k_{\sigma bx1}$	$k_{\sigma by1}$	$k_{\sigma mx1}$	$k_{\sigma my1}$	$k_{\sigma mx2}$
1	0,226	0,0457299	0,296292	0,296292	0,020214	0,020214	-0,03398
	20	0,0396	0,2431	0,2431	0,0302	0,0302	-0,0589
	40	0,0334	0,1893	0,1893	0,0403	0,0403	-0,0841
1,3	0,226	0,0676377	0,397237	0,284063	0,022962	0,042132	-0,07352
1,5	0,226	0,0822429	0,464534	0,275911	0,024794	0,056745	-0,09988
	20	0,0685	0,3713	0,2156	0,0243	0,0694	-0,1244
	40	0,0546	0,277	0,1546	0,0238	0,0822	-0,1492

– шектік шарттарға сәйкес келетін,  $k_{w1} = 0,0676$ , пластина майысуын анықтайтын коэффициент;

–  $k_{\sigma bx1} = 0,3972$  шектік шарттарға сәйкес келетін,  $\square_{b,x}$  иілетін пластинаның кернеулерін анықтайтын коэффициент;

-  $k_{\sigma by1} = 0,2841$  шектік шарттарға сәйкес келетін,  $\square_{b,y}$  иілетін пластинаның кернеулерін анықтайтын коэффициент;

–  $k_{\sigma mx1} = 0,023$  шектік шарттарға сәйкес келетін,  $\square_{m,x}$  мембраналы кернеулерін анықтайтын коэффициент;

–  $k_{\sigma my1} = 0,0421$  шектік шарттарға сәйкес келетін,  $\square_{m,y}$  мембраналы кернеулерін анықтайтын коэффициент;

бірқалыпты үйлестірілген жүктемелермен жүктелген  $w$  пластина сегментінің иілуін ҚР ҚН EN 1993-1-7 (C.1) Формуласы бойынша анықталады:

$$w = k_{w1} \cdot \frac{q_{Ed} \cdot a^4}{E \cdot t_c^3} = 0,0676 \times \frac{15,77 \times 10^{-3} \times (0,5)^4}{2,06 \times 10^5 \times (0,012)^3} = 1,837 \times 10^{-4} \text{ м.}$$

Иілу моменттерімен алынған кернеулер ҚР ҚН EN 1993-1-7 (C.2) және (C.3) Формулалары бойынша есептелінеді:

$$\sigma_{bxEd} = k_{\sigma bx} \cdot \frac{q_{Ed} \cdot a^2}{t_c^2} = 0,3972 \times \frac{15,77 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,012)^2} = 10,876 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{byyE} = k_{\sigma by} \cdot \frac{q_{Ed} \cdot a^2}{t_c^2} = 0,2841 \cdot \frac{15,77 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,012)^2} = 7,777 \text{ МПа.}$$

Сегмент пластинадағы  $\sigma_{m,x}$  және  $\sigma_{m,y}$  мембраналы кернеулер ҚР ҚН EN 1993-1-7 (C.4) және (C.5) Формулалар бойынша анықталады:



$$\sigma_{mxEd} = k_{\sigma mx1} \cdot \frac{q_{Ed} \cdot a^2}{t_c^2} = 0,023 \times \frac{15,77 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,012)^2} = 0,629 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{myEd} = k_{\sigma my1} \cdot \frac{q_{Ed} \cdot a^2}{t_c^2} = 0,0421 \cdot \frac{15,77 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,012)^2} = 1,154 \text{ МПа}.$$

Вертикальді қабырғаларға әсер ететін тірек күші, вертикальді кернеулерді қайтадан есептейміз:

$$\sigma_{myEd} = k_{\sigma my1} \cdot \frac{q_{Ed} \cdot a^2}{t_c^2} + P_{w3} = 0,0421 \times \frac{15,77 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,012)^2} + 6,521 \times 10^{-3} =$$

$$= 1,160 \text{ МПа}.$$

Пластинаның жазықтықтығында жүксіз жалпы кернеулер иілу және мембраналы кернеулер мен анықталады және ҚР ҚН EN 1993-1-7 (С.6) және (С.7) Формулалар бойынша есептелінеді:

$$\sigma_{xEEd} = -\sigma_{bxEd} + \sigma_{mxEd} = -10,876 + 0,629 = -10,247 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{yEd} = -\sigma_{byEd} + \sigma_{myEd} = -7,777 + 1,16 = -6,617 \text{ МПа}.$$

ҚР ҚН EN 1993-1-7 (С.10) Формуласы бойынша пластиналар үшін эквивалентті кернеу:

$$\sigma_{eqEd} = \sqrt{\sigma_{xEEd}^2 + \sigma_{yEd}^2 - \sigma_{xEEd} \times \sigma_{yEd}} =$$

$$= \sqrt{(-10,247)^2 + (-6,617)^2 - (-10,247) \times (-6,617)} = 9,0 \text{ МПа}.$$

Пластинаның жазықтықтығында жүксіз жалпы кернеулер иілу және мембраналы кернеулер мен анықталады және ҚР ҚН EN 1993-1-7 (С.8) және (С.9) Формулалар бойынша есептелінеді:

$$\sigma_{xEEd} = \sigma_{bxEd} + \sigma_{mxEd} = 10,876 + 0,629 = 11,504 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{yEd} = \sigma_{byEd} + \sigma_{myEd} = 7,777 + 1,160 = 8,937 \text{ МПа}.$$

ҚР ҚН EN 1993-1-7 (С.10) Формуласы бойынша анықталатын пластина үшін эквивалентті кернеу:

$$\sigma_{eqEd} = \sqrt{\sigma_{xEEd}^2 + \sigma_{yEd}^2 - \sigma_{xEEd} \times \sigma_{yEd}} = \sqrt{11,504^2 + 8,937^2 - 11,504 \times 8,937} =$$

$$= 10,46 \text{ МПа}.$$

### 3.2.1.3 Табақшаларды шекті күйлер бойынша тексеру

Шекті күйлердің бірінші тобы бойынша тексеру

Тексеру аққыштық шегі бойынша ҚР ҚН EN-нің 1993-1-7 6.2 т. сәйкес орындалады.

Қиманың классына қарамастан беріктік бойынша көлденең қиманың салмақ түсіру қабілеттілігінің жеке коэффициенті ҚР ҚН EN 1993-1-1 6.1 (1) Тармағы және ҰҚ.2.13 сәйкес анықталады:

$$\gamma_{MO} = 1,00.$$

Есептік салмақ түсіретін қабілеттілігін ҚР ҚН EN 1993-1-7 (6.2) Формуласы бойынша анықтаймыз:

$$\sigma_{eqRd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{MO}} = \frac{235}{1,00} = 235 \text{ МПа},$$

мұндағы  $f_{yk}$  – аққыштық шегі.

Жазықтықтағы жүксіз және жүктелген кернеулерден алынған, есептік жүктемеден әсер ететін кернеулерді есептік мағына ретінде максималды эквивалентті кернеуді қабылдаймыз.

$$\sigma_{eqEd} = \max(\sigma_{eqEd}) = 10,46 \text{ МПа}.$$

Әсер ететін кернеудің Есептік мағына ретінде

Салмақ түсетін қабілеттілігінің шекті күйінің тексеруі ҚР ҚН EN 1993-1-7 (6.1) Формуласы бойынша орындалады:

$$\sigma_{eqEd} \leq \sigma_{eqRd}$$

$$\sigma_{eqEd} = 10,46 \text{ МПа} < \sigma_{eqRd} = 235 \text{ МПа}.$$

Шарт орындалады.

Пайдалану жарамдылығы бойынша шекті күйді тексеру.

Панельдердің шекті қимасының максималды ауытқуы ҚР ҚН EN 1993-4-1, (9.10) Формула

9.8.2 Тармағының талаптары бойынша  $\delta_{max}$  шеттеріне біркелкі шектеу болу керек:

$$\delta_{max} = k_3 \cdot L = 0,05 \cdot 0,5 \text{ м} = 0,025 \text{ м},$$

Мұндағы  $L$  – бет жағының ең қысқа өлшем;

$k_3$  – 0,05 тең коэффициент (ҚР ҚН EN 1993-4-1 ҰҚ.2.46).

$$w_{тр} = \delta_{max}$$

ҚР ҚН EN 1993-1-7 8.2 Тармақ бойынша тексеру орындалады:

$$w = 1,837 \cdot 10^{-4} \text{ м} < w_{тр} = 0,025 \text{ м}.$$

Шарт орындалады.

3.2.2 Бункердің вертикаль қабырғасының жазық қаттылық көлденең қырларын есептеу

3.2.2.1 Қалыпты қысымның әрекетінен иілу элементтеріндей қырлардың есебі орындалады.

PGC1, PGC2, PGC3 горизонтальді қаттылық қырларға жүктемелерді есептеу (3 Сурет):

$$P_{GC0} = \frac{P_1}{2} \cdot a_{п1} = \frac{4,149}{2} \cdot 0,7 = 1,452 \frac{\text{кН}}{\text{м}},$$

$$P_{GC1} = \frac{P_1}{2} \cdot a_{п1} + \frac{P_2}{2} \cdot a_{п2} = \frac{4,149}{2} \cdot 0,7 + \frac{10,82}{2} \cdot 0,65 = 4,97 \frac{\text{кН}}{\text{м}},$$

$$P_{GC2} = \frac{P_2}{2} \cdot a_{п2} + \frac{P_3}{2} \cdot a_{п3} = \frac{10,82}{2} \cdot 0,65 + \frac{15,77}{2} \cdot 0,65 = 8,643 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

ҚР ҚН EN 1993-1-1(6.12) Формуласы бойынша көлденең бағытталған жүктемелердің иілу элементтері үшін орындалатын қырдың есебі.  $M_{Ed}$  иілу моменттерінің есептік мағынасы әр көлденең қиманың шартына қанағаттандыру керек:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cRd}} \leq 1,$$

мұндағы  $M_{Ed}$  – иілу моменттерге әсер ететін есептік мағына;

$M_{cRd}$  – басты оське біркелкі салмақ түсетін қабілеттілігінің есептік мағынасы.

Салмақ түсіретін қабілеттілігінің есептік мағынасы көлденең қиманың классификациясына тәуелді болады (ҚР ҚН EN 1993-1-1 6.2.1 (3) т.). аққыштық шектікті Көлденең қималарының классификациясына сәйкес (ҚР ҚН EN 1993-1-1 5.5 Тармақ) 3 классқа жататын қатаң қырлар. 3 классты көлденең қима – болатты элементтердің шеткі сығылған талшық кернеудегі серпінді кернеулерді үйлестіру кезіндегі аққыш шектікті жететін, бірақ пластикалық деформацияның дамуына жергілікті тұрақтылық кедергі жасайды.

3.2.2.2 Салмақ түсетін қабілеттілігінің шекті күйлердің қырды есептеу

Көлденең қиманың басты осьтердің біріне қатысты иіліске көтергіш қасиеттің есептік мәні  $M_{cRd}$  қималардың 3 классы үшін келесі (6.14) Формула бойынша анықталады, ҚР ҚН EN 1993-1-1 6.2.5.(2) Тармағы бойынша:

$$M_{cRd} = M_{elRd} = \frac{W_{elmin} \cdot f_y}{\gamma_{mo}},$$

мұндағы  $W_{elmin}$  – серпінді кезеңде жұмыс істейтін қиманың кедергі моменті,

$f_y = 235 \text{ Н/мм}^2 = 235 \cdot 10^3 \text{ кН/м}^2$  (Таблица 3.1 СН РК EN 1993-1-1).

Горизонтальді қырлардың қимасын тексереміз  $b_{тр} = 200 \text{ мм}$ ;  $t_{тр} = 10 \text{ мм}$ .

$$W_{elmin} = \frac{t_{гр} b_{гр}^2}{6} = \frac{0,01 \cdot (0,2)^2}{6} = 6,667 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3;$$

$$M_{cRd} = M_{elRd} = \frac{W_{elmin} \cdot f_y}{\gamma_{MO}} = \frac{6,667 \times 10^{-5} \times 235 \times 10^3}{1,025} = 15,28 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

РГС2 көлденең қырдға әсер ететін максимальді жүктеме. Осы элементтердің қимасының іріктеп алуын орындаймыз. Бункердің вертикаль қабырғаларының қалған көлденең қырларын сол қимадай қабылдаймыз.

РГС2 қырда есептік иілу моменті:

$$M_{Ed} = \frac{P_{ГС2} \cdot B^2}{8} = \frac{8,643 \cdot 5^2}{8} = 27,01 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

Шарт орындалуының тексеруі:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cRd}} = \frac{27,01}{15,28} = 1,768 > 1.$$

Шарт орындалмайды.

Қатаң горизонтальді қырлардың көлденең өлшемдерін ұлғайтамыз.  $t_{гр} = 16 \text{ мм}$ ,  $b_{гр} = 300 \text{ мм}$  қатаң горизонтальді қырлардың көлденең өлшемдерін қабылдаймыз. Онда:

$$W_{elmin} = \frac{t_{гр} b_{гр}^2}{6} = \frac{0,016 \cdot (0,3)^2}{6} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3,$$

$$M_{cRd} = \frac{W_{elmin} \cdot f_y}{\gamma_{MO}} = \frac{2,4 \cdot 10^{-4} \times 235 \times 10^3}{1,025} = 55,02 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Шарт орындалуының тексеруі:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cRd}} = \frac{27,01}{55,02} = 0,491 < 1.$$

Шарт орындалады.

Қатаң көлденең қырлардың көлденең өлшемдерін біржола қабылдаймыз:

$t_{гр} = 16 \text{ мм}$ ,  $b_{гр} = 300 \text{ мм}$ .

### 3.2.3 Бункердің вертикаль қабырғасының вертикаль қырларын есептеу

Вертикаль қырларға қысымнан жазық жүктеулер, сонымен қатар сусымалы материалдардың тік үйкеліс күштері әрекет етеді. ҚР ҚН ЕН 1993-1-1 6.3.3 Тармағының ережелеріне сәйкес қысылған-иілген (ортадан тыс-қысылған) элементі сияқты қырдың есебін орындаймыз.

Қырға жазық жүктемелеуді есептеу:

$$P_{hPBC} = (P_1 \times a_{П1} + P_2 \times a_{П2} + P_3 \times a_{П3}) \times \frac{1}{H_c} \times b_{П} =$$

$$= (4,149 \times 0,7 + 10,82 \times 0,65 + 15,77 \times 0,65) \times \frac{1}{2,0} \times 0,5 = 5,047 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Қырға жанама үйлестірілген жүктердің есебі:

$$P_{wPBC} = (P_{w1} \times a_{П1} + P_{w2} \times a_{П2} + P_{w3} \times a_{П3}) \times \frac{1}{H_c} \times b_{П} =$$

$$= (1,718 \times 0,7 + 4,478 \times 0,65 + 6,521 \times 0,65) \times \frac{1}{2,0} \times 0,5 = 2,088 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Қырдағы бойлық осьті күш:

$$N_{Ed} = \frac{1}{2} \times (L_p \cdot P_{wPBC}) = \frac{1}{2} \times 2,0 \times 2,088 = 2,088 \text{ кН}.$$

Қырдың ұзындығы  $L_p = H_c = 2,0 \text{ м}$ .

Иілу моменті:

$$M_{yEd} = \frac{P_{hPBC} \times L_p^2}{8} = \frac{5,047 \times (2,0)^2}{8} = 2,524 \text{ кНм} = 2524 \text{ кНмм}.$$

ҚР ҚН EN 1993-1-1 (6.61) және (6.62) Формуласының және 6.3.3(4) Тармағының талаптарын қанағаттандыратын сығу-иілу элементтері сәйкес:

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,0;$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,0.$$

Z – Z жазықтығында қатаң қырдың иілуін шақыртатын осы мысалдағы  $M_{z,Ed} = 0$  жүктемесі. Осы жағдай үшін ҚР ҚН EN 1993-1-1(6.61) және (6.62) Формулалары келесі түрге сәйкес:

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,0;$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,0;$$

мұндағы  $N_{Ed}$ ,  $M_{y,Ed}$  – иілу моментінің және сығу күштердің есептік мағынасы;

$N_{Rk}$ ,  $M_{y,Rk}$  – Y – Y біркелкі осыне сәйкес сығылатын және иілетін салмақ түсіретін қабілеттілігінің нормативті мағынасы;

$\chi_y$  – жазық формадағы тұрақтылық шығынның коэффициенті, 6.3.1 т.;

$\chi_{LT}$  – иілудің жазық формадағы тұрақтылықты тексеру кезіндегі түсіретін коэффициент, ҚР ҚН EN 1993-1-1 6.3.2 Тармағы;

$k_{yy}$  және  $k_{zy}$  – әрекеттесу коэффициенті.

Тұрақтылық бойынша салмақ түсетін қабілеттілігін анықтау кезіндегі жеке қауіпсіздік коэффициенті (ҚР ҚН EN 1993-1-1 ҰҚ.2.13 қар.):

$$\gamma_{M1} = 1,0$$

$k_{yy}$  және  $k_{zy}$  әрекеттесу коэффициентін ҚР ҚН EN 1993-1-1 А Қосымшасы бойынша анықтаймыз. ҚР ҚН EN 1993-1-1 А.1 Кестесінде 3 класс қималары үшін:

$$k_{yy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}};$$

$$k_{zy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}};$$

$$C_{m,y} = C_{m,y,0} + (1 - C_{m,y,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}},$$

$$C_{m,LT} = C_{m,y}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} \geq 1,$$

$$\mu_y = \frac{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}{1 - \chi_y \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)};$$

$$\mu_z = \frac{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}{1 - \chi_y \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}.$$

А.2 Кестесінде біраралықты біліктің моменттің эпюрасы үшін біркелкі үйлестірілген жүктеменің  $C_{m,i,0}$  коэффициенті формуласы бойынша анықталады:

$$C_{m,i,0} = C_{m,y,0} = 1 + 0,03 \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}$$

Екіталай ұзындық:

— жазықтықта  $L_{cr,y} = 2$  м;

— жазықтықтан  $L_{cr,z} = 0,7$  м.

$b_{вр} = 100$  мм;  $t_{вр} = 8$  мм вертикальді қырдың қимасын тексереміз.

$$\begin{aligned} A_i &= A_{вр} = t_{вр} \cdot b_{вр} = 8 \cdot 100 = 800 \text{ мм}^2, \\ W_i &= W_{вр} = \frac{t_{вр} \cdot b_{вр}^2}{6} = \frac{8 \cdot 100^2}{6} = 13,33 \cdot 10^3 \text{ мм}^3, \\ I_y &= \frac{t_{вр} \cdot b_{вр}^3}{12} = \frac{8 \cdot 100^3}{12} = 667 \cdot 10^3 \text{ мм}^4, \\ I_z &= \frac{b_{вр} \cdot h_{вр}^3}{12} = \frac{100 \cdot 8^3}{12} = 4,27 \cdot 10^3 \text{ мм}^4, \\ i_y &= \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{667 \cdot 10^3}{800}} = 28,875 \text{ мм}, \\ i_z &= \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{4,27 \cdot 10^3}{800}} = 2,31 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Еркін айналмадағы көлденең қиманың инерция моменті кручения  $I_T$  тең болады:

$$I_T = \alpha \cdot t_{вр}^4$$

$b_{вр}/h_{вр}$	1,5	2	3	6	10	12,5
$\alpha$	0,294	0,459	0,79	1,789	3,123	3,957

Біздің жағдайда  $\frac{b_{вр}}{h_{вр}} = \frac{100}{8} = 12,5$ , интерполяция бойынша  $\alpha=3,957$ :

$$I_T = \alpha \cdot t_{вр}^4 = 3,957 \cdot 8^4 = 16208 \text{ мм}^4,$$

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2,$$

$y_0 = z_0 = 0$  — ауырлық ортасы және иілудің ортасы сәйкес келеді,

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 = 28,875^2 + 2,31^2 = 839,102 \text{ мм}^2.$$

Y — Y осіне біркелкі сығу және иілуге салмақ түсетін қабілеттілігінің нормативті мағыналарды аламыз (ҚР ҚН EN 1993-1-1 6.7 Кесте, 3 классты қималар үшін):

$$N_{Rk} = f_y \cdot A_i = 235 \cdot 800 = 0,188 \cdot 10^3 \text{ кН},$$

$$M_{yRk} = f_y \cdot W_i = 235 \cdot 13,33 \cdot 10^3 = 3,132 \cdot 10^3 \text{ кНмм}.$$

Y — Y осіне  $N_{cr,y}$  серпінді кезеңдегі және Z — Z —  $N_{cr,z}$  осіне біркелкі жазық формадағы тұрақтылық шығынның екіталай күші:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 667 \cdot 10^3}{2000^2} = 345,258 \text{ кН},$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 EI_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 4,27 \cdot 10^3}{700^2} = 18,043 \text{ кН}.$$

Айналмалы форма бойынша серпінді кезеңдегі тұрақтылықтың екіталай күші:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left( GI_T + \frac{\pi^2 EI_w}{L_T^2} \right)$$

Мұнда  $\frac{\pi^2 EI_w}{L_T^2} = 0$  қысылған айналма әсеріне көңіл бермейміз, аламыз:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot GI_T = \frac{1}{839,102} \cdot 81 \cdot 16208 = 1564 \text{ кН}.$$

Тұрақтылық шығынның ауытқуына сәйкес келетін түріне тәуелді болатын  $\bar{\lambda}$  шартты иілуіне тәуелді болатын  $\chi$  мағынасын ҚР ҚН EN 1993-1-1(6.49) Формуласы бойынша анықтау қажет:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}},$$

мұндағы  $\Phi$  – формула бойынша анықталатын өлшем:

$$\Phi = 0,5 \cdot (1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2).$$

$\bar{\lambda}$  шартты иілу ҚР ҚН EN 1993-1-1 (6.50) Формуласы бойынша анықталады:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1},$$

$\lambda_1$  – формула бойынша анықталатын өлшем:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,14 \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5}{235}} = 93,86.$$

Тұрақтылық шығынның ауытқуын ҚР ҚН EN 1993-1-1 6.2 Кестесі ( $t_f < 40\text{мм}$ ,  $f_y$  S235-тен S420 дейін) бойынша анықтаймыз. Берілген параметрлерге  $a$ ,  $b$  ауытқуына сәйкес келеді.  $\chi_y$  және тұрақтылық коэффициентін анықтау кезіндегі  $a$  ауытқуын және  $\chi_z$  үшін  $b$  ауытқуын қабылдаймыз.

$\chi_y$  жазық формадағы тұрақтылық шығынның түсіретін коэффициентін есептейміз.

$a$  ауытқымасы  $\alpha = 0,21$  сәкес келетін,  $\alpha$  коэффициент шамасын ҚР ҚН EN 1993-1-1 6.1 Кестесі бойынша анықтаймыз.

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2000}{28,875} \cdot \frac{1}{93,86} = 0,738,$$

$$\Phi_y = 0,5 \cdot (1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,21 \cdot (0,738 - 0,2) + 0,738^2) = 0,829.$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,829 + \sqrt{0,829^2 - 0,738^2}} = 0,829,$$

$$\mu_y = \frac{1 - \left( \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} \right)}{1 - \chi_y \left( \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} \right)} = \frac{1 - \frac{2,088}{345,258}}{1 - 0,829 \cdot \frac{2,088}{345,258}} = 0,999.$$

$\chi_z$  жазық формадағы тұрақтылық шығынның түсіретін коэффициентін анықтаймыз.

$b$  ауытқымасы  $\alpha = 0,34$  сәкес келетін,  $\alpha$  коэффициент шамасын ҚР ҚН EN 1993-1-1 6.1 Кестесі бойынша анықтаймыз.

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{700}{2,31} \cdot \frac{1}{93,86} = 3,228,$$

$$\Phi_z = 0,5 \cdot (1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,34 \cdot (3,228 - 0,2) + 3,228^2) = 6,225,$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{6,225 + \sqrt{6,225^2 - 3,228^2}} = 0,086,$$

$$\mu_z = \frac{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}{1 - \chi_z \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} = \frac{1 - \frac{2,088}{18,043}}{1 - 0,086 \cdot \frac{2,088}{18,043}} = 0,893.$$

Түсіретін коэффициент  $\chi_{LT}$  (ҚР ҚН EN 1993-1-1 (6.56)) Формула:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}},$$

Сонымен бірге шарт сақталауы керек :

$$\chi_{LT} \leq 1,0 \text{ или } \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2}.$$

$\chi_{LT}$  түсіретін коэффициентті анықтау үшін  $\Phi_{LT}$  шамасы (ҚР ҚН EN 1993-1-1 6.3.2.3 Тармақты қар.):

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right].$$

Бастапқы жетілмегендікті есептейтін  $\alpha_{LT}$  коэффициенті ҚР ҚН EN 1993-1-1 6.3 Кестесі бойынша анықталады. Коэффициент тұрақтылық шығынның типіне байланысты болады. Ауытқымалы тұрақтылық шығынның таңдауы көлденең қиманың түріне байланысты болады (ҚР ҚН EN 1993-1-1 6.4 Кестесін қар.).  $d$  – біздің жағдайдағы Ауытқымалы тұрақтылық шығынның типі.

Осылайша, ҚР ҚН EN 1993-1-1 6.3 Кестесі бойынша:

$$\alpha_{LT} = 0,76.$$

$\bar{\lambda}_{LT}$  шартты иілімнің анықтауын ҚР ҚН EN 1993-1-1 6.3.2.2(1) Тармағын қар. :

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}.$$

$M_{cr}$  серпінді кезеңдегі жазық формадағы иілудің тұрақтылық шығынның екіталай моментін анықтау:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 E I_z}{L^2} \cdot \sqrt{\left[ \frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 G I_T}{\pi^2 E I_z} \right]}.$$

ҚР ҚН EN 1993-1-1 6.6 Кестесі бойынша  $k_c$  коэффициентін, А1 Кестесі бойынша  $C_1$  коэффициентін анықтау:

$$C_1 = k_c^{-2} = 0,94^{-2} = 1,132,$$

$$M_{cr} = 1,132 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 4,27 \cdot 10^3}{700^2} \cdot \sqrt{0 + \frac{700^2 \cdot 81 \cdot 16208}{\pi^2 \cdot 210 \cdot 4,27 \cdot 10^3}} = 5,509 \cdot 10^3 \text{ кНмм},$$

Аламыз:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{13,33 \cdot 10^3 \cdot 235}{5,509 \cdot 10^6}} = 0,754,$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = 0,506,$$

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + 0,76(0,754 - 0,2) + 0,754^2] = 0,995,$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,995 + \sqrt{0,995^2 - 0,754^2}} = 0,761.$$

Шарт  $\chi_{LT} = 0,761 < 1,0$  и  $\chi_{LT} = 0,761 \leq \frac{1}{\lambda_{LT}^2} = \frac{1}{0,754^2} = 1,759$  қабылдаймыз  $\chi_{LT} = 0,761$ .

A1 Кестесі бойынша 1,2 және 3 классты қималар үшін:

- салыстырмалы эксцентриситет

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \cdot \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{2524}{2,088} \cdot \frac{800}{13,33 \cdot 10^3} = 72,547,$$

- жетілмегендікті есептейтін коэффициент

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} = 1 - \frac{16208}{667 \cdot 10^3} = 0,976 > 0,$$

$$C_{m,y,0} = 1 + 0,03 \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 1 + 0,03 \cdot \frac{2,088}{345,258} = 1,000181 \approx 1,$$

$$C_{m,y} = C_{m,y,0} + (1 - C_{m,y,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}} = 1,$$

$$C_{m,LT} = C_{m,y}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 1 \cdot \frac{0,976}{\sqrt{\left(1 - \frac{2,088}{18,043}\right) \cdot \left(1 - \frac{2,088}{1564}\right)}} = 1,039 > 1,$$

қабылдаймыз  $C_{m,LT} = 1,039$ .

аламыз:

$$k_{yy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1 \cdot 1,039 \cdot \frac{0,999}{1 - \frac{2,088}{345,258}} = 1,044,$$

$$k_{zy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1 \cdot 1,039 \cdot \frac{0,893}{1 - \frac{2,088}{345,258}} = 0,933.$$

Сығу-иілу элементтер үшін тұрақтылық шарт:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{2,088}{0,829 \cdot 188} + 1,044 \cdot \frac{2524}{0,761 \cdot \frac{3132}{1,0}} = 1,119 > 1,0;$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{2,088}{0,086 \cdot 188} + 0,933 \cdot \frac{2524}{0,761 \cdot \frac{3132}{1,0}} = 1,117 > 1,0.$$

Тұрақтылықтың шарты орындалмайды, қиманы ұлғайту қажет.

Ветирикальді қырдың қимасын тексереміз  $b_{bp} = 100$  мм;  $t_{bp} = 10$  мм.

$$A_i = A_{bp} = t_{bp} \cdot b_{bp} = 10 \cdot 100 = 1000 \text{ мм}^2,$$

$$W_i = W_{bp} = \frac{t_{bp} \cdot b_{bp}^2}{6} = \frac{10 \cdot 100^2}{6} = 16,67 \cdot 10^3 \text{ мм}^3,$$

$$I_y = \frac{t_{bp} \cdot b_{bp}^3}{12} = \frac{10 \cdot 100^3}{12} = 833,3 \cdot 10^3 \text{ мм}^4,$$

$$I_z = \frac{b_{bp} \cdot h_{bp}^3}{12} = \frac{100 \cdot 10^3}{12} = 8,333 \cdot 10^3 \text{ мм}^4,$$



$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{833,3 \cdot 10^3}{1000}} = 28,867 \text{ мм},$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{8,333 \cdot 10^3}{1000}} = 2,887 \text{ мм},$$

$$I_T = \alpha \cdot t_{\text{вп}}^4$$

$b_{\text{вп}}/h_{\text{вп}}$	1,5	2	3	6	10
$\alpha$	0,294	0,459	0,79	1,789	3,123

Біздің жағдайда  $b_{\text{вп}}/h_{\text{вп}} = 100/10 = 10$ , интерполяция бойынша  $\alpha=3,123$ :

$$I_T = \alpha \cdot t_{\text{вп}}^4 = 3,123 \cdot 10^4 = 31230 \text{ мм}^4,$$

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 = 28,867^2 + 2,887^2 = 841,638 \text{ мм}^2.$$

Сығу және иілу үшін салмақ түсетін қабілеттілігінің нормативті мағынасы:

$$N_{Rk} = f_y \cdot A_i = 235 \cdot 1000 = 0,235 \cdot 10^3 \text{ кН},$$

$$M_{yRk} = f_y \cdot W_i = 235 \cdot 16,67 \cdot 10^3 = 3,917 \cdot 10^3 \text{ кНмм}.$$

Жазықтық формадағы тұрақтылық шығынның екіталай күші:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 E I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 833,3 \cdot 10^3}{2000^2} = 431,340 \text{ кН},$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 8,333 \cdot 10^3}{700^2} = 35,211 \text{ кН}.$$

Айналмалы форма бойынша серпінді кезеңдегі тұрақтылықтың екіталай күші:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot G I_T = \frac{1}{841,638} \cdot 81 \cdot 31230 = 3006 \text{ кН}.$$

$\chi_y$  жазық формадағы тұрақтылық шығындағы түсіретін коэффициентті есептейміз.

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2000}{28,867} \cdot \frac{1}{93,86} = 0,738,$$

$$\Phi_y = 0,5 \cdot \left( 1 + \alpha (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right) = 0,5 \cdot (1 + 0,21 \cdot (0,738 - 0,2) + 0,738^2) = 0,829.$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,829 + \sqrt{0,829^2 - 0,738^2}} = 0,829,$$

$$\mu_y = \frac{1 - \left( \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} \right)}{1 - \chi_y \left( \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} \right)} = \frac{1 - \frac{2,088}{431,340}}{1 - 0,829 \cdot \frac{2,088}{431,340}} = 0,999.$$

$\chi_z$  жазық формадағы тұрақтылық шығындағы түсіретін коэффициентті есептейміз.

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{700}{2,887} \cdot \frac{1}{93,86} = 2,583,$$

$$\Phi_z = 0,5 \cdot \left( 1 + \alpha (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right) = 0,5 \cdot (1 + 0,34 \cdot (2,583 - 0,2) + 2,583^2) = 4,241,$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{4,241 + \sqrt{4,241^2 - 2,583^2}} = 0,131,$$

$$\mu_z = \frac{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}{1 - \chi_z \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} = \frac{1 - \frac{2,088}{35,211}}{1 - 0,131 \cdot \frac{2,088}{35,211}} = 0,948.$$

Түсіретін коэффициент  $\chi_{LT}$ :

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}.$$

$M_{cr}$  серпінді кезеңдегі жазық формадағы иілудің тұрақтылық шығынның екіталай момент:

$$C_1 = k_c^{-2} = 0,94^{-2} = 1,132,$$

$$M_{cr} = 1,132 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 8,333 \cdot 10^3}{700^2} \sqrt{0 + \frac{700^2 \cdot 81 \cdot 31230}{\pi^2 \cdot 210 \cdot 8,333 \cdot 10^3}} = 10,683 \cdot 10^3 \text{ кНм},$$

Аламыз:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{16,67 \cdot 10^3 \cdot 235}{10,683 \cdot 10^6}} = 0,606,$$

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + 0,76 \cdot (0,606 - 0,2) + 0,606^2] = 0,838,$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,838 + \sqrt{0,838^2 - 0,606^2}} = 0,706.$$

Шарт  $\chi_{LT} = 0,706 < 1,0$  и  $\chi_{LT} = 0,706 \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{0,606^2} = 2,723$ , қабылдаймыз  $\chi_{LT} = 0,706$ .

A1 Кестесі бойынша 1,2 және 3 классты қималар үшін:

- салыстырмалы эксцентриситет

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \cdot \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{2524}{2,088} \cdot \frac{1000}{16,67 \cdot 10^3} = 72,514,$$

- жетілмегендікті есептейтін коэффициент

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} = 1 - \frac{31230}{833,3 \cdot 10^3} = 0,962 > 0,$$

$$C_{m,y,0} = 1 + 0,03 \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 1 + 0,03 \cdot \frac{2,088}{431,340} = 1,000145 \approx 1,$$

$$C_{m,y} = C_{m,y,0} + (1 - C_{m,y,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}} = 1,$$

$$C_{m,LT} = C_{m,y}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 1 \cdot \frac{0,962}{\sqrt{\left(1 - \frac{2,088}{35,211}\right) \cdot \left(1 - \frac{2,088}{3006}\right)}} = 0,992 < 1,$$

қабылдаймыз  $C_{m,LT} = 1$ .

аламыз:

$$k_{yy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,999}{1 - \frac{2,088}{431,340}} = 1,004,$$

$$k_{zy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,948}{1 - \frac{2,088}{431,340}} = 0,953.$$

Сығу-иілу элементтер үшін тұрақтылық шарт:

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} = \frac{2,088}{0,829 \cdot 235} + 1,004 \cdot \frac{2524}{0,706 \cdot \frac{3917}{1,0}} = 0,927 < 1,0;$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} = \frac{2,088}{0,131 \cdot 235} + 0,953 \cdot \frac{2524}{0,706 \cdot \frac{3917}{1,0}} = 0,938 < 1,0.$$

Шарт орындалады.

$t_{BP} = 10$  мм,  $b_{BP} = 100$  мм бункер қимасының қатаң қабырғаларының вертикальді қырын қабылдаймыз.

### 3.3 Шұңғы элементтерінің есебі

#### 3.3.1 Бункер шұңғының пластина қабырғаларының есебі

Көлденең және вертикальді қатаң қырлармен шектелген бункер шұңғының жеке пластина қабырғаларын қарастырамыз. көлденең және вертикальді жүктер біркелкі үйлестірілген әрбір пластина шегіне әсер ететін және пластиналар ұштарда топсалы тірелген, вертикальді қабырғалар үшін де шартты қабылдаймыз.

##### 3.3.1.1 Жүктемелерді анықтау

Әр пластинадағы жүктемелерді анықтаймыз (пластинаның таңбауын 2 Суретті қар.).

Қалыпты жүктеме:

$$P_4 = \left( \frac{P_{nf10} + P_{nf11}}{2} \times a_{ш1} + \frac{P_{nf11} + P_{nf12}}{2} \times a_{ш2} + \frac{P_{nf12} + \frac{P_{nf12} + P_{nf13}}{2}}{2} \times \frac{a_{ш1}}{2} \right) \times \frac{1}{a_{п4}} =$$

$$= \left( \frac{31,05 + 32,98}{2} \times 0,2 + \frac{32,98 + 34,19}{2} \times 0,4 + \frac{34,19 + \frac{34,19 + 34,83}{2}}{2} \times \frac{0,2}{2} \right) \times \frac{1}{0,7} =$$

$$= 33,248 \text{ кПа},$$

$$P_5 = \left( \frac{\frac{P_{nf12} + P_{nf13}}{2} + P_{nf13}}{2} \times \frac{a_{ш1}}{2} + \frac{P_{nf13} + P_{nf14}}{2} \times a_{ш2} + \frac{P_{nf14} + P_{nf15}}{2} \times a_{ш1} \right) \times \frac{1}{a_{п5}} =$$

$$= \left( \frac{\frac{34,19 + 34,83}{2} + 34,83}{2} \times \frac{0,2}{2} + \frac{34,83 + 35,02}{2} \times 0,4 + \frac{35,02 + 34,82}{2} \times 0,2 \right) \times \frac{1}{0,7} =$$

$$= 34,888 \text{ кПа},$$

$$P_6 = \left( \frac{P_{nf15} + P_{nf16}}{2} \times a_{ш1} + \frac{P_{nf16} + P_{nf17}}{2} \times a_{ш1} + \frac{P_{nf17} + P_{nf18}}{2} \times a_{ш1} + \frac{P_{nf18} + P_{nf19}}{2} \times a_{ш1} \right) \times$$

$$\times \frac{1}{a_{п6}} =$$

$$= \left( \frac{34,82 + 34,30}{2} \times 0,2 + \frac{34,30 + 32,45}{2} \times 0,2 + \frac{32,45 + 31,17}{2} \times 0,2 + \frac{31,17 + 28,04}{2} \times 0,2 \right) \times \frac{1}{0,8} =$$

$$= 32,338 \text{ кПа},$$

мұндағы  $a_{ш1}$ ,  $a_{ш2}$  – қабықшаның ұзындығы бойынша жүктемелердің өзгеру қадамдары, м;

Жанама жүктеме:

$$P_{t4} = \left( \frac{P_{tf10} + P_{tf11}}{2} \times a_{ш1} + \frac{P_{tf11} + P_{tf12}}{2} \times a_{ш2} + \frac{P_{tf12} + \frac{P_{tf12} + P_{tf13}}{2}}{2} \times \frac{a_{ш1}}{2} \right) \times \frac{1}{a_{п4}} =$$

$$= \left( \frac{11,0 + 11,69}{2} \times 0,2 + \frac{11,69 + 12,11}{2} \times 0,4 + \frac{12,11 + \frac{12,11 + 12,34}{2}}{2} \times \frac{0,2}{2} \right) \times \frac{1}{0,7} = 11,78 \text{ кПа},$$

$$\begin{aligned}
P_{t5} &= \left( \frac{P_{tf12} + P_{tf13}}{2} + P_{tf13} \times \frac{a_{ш1}}{2} + \frac{P_{tf13} + P_{tf14}}{2} \times a_{ш2} + \frac{P_{tf14} + P_{tf15}}{2} \times a_{ш1} \right) \times \frac{1}{a_{п5}} = \\
&= \left( \frac{12,11 + 12,34}{2} + 12,34 \times \frac{0,2}{2} + \frac{12,34 + 12,41}{2} \times 0,4 + \frac{12,41 + 12,34}{2} \times 0,2 \right) \times \frac{1}{0,7} = \\
&= 12,362 \text{ кПа}, \\
P_{t6} &= \left( \frac{P_{tf15} + P_{tf16}}{2} \times a_{ш1} + \frac{P_{tf16} + P_{tf17}}{2} \times a_{ш1} + \frac{P_{tf17} + P_{tf18}}{2} \times a_{ш1} + \frac{P_{tf18} + P_{tf19}}{2} \times a_{ш1} \right) \times \\
&\times \frac{1}{a_{п6}} = \\
&= \left( \frac{12,34 + 12,15}{2} \times 0,2 + \frac{12,15 + 11,5}{2} \times 0,2 + \frac{11,5 + 11,04}{2} \times 0,2 + \frac{11,04 + 9,94}{2} \times 0,2 \right) \times \frac{1}{0,8} = \\
&= 11,458 \text{ кПа},
\end{aligned}$$

П5 пластина максималды жүктеме қабылдайтынын келтірілген есептерден белгілі. Шекті жағдайлар бойынша берілген элементтердің тексеруін орындаймыз.

шұңғы қабырғаларының вертикальді қабырғасының еңіс бұрышы:

$$\alpha = \beta = 40^\circ.$$

шұңғы қабырғаларының вертикальді проекциясының ұзындығы:

$$a_{ВП4} = a_{п4} \times \frac{1}{\cos \alpha} = 0,914 \text{ м},$$

$$a_{ВП5} = a_{п5} \times \frac{1}{\cos \alpha} = 0,914 \text{ м},$$

$$a_{ВП6} = a_{п6} \times \frac{1}{\cos \alpha} = 1,044 \text{ м}.$$

### 3.3.1.2 Пластинадағы кернеудің есебі

ҚР ҚН EN 1993-1-7, С.1 Кестесі, С.1 Қосымша құралдыры сәйкес есеп орындалады.

П5 пластинаның есебі.

С.1 Кестесі бойынша параметрлер:

– пластинаның ең кіші өлшемі  $a = b_{п} = 0,5$  тең;

– пластинаның ең үлкен өлшемі  $b = a_{ВП5} = 0,914$  м тең;

– қатынас:

$$\gamma = \frac{b}{a} = 1,83;$$

– параметр:

$$Q = \frac{q_{ed} \cdot a^4}{E \cdot t_c^4},$$

мұндағы  $q_{ed}$  – барлық жазықтығы бойынша біркелкі үйлестірілген жүктеменің есептік мағынасы.

$$q_{ed} = P_{Ed5}.$$

$$Q = \frac{q_{ed} \cdot a^4}{E \cdot t_b^4} = \frac{34,888 \times 10^{-3} \times (0,5)^4}{2,1 \times 10^5 \times (0,01)^4} = 1,038.$$

Түзу интерполяция көмегімен ҚР ҚН EN 1993-1-7 С.1 Кестесіне сәйкес есептік коэффициенттерін анықтаймыз:

$b/a$	$Q$	$k_{w1}$	$k_{\sigma bx1}$	$k_{\sigma by1}$	$k_{\sigma mx1}$	$k_{\sigma my1}$	$k_{\sigma mx2}$
1,5	1,038	0,0822429	0,464534	0,275911	0,024794	0,056745	-0,09988
	20	0,0685	0,3713	0,2156	0,0243	0,0694	-0,1244
	40	0,0546	0,277	0,1546	0,0238	0,0822	-0,1492
1,83	1,038	0,0978865	0,539804	0,266582	0,015351	0,060556	-0,10342
2,0	20	0,0921	0,4909	0,2166	0,0085	0,0801	-0,1346
	1,038	0,1086918	0,592536	0,262014	0,009069	0,06275	-0,10511
	40	0,0746	0,3837	0,1687	0,0079	0,0984	-0,1657

– шектік шарттарға сәйкес келетін,  $k_{w1} = 0,0979$ , пластина майысуын анықтайтын коэффициент;

–  $k_{\sigma bx1} = 0,5398$  шектік шарттарға сәйкес келетін,  $\square_{b,x}$  иілетін пластинаның кернеулерін анықтайтын коэффициент;

–  $k_{\sigma by1} = 0,2666$  шектік шарттарға сәйкес келетін,  $\square_{b,y}$  иілетін пластинаның кернеулерін анықтайтын коэффициент;

–  $k_{\sigma mx1} = 0,0154$  шектік шарттарға сәйкес келетін,  $\square_{m,x}$  мембраналы кернеулерін анықтайтын коэффициент;

–  $k_{\sigma my1} = 0,0606$  шектік шарттарға сәйкес келетін,  $\square_{m,y}$  мембраналы кернеулерін анықтайтын коэффициент;

Біркалыпты үйлестірілген жүктемелермен жүктелген  $w$  пластина сегментінің иілуін ҚР ҚН EN 1993-1-7 (C.1) Формуласы бойынша анықталады:

$$w = k_{w1} \cdot \frac{q_{ed} \cdot a^4}{E \cdot t_B^3} = 0,0979 \times \frac{34,888 \times 10^{-3} \times (0,5)^4}{2,1 \times 10^5 \times (0,01)^3} = 1,016 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Иілу моменттерімен алынған кернеулер ҚР ҚН EN 1993-1-7 (C.2) және (C.3) Формулалары бойынша есептелінеді:

$$\sigma_{bxEd} = k_{\sigma bx1} \cdot \frac{q_{ed} \cdot a^2}{t_B^2} = 0,5398 \cdot \frac{34,888 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,01)^2} = 47,08 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{byEd} = k_{\sigma by1} \cdot \frac{q_{ed} \cdot a^2}{t_B^2} = 0,2666 \cdot \frac{34,888 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,01)^2} = 23,25 \text{ МПа.}$$

Пластина сегментіндегі  $\sigma_{m,x}$  және  $\sigma_{m,y}$  мембраналы кернеулер ҚР ҚН EN 1993-1-7 (C.4) және (C.5) Формулалар бойынша анықталады:

$$\sigma_{mxEd} = k_{\sigma mx1} \cdot \frac{q_{ed} \cdot a^2}{t_B^2} = 0,0154 \cdot \frac{34,888 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,01)^2} = 1,343 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{myEd} = k_{\sigma my1} \cdot \frac{q_{ed} \cdot a^2}{t_B^2} = 0,0606 \cdot \frac{34,888 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,01)^2} = 5,286 \text{ МПа.}$$

Бункердің вертикальді қабырғаларға тірек күштер әсер еткенмен, мембраналы күштермен қамтамасыз ететін вертикальді кернеулерді басынан есептейміз:

$$\sigma_{myEd} = k_{\sigma my1} \cdot \frac{q_{ed} \cdot a^2}{t_B^2} + P_{t5} = 0,0606 \cdot \frac{34,888 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,010)^2} + 12,362 \times 10^{-3} = 5,298 \text{ МПа.}$$

ҚР ҚН EN 1993-1-7 (C.6) және (C.7) Формулаларға сәйкес иілген және мембраналы кернеулер анықталатын пластина жазықтығында жүктелген жалпы кернеулер:

$$\sigma_{xE} = -\sigma_{bxEd} + \sigma_{mxEd} = -47,08 + 1,343 = -45,737 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{yE} = -\sigma_{byEd} + \sigma_{myEd} = -23,25 + 5,298 = -17,952 \text{ МПа.}$$

ҚР ҚН EN 1993-1-7 (C.10) Формуласы бойынша анықталатын пластина үшін эквивалентті кернеулер:

$$\sigma_{eqEdp6} = \sqrt{\sigma_{xE d}^2 + \sigma_{yE d}^2 - \sigma_{xE d} \times \sigma_{yE d}} =$$

$$\sqrt{(-45,737)^2 + (-17,952)^2 - (-45,737) \times (-17,952)} = 39,913 \text{ МПа}$$

ҚР ҚН EN 1993-1-7 C.8 және C.9 Формуласы бойынша есептелінетін және иілу және мембраналы кернеулермен анықталатын жазықтықтағы жүксіз жалпы кернеулер:

$$\sigma_{xE d} = \sigma_{bxE d} + \sigma_{mxE d} = 47,08 + 1,343 = 48,423 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{yE d} = \sigma_{byE d} + \sigma_{myE d} = 23,25 + 5,298 = 28,548 \text{ МПа}.$$

ҚР ҚН EN 1993-1-7 (C.10) Формуласы бойынша анықталатын пластиналар үшін эквивалентті кернеулер:

$$\sigma_{eqEdp6} = \sqrt{\sigma_{xE d}^2 + \sigma_{yE d}^2 - \sigma_{xE d} \times \sigma_{yE d}} =$$

$$\sqrt{48,423^2 + 28,548^2 - 48,423 \times 28,548} = 42,159 \text{ МПа}$$

3.2.1.3 Шекті күй бойынша пластинаны тексеру

Салмақ түсіретін қабілеттілігінің шекті күйінің тексеруі.

ҚР ҚН EN 1993-1-7 6.2 Тармағына сәйкес серпінділік шегі бойынша тексеру орындалады.

$\sigma_{eqEd} = \max(\sigma_{eqEd}) = 42,159 \text{ МПа}$  созылған және сығылған зоналарда тандалынған кернеулерден есептік мағына ретінде максималды кернеуді қабылдаймыз.

Салмақ түсіретін қабілеттілігінің шекті күйі ҚН EN 1993-1-7 6.1 Формуласы бойынша тексеру:

$$\sigma_{eqEd} \leq \sigma_{eqRd} \quad \sigma_{eqEd} = 42,159 \text{ МПа} < \sigma_{eqRd} = 235 \text{ МПа}.$$

Шарт орындалады.

Шекті жағдай бойынша пайдалану жарамдылығының жағдайын тексеру.

ҚР ҚН EN 1993-4-1 9.8.2 Тармақ, (9.10) Формулаларының талаптарымен шекті болатын  $\delta_{max}$  шеттеріне қатысты панель кимасының максималді ауытқуы:

$$\delta_{max} = k_3 \cdot L = 0,05 \cdot 0,5 = 0,025 \text{ м},$$

мұндағы  $L$  – беттің қысқа жағының өлшемі;

$k_3$  – 0,05 ге тең коэффициент (ҰҚ.2.46 к СН РК EN 1993-4-1).

$$w_{тр} = \delta_{max}$$

ҚР ҚН EN 1993-1-7: 8.2 Тармағы бойынша тексеру орындалады

$$w = 1,016 \cdot 10^{-3} < w_{тр} = 0,025 \text{ м}.$$

Шарт орындалады.

3.3.2 Жазық қаттылық қырларды есептеу

3.3.2.1 Бункердің көршілес қабырғалары арасындағы учаскедегі жазық қаттылық қырлардың қималарын таңдау.

Қырдың қалыңдығы көлденең жатады.

Көлденең қатаң қырдың есебі қалыпты қысымнан иілу элементтерге дейін орындалады.

Қатаң горизонталь қырдың көлденең өлшемдерін алдын ала қабылдаймыз:

$$t_{ГР} = 16 \text{ мм}, b_{ГР} = 300 \text{ мм}.$$

Қатаң көлденең қырларға қалыпты үйлестірілген жүктеменің есебі:

$$P_{ГВ1} = \left( P_4 \cdot \frac{a_{ВП4}}{2} + P_5 \cdot \frac{a_{ВП5}}{2} \right) \times \cos \beta = \left( 33,248 \times \frac{0,914}{2} + 34,888 \times \frac{0,914}{2} \right) \times \cos \beta = 23,853 \frac{\text{кН}}{\text{м}},$$

$$P_{ГВ2} = \left( P_5 \cdot \frac{a_{ВП5}}{2} + P_6 \cdot \frac{a_{ВП6}}{2} \right) \times \cos \beta = \left( 34,888 \times \frac{0,914}{2} + 32,338 \times \frac{1,044}{2} \right) \times \cos \beta = 25,145 \frac{\text{кН}}{\text{м}},$$

$$P_{ГВ3} = P_6 \cdot \frac{a_{ВП6}}{2} \times \cos \beta = 32,338 \times \frac{1,044}{2} \times \cos \beta = 12,931 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

3.2.2 Шекті күйдің 1 тобы бойынша қырдың есебі

ГРВ1 қырдың ұзындығы

$$L = B - 2 \cdot (a_{П4} \cdot \sin \beta) = 5,0 - 2 \cdot (0,7 \cdot 0,6428) = 4,1 \text{ м.}$$

ГРВ2 қырдың ұзындығы

$$L = B - 2 \cdot ((a_{П4} + a_{П5}) \cdot \sin \beta) = 5,0 - 2 \cdot (1,4 \cdot 0,6428) = 3,2 \text{ м.}$$

ГРВ1 қимасының жинағын орындаймыз. Басқа шұңқының қабырғаларының көлденең қырлары үшін сондай қима қабылдаймыз.

ҚР ҚН ЕН 1993-1-1 (6.12) Формуласы бойынша қалыпты жүктеме әрекетінен иілу элементтеріндей орындалатын қырдың есебі:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cRd}} \leq 1.$$

Қырдағы иілу моментін есептеу:

$$M_{Ed} = \frac{P_{ГВ1} \cdot L^2}{8} = \frac{23,853 \cdot 4,1^2}{8} = 50,121 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Вертикальді қабырғалардың көлденең қыры үшін  $M_{cRd}$  мағынасына сәйкес келетін тең деп қабылданатын басты осьтерден тұратын салмақ түсетін қабілетілігі бар иілудің есептік мағынасы. Тексеруді орындаймыз:

Вертикальді қабырғалардың көлденең қыры үшін  $M_{cRd}$  мағынасына сәйкес келетін тең деп қабылданатын басты осьтерден тұратын салмақ түсетін қабілетілігі бар иілудің есептік мағынасы.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cRd}} = \frac{50,121}{55,020} = 0,911 < 1.$$

Шарт орындалады.

қатаң горизонтальді қырлардың көлденең өлшемдердің қабылдаймыз:

$$t_{ГР} = 16 \text{ мм}, b_{ГР} = 300 \text{ мм.}$$

3.3.3 Бункер шұңғымасы қабырғасының тік қырларын есептеу

Тік қырларға қысымнан қалыпты қысым, сонымен қатар сусымалы материалдардың тік жанама үйкеліс күштері әрекет етеді. 1993-1-1 ҚР ҚН ЕН-нің 6.3.3 Тармағының ережелеріне сәйкес қысылған-иілген (ортадан тыс-қысылған) элементі сияқты қырдың есебін орындаймыз.

Қырларға қалыпты жүктемені есептеу

$$\begin{aligned} P_{nРВВ} &= (P_4 \times a_{П4} + P_5 \times a_{П5} + P_6 \times a_{П6}) \times \frac{1}{H_B} \times b_{П} = \\ &= (33,248 \times 0,7 + 34,888 \times 0,7 + 32,338 \times 0,8) \times \frac{1}{2,2} \times 0,5 = 16,719 \frac{\text{кН}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Қырға жанама үйлестірілген жүктердің есебі:

$$\begin{aligned} P_{tРВВ} &= (P_{t4} \times a_{ВП4} + P_{t5} \times a_{ВП5} + P_{t6} \times a_{ВП6}) \times \frac{1}{H_B \times \frac{1}{\cos \alpha}} \times b_{П} = \\ &= (11,78 \times 0,914 + 12,362 \times 0,914 + 11,458 \times 1,044) \times \frac{1}{2,2 \times \frac{1}{\cos 40^\circ}} \times 0,5 = 5,924 \frac{\text{кН}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Қырдағы бойлық осьті күш:

$$N_{Ed} = \frac{1}{2} \times L_p \cdot P_{tРВВ} = \frac{1}{2} \times 2,2 \times \frac{1}{\cos 40^\circ} \times 5,924 = 8,506 \text{ кН.}$$

Қырдың қзындығы  $L_p = H_{св} = 2,2 / \cos 40^\circ = 2,872 \text{ м.}$

Иілу момент:

$$M_{yEd} = \frac{P_{nРВВ} \cdot L_p^2}{8} = \frac{16,719 \cdot (2,872)^2}{8} = 17,238 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Екіталай ұзындық:

— жазықтығына  $L_{cr,y} = 2,872 \text{ м;}$

— жазықтығынан  $L_{cr,z} = 1,044$  м.

Қырдың вертикальді қимасын тексереміз  $b_{bp} = 200$  мм;  $t_{bp} = 16$  мм.

$$A_i = A_{bp} = t_{bp} \cdot b_{bp} = 16 \cdot 200 = 3200,$$

$$W_i = W_{bp} = \frac{t_{bp} \cdot b_{bp}^2}{6} = \frac{16 \cdot 200^2}{6} = 106,67 \cdot 10^3 \text{ мм}^3,$$

$$I_y = \frac{t_{bp} \cdot b_{bp}^3}{12} = \frac{16 \cdot 200^3}{12} = 10667 \cdot 10^3 \text{ мм}^4,$$

$$I_z = \frac{b_{bp} \cdot h_{bp}^3}{12} = \frac{200 \cdot 16^3}{12} = 68,267 \cdot 10^3 \text{ мм}^4,$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{10667 \cdot 10^3}{3200}} = 57,736 \text{ мм},$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{68,267 \cdot 10^3}{3200}} = 4,619 \text{ мм},$$

$$I_T = \alpha \cdot t_{bp}^4$$

$b_{bp}/h_{bp}$	1,5	2	3	6	10	12,5
$\alpha$	0,294	0,459	0,79	1,789	3,123	3,957

Біздің жағдайда  $b_{bp}/h_{bp} = 200/16 = 12,5$ , интерполяция бойынша  $\alpha=3,957$ :

$$I_T = \alpha \cdot t_{bp}^4 = 3,957 \cdot 16^4 = 259326 \text{ мм}^4,$$

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 = 57,736^2 + 4,619^2 = 3354,78 \text{ мм}^2.$$

Сығу және иілу үшін салмақ түсетін қабілеттілігінің нормативті мағынасы:

$$N_{Rk} = f_y \cdot A_i = 235 \cdot 3200 = 0,752 \cdot 10^3 \text{ кН},$$

$$M_{yRk} = f_y \cdot W_i = 235 \cdot 106,67 \cdot 10^3 = 25,067 \cdot 10^3 \text{ кНмм}.$$

Жазықтық формадағы тұрақтылық шығынның екіталай күші:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10667 \cdot 10^3}{2872^2} = 2678 \text{ кН},$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 EI_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 68,267 \cdot 10^3}{1044^2} = 129,685 \text{ кН}.$$

Айналмалы форма бойынша серпінді кезеңдегі тұрақтылықтың екіталай күші:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot GI_T = \frac{1}{3354,78} \cdot 81 \cdot 259326 = 6261,336 \text{ кН}.$$

$\chi_y$  тұрақтылық шығынның жазықтық формадағы түсіретін коэффициенттің еспетейміз.

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2872}{57,736} \cdot \frac{1}{93,86} = 0,53,$$

$$\Phi_y = 0,5 \cdot \left( 1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right) = 0,5 \cdot (1 + 0,21 \cdot (0,53 - 0,2) + 0,53^2) = 0,675.$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,675 + \sqrt{0,675^2 - 0,53^2}} = 0,915,$$



$$\mu_y = \frac{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}{1 - \chi_y \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)} = \frac{1 - \frac{8,506}{2678}}{1 - 0,915 \cdot \frac{8,506}{2678}} = 0,9997.$$

$\chi_z$  тұрақтылық шығынның жазықтық формадағы түсіретін коэффициентін еспетейміз

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1044}{4,619} \cdot \frac{1}{93,86} = 2,408,$$

$$\Phi_z = 0,5 \cdot \left(1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2\right) = 0,5 \cdot (1 + 0,34 \cdot (2,408 - 0,2) + 2,408^2) = 3,774,$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{3,774 + \sqrt{3,774^2 - 2,408^2}} = 0,1497,$$

$$\mu_z = \frac{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}{1 - \chi_z \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} = \frac{1 - \frac{8,506}{129,685}}{1 - 0,1497 \cdot \frac{8,506}{129,685}} = 0,944.$$

Түсіретін коэффициент  $\chi_{LT}$ :

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}.$$

$M_{cr}$  серпінді кезеңдегі жазықтық формадағы тұрақтылық шығынның екіталай моменті

$$C_1 = k_c^{-2} = 0,94^{-2} = 1,132,$$

$$M_{cr} = 1,132 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 68,267 \cdot 10^3}{1044^2} \cdot \sqrt{0 + \frac{1044^2 \cdot 81 \cdot 259326}{\pi^2 \cdot 210 \cdot 68,267 \cdot 10^3}} = 59,082 \cdot 10^3 \text{ кНм},$$

аламыз:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{106,67 \cdot 10^3 \cdot 235}{59,082 \cdot 10^6}} = 0,651,$$

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + 0,76 \cdot (0,651 - 0,2) + 0,651^2] = 0,883,$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,883 + \sqrt{0,883^2 - 0,651^2}} = 0,676.$$

Шарт  $\chi_{LT} = 0,676 < 1,0$  және  $\chi_{LT} = 0,676 \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{0,651^2} = 2,36$ , қабылдаймыз  $\chi_{LT} = 0,676$ .

A1 Кестесі бойынша 1,2 және 3 классты қималар үшін:

- салыстырмалы эксцентриситет

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \cdot \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{17238}{8,506} \cdot \frac{3200}{106,67 \cdot 10^3} = 60,795,$$

- жетілмегендікті есептейтін коэффициент

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} = 1 - \frac{259326}{10667 \cdot 10^3} = 0,976 > 0,$$

$$C_{m,y,0} = 1 + 0,03 \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 1 + 0,03 \cdot \frac{8,506}{2678} = 1,000095 \approx 1,$$

$$C_{m,y} = C_{m,y,0} + (1 - C_{m,y,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}} = 1,$$

$$C_{m,LT} = C_{m,y}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 1 \cdot \frac{0,976}{\sqrt{\left(1 - \frac{8,506}{129,685}\right) \cdot \left(1 - \frac{8,506}{6261,336}\right)}} = 1,046 > 1,$$

кабылдаймыз  $C_{m,LT} = 1,046$ .

Аламыз:

$$k_{yy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1 \cdot 1,046 \cdot \frac{0,9997}{1 - \frac{8,506}{2678}} = 1,049,$$

$$k_{zy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1 \cdot 1,046 \cdot \frac{0,944}{1 - \frac{8,506}{2678}} = 0,991.$$

Сығу-иілу элементтер үшін тұрақтылық шарты:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{8,506}{0,915 \cdot 752} + 1,049 \cdot \frac{17238}{0,676 \cdot \frac{25067}{1,0}} = 1,079 > 1,0;$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{8,506}{0,1497 \cdot 752} + 0,991 \cdot \frac{17238}{0,676 \cdot \frac{25067}{1,0}} = 1,084 > 1,0.$$

Шарт орындалмайды.

Ветикальді қырдың қимасын тексереміз  $b_{bp} = 220$  мм;  $t_{bp} = 16$  мм.

$$A_i = A_{bp} = t_{bp} \cdot b_{bp} = 16 \cdot 220 = 3520,$$

$$W_i = W_{bp} = \frac{t_{bp} \cdot b_{bp}^2}{6} = \frac{16 \cdot 220^2}{6} = 129,067 \cdot 10^3 \text{ мм}^3,$$

$$I_y = \frac{t_{bp} \cdot b_{bp}^3}{12} = \frac{16 \cdot 220^3}{12} = 14197 \cdot 10^3 \text{ мм}^4,$$

$$I_z = \frac{b_{bp} \cdot h_{bp}^3}{12} = \frac{220 \cdot 16^3}{12} = 75,093 \cdot 10^3 \text{ мм}^4,$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{14197 \cdot 10^3}{3520}} = 63,508 \text{ мм},$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{75,093 \cdot 10^3}{3520}} = 4,619 \text{ мм},$$

$$I_T = \alpha \cdot t_{bp}^4$$

$b_{bp}/h_{bp}$	1,5	2	3	6	10	13,75
$\alpha$	0,294	0,459	0,79	1,789	3,123	4,374

Біздің жағдайда  $b_{bp}/h_{bp} = 220/16 = 13,75$ , интерполяция бойынша  $\alpha=4,374$ :

$$I_T = \alpha \cdot t_{bp}^4 = 4,374 \cdot 16^4 = 286654 \text{ мм}^4,$$

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 = 63,508^2 + 4,619^2 = 4054,601 \text{ мм}^2.$$

Свғу және иілі кезінде салмақ түсіретін қабілеттілігінің нормативті мағынасы:

$$N_{Rk} = f_y \cdot A_i = 235 \cdot 3520 = 0,827 \cdot 10^3 \text{ кН},$$

$$M_{yRk} = f_y \cdot W_i = 235 \cdot 129,067 \cdot 10^3 = 30,331 \cdot 10^3 \text{ кНмм}.$$

Тұрақтылық шығынның жазықтық формадағы екіталай күші:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 14197 \cdot 10^3}{2872^2} = 3564 \text{ кН},$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 EI_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 75,093 \cdot 10^3}{1044^2} = 142,652 \text{ кН}.$$

Айналмалы форма бойынша серпінді кезеңдегі тұрақтылықтың екіталай күші:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot GI_T = \frac{1}{4054,601} \cdot 81 \cdot 286654 = 5726,574 \text{ кН}.$$

$\chi_y$  тұрақтылық шығынның жазықтық формадағы түсіретін коэффициенттің еспетейміз.

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2872}{63,508} \cdot \frac{1}{93,86} = 0,482,$$

$$\Phi_y = 0,5 \cdot (1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,21 \cdot (0,482 - 0,2) + 0,482^2) = 0,646.$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,646 + \sqrt{0,646^2 - 0,482^2}} = 0,929,$$

$$\mu_y = \frac{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}{1 - \chi_y \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)} = \frac{1 - \frac{8,506}{3564}}{1 - 0,929 \cdot \frac{8,506}{3564}} = 0,9998.$$

$\chi_z$  тұрақтылық шығынның жазықтық формадағы түсіретін коэффициенттің еспетейміз.

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1044}{4,619} \cdot \frac{1}{93,86} = 2,408,$$

$$\Phi_z = 0,5 \cdot (1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,34 \cdot (2,408 - 0,2) + 2,408^2) = 3,774,$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{3,774 + \sqrt{3,774^2 - 2,408^2}} = 0,1497,$$

$$\mu_z = \frac{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}{1 - \chi_z \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} = \frac{1 - \frac{8,506}{142,652}}{1 - 0,1497 \cdot \frac{8,506}{142,652}} = 0,949.$$

Түсіретін коэффициент  $\chi_{LT}$ :

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}.$$

$M_{cr}$  серпінді кезеңдегі жазықтық формадағы тұрақтылық шығынның екіталай моменті:

$$C_1 = k_c^{-2} = 0,94^{-2} = 1,132,$$

$$M_{cr} = 1,132 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 75,093 \cdot 10^3}{1044^2} \cdot \sqrt{0 + \frac{1044^2 \cdot 81 \cdot 286654}{\pi^2 \cdot 210 \cdot 75,093 \cdot 10^3}} = 65,149 \cdot 10^3 \text{ кНмм},$$

аламыз:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{129,067 \cdot 10^3 \cdot 235}{65,149 \cdot 10^6}} = 0,682,$$

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + 0,76 \cdot (0,682 - 0,2) + 0,682^2] = 0,916,$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,916 + \sqrt{0,916^2 - 0,682^2}} = 0,655.$$

Шарт  $\chi_{LT} = 0,655 < 1,0$  және  $\chi_{LT} = 0,655 \leq \frac{1}{\lambda_{LT}^2} = \frac{1}{0,682^2} = 2,15$ , қабылдаймыз  $\chi_{LT} = 0,655$ .

A1 Кестесі бойынша 1,2 және 3 классты қималар үшін:

- салыстырмалы эксцентриситет

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \cdot \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{17238}{8,506} \cdot \frac{3520}{129,067 \cdot 10^3} = 55,27,$$

- жетілмегендікті есептейтін коэффициент

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} = 1 - \frac{286654}{14197 \cdot 10^3} = 0,9798 > 0,$$

$$C_{m,y,0} = 1 + 0,03 \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 1 + 0,03 \cdot \frac{8,506}{3564} = 1,000072 \approx 1,$$

$$C_{m,y} = C_{m,y,0} + (1 - C_{m,y,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}} = 1,$$

$$C_{m,LT} = C_{m,y}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 1 \cdot \frac{0,9798}{\sqrt{\left(1 - \frac{8,506}{142,652}\right) \cdot \left(1 - \frac{8,506}{5726,574}\right)}} = 1,011 > 1,$$

қабылдаймыз  $C_{m,LT} = 1,011$ .

аламыз:

$$k_{yy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1 \cdot 1,011 \cdot \frac{0,9998}{1 - \frac{8,506}{3564}} = 1,0132,$$

$$k_{zy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1 \cdot 1,011 \cdot \frac{0,949}{1 - \frac{8,506}{3564}} = 0,962.$$

Сығу-иілу элементтер үшін тұрақтылық шарт:

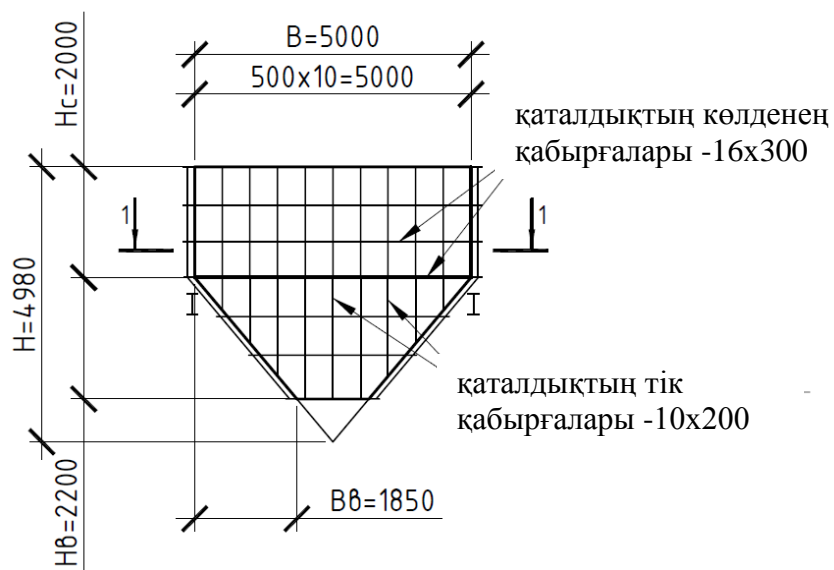
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{8,506}{0,929 \cdot 827} + 1,0132 \cdot \frac{17238}{0,655 \cdot \frac{30313}{1,0}} = 0,891 < 1,0;$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{8,506}{0,1497 \cdot 827} + 0,962 \cdot \frac{17238}{0,655 \cdot \frac{30313}{1,0}} = 0,904 < 1,0.$$

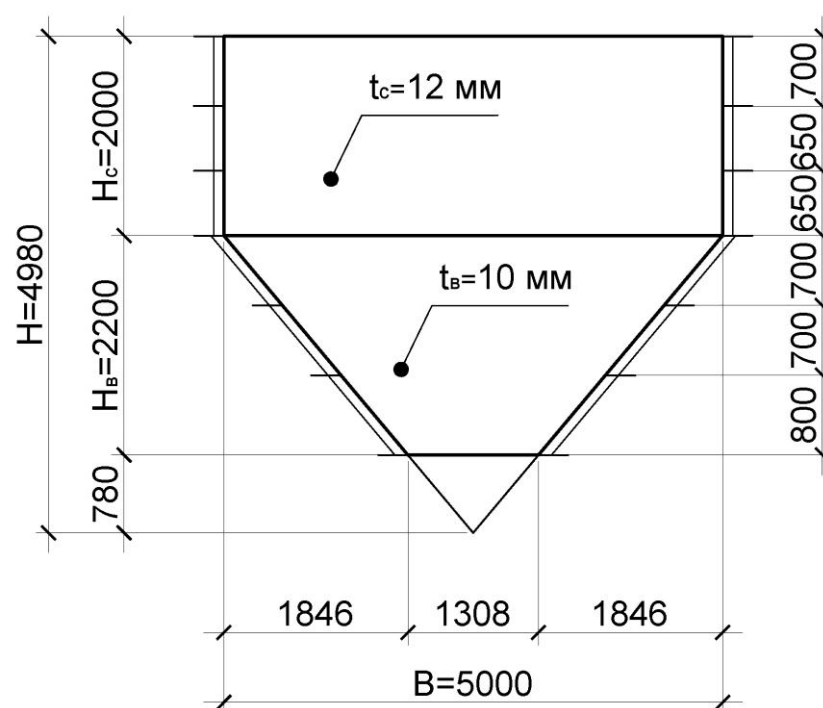
Шарт орындалады.

$t_{Br} = 16$  мм,  $b_{Br} = 220$  мм қимасымен бункердің қатаң қабырғаларының вертикальді қырын қабылдаймыз.

5 және 6 Суреттерде бункер конструкцияларының соңғы параметрлері келтірілген.



5 Сурет– Бункер конструкцияларының тұжырымды параметрлер



6 Сурет– Бункер конструкцияларының тұжырымды параметрлер

**УДК 624.014.24**

**МКС 91.010**

---

**Негізгі сөздер:** болат бункер, қабық, табақ, конус, цилиндр, бүйірлік тегіс қабырғалар, кертікті түйін, соққылы тұтқырлық, беріктік, тұрақтылық.

---

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	V
1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ .....	1
1.1 Область применения .....	1
1.2 Нормативные ссылки .....	2
1.3 Исходные положения .....	3
1.4 Различие между принципами и правилами применения .....	3
1.5 Термины и определения.....	3
1.6 Условные обозначения.....	7
1.6.1 Прописные буквы латинского алфавита .....	7
1.6.2 Строчные буквы латинского алфавита.....	8
1.6.3 Буквы греческого алфавита .....	9
1.6.4 Подстрочные индексы .....	10
1.7 Правила знаков .....	11
1.7.1 Глобальная система координат для цилиндрического бункера .....	11
1.7.2 Глобальная система координат для прямоугольного бункера.....	12
1.7.3 Локальные системы координат для конструктивных элементов в цилиндрических и прямоугольных бункерах .....	13
1.7.4 Правила для равнодействующих напряжений в цилиндрических и прямоугольных бункерах .....	15
1.8 Единицы измерения.....	18
2 ОСНОВЫ РАСЧЕТА .....	19
2.1 Основные требования .....	19
2.2 Классификация бункеров по надежности .....	19
2.3 Предельные состояния .....	20
2.4 Технологические и климатические воздействия .....	20
2.4.1 Общие положения .....	20
2.4.2 Ветровые нагрузки .....	21
2.4.3 Комбинации давления сыпучих материалов с другими воздействиями.....	21
2.5 Свойства материала.....	21
2.6 Геометрические характеристики.....	21
2.7 Моделирование бункера для определения эффекта воздействий .....	22
2.8 Расчет на основании испытаний .....	22
2.9 Эффекты воздействий для проверок предельных состояний.....	22
2.9.1 Общие положения .....	22
2.9.2 Частные коэффициенты для критических предельных состояний.....	22
2.9.3 Предельные состояния по эксплуатационной пригодности .....	23
2.10 Долговечность.....	23
2.11 Огнестойкость.....	23
3 СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ .....	24
3.1 Общие положения .....	24
3.2 Конструкционные стали .....	24
3.3 Нержавеющие стали .....	24

3.4 Специальные легированные стали .....	25
3.5 Требования по ударной вязкости.....	25
4 ОСНОВЫ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ .....	26
4.1 Критические предельные состояния .....	26
4.1.1 Основные положения .....	26
4.1.2 Условие проверки предельных состояний .....	26
4.1.3 Выносливость и малоцикловая усталость .....	26
4.1.4 Допуски на коррозионный и абразивный износ .....	26
4.1.5 Учет температурных воздействий.....	27
4.2 Расчет оболочки бункера.....	27
4.2.1 Моделирование конструкции оболочки .....	27
4.2.2 Методы расчета.....	27
4.2.3 Геометрические несовершенства .....	30
4.3 Расчет коробчатых конструкций прямоугольного бункера.....	31
4.3.1 Моделирование конструкции короба.....	31
4.3.2 Геометрические несовершенства .....	31
4.3.3 Методы расчета.....	31
4.4 Эквивалентные ортотропные свойства обшивки из гофрированного листа.....	32
5 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТЕНОК ЦИЛИНДРА .....	35
5.1 Основы проектирования .....	35
5.1.1 Общие положения .....	35
5.1.2 Проектирование стенки бункера .....	35
5.2 Различия между формами цилиндрических оболочек .....	36
5.3 Несущая способность стенок цилиндрических бункера .....	37
5.3.1 Общие положения .....	37
5.3.2 Изотропные стенки на сварных или болтовых соединениях.....	37
5.3.3 Изотропные стенки с вертикальными ребрами жесткости .....	49
5.3.4 Горизонтально гофрированные стенки.....	51
5.3.5 Вертикально гофрированные стенки с кольцевыми ребрами жесткости.....	60
ПРИМЕР 1 Расчет изотропной стенки бункера .....	61
5.4 Специальные требования к опиранию цилиндрических стенок .....	86
5.4.1 Оболочки с днищем, полностью опертым или установленным на балочную клетку .....	86
5.4.2 Оболочка с опиранием на юбку.....	86
5.4.3 Опирание цилиндрической стенки на примыкающие колонны.....	87
5.4.4 Цилиндрическая оболочка на отдельных опорах .....	87
5.4.5 Бункер с опиранием на колонны, расположенные под воронкой .....	88
5.4.6 Элементы локальных опор и ребра для передачи усилий на цилиндрические стенки.....	89
5.4.7 Анкерное крепление базы бункера.....	90
ПРИМЕР 2 Расчет опорных конструкций бункера (юбки).....	91
5.5 Конструктивные решения отверстий в цилиндрических стенках.....	99
5.5.1 Общие положения .....	99
5.5.2 Прямоугольные отверстия.....	99
5.6 Предельные состояния по эксплуатационной пригодности .....	100
5.6.1 Основные положения.....	100



5.6.2 Отклонения .....	101
6 ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНИЧЕСКИХ ВОРОНОК .....	102
6.1 Основы расчета .....	102
6.1.1 Общие положения .....	102
6.1.2 Проектирование стенок воронки .....	102
6.2 Различия между формами оболочек воронки .....	102
6.3 Несущая способность конических воронок .....	103
6.3.1 Общие положения .....	103
6.3.2 Воронки с изотропной стенкой без ребер жесткости на сварных или болтовых соединениях .....	103
ПРИМЕР 3 Расчет конической воронки бункера .....	108
6.4 Специальные конструкции бункеров .....	114
6.4.1 Опорные конструкции .....	114
6.4.2 Воронка на колоннах .....	114
6.4.3 Несимметричная воронка .....	114
6.4.4 Стенка воронки с ребрами жесткости .....	114
6.4.5 Конус, состоящий из сегментов .....	115
6.5 Предельные состояния эксплуатационной пригодности .....	115
6.5.1 Основные положения .....	115
6.5.2[6.5.2(1)] Вибрация .....	116
7 ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ КРУГЛОЙ КОНИЧЕСКОЙ КРЫШИ .....	117
7.1 Основные положения .....	117
7.2 Различия между конструктивными формами крыши .....	117
7.2.1 Терминология .....	117
7.3 Несущая способность круглых конических крыш бункера .....	117
7.3.1 Крыши-оболочки .....	117
7.3.2 Каркасные крыши .....	118
7.3.3 Карнизный узел .....	118
8 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И КОЛЬЦЕВЫХ БАЛОК .....	119
8.1 Основные положения .....	119
8.1.1 Общие положения .....	119
8.1.2 Проектирование кольцевого ребра .....	119
8.1.3 Терминология .....	120
8.1.4 Моделирование соединения .....	121
8.1.5 Ограничения на расположение кольца .....	121
8.2 Расчет соединения .....	121
8.3 Несущая способность .....	122
8.4 Проверки по предельным состояниям .....	122
ПРИМЕР 4 Расчет кольцевой балки .....	122
9 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ БУНКЕРОВ С ПЛОСКИМИ БОКОВЫМИ СТЕНКАМИ .....	136
9.1 Основные положения .....	136
9.2 Классификация конструктивных форм .....	136
9.2.1 Неподкрепленные бункеры .....	136

9.2.2 Бункеры с ребрами жесткости .....	136
9.2.3 Бункеры с затяжками .....	137
9.3 Несущая способность неподкрепленных вертикальных стенок.....	137
9.4 Несущая способность стенок бункера из гофрированных листов с ребрами жесткости.....	137
9.5 Бункеры с внутренними затяжками.....	137
9.6 Несущая способность пирамидальных воронок .....	137
9.7 Вертикальные ребра жесткости на стенках короба .....	137
9.8 Предельные состояния эксплуатационной пригодности .....	138
9.8.1 Основные положения.....	138
9.8.2 Отклонения .....	138
ПРИМЕР 5 Расчет прямоугольного бункера с плоскими стенками.....	138

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящее нормативно-техническое пособие подготовлено ТОО «Астана Строй-Консалтинг» по договору с акционерным обществом «Казахский научно-исследовательский и проектный институт строительства и архитектуры» (АО «КазНИИСА»).

Настоящее нормативно-техническое пособие составлено в развитие положений СН РК EN 1993-4-1 «Проектирование стальных конструкций - Часть 4-1: Бункеры» предназначено для проектирования стальных бункеров круглой или прямоугольной формы в плане.

Настоящее нормативно-техническое пособие является частью группы нормативно-технических пособий к строительным нормам Республики Казахстан СН РК EN 1993, идентичных Еврокоду 3.

Группа нормативно-технических пособий к СН РК EN 1993 – это перечень нормативно-технических документов, в которых приведены: рекомендации к расчету и к конструированию стальных конструкций согласно Принципам и Правилам проектирования СН РК EN 1993; разъяснения нормативной ссылочной информации; численные примеры расчета; дополнительная справочная информация.

Положения нормативно-технических пособий к СН РК EN 1993 охватывают только требования по несущей способности, эксплуатационной пригодности, долговечности и огнестойкости стальных конструкций. Другие требования не отражены в нормативно-технических пособиях к СН РК EN 1993.

Нормативно-технические пособия к СН РК EN 1993 следует использовать совместно со следующими нормативно-техническими документами:

- НТП к СН РК EN 1990;
- НТП к СН РК EN 1991;
- НТП к СН РК EN 1992 - СН РК EN 1999, в тех частях, которые непосредственно затрагивают расчет стальных конструкций или их элементов;
- стандарты EN, ETAG, ETA и другие соответствующие стандарты на строительные изделия, относящиеся к стальным конструкциям.

Основополагающими документами при разработке нормативно-технических пособий к СН РК EN 1993, помимо самих 20 частей СН РК EN 1993 «Проектирование стальных конструкций», являются СН РК EN 1990, СН РК EN 1991 и EN 1090.

Группа нормативно-технических пособий к СН РК EN 1993 состоит из 19 пособий:

- нормативно-технические пособия к СН РК EN 1993-1 (12 пособий);
- нормативно-техническое пособие к СН РК EN 1993-2 (1 пособие);
- нормативно-техническое пособие к СН РК EN 1993-3 (1 пособие);
- нормативно-технические пособия к СН РК EN 1993-4 (3 пособия);
- нормативно-техническое пособие к СН РК EN 1993-5 (1 пособие);
- нормативно-техническое пособие к СН РК EN 1993-6 (1 пособие).

В нормативно-технических пособиях к СН РК EN 1993-1 приведены указания по проектированию стальных конструкций, которые распространяются на части СН РК EN 1993, имеющие отношение к специальным стальным зданиям и сооружениям:

- СН РК EN 1993-2;

## НТП РК 03-04-1.1-2012

- СН РК EN 1993-3;
- СН РК EN 1993-4;
- СН РК EN 1993-5;
- СН РК EN 1993-6.

В настоящем нормативно-техническом пособии к СН РК EN 1993-4-1 приведены:

- Принципы и Правила проектирования стальных бункеров круглой или прямоугольной формы в плане, содержащиеся в СН РК EN 1993-4-1;
- положения, развивающие Принципы и Правила проектирования, приведенные в СН РК EN 1993-4-1;
- рекомендации, дополняющие Принципы и Правила проектирования, приведенные в СН РК EN 1993-4-1;
- численные примеры расчета, иллюстрирующие применение положений СН РК EN 1993-1-12 в практике проектирования.

При разработке настоящего нормативно-технического пособия, помимо положений СН РК EN 1993-4-1, учтены:

- положения Национального Приложения к СН РК EN 1993-4-1;
- соответствующие положения СН РК EN 1990;
- соответствующие положения СН РК EN 1991.

Настоящее нормативно-техническое пособие состоит из 12 разделов. Разделы с 1 по 12 настоящего нормативно-технического пособия повторяют структуру норматива СН РК EN 1993-4-1. В настоящем нормативно-техническом пособии номера пунктов СН РК EN 1993-4-1 приведены в скобках.

Настоящее нормативно-техническое пособие предназначено для инженерно-технических работников проектных организаций, научных работников, заказчиков проектной продукции, преподавателей и студентов высших учебных заведений.

Настоящее нормативно-техническое пособие вводится в действие для применения на добровольной основе в качестве нормативного документа Республики Казахстан.

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ НОРМАТИВТІК–ТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРАЛЫ**  
**НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ РЕСПУБЛИКИ КАЗАКСТАН**  
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ЧАСТЬ.**  
**СТАЛЬНЫЕ БУНКЕРЫ**

---

**DESIGN OF STEEL STRUCTURES**  
**PART. STEEL SILOS**

---

Дата введения - 2015-07-01

**1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

**1.1 Область применения**

1.1.1 СН РК EN 1993-4-1 устанавливает принципы и правила проектирования стальных бункеров круглой или прямоугольной формы в плане, которые могут устанавливаться:

- в здании и опираться на конструкции здания;
- отдельно и опираться на колонны или иметь непрерывное опирание.

Данное нормативно-техническое пособие к СН РК EN 1993-4-1 (далее пособие) содержит материалы, разъясняющие и конкретизирующие нормы и правила проектирования стенок, воронок, кольцевых опорных балок цилиндрических и призматических бункеров со стенками из плоских и гофрированных листов.

1.1.2 В СН РК EN 1993-4-1 изложены только требования к прочности и устойчивости стальных бункеров. Требования к эксплуатационной безопасности, выполнению функционального назначения, изготовлению, монтажу, контролю качества изложены в соответствующих нормах СН РК EN. Принципы и правила проектирования отдельных элементов бункеров, таких как люки для доступа внутрь, фланцы, загрузочные устройства, питатели, выпускные устройства и т. п., следует принимать согласно соответствующим нормам.

1.1.3 Особые требования по проектированию в условиях сейсмических воздействий устанавливаются СН РК EN 1998 «Положения по проектированию сейсмостойких конструкций», который дополняет или адаптирует положения норм СН РК EN 1993.

1.1.4 Правила расчета и проектирования стальных опорных конструкций для бункеров изложены в СН РК EN 1993-1-1. При этом к опорным конструкциям относятся все конструктивные элементы, расположенные ниже нижнего опорного кольца или опорной балки бункера и выше фундамента; см. Рисунки 1.1 и 1.2. Металлические опорные конструкции могут быть выполнены в виде непрерывной оболочки или отдельных (дискретных) опор.

1.1.5 Принципы и правила проектирования железобетонных конструкций фундаментов для стальных бункеров изложены в СН РК EN 1992 и СН РК EN 1997.

1.1.6 Значения специфических нагрузок и воздействий на стальные бункеры от хранимых сыпучих материалов должны приниматься согласно СН РК EN 1991-4 «Воздействие на бункеры и резервуары».

1.1.7 В СН РК EN 1993-4-1 не рассматриваются вопросы огнестойкости конструкций, бункеры с внутренними отсеками и внутренними конструкциями; бункеры емкостью менее 100 кН (10 т); случаи, когда необходимы особые мероприятия для предупреждения последствий аварий.

1.1.8 СН РК EN 1993-4-1 применяется для бункеров круглой формы в плане, осесимметричной геометрической формы. На такие бункеры симметричной формы могут действовать несимметричные нагрузки, а также опоры бункера могут вызвать в конструкциях силы, которые не являются осесимметричными.

## **1.2 Нормативные ссылки**

СН РК EN 1993-4-1 включает, наряду со ссылками на дату или без них, положения, заимствованные из других стандартов. Эти нормативные ссылки цитируются в соответствующих местах в тексте на указанные ниже издания стандартов.

Если ссылка датирована, то последующие изменения или измененная редакция издания применимы к только в том случае, если они включены в СН РК EN 1993-4-1 путем внесения поправок или дополнений. Ссылки, которые не имеют даты, относятся к последней редакции опубликованного издания.

СН РК EN 1090 Проектирование стальных конструкций;

СН РК EN 1990 Еврокод: Основы строительного проектирования;

СН РК EN 1991 Еврокод 1: Воздействия на конструкции;

Часть 1–1 Воздействия на конструкции. Нагрузки на здания: концентрированные, вызванные собственной массой и временные нагрузки;

Часть 1–2 Воздействия на конструкции. Воздействия на конструкции незащищенные от огня;

Часть 1–3 Воздействия на конструкции. Снеговые нагрузки;

Часть 1–4 Воздействия на конструкции. Ветровые нагрузки;

Часть 1–5 Воздействия на конструкции. Температурные нагрузки;

Часть 1–6 Воздействия на конструкции. Конструкционные нагрузки;

Часть 1–7 Воздействия на конструкции. Случайные воздействия;

Часть 4 Воздействия на бункеры и резервуары;

СН РК EN 1993 Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций;

Часть 1–1 Общие правила и правила для зданий;

Часть 1–3 Тонкостенные холодногнутые элементы и листы;

Часть 1–4 Нержавеющие стали;

Часть 1–6 Прочность и устойчивость оболочечных конструкций;

Часть 1–7 Планарные конструкции из сварных листов с поперечной нагрузкой;

Часть 1–8 Проектирование соединений;

Часть 1–9 Усталостная прочность стальных конструкций;

Часть 1–10 Выбор стали с учетом ударной вязкости и свойств в направлении толщины проката;

Часть 4.2 Резервуары;

СН РК EN 1997 Еврокод 7: Геотехническое проектирование;

СН РК EN 1998 Еврокод 8: Положения по проектированию сейсмостойких конструкций;

Часть 4 Бункеры, резервуары и трубопроводы;

СН РК EN 10025 Изделия горячекатаные из нелегированной конструкционной стали– условия промышленной поставки;

СН РК EN 10149 Плоские изделия горячей прокатки из сталей с высоким пределом текучести для холодной формовки;

ISO 1000 Единицы СИ;

ISO 3898 Основы проектирования конструкций. Условные обозначения. Общие символы;

ISO 4997 Конструкционные стальные листы, обжаты в холодном состоянии;

ISO 8930 Общие принципы надежности конструкций. Список эквивалентных терминов.

### 1.3 Исходные положения

В дополнение к исходным положениям СН РК EN 1990 необходимо, чтобы изготовление и монтаж бункеров выполнялись в соответствии с СН РК EN 1090-2.

### 1.4 Различие между принципами и правилами применения

См. Пункт 1.4 СН РК EN 1990.

### 1.5 Термины и определения

Термины, которые приводятся в Пункте 1.5 СН РК EN 1990 для общего применения в нормах СН РК EN на проектирование строительных конструкций, и определения из ISO 8930 применяются в настоящем пособии к СН РК EN 1993-4-1, если не оговорено другое. В СН РК EN 1993-4-1 для расчета и проектирования бункеров вводятся следующие дополнительные термины:

1.5.1 **Оболочка:** Конструкция, образованная из изогнутого тонкого листа.

1.5.2 **Осесимметричная оболочка:** Оболочка, поверхность которой образуется посредством вращения меридиональной образующей вокруг центральной оси.

1.5.3 **Короб:** Короб представляет собой замкнутую призматическую вертикальную часть бункера, которая составлена из отдельных плоских стенок. В плане короб может иметь прямоугольное или квадратное сечение. Обычно, короб имеет сопоставимые размеры по длине, ширине и высоте. Короб является верхней частью пирамидально-призматического бункера.

**1.5.4 Меридиональное направление:** Направление, в котором касательная к точкам поверхности оболочки бункера находится в вертикальной плоскости. Другими словами, это есть вертикальное или наклонное направление на поверхности оболочки, по которому дождевая капля стекает вниз.

**1.5.5 Окружное направление:** Направление, при котором касательная к любой точке стенки бункера находится в горизонтальной плоскости. Оно меняется по периметру бункера и совпадает с направлением касательной в точках периметра бункера независимо от его формы – круглой или прямоугольной.

**1.5.6 Срединная поверхность:** Этот термин используется для обозначения поверхности оболочки, нормальные напряжения на которой равны нулю в случае действия только изгибающих моментов, или для срединной плоскости плоского листа, являющегося частью короба.

**1.5.7 Шаг ребер жесткости:** Расстояние между параллельными осями двух расположенных рядом параллельных ребер жесткости.

**1.5.8 Бункер:** Бункер предназначен для временного хранения сыпучих твердых материалов. Бункер имеет вертикальную форму и загружается сверху за счет силы тяжести сыпучего материала. Термин «бункер» относится ко всем формам конструкций для хранения сыпучих материалов, которые могут иметь форму силоса, воронки или их комбинаций.

**1.5.9 Вертикальная часть бункера (barrel):** Слово «barrel» переводится как «цилиндр» и относится к бункерам кругового и прямоугольного сечения. В русском языке цилиндр может иметь только круговое (кольцевое) сечение, поэтому эквивалентом данного термина является «вертикальная часть бункера» или «ствол», т.е. верхняя часть бункера, имеющая вертикальные стенки. У призматических бункеров данная часть имеет в сечении форму прямоугольника или квадрата, поэтому такие бункера могут также называться «бункера прямоугольной формы в плане». У цилиндрических бункеров верхняя часть в плане имеет форму окружности.

**1.5.10 Воронка:** Воронка – это часть бункера, которая суживается к низу и предназначена для направления сыпучего материала к выпускному отверстию под действием собственного веса.

**1.5.11 Узел (junction):** Узел – это точка, в которой соединяются два или более сегмента оболочки или плоских элементов призматической части. Ребра жесткости могут составлять часть узла или нет. Например, присоединение кругового ребра к оболочке или призматической части бункера может рассматриваться как узел.

**1.5.12 Переходное соединение:** Это есть узел соединения вертикальной части бункера и воронки. Данный узел может располагаться в основании вертикальной части бункера или несколько ниже.

**1.5.13 Юбка (skirt):** Юбка – это участок вертикальной части (стенки) бункера, который располагается ниже переходного узла. Юбка отличается от оболочки верхней части бункера тем, что воспринимает нагрузки от вышележащих конструкций и не находится в непосредственном контакте с хранимым сыпучим материалом.



**1.5.14 Пояс:** Пояс, или ряд – это стальные листы, соединенные вместе и образующие один горизонтальный замкнутый участок вертикальной оболочки цилиндрического бункера.

**1.5.15 Продольное ребро жесткости:** Локальный элемент жесткости, повторяющий форму меридиана оболочки, который, в свою очередь, является образующей оболочки вращения. Оно используется для повышения устойчивости, восприятия локальных нагрузок или вертикальных осевых сжимающих усилий. Продольное ребро не предназначено для повышения несущей способности при действии изгибающих моментов от основной поперечной нагрузки.

**1.5.16 Ребро (rib):** Локальный несущий элемент, который непосредственно воспринимает нагрузки, вызывающие изгиб в плоскости меридиана оболочки или пластины. Ребро располагается по образующей оболочки вращения или как вертикальное ребро призматической части. Оно используется для перераспределения поперечной нагрузки на конструкцию за счет работы на изгиб.

**1.5.17 Кольцевое ребро жесткости:** Кольцевое ребро жесткости – это местный элемент жесткости, который проходит по периметру конструкции на определенной высоте и пересекает меридиан. Принимается, что оно имеет пренебрежимо малую жесткость в меридиональной плоскости оболочки. Кольцевое ребро повышает устойчивость оболочки или воспринимает локальные нагрузки, но не как основной несущий элемент. В оболочке вращения оно проходит по окружности, а в прямоугольных конструкциях оно имеет прямоугольную форму поперечного сечения бункера.

**1.5.18 Смешанные ребра жесткости (smeared stiffeners):** Ребра жесткости называют смешанными, если стенка оболочки и отдельные ребра жесткости рассматриваются как составное сечение с шириной, кратной шагу ребер. Жесткостные параметры стенки оболочки со смешанными ребрами соответствуют ортотропной конструкции с внецентренными составляющими внутренних усилий, которые приводят к взаимодействию изгиба и растяжения.

**1.5.19 Опорное кольцо (base ring):** Опорное кольцо – это конструктивный элемент, который проходит по окружности конструкции и прикрепляет сооружение к фундаменту или к другим конструктивным элементам. Опорное кольцо должно обеспечивать соответствие условий закрепления, которые приняты в расчете, действительным условиям закрепления.

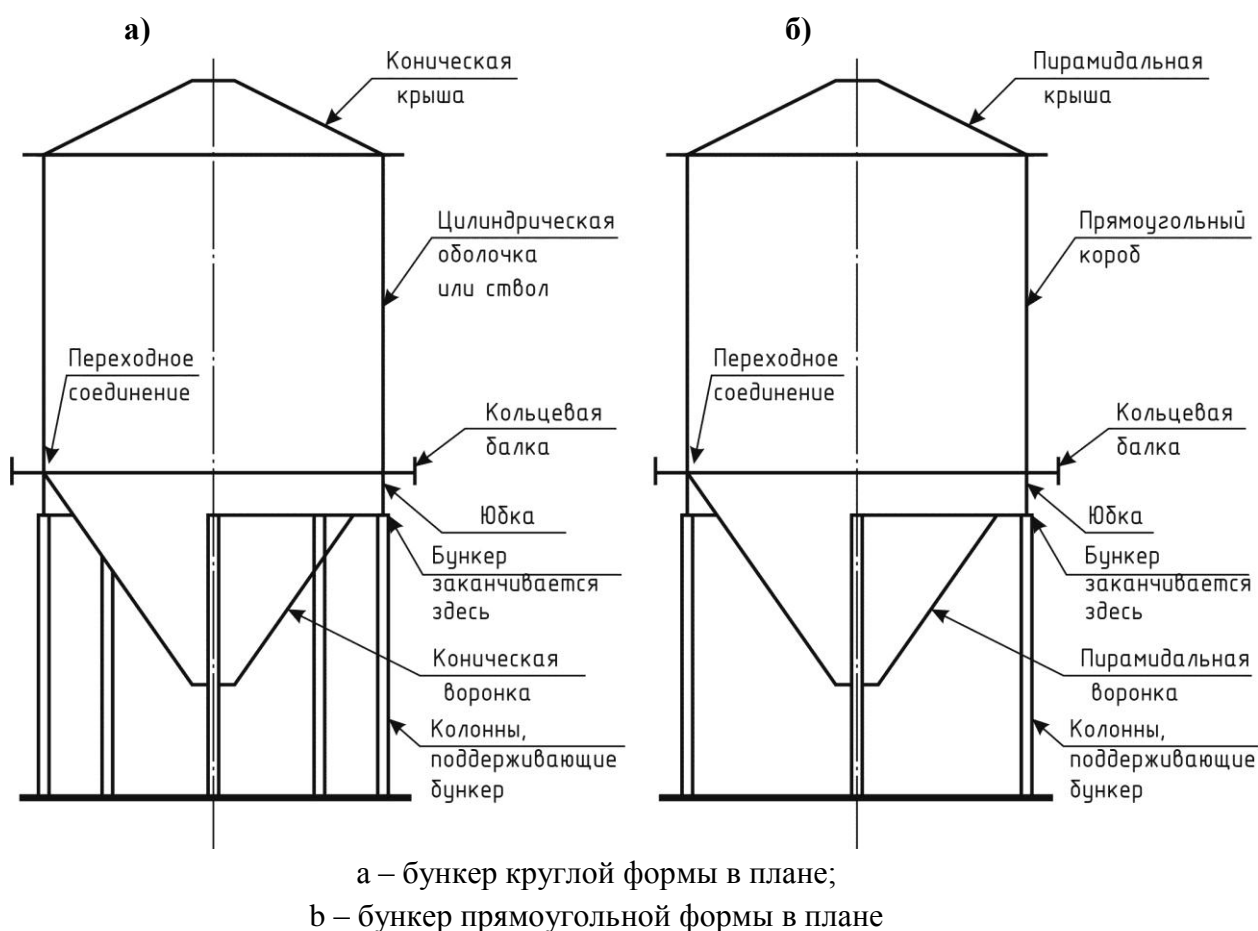
**1.5.20 Составная или прокатная кольцевая балка (ring girder or ring beam):** Данная балка является жестким элементом, который обладает изгибной жесткостью как в горизонтальной плоскости сечения бункера, так и в перпендикулярной плоскости. В цилиндрических бункерах кольцевая балка имеет форму кольца, в призматических бункерах балка располагается по сторонам квадрата или прямоугольника. Кольцевая балка является одним из основных несущих элементов и передает нагрузку от оболочки или призматической части на опоры.

**1.5.21 Непрерывное (неразрезное) опирание (continuous support):** Бункер имеет непрерывное опирание, если в любой точке по периметру передача горизонтальных и вертикальных нагрузок осуществляется одинаковым способом. Возможные

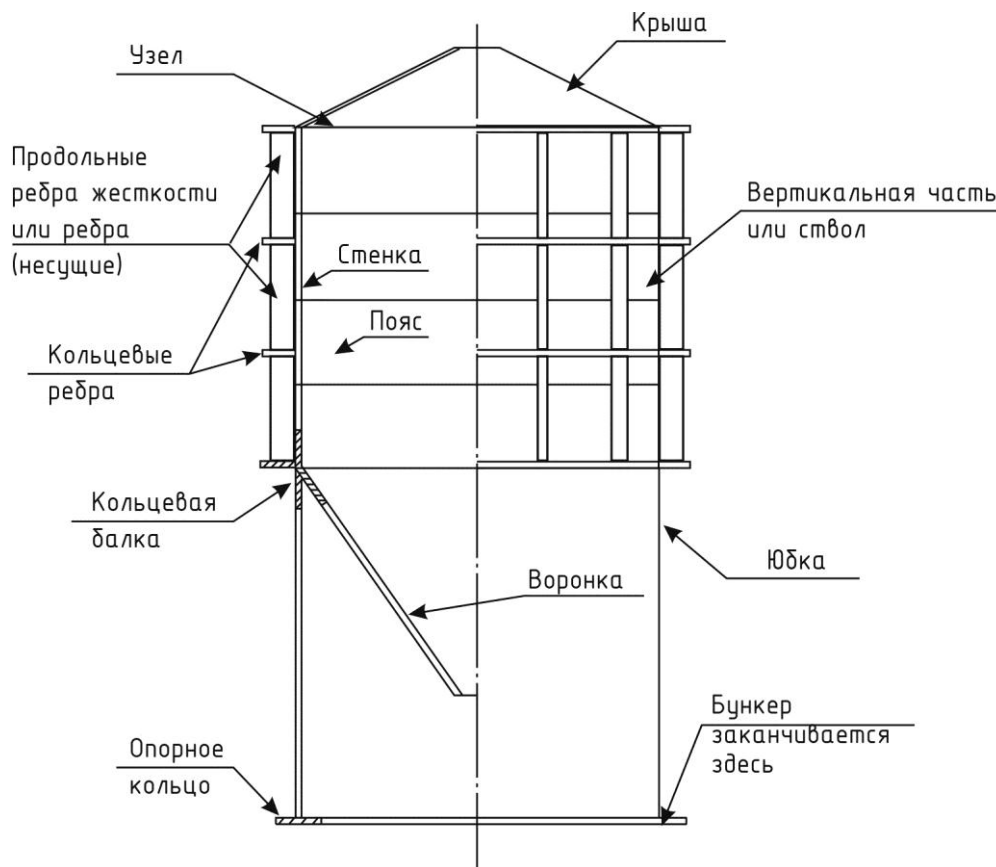
незначительные отклонения от этого условия (например, в виде небольшого отверстия) не влияют на применимость этого определения.

**1.5.22 Отдельная опора (дискретное опирание) (discrete support):** Дискретное опирание имеет место, когда бункер поддерживается ограниченным количеством узких консолей или колонн, расположенных по периметру сооружения. Обычно применяется четыре или шесть отдельных опор, но имеются случаи использования трех опор и более шести опор.

**1.5.23 Пирамидальная воронка:** Пирамидальная воронка применяется в качестве воронки для призматического бункера и имеет вид перевернутой пирамиды. В настоящем пособии принимается, что геометрия воронки является простой, т.е. она состоит только из четырех плоских элементов трапецевидной формы.



**Рисунок 1.1 – Терминология, используемая в конструкции бункера (дискретное опирание)**



**Рисунок 1.2 – Терминология, используемая в конструкции бункера (непрерывное опирание цилиндрического бункера)**

**1.5.24 Изотропная стенка:** Стенка бункера, свойства которой одинаковы во всех направлениях. Основным свойством является жесткость, поэтому данное определение относится к стенке из гладкого листа.

## **1.6 Условные обозначения**

### **1.6.1 Прописные буквы латинского алфавита**

- $A$  – площадь поперечного сечения;
- $C$  – мембранная жесткость при растяжении;
- $C$  – коэффициент потери устойчивости;
- $D$  – жесткость при изгибе;
- $E$  – модуль Юнга;
- $F$  – сила;
- $G$  – модуль сдвига;
- $H$  – высота конструкции;
- $I$  – момент инерции поперечного сечения;
- $I_t$  – унифицированная постоянная кручения;
- $K$  – изгибная жесткость панели стенки;
- $L$  – высота сегмента оболочки или ребра жесткости;

$M$  – изгибающий момент;

$N$  – осевая сила;

$Q$  – качество допусков на изготовление оболочки, подверженной потере устойчивости;

$R_\phi$  – локальный радиус на гребне или во впадине гофра.

### 1.6.2 Строчные буквы латинского алфавита

$a$  – коэффициент;

$b$  – ширина листа или ребра жесткости;

$d$  – расстояние между гребнями гофра;

$e$  – эксцентриситет силы или ребра жесткости;

$f_y$  – предел текучести стали;

$f_u$  – предел прочности стали (временное сопротивление);

$h$  – расстояние между полками кольцевой балки;

$j$  – коэффициент эффективности для сварных нахлесточных соединений, рассчитанных с использованием мембранных напряжений;

$j$  – эквивалентная гармоника изменения расчетного напряжения;

$l$  – приведенная длина оболочки для линейного расчета напряжений;

$l$  – длина волны гофра гофрированной стали;

$l$  – половина длины волны возможной формы потери устойчивости (высота, учитываемая в расчете);

$m_x$  — меридиональный изгибающий момент на единицу ширины;

$m_\theta$  — окружной изгибающий момент на единицу ширины;

$m_{x\theta}$  — скручивающий момент сдвига на единицу ширины;

$m$  – изгибающий момент на единицу ширины (равнодействующая нормальных напряжений от изгиба);

$m_x$  – меридиональный изгибающий момент на единицу длины окружности;

$m_y$  – окружной изгибающий момент на единицу высоты короба;

$m_\theta$  – окружной (кольцевой) изгибающий момент на единицу высоты оболочки;

$m_{xy}$  – крутящий момент от касательных напряжений на единицу ширины пластины;

$m_{x\theta}$  – крутящий момент от касательных напряжений на единицу ширины оболочки;

$n$  – количество отдельных опор по периметру бункера;

$n$  – равнодействующая мембранных напряжений (сила на единицу ширины пластины или оболочки);

$n_x$  – равнодействующая меридиональных мембранных нормальных напряжений на единицу длины окружности;

$n_y$  – равнодействующая окружных мембранных нормальных напряжений на единицу высоты короба;

$n_\theta$  – равнодействующая окружных (кольцевых) мембранных нормальных напряжений на единицу высоты оболочки;

$n_{xy}$  – равнодействующая мембранных касательных напряжений на единицу ширины пластины;

$n_{x\theta}$  – равнодействующая мембранных касательных напряжений на единицу ширины оболочки;

$p$  – нагрузка от распределенного давления;

$p_n$  – нормальное давление, перпендикулярное поверхности оболочки (направленное наружу);

$p_x$  – меридиональная поверхностная нагрузка, параллельная оболочке (направлена вниз);

$P_\theta$  – окружная поверхностная нагрузка, параллельная оболочке (направлена против часовой стрелки в горизонтальной плоскости);

$q$  – поперечная сила на единицу длины, действующая на стержень;

$r$  – радиальная координата для цилиндрического бункера;

$r$  – радиус срединной поверхности оболочки;

$s$  – шаг ребер жесткости в окружном направлении;

$t$  – толщина стенки;

$t_x, t_y$  – эквивалентная толщина стенки гофрированного листа при растяжении в направлениях  $x, y$ ;

$w$  – размах несовершенства;

$w$  – радиальная деформация;

$x$  – локальная меридиональная координата;

$y$  – локальная окружная координата;

$z$  – глобальная осевая координата;

$z$  – координата вдоль вертикальной оси осесимметричного бункера (оболочка вращения).

### 1.6.3 Буквы греческого алфавита

$\alpha$  – упругий коэффициент потери устойчивости при наличии несовершенства (понижающий коэффициент);

$\alpha$  – коэффициент температурного расширения;

$\beta$  – половина угла вершины воронки;

$\gamma_F$  – частный коэффициент для нагрузок;

$\gamma_M$  – частный коэффициент для несущей способности;

$\delta$  – предельный прогиб;

$\Delta$  – приращение;

$\chi$  – понижающий коэффициент для потери устойчивости гибкой колонны;

$\chi$  – коэффициент снижения (критических) напряжений потери устойчивости оболочки;

$\lambda$  – полуволна меридионального изгиба оболочки;

$\bar{\lambda}$  – условная гибкость оболочки;

$\mu$  – коэффициент трения о стенки;

$\nu$  – коэффициент поперечной деформации Пуассона;  
 $\theta$  – угловая окружная координата оболочки в горизонтальной плоскости;  
 $\sigma$  – нормальное напряжение;  
 $\sigma_{bx}$  – меридиональное нормальное напряжение от изгиба;  
 $\sigma_{by}$  – окружное нормальное напряжение от изгиба в коробе;  
 $\sigma_{b\theta}$  – окружное нормальное напряжение от изгиба в криволинейной оболочке;  
 $\tau_{bxy}$  – касательное напряжение от кручения в коробе;  
 $\tau_{bx\theta}$  – касательное напряжение от кручения в криволинейной оболочке;  
 $\sigma_{mx}$  – меридиональное мембранное нормальное напряжения;  
 $\sigma_{my}$  – окружное мембранное нормальное напряжение в коробе;  
 $\sigma_{m\theta}$  – кольцевое мембранное нормальное напряжение в криволинейной оболочке;  
 $\tau_{mxy}$  – мембранное касательное напряжение в коробе;  
 $\tau_{mx\theta}$  – мембранное касательное напряжение в криволинейной оболочке;  
 $\sigma_{sox}$  – меридиональное нормальное напряжение на внешней поверхности;  
 $\sigma_{soy}$  – окружное нормальное напряжение на внешней поверхности короба;  
 $\sigma_{so\theta}$  – окружное нормальное напряжение на внешней поверхности криволинейной оболочки;  
 $\tau_{soxy}$  – касательное напряжение на внешней поверхности короба;  
 $\tau_{sox\theta}$  – касательное напряжение на внешней поверхности криволинейной оболочки;  
 $\tau$  – касательное напряжение;  
 $\omega$  – безразмерный параметр в расчетах устойчивости;  
 $\omega$  – наклон к вертикали оси воронки, которая не вертикальна;  
 $\psi$  – параметр неравномерности напряжений.

#### 1.6.4 Подстрочные индексы

$E$  – эффект воздействий, т.е. значения напряжений или перемещений, возникающих от расчетных воздействий;

$F$  – воздействие;

$M$  – материал;

$R$  – несущая способность (сопротивление);

$S$  – значение равнодействующей напряжений, возникающих от расчетных воздействий;

$b$  – изгиб;

$c$  – цилиндр;

$cr$  – критическое значение потери устойчивости;

$d$  – расчетное значение;

$eff$  – приведенное (расчетное) значение;

$h$  – воронка;

$m$  – мембрана, середина пролета;

$min$  – минимальное допустимое значение;

$n$  – перпендикулярно стенке;

$p$  – давление;  
 $r$  – радиальный;  
 $s$  – юбка, опора;  
 $s$  – напряжение на поверхности ( $o$  – наружная поверхность,  $i$  – внутренняя поверхность);  
 $u$  – критическое (предельное) значение;  
 $\omega$  – меридиональное, параллельное относительно стенки (трение о стенку);  
 $x$  – меридиональное направление;  
 $y$  – окружное направление (для конструкций короба), текучесть;  
 $z$  – осевое направление;  
 $\theta$  – окружной, кольцевой (для оболочек вращения).

## 1.7 Правила знаков

### 1.7.1 Глобальная система координат для цилиндрического бункера

1.7.1.1 Правила знаков, которые приводятся в данном разделе пособия к СН РК EN 1993-4-1, применяются для конструкции бункера в целом, как отдельного сооружения (см. Рисунок 1.3). Эти правила используются при выполнении расчетов напряженно-деформированного состояния элементов оболочки бункера, включая ствол и воронку.

1.7.1.2 Для системы осей конструкций бункера в глобальной системе координат используются следующие цилиндрические координаты:

$z$  – вертикальная координата вдоль центральной оси оболочки вращения;  
 $r$  – радиальная координата (радиус);  
 $\theta$  – окружная координата (угол).

1.7.1.3 Соглашения для положительного направления и соответствующего значения величин:

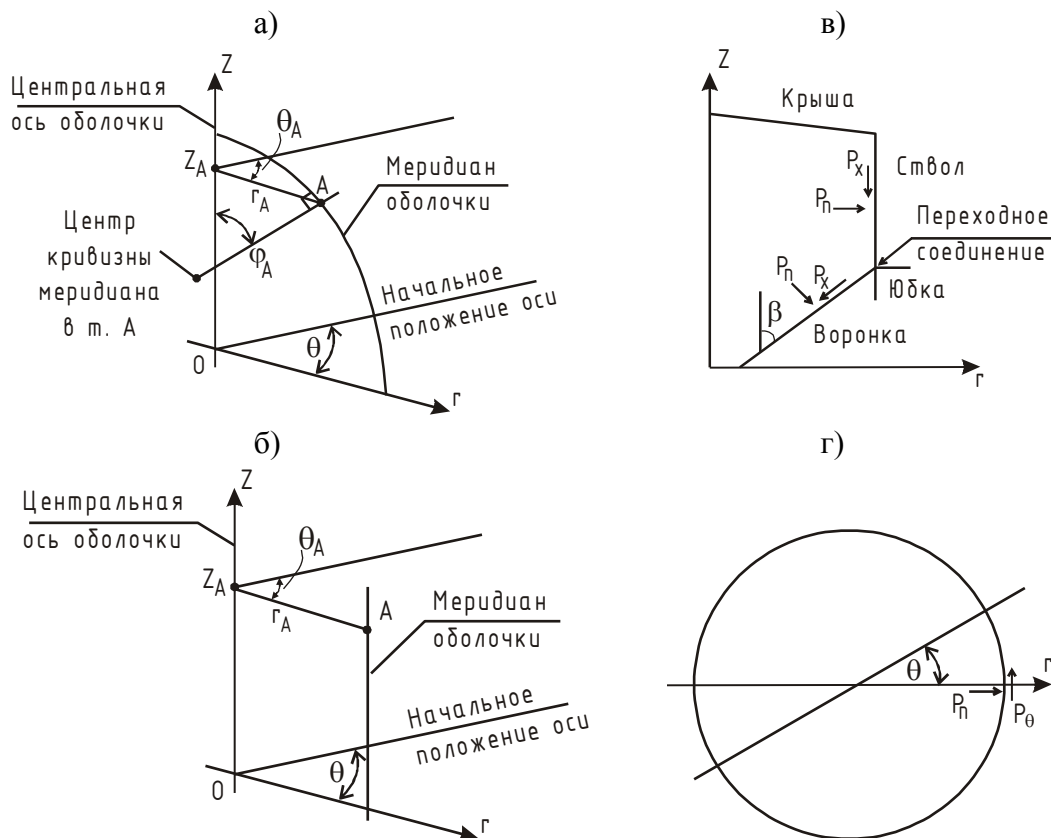
- направление наружу является положительным (внутреннее давление имеет положительный знак, перемещение оболочки наружу – положительный знак);
- растягивающие напряжения имеют положительный знак, исключение составляют формулы расчета на устойчивость, в которых сжатие считается положительным.

1.7.1.4 Условные обозначения и соглашение о знаках для распределенных воздействий на поверхность оболочки бункера:

$p_n$  – давление, нормальное к поверхности оболочки, направление наружу является положительным;

$p_x$  – меридиональная нагрузка на поверхность оболочки и параллельная ей, направление вниз является положительным, нагрузка прикладывается к оболочке в вертикальной плоскости;

$p_\theta$  – кольцевая нагрузка на поверхность оболочки и параллельная ей, направление против часовой стрелки является положительным. Нагрузка прикладывается к оболочке в горизонтальной плоскости.



- а – глобальная система координат для оболочки вращения;  
 б – глобальная система координат для цилиндра;  
 в – координаты для оболочки бункера и нагрузки (вертикальное сечение);  
 г – координаты для оболочки бункера и нагрузки (горизонтальное сечение)

**Рисунок 1.3 – Система координат для цилиндрического бункера**

### 1.7.2 Глобальная система координат для прямоугольного бункера

1.7.2.1 Правила знаков, которые приводятся в данном разделе, применяются для конструкции бункера в целом, как отдельного сооружения. Эти правила используются при выполнении расчетов напряженно-деформированного состояния короба и воронки бункера.

1.7.2.2 Для осей конструкций бункера в глобальной системе координат (см. Рисунок 1.4) используется прямоугольная (декартова) система координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , правая. Вертикальному направлению соответствует координата  $z$ .

1.7.2.3 Соглашения для положительного направления и соответствующего значения величин имеют вид:

- направление наружу является положительным (внутреннее давление имеет положительный знак, перемещение стенки наружу – положительный знак;
- растягивающие напряжения имеют положительный знак, исключение составляют формулы расчета на устойчивость, в которых сжатие считается положительным.

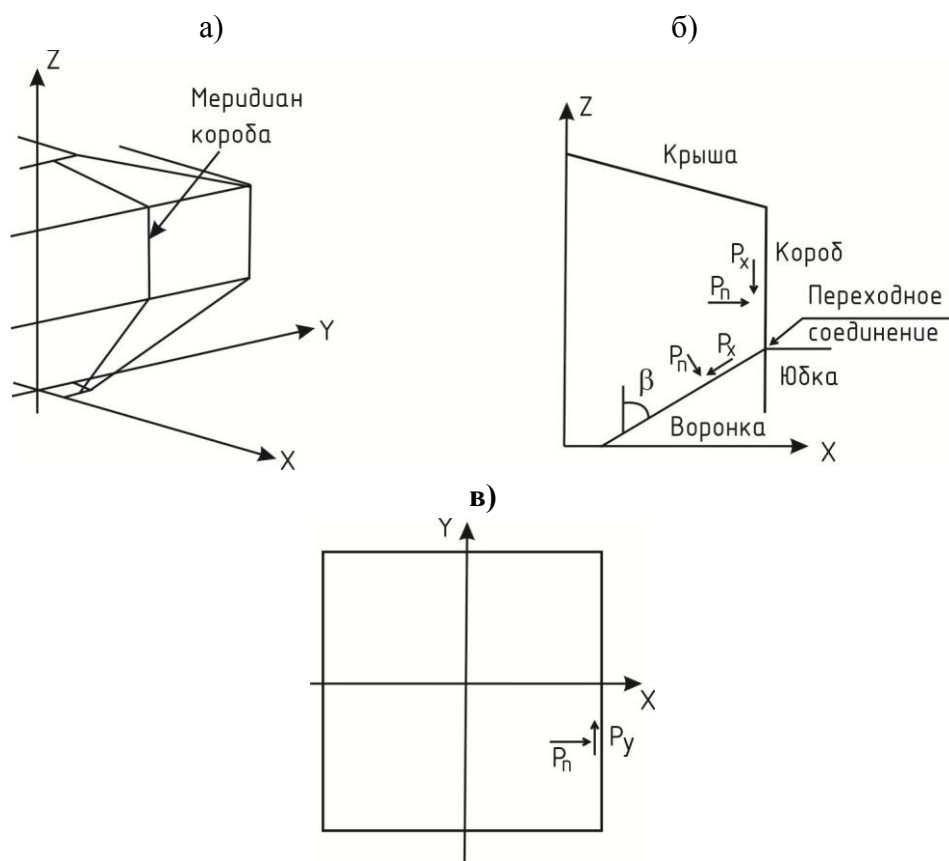


1.7.2.4 Условные обозначения и соглашение о знаках для распределенных нагрузок на поверхность стенок бункера:

$p_n$  – давление, нормальное к поверхности стенки, направление наружу является положительным;

$p_x$  – меридиональная нагрузка на поверхность стенки и параллельная ей, направление вниз является положительным, нагрузка прикладывается к стенке в вертикальной плоскости;

$p_\theta$  – поперечная нагрузка на поверхность стенки и параллельная ей, направление против часовой стрелки является положительным, нагрузка прикладывается к стенке в горизонтальной плоскости.



а – глобальная система координат;

б – координаты для бункера и нагрузки (вертикальное сечение);

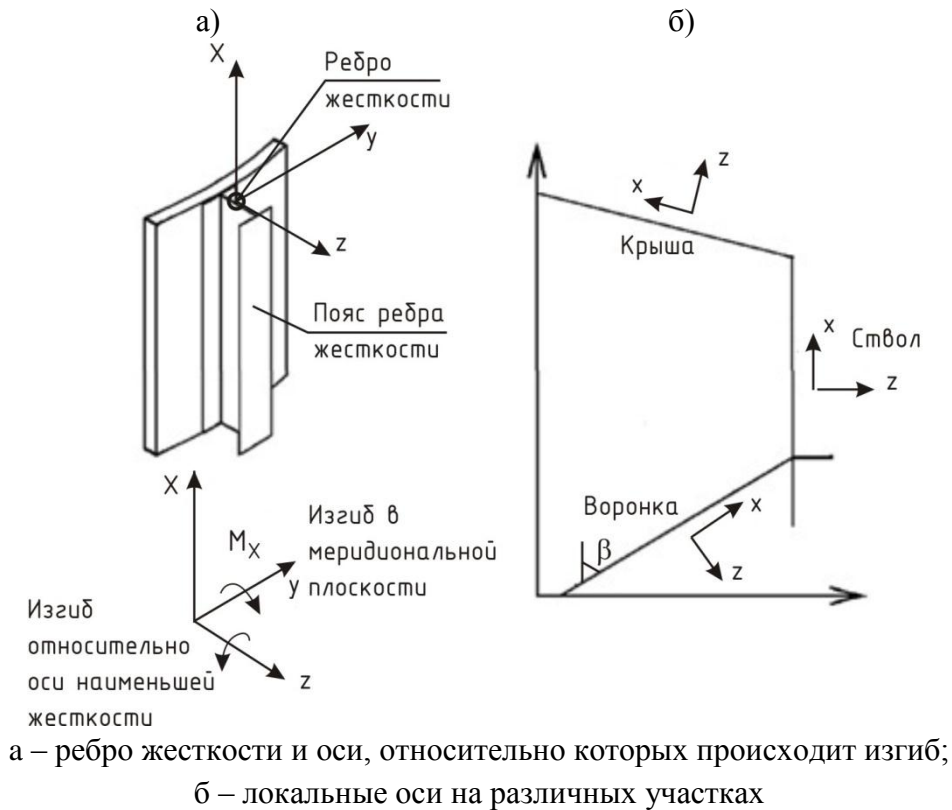
в – координаты для бункера и нагрузки (горизонтальное сечение)

**Рисунок 1.4 – Система координат для прямоугольного бункера**

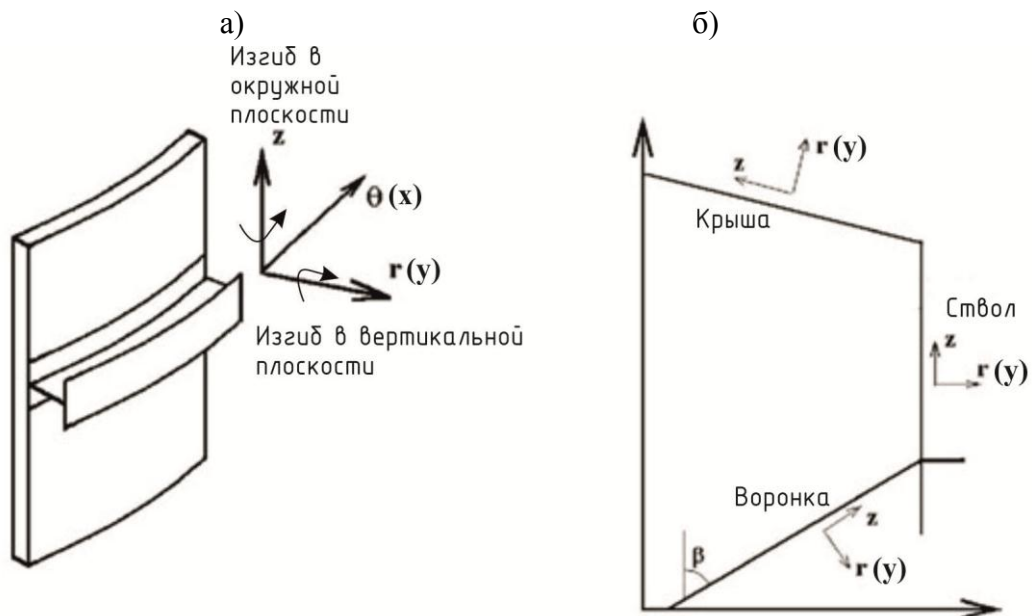
### 1.7.3 Локальные системы координат для конструктивных элементов в цилиндрических и прямоугольных бункерах

1.7.3.1 Направления осей для конструктивных элементов, которые крепятся к стенке бункера, принимаются различными в зависимости от ориентации рассматриваемого элемента, который может располагаться в меридиональной плоскости или в окружном направлении по периметру бункера (см. Рисунки 1.5 и 1.6). Для

цилиндрических бункеров периметр имеет форму кольца. Для прямоугольных, или пирамидально-призматических бункеров периметр имеет форму прямоугольника.



**Рисунок 1.5 – Локальная система координат для продольных ребер жесткости на оболочке или коробе**



а – ребро жесткости и оси, относительно которых происходит изгиб; б – локальные оси на различных участках

**Рисунок 1.6 – Локальные системы координат для кольцевых ребер жесткости на оболочке (в скобках указаны оси для короба)**

1.7.3.2 Обозначения и направления осей для прямых конструктивных элементов (см. Рисунок 1.5 а), расположенных вдоль меридиана и прикрепленных к стенке бункера, принимаются следующие:

- $x$  – меридиональная координата для стенки, воронки и крыши;
- $y$  – ось с наибольшей изгибной жесткостью, параллельная полкам ребра жесткости, относительно этой оси происходит изгиб в меридиональной плоскости;
- $z$  – ось с наименьшей изгибной жесткостью, перпендикулярная полкам ребра жесткости.

1.7.3.3 Обозначения и направления осей для криволинейных конструктивных элементов (см. Рисунок 1.6 а), расположенных по периметру в окружном направлении и прикрепленных к стенке бункера принимаются следующие:

- $\theta$  – угловая координатная ось;
- $r$  – радиальная ось, относительно этой оси происходит изгиб в вертикальной плоскости;
- $z$  – вертикальная ось, относительно этой оси происходит изгиб в окружной плоскости, перпендикулярной стенке.

Изгиб окружного ребра жесткости (кольца) относительно локальной вертикальной оси  $z$  происходит совместно с изгибом цилиндрической оболочки от действия окружного момента  $m_\theta$ . В горизонтальном кольце возникают изгибающие моменты относительно локальной радиальной оси  $r$  в следующих случаях:

- кольцо является кольцевой несущей балкой;
- на кольцо действуют горизонтальные радиальные силы, приложенные с эксцентриситетом относительно центра тяжести сечения кольца.

1.7.3.4 Обозначения для осей окружного прямого конструктивного элемента (см. Рисунок 1.6 а), прикрепленного к коробу и расположенного вдоль стенки, приняты следующими:

- $x$  – горизонтальная ось вдоль стенки;
- $y$  – горизонтальная ось, перпендикулярная стенке;
- $z$  – вертикальная ось (ось направлена вверх в вертикальной плоскости).

Горизонтальный прямой конструктивный элемент изгибается относительно вертикальной оси  $z$  в случае изгиба стенки короба из плоскости стенки. Данный случай соответствует обычной работе элемента.

#### **1.7.4 Правила для равнодействующих напряжений в цилиндрических и прямоугольных бункерах**

1.7.4.1 Правило для подстрочных индексов величин, обозначающих напряжения, имеет вид: «подстрочный индекс обозначает направление, в котором приложенная сила вызывает нормальные напряжения».

Равнодействующие мембранных напряжений (при равномерном распределении напряжений по толщине оболочки) (см. Рисунок 1.7 а, б):

- $n_x$  – равнодействующая меридиональных мембранных напряжений;
- $n_\theta$  – равнодействующая кольцевых мембранных напряжений в оболочках;

$n_y$  – равнодействующая окружных мембранных напряжений в коробах;  
 $n_{xy}$  или  $n_{x\theta}$  – равнодействующие касательных мембранных напряжений.

Мембранные напряжения:

$\sigma_{mx}$  – меридиональное мембранное напряжение;

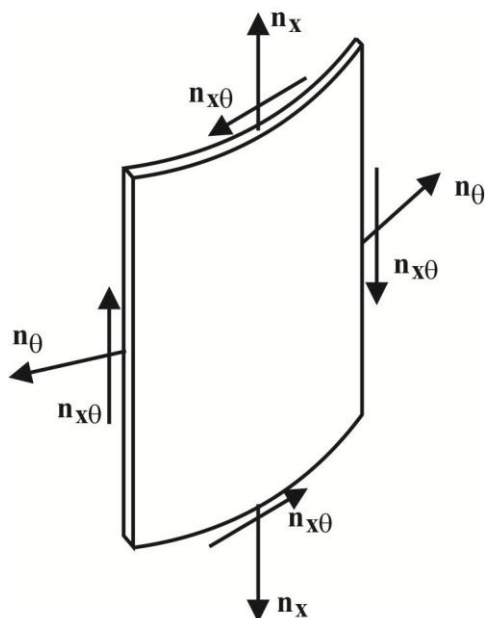
$\sigma_{m\theta x}$  – кольцевое мембранное напряжение в оболочках;

$\sigma_{my}$  – окружное мембранное напряжение в прямоугольных коробах;

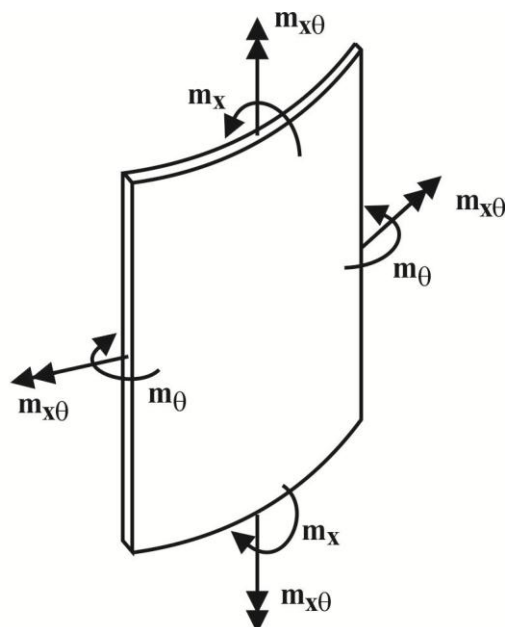
$\tau_{mxy}$  или  $\tau_{mx\theta}$  – касательные мембранные напряжения.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 В качестве перевода для термина «stress resultant» не следует использовать термин «резльтирующие напряжения». Это обусловлено следующими причинами: (1) результирующими в литературе по инженерным расчетам называют обычно приведенные напряжения, т.е. результат действия нескольких напряжений, (2) согласно СН РК EN 1993-1-6, данные напряжения определяются как интеграл от нормальных напряжений по единичной длине оболочки, поэтому адекватным переводом будет термин «равнодействующая напряжений».

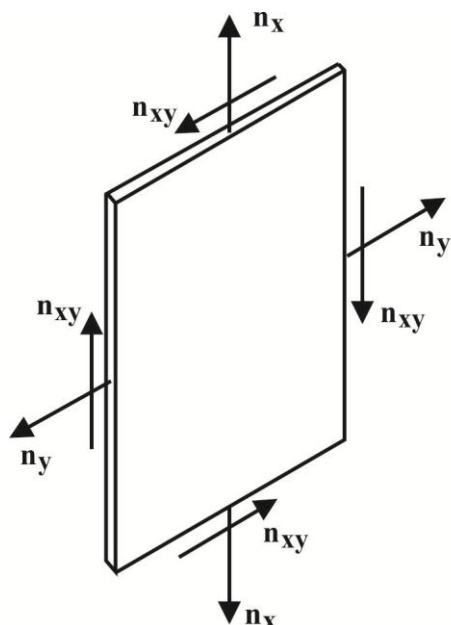
а)



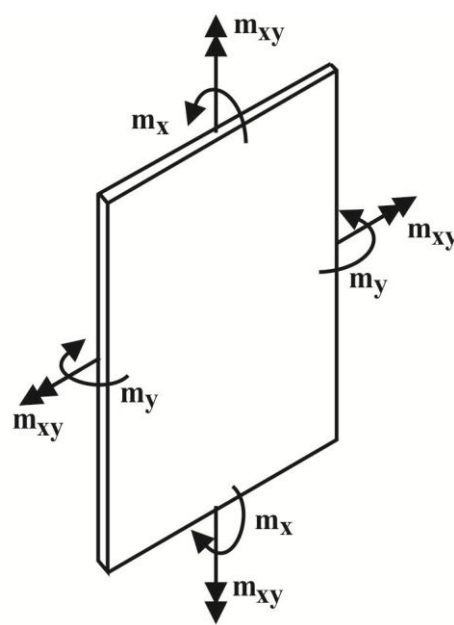
б)



в)



г)



а – равнодействующие мембранных напряжений в оболочках;

б – равнодействующие напряжений от изгиба (момент на единицу длины) в оболочках

в – равнодействующие мембранных напряжений в коробах;

г – равнодействующие напряжений от изгиба в коробах

**Рисунок 1.7 – Равнодействующие напряжения в стенках бункера (и коробах)**

1.7.4.2 Правило для подстрочных индексов величин, обозначающих моменты, имеет вид: «подстрочный индекс обозначает направление, в котором приложенный момент вызывает нормальные напряжения». Следует отметить, что данное правило отличается от обозначения и правил знаков, которые применяются для балок и колонн в соответствии с СН РК EN 1993-1-1 и СН РК EN 1993-1-3.

Равнодействующие напряжений от изгиба (при неравномерном распределении напряжений по толщине оболочки) (см. Рисунок 1.7 в, г):

$m_x$  – меридиональный изгибающий момент на единицу ширины;

$m_\theta$  – кольцевой изгибающий момент на единицу ширины в оболочках;

$m_y$  – окружной изгибающий момент на единицу ширины стенки в прямоугольных коробах;

$m_{xy}$  или  $m_{x\theta}$  – крутящие моменты от касательных напряжений на единицу ширины.

Напряжения от изгиба:

$\sigma_{bx}$  – меридиональное нормальное напряжение от изгиба;

$\sigma_{b\theta}$  – кольцевое нормальное напряжение от изгиба в оболочках;

$\sigma_{by}$  – окружное (горизонтальное) нормальное напряжение от изгиба в прямоугольных коробах;

$\tau_{bxy}$  или  $\tau_{bx\theta}$  – касательные напряжения от кручения из плоскости оболочки.

Напряжения на внутренних и наружных поверхностях:

$\sigma_{six}$ ,  $\sigma_{sox}$  – меридиональные внутренние и наружные нормальные напряжения на поверхности в коробах и оболочках;

$\sigma_{si\theta}$ ,  $\sigma_{so\theta}$  – кольцевые внутренние и наружные нормальные напряжения на поверхности в оболочках;

$\tau_{six\theta}$ ,  $\tau_{sox\theta}$  – внутренние и наружные касательные напряжения на поверхности в оболочках;

$\sigma_{siy}$ ,  $\sigma_{soy}$  – окружные внутренние и наружные нормальные напряжения на поверхности в прямоугольных коробах;

$\tau_{sixy}$ ,  $\tau_{soxy}$  – внутренние и наружные касательные напряжения на поверхности в прямоугольных коробах.

## 1.8 Единицы измерения

1.8.1 При выполнении расчетов должны применяться единицы измерения системы СИ в соответствии с ISO 1000.

1.8.2 Для расчетов рекомендуется использовать следующие взаимосогласованные величины и размерности:

- размеры и толщины: м, см, мм;
- удельный вес: кН/м<sup>3</sup>, Н/мм<sup>3</sup>;
- усилия и нагрузки: кН, Н;
- линейно распределенные силы и нагрузки: кН/м, Н/мм;
- давление и воздействия, распределенные по площади: кПа, МПа;
- единичная масса: кг/м<sup>3</sup>, кг/мм<sup>3</sup>;
- ускорение: км/сек<sup>2</sup>, м/сек<sup>2</sup>;
- равнодействующие мембранных напряжений: кН/м, кН/см, Н/мм;
- равнодействующие напряжений от изгиба: кНм/м, кНсм/см, Нмм/мм;
- напряжения и модули упругости: кПа, МПа (= Н/мм<sup>2</sup> = 0,1 кН/см<sup>2</sup>).

ПРИМЕЧАНИЕ Использование единиц кН/см и кН/см<sup>2</sup> наиболее удобно для выполнения расчетов напряжений, поскольку геометрические характеристики поперечных сечений элементов обычно измеряются в см. Это не противоречит системе единиц СИ, так как не требует специальных переводных коэффициентов.

## 2 ОСНОВЫ РАСЧЕТА

### 2.1 Основные требования

2.1.1 Конструкции бункера должны быть запроектированы, изготовлены и построены согласно основным требованиям к безопасности строительных конструкций, изложенным в Разделе 2 СН РК EN 1990, а также с учетом дополнений, приведенных в данном разделе. Данные требования распространяются и на обслуживание конструкций.

2.1.2 В состав несущих конструкций бункера входят: все оболочки и плоские элементы конструкции, горизонтальные и вертикальные ребра жесткости, несущие ребра, опорное кольцо или опорная балка, юбка, а также присоединяемые элементы.

2.1.3 Поддерживающие конструкции, на которые опирается бункер, не являются частью бункера. Граница между бункером и его опорами показана на Рисунках 1.1 и 1.2. Аналогично, конструкции, которые опираются на бункер сверху, не входят в состав конструкций бункера.

2.1.4 Конструкции бункера должны быть рассчитаны и запроектированы, по возможности, таким образом, чтобы не разрушаться под действием повреждений, возникающих при использовании бункера.

2.1.5 К конструкциям бункера могут предъявляться специальные требования, обусловленные технологическим процессом. Для учета при проектировании эти требования должны быть согласованы между проектной организацией, заказчиком и соответствующим государственным органом.

### 2.2 Классификация бункеров по надежности

2.2.1 Разделение строительных конструкций по степени ответственности и вытекающие из этого требования к надежности излагаются в СН РК EN 1990, п.2.2.

2.2.2 При расчете и проектировании конструкций бункеров следует использовать различные уровни требований в зависимости от выбранного класса последствий, конструктивного решения, возможных видов отказа и форм разрушения.

2.2.3 В СН РК EN 1993-4-1 все бункера разделяются на 3 класса последствий: класс 1, 2, 3. Требования к различным классам и методы их расчета имеют целью обеспечить примерно одинаковую надежность бункеров различных классов с учетом затрат на проектирование и строительство. Чем выше класс ответственности, тем выше требования к снижению риска для жизни и последствий конструктивного отказа.

В Таблице 2.1 приводится классификация бункеров в зависимости от размера и типа работы, влияющих на надежность.

В СН РК EN 1991-4 приводится другая классификация бункеров – по воздействиям, в зависимости от типа действующих нагрузок и соотношения размеров. Классификация в СН РК EN 1991-4 выполнена на основании имеющихся неопределенностей при расчете нагрузок от сыпучего материала.

**Таблица 2.1 – Классы последствий для бункеров**

Класс последствий	Условия проектирования Расчетные ситуации
Класс последствий 1	Бункеры с наземными опорами или бункеры, опирающиеся на сплошную юбку до уровня земли и имеющие емкость более 5000 т. Бункеры на отдельных колоннах емкостью более 1000 т. Бункеры емкостью более 200 т, в которых присутствует любая из расчетных ситуаций: а) разгрузка с эксцентриситетом; б) локальная боковая нагрузка; в) несимметричное заполнение.
Класс последствий 2	Все бункеры, соответствующие СН РК EN 1993-4-1 и не входящие в другой класс
Класс последствий 3	Бункеры емкостью от 10 до 100 т
* Бункеры емкостью менее 10 т не подпадают под требования норм СН РК EN 1993-4-1.	

2.2.4 При проектировании для бункера можно принять более высокий класс последствий чем тот, который указан в Таблице 2.1 СН РК EN 1993-4-1.

2.2.5 Выбор класса последствий должен быть совместно согласован проектной организацией, заказчиком и соответствующим государственным органом надзора.

2.2.6 Класс последствий 3 следует использовать, если на стенку бункера действует локальная боковая нагрузка от хранимого материала, распространяющаяся не менее чем на половину окружности бункера. Локальная нагрузка вызывает появление изгибающих моментов в стенке бункера, ее значение определяется по нормам СН РК EN 1991-4.

2.2.7 Для бункеров класса последствий 1 используются упрощенные правила расчета, которые излагаются в приложении А СН РК EN 1993-4-1.

## 2.3 Предельные состояния

Для расчета бункеров по нормам СН РК EN 1993-4-1 следует использовать предельные состояния, определенные СН РК EN 1993-1-6 для расчета оболочек.

## 2.4 Технологические и климатические воздействия

### 2.4.1 Общие положения

При расчете и проектировании бункеров должны выполняться общие требования к определению нагрузок и воздействий, изложенные в Разделе 4 СН РК EN 1990.



## **2.4.2 Ветровые нагрузки**

2.4.2.1 При определении ветровых воздействий на отдельно стоящий бункер или бункер в группе для случаев, не указанных в СН РК EN 1991-1-4, следует использовать дополнительную информацию, полученную из справочных данных или экспериментальных исследований.

2.4.2.2 Высокие легкие сплошностенчатые конструкции чувствительны к принимаемому при расчете распределению давления ветра по окружности стенки. Поэтому для расчета устойчивости стенки при пустом бункере и деталей крепления бункера к фундаменту в специальных случаях могут использоваться другие значения ветровой нагрузки, по сравнению с приводимыми в СН РК EN 1991-1-4. Дополнительная информация о распределении ветрового давления по окружности цилиндрических бункеров приводится в приложении С СН РК EN 1991-1-4.

## **2.4.3 Комбинации давления сыпучих материалов с другими воздействиями**

При расчете бункера необходимо использовать частные коэффициенты для воздействий, указанные в Пункте 2.9.2 СН РК EN 1993-4-1.

## **2.5 Свойства материала**

2.5.1 Материалы для бункеров должны соответствовать общим требованиям, изложенным в СН РК EN 1993-1-1.

2.5.2 Необходимо учитывать специальные требования к свойствам материалов для бункеров, изложенные в Разделе 3 СН РК EN 1993-4-1.

## **2.6 Геометрические характеристики**

2.6.1 Следует использовать положения о геометрических характеристиках, которые содержатся в Разделе 6 СН РК EN 1990 для номинальных значений характеристик и учета неблагоприятных отклонений размеров.

2.6.2 Необходимо также пользоваться дополнительными указаниями о геометрических характеристиках, которые относятся к конструкциям оболочек и приводятся в СН РК EN 1993-1-6.

2.6.3 Толщина листов оболочки принимается в качестве номинальной толщины. Если на стальной лист нанесено металлизированное покрытие горячим цинкованием согласно СН РК EN 10149, в качестве номинальной толщины следует принимать толщину основного металла листа, которая определяется вычитанием из номинальной наружной толщины общей толщины цинкового покрытия на обеих поверхностях стального листа.

2.6.4 Уменьшение толщины металла стенок и воронки бункера вследствие коррозионного и абразивного износа должно быть учтено при проектировании в соответствии с Пунктом 4.1.4 СН РК EN 1993-4-1.

## **2.7 Моделирование бункера для определения эффекта воздействий**

2.7.1 При выполнении статического расчета («общий расчет», по терминологии СН РК EN 1990) необходимо соблюдать основные требования к созданию расчетных моделей и выполнению расчетов, изложенные в Разделе 5 СН РК EN 1990.

2.7.2 Специфические требования к расчету конструкций при проверках по предельным состояниям эксплуатационной пригодности необходимо выполнять в соответствии с указаниями Разделов 4 – 9 данного пособия к СН РК EN 1993-4-1, где приводятся различные требования в зависимости от типа конструктивного элемента и класса последствий для бункера.

2.7.3 Специфические требования к расчету конструкций для выполнения проверок по критическим предельным состояниям (по несущей способности) необходимо выполнять в соответствии с указаниями Разделов 4 – 9 данного пособия к СН РК EN 1993-4-1. Более подробные указания приводятся в СН РК EN 1993-1-6 и СН РК EN 1993-1-7.

## **2.8 Расчет на основании испытаний**

2.8.1 При расчете с использованием экспериментальных данных следует руководствоваться общими требованиями, изложенными в Разделе 5 СН РК EN 1990.

2.8.2 Для типовых бункеров заводского изготовления, которые проходят полноразмерные испытания после изготовления, может использоваться критерии надежности, принятые на основе опыта проектирования. Выполнение критериев проверяется при испытаниях.

## **2.9 Эффекты воздействий для проверок предельных состояний**

### **2.9.1 Общие положения**

При выполнении проверок по предельным состояниям должны выполняться общие требования Раздела 6 СН РК EN 1990.

### **2.9.2 Частные коэффициенты для критических предельных состояний**

#### **2.9.2.1 Частные коэффициенты для воздействий на бункеры**

2.9.2.1.1 Для постоянных, переходных и аварийных расчетных ситуаций необходимо использовать частные коэффициенты для воздействий  $\gamma_F$ , которые приводятся в СН РК EN 1990. Коэффициенты к комбинационному значению нагрузок  $\psi_0$  приводятся в EN 1991-4.

2.9.2.1.2 Значения частных коэффициентов для нагрузок для массовых типовых бункеров заводского изготовления могут быть установлены соответствующими уполномоченными органами. Для таких бункеров коэффициенты надежности из Пункта 2.9.2.1.1 СН РК EN 1993-4-1 служат только в качестве ориентировочных для того, чтобы

показать требуемый уровень надежности, согласующийся с уровнем надежности других проектов бункеров.

### 2.9.2.2 Частные коэффициенты для несущей способности

2.9.2.2.1 Если прочностные характеристики конструкций определяются на основании испытаний или экспериментов необходимо использовать указания СН РК EN 1990.

2.9.2.2.2 Проверку усталостной прочности (выносливости) следует выполнять в соответствии с Разделом 9 СН РК EN 1993-1-6.

2.9.2.2.3 Р Значения частных коэффициентов для несущей способности  $\gamma_{Mi}$  для различных предельных состояний следует принимать по Таблице 2.2 настоящего пособия к СН РК EN 1993-4-1.

### 2.9.3 Предельные состояния по эксплуатационной пригодности

Если в соответствующих разделах СН РК EN 1993-4-1 даются упрощенные правила проверок для предельных состояний по эксплуатационной пригодности, допускается не выполнять детальные расчеты с использованием расчетных комбинаций нагрузок.

## 2.10 Долговечность

Для обеспечения расчетной долговечности необходимо выполнять общие требования, изложенные в Разделе 2.4 СН РК EN 1990.

## 2.11 Огнестойкость

Для обеспечения необходимой степени огнестойкости конструкций бункеров следует соблюдать положения, установленные в СН РК EN 1993-1-2.

**Таблица 2.2 – Частные коэффициенты для несущей способности**

Несущая способность для формы отказа	Значение коэффициента $\gamma_M$
Несущая способность сварного или болтового соединения стенки оболочки по пластическому предельному состоянию	$\gamma_{M0} = 1,00$
Устойчивости стенки оболочки	$\gamma_{M1} = 1,10$
Сопротивление сварного или болтового соединения стенки оболочки разрыву	$\gamma_{M2} = 1,25$
Сопротивление стенки оболочки малоцикловой усталости	$\gamma_{M4} = 1,00$
Несущая способность соединений	$\gamma_{M5} = 1,25$
Несущая способность стенки оболочки по выносливости	$\gamma_{M6} = 1,10$

### 3 СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

#### 3.1 Общие положения

3.1.1 Марки стали для изготовления бункеров должны обладать хорошей свариваемостью для облегчения выполнения последующих мероприятий по ремонту и реконструкции.

3.1.2 Марки стали для изготовления цилиндрических бункеров должны обладать достаточной пластичностью для выполнения операций изгиба и образования элементов криволинейной формы без ухудшения свойств.

3.1.3 Прочностные свойства сталей, которые рассматриваются в настоящем пособии к СН РК EN 1993-4-1, приводятся в Таблице 3.1 СН РК EN 1993-1-1 и в Таблице 3.1b СН РК EN 1993-1-3 и являются номинальными значениями, которые следует принимать в качестве характеристических значений при выполнении расчетов.

3.1.4 Другие свойства стали, такие как ударная вязкость, предельное относительное удлинение, химический состав и т.д. приводятся в соответствующих нормах, указанных в СН РК EN 1993-1-1.

3.1.5 В случае, если бункер предназначен для заполнения горячими сыпучими материалами, значения прочностных свойств стали должны быть снижены до значений, которые соответствуют максимальным возможным температурам хранимого материала.

3.1.6 Если температура хранимого в бункере материала превышает 100°C, свойства стали следует определять в соответствии со СН РК EN 13084-7.

#### 3.2 Конструкционные стали

3.2.1 Расчетные методы, которые содержатся в СН РК EN 1993-4-1, предназначены для конструкционных сталей, указанных в СН РК EN 1993-1-1, который соответствует европейским и международным стандартам, перечисленным в Таблице 3.1 СН РК EN 1993-4-1.

3.2.2 Механические свойства конструкционных сталей, указанные в СН РК EN 10025 и EN 10149, допускается принимать по СН РК EN 1993-1-1, СН РК EN 1993-1-3 и СН РК EN 1993-1-4.

3.2.3 Допуски на коррозию и износ приведены в Разделе 4 СН РК EN 1993-4-1.

3.2.4 Механические свойства стали при растяжении и сжатии принимаются одинаковыми.

3.2.5 Для сталей, которые рассматриваются в СН РК EN 1993-4-1, расчетное значение модуля упругости Юнга принимается  $E = 210\,000$  МПа, коэффициент поперечной деформации Пуассона –  $\nu = 0,3$ .

#### 3.3 Нержавеющие стали

3.3.1 Механические свойства нержавеющей сталей должны приниматься по СН РК EN 1993-1-4.

3.3.2 Руководящие положения для выбора марок нержавеющей стали в зависимости от особенностей коррозионных и абразивных воздействий следует брать из соответствующих компетентных источников.

3.3.3 Если расчеты включают проверку устойчивости, следует применять соответствующие уменьшенные значения механических свойств нержавеющей стали (см. СН РК EN 1993-1-6).

### **3.4 Специальные легированные стали**

3.4.1 Для нестандартных легированных сталей должны использоваться соответствующие значения механических свойств.

3.4.2 Руководящие положения для выбора марок нестандартных легированных сталей в зависимости от особенностей коррозионных и абразивных воздействий следует брать из соответствующих компетентных источников.

3.4.3 Если расчеты включают проверку устойчивости, следует применять соответствующие уменьшенные значения механических свойств легированных сталей (см. СН РК EN 1993-1-6).

ПРИМЕЧАНИЕ Положения Пунктов 3.3.3 и 3.4.3 говорят о том, что значение модуля упругости нержавеющей и легированных сталей, который влияет на критические напряжения потери устойчивости, может отличаться от модуля упругости обычных конструкционных сталей.

### **3.5 Требования по ударной вязкости**

Требования к ударной вязкости сталей следует определять в соответствии с СН РК EN 1993-1-10.

## **4 ОСНОВЫ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ**

### **4.1 Критические предельные состояния**

#### **4.1.1 Основные положения**

Стальные конструкции и их элементы должны удовлетворять основным проектным требованиям, указанным в Разделе 2 СН РК EN 1993-1-1.

#### **4.1.2 Условие проверки предельных состояний**

Для всех предельных состояний расчет должен обеспечить выполнение условия:

$$S_d < R_d \quad (4.1)$$

где  $S$  и  $R$  – расчетные параметры воздействия и несущей способности.

### **4.1.3 Выносливость и малоцикловая усталость**

4.1.3.1 Элементы конструкций, в которых возникают значительные локальные напряжения от изгиба, должны проверяться по предельным состояниям выносливости и малоцикловой усталости. Методики проверок изложены, соответственно, в СН РК EN 1993-1-6 и СН РК EN 1993-1-7.

4.1.3.2 Для бункеров класса последствий 1 проверки на выносливость и малоцикловую усталость выполнять не следует.

### **4.1.4 Допуски на коррозионный и абразивный износ**

4.1.4.1 Влияние абразивного воздействия от хранимого сыпучего материала на стенки и воронку бункера в течение его срока службы необходимо учесть при назначении расчетной толщины стенки для выполнения расчетов. Это производится путем снижения расчетной толщины стенки по отношению к проектной толщине на величину ожидаемого износа.

4.1.4.2 Скорость абразивного износа зависит от степени защиты стенок бункера посредством футеровки. Для футерованных бункеров следует также задавать допуски на абразивный износ исходя из опыта эксплуатации. Если данная информация отсутствует, следует принять уменьшение толщины стенки во всех точках контакта с сыпучим материалов на величину  $\Delta_{ta} = 2$  мм.

4.1.4.3 Влияние коррозионного износа стенки бункера от воздействия влажного хранимого материала в течение его срока службы необходимо учесть при выполнении расчетов толщины стенки бункера.

4.1.4.4 Конкретные значения допусков на коррозию и истирание, соответствующие условиям эксплуатации бункера и параметрам хранимого материала, должны назначаться на основании соглашения между проектной организацией, заказчиком и соответствующим государственным органом надзора. Для того, чтобы реальные значения уменьшения толщины стенки в процессе эксплуатации не превысили принятые при проектировании, необходимо выполнять соответствующие мероприятия по контролю и обслуживанию.

### **4.1.5 Учет температурных воздействий**

Если в бункере хранятся сыпучие материалы в горячем состоянии, необходимо выполнить расчет напряжений, возникающих в элементах бункера из-за наличия разности температур между участками конструкции бункера, которые находятся в непосредственном контакте с горячим материалом, и охлажденными участками.

## **4.2 Расчет оболочки бункера**

### **4.2.1 Моделирование конструкции оболочки**

4.2.1.1 Моделирование конструкций оболочки должно выполняться в соответствии с требованиями СН РК EN 1993-1-6. Эти требования удовлетворяются при выполнении нижеследующих положений.

4.2.1.2 Модель конструкций оболочки должна включать кольцевые и продольные ребра жесткости, большие отверстия и присоединенные элементы.

4.2.1.3 Конструкция оболочки и бункера должна соответствовать проектным предпосылкам относительно нагрузок, граничных условий и т.д., и обеспечивать их соблюдение.

### **4.2.2 Методы расчета**

#### **4.2.2.1 Общие положения**

4.2.2.1.1 Расчет оболочки бункера должен выполняться в соответствии с требованиями СН РК EN 1993-1-6.

4.2.2.1.2 К бункеру определенного класса последствий допускается применять методы расчета для более высокого класса.

#### **4.2.2.2 Класс последствий 3**

Для бункеров класса последствий 3 (см. Пункт 2.3) внутренние силы и моменты должны определяться посредством достоверного численного анализа (расчет оболочки методом конечных элементов) как определено в СН РК EN 1993-1-6. Прочность при пластическом разрушении под действием основных напряжений может быть использована для проверки предельного состояния пластичности (LS1), как это определено в СН РК EN 1993-1-6.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Под пластическим разрушением понимается появление расчетных приведенных напряжений, превышающих предел текучести по всему сечению стенки в достаточном количестве точек (подробнее см. Пункт 4.2.2 СН РК EN 1993-1-6).

#### **4.2.2.3 Класс последствий 2**

4.2.2.3.1 Бункера класса последствий 2 в условиях осесимметричных воздействий и условий опирания могут быть рассчитаны с использованием следующих методов:

а) Мембранная (безмоментная) теория расчета оболочек может применяться для определения основных напряжений. Формулы теории упругого изгиба могут использоваться для определения всех локальных напряжений от изгиба.

ПРИМЕЧАНИЕ – Основными являются напряжения, которые необходимы для равновесия конструкции и внешней нагрузки. Формулы для определения внутренних силовых факторов по упругой теории изгиба приводятся в приложении В СН РК EN 1993-1-6 и справочной литературе.

б) Достоверный численный анализ (в том числе геометрически и физически нелинейные расчеты оболочки методом конечных элементов) выполняется согласно требованиям СН РК EN 1993-1-6.

ПРИМЕЧАНИЕ Численный анализ считается достоверным, если выполнена прямая или косвенная проверка полученных с его помощью результатов.

4.2.2.3.2 Если расчетная нагрузка от хранимых твердых материалов не может рассматриваться как осесимметричная, должен быть применен достоверный численный анализ.

4.2.2.3.3 Несмотря на условие Пункта 4.2.2.3.2, если нагрузка по окружности оболочки изменяется плавно, вызывая только общий изгиб оболочки в целом (т. е. в виде первой гармоники), для определения основных напряжений можно применить мембранную теорию расчета оболочек.

4.2.2.3.4 Для расчета усилий от ветровой нагрузки, осадки фундамента и плавных изменений местной нагрузки (см. положения СН РК EN 1991-4 для тонкостенных бункеров) можно использовать полумембранную или мембранную теорию расчета оболочек.

4.2.2.3.5 Если для определения основных напряжений в оболочке применяется мембранная теория, то:

а) Принимается, что дискретные кольцевые ребра, прикрепленные к изотропной цилиндрической оболочке бункера, находящегося под действием внутреннего давления, имеют расчетную площадь, которая включает длину оболочки выше и ниже ребра  $0,78\sqrt{rt}$ , за исключением кольца в переходном соединении.

б) Воздействие локальных напряжений от изгиба в местах, где нарушена непрерывность поверхности оболочки или ее опирания, должно оцениваться отдельно.

4.2.2.3.6 Если на изотропной стенке оболочки устанавливаются вертикальные ребра жесткости, то напряжения в ребрах жесткости и стенке оболочки определяются с учетом совместной работы стенки и ребер, т.е. включая площадь поперечного сечения ребер (smeared – «размазанные» ребра) в расчетную площадь оболочки. Для этого расстояние между ребрами жесткости должно составлять не более  $5\sqrt{rt}$ , где  $r$  и  $t$  – радиус и толщина оболочки, соответственно.

4.2.2.3.7 Если учитывается общая площадь стенки и ребер жесткости (по Пункту 4.2.2.3.6), напряжения в ребрах жесткости должны определяться с учетом их совместности деформаций со стенкой, включая действие на ребра мембранных окружных напряжений.

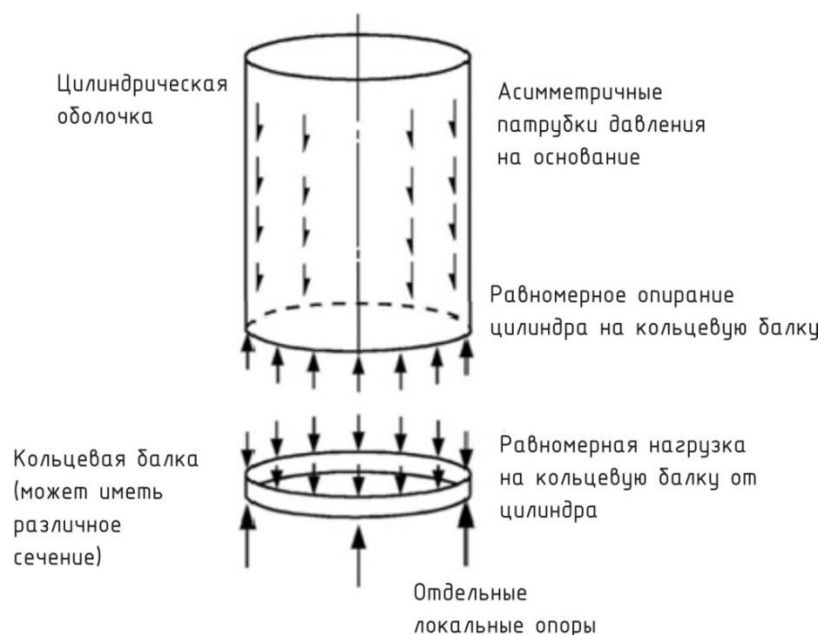
4.2.2.3.8 Если кольцевая балка установлена на дискретные опоры, для определения основных напряжений можно применить мембранную теорию; при этом необходимо соблюдать требования Пунктов 5.4 и 8.1.4 СН РК EN 1993-4-1, касающиеся вычисления дополнительных не осесимметричных основных напряжений.



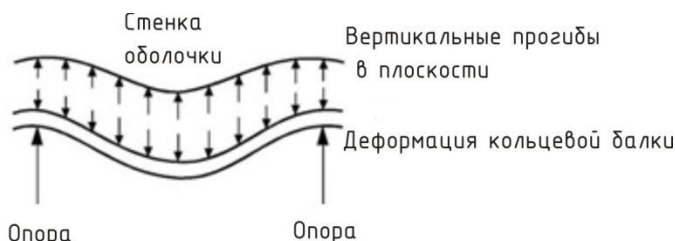
4.2.2.3.9 Если кольцевая балка установлена на дискретные опоры, должна учитываться совместность деформаций кольцевой балки и смежных сегментов оболочки; см. Рисунок 4.1. Особое внимание следует обратить на совместность осевых деформаций, так как вызванные этим напряжения распространяются высоко по оболочке.

Если используется такая кольцевая балка, необходимо учесть эксцентриситет центра тяжести кольцевой балки и центра сдвига относительно стенки оболочки и центральной оси опоры; см. Пункты 8.1.4 и 8.2.3 СН РК EN 1993-4-1.

а)



б)



а – обычная расчетная модель бункеров на колоннах;

б – деформации цилиндра, вызванные совместностью с деформациями балки

**Рисунок 4.1 – Совместность деформаций кольцевой балки и оболочки**

4.2.2.3.10 Если бункер подвергается воздействию любого вида несимметричной нагрузки от сыпучих материалов (местные боковые нагрузки, выгрузка с эксцентриситетом, несимметричное заполнение и т. п.), расчетная модель конструкции должна позволять определить передачу мембранного сдвига по стенке и между стенкой и кольцевыми ребрами. Передача сдвига между частями стенки и кольцевыми ребрами имеет особое значение в конструкциях, где используются болты и другие дискретные соединительные элементы.

4.2.2.3.11 Если кольцевая балка используется для передачи нагрузки от стенки бункера на дискретные опоры, или элементы конструкции соединяются на болтах или с

помощью других отдельных деталей, необходимо выполнить расчет на усилия сдвига между отдельными участками кольцевой балки. Усилия сдвига возникают вследствие изгиба оболочки и кольцевой балки.

4.2.2.3.12 Жесткость сыпучего материала не оказывает влияние на снижение деформаций стенок и повышение устойчивости оболочки, за исключением случаев использования результатов обоснованного анализа в условиях, когда имеется доказательство неподвижности сыпучего материала во время выгрузки.

#### **4.2.2.4 Класс последствий 1**

Бункеры класса последствий 1 могут рассчитываться по мембранной теории оболочек для определения основных напряжений, при этом для описания эффектов локального изгиба и несимметричных воздействий следует использовать коэффициенты и упрощенные формулы.

#### **4.2.3 Геометрические несовершенства**

4.2.3.1 Для геометрических несовершенств оболочки должны выполняться ограничения на форму и размеры, установленные в СН РК EN 1993-1-6.

4.2.3.2 Для бункеров классов последствий 2 и 3 геометрические несовершенства должны измеряться после постройки, чтобы обеспечить достижение предполагаемого уровня качества допусков на изготовление.

4.2.3.3 Геометрические несовершенства оболочки не следует в явном виде учитывать при определении внутренних сил и моментов. Геометрические несовершенства оболочки учитываются в случае использования таких численных методов расчета, как геометрически нелинейный расчет с учетом несовершенств (GNIA) или геометрически и физически нелинейный расчет с учетом несовершенств (GMNIA), поскольку эти методы позволяют оценить критические нагрузки для оболочки в целом. Указания по использованию этих методов приводятся в СН РК EN 1993-1-6.

#### **4.3 Расчет коробчатых конструкций прямоугольного бункера**

##### **4.3.1 Моделирование конструкции короба**

4.3.1.1 Модель конструкции короба должна отвечать требованиям СН РК EN 1993-1-7. Эти требования удовлетворяются при выполнении следующих положений.

4.3.1.2 Модель конструкции короба должна включать все элементы жесткости, большие отверстия и присоединенные элементы.

4.3.1.3 Конструкция бункера должны обеспечивать осуществление граничных условий, принятых в расчете.

4.3.1.4 Узлы соединения элементов короба должны соответствовать расчетной модели по прочности и жесткости.

4.3.1.5 Каждую панель короба можно рассчитывать как отдельную пластинку при условии, что:

- а) учтены силы и моменты от примыкающих панелей;
- б) учтена изгибная жесткость примыкающих панелей.

4.3.1.6 Если на изотропной плоской стенке устанавливаются горизонтальные ребра жесткости, то напряжения в ребрах жесткости и стенке оболочки можно определить с учетом совместной работы стенки и ребер (как для ортотропной плиты), т.е. включая площадь поперечного сечения ребер в расчетную площадь оболочки. Для этого расстояние между ребрами жесткости должно составлять не более  $40t$ , где  $r$  и  $t$  – радиус и толщина стенки, соответственно.

4.3.1.7 Если учитывается совместная работа стенки и горизонтальных ребер жесткости, напряжения в ребрах жесткости должны определяться с учетом эксцентриситета ребра относительно стенки и напряжений в стенке, перпендикулярных ребру.

4.3.1.8 Расчетная ширина листа с каждой стороны ребра жесткости, которая включается в общее расчетное сечение ребра, не должна превышать значение  $15t$ , где  $t$  – толщина примыкающего листа.

#### 4.3.2 Геометрические несовершенства

4.3.2.1 Для геометрических несовершенств элементов короба должны выполняться ограничения на форму и размеры, установленные в СН РК EN 1993-1-7.

4.3.2.2 Геометрические несовершенства элементов короба не следует в явном виде учитывать при определении внутренних сил и моментов.

#### 4.3.3 Методы расчета

4.3.3.1 Определение внутренних усилий в плоских элементах стенки короба можно выполнить следующими способами:

- а) метод статического равновесия для мембранных сил и балочная теория для изгиба;
- б) расчет на основе линейной теории изгиба и растяжения пластин;

ПРИМЕЧАНИЕ Расчет на основе линейной теории изгиба пластин от действия поперечной нагрузки допускается использовать, если сжимающие нормальные и касательные напряжения от сил, действующих в плоскости стенки, не превышают 10 % от несущей способности.

- в) расчет на основе нелинейной теории изгиба и растяжения пластин.

4.3.3.2 Расчет бункеров класса последствий 1 следует выполнять методом (а) из Пункта 4.3.3.1.

4.3.3.3 Если расчетные нагрузки симметричны относительно каждого плоского элемента, расчет бункера класса последствий 2 следует выполнять методом (а) из Пункт 4.3.3.1.

4.3.3.4 Если расчетные нагрузки несимметричны, расчет бункера класса последствий 2 следует выполнять методами б) или в) из Пункта 4.3.3.1.

4.3.3.5 Расчет внутренних сил и моментов в бункерах класса последствий 3 следует выполнять методами б) или в) из Пункта 4.3.3.1.

#### 4.4 Эквивалентные ортотропные свойства обшивки из гофрированного листа

4.4.1 Расчет обшивки из гофрированного листа следует выполнять как эквивалентной однородной ортотропной стенки.

4.4.2 Характеристики гофрированного листа, которые определяться в данном разделе, можно использовать для расчета прочности и устойчивости конструкций при условии, что профиль гофра имеет арктангенциальную или синусоидальную конфигурацию. Характеристики листов с другим профилем гофра необходимо определять другими способами на основе общих принципов.

4.4.3 Жесткостные характеристики гофрированной листовой обшивки следует определять в системе координат  $x, y$ , при этом ось  $y$  проходит вдоль складок гофра, а ось  $x$  располагается перпендикулярно складкам гофра. Гофрирование следует описывать нижеследующими параметрами независимо от конкретных размеров гофрированного профиля (см. Рисунок 4.2):

$d$  – расстояние от гребня до гребня;

$l$  – шаг волны гофра;

$R_\phi$  – локальный радиус гребня или впадины.

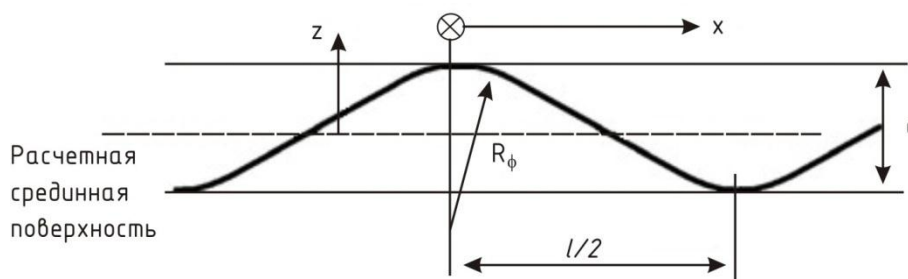


Рисунок 4.2 – Профиль гофра и геометрические параметры

4.4.4 Все жесткостные характеристики гофра являются однонаправленными, т.е. они не влияют на характеристики относительно других направлений (коэффициент Пуассона не учитывается).

4.4.5 Эквивалентные мембранные жесткостные характеристики, т.е. жесткости при растяжении, определяются по формулам:

$$C_x = Et_x = E \frac{2t^3}{3d^2} \quad (4.2)$$

$$C_y = Et_y = Et \left( 1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2} \right) \quad (4.3)$$

$$C_{xy} = Gt_{xy} = \frac{Gt}{\left( 1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2} \right)} \quad (4.4)$$

где  $t_x$  – эквивалентная толщина для ортотропных мембранных сил, перпендикулярных гофрам;

$t_y$  – эквивалентная толщина для ортотропных мембранных сил, параллельных гофру;

$t_{xy}$  – эквивалентная толщина для ортотропных мембранных сил сдвига.

ПРИМЕЧАНИЕ «Ортотропный» означает, что усилие действует в эквивалентной ортотропной оболочке, а не в действительном гофрированном листе.

4.4.6 Эквивалентные свойства при изгибе, т.е. изгибные жесткости, определяются для моментов, вызывающих изгиб данным направлением по формулам:

$$D_x = EI_x \text{ на единицу ширины} = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2}\right)} \quad (4.5)$$

$$D_y = EI_y \text{ на единицу ширины} = 0.13Et d^2 \quad (4.6)$$

$$D_{xy} = GI_{xy} \text{ на единицу ширины} = \frac{Gt^3}{12} \left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2}\right) \quad (4.7)$$

где  $I_x$  – эквивалентный момент инерции сечения на единицу ширины для изгиба в плоскости, перпендикулярной гофру;

$I_y$  – эквивалентный момент инерции сечения на единицу ширины для изгиба в плоскости, параллельной гофру;

$I_{xy}$  – эквивалентный момент инерции сечения на единицу ширины для кручения.

ПРИМЕЧАНИЕ Обозначение изгибающих моментов  $x$ ,  $y$  показывает направление искривления пластины, т. е. оно противоположно обозначению, принятому для балок (для балок моменты указываются относительно оси, перпендикулярной плоскости изгиба). Изгиб, параллельный гофрам, связан с изгибной жесткостью гофрированного профиля, которая является основной причиной его использования.

4.4.7 В цилиндрических бункерах с расположением гофра по окружности направления осей координат  $x$  и  $y$  в приведенных выше формулах должны быть заменены на, соответственно, меридиональное  $\phi$  и окружное  $\theta$  направления (см. Рисунок 1.3 (а)). Если гофр расположен в меридиональной плоскости, направления осей  $x$  и  $y$  в приведенных выше выражениях должны приниматься как, соответственно, окружное  $\theta$  и меридиональное  $\phi$  направления.

4.4.8 Свойства сдвига должны рассматриваться как независимые от ориентации гофра. Значение модуля упругости при сдвиге

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 80800 \text{ МПа}$$

4.4.9 В прямоугольных бункерах с горизонтальным расположением гофра направления осей координат  $x$  и  $y$  в приведенных выше выражениях должны приниматься, соответственно, как локальное осевое  $x$  и горизонтальное  $y$  направления (см. Рисунок 1.4 (а)). Если гофры расположены вертикально или меридионально, направления  $x$  и  $y$  в

приведенных выше выражениях должны быть приняты для реальной конструкции как горизонтальное  $y$  и осевое  $x$  направления, соответственно.

## **5 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТЕНОК ЦИЛИНДРА**

### **5.1. Основы проектирования**

#### **5.1.1 Общие положения**

5.1.1.1 Конструктивные размеры стальных цилиндрических стенок бункера следует назначать такими, чтобы выполнялись основные проектные требования критических предельных состояний по несущей способности, как это указано в Разделе 2.

5.1.1.2 Оценка надежности цилиндрической оболочки должна выполняться с использованием требований СН РК EN 1993-1-6.

#### **5.1.2 Проектирование стенки бункера**

5.1.2.1 При выполнении расчетов по предельным состояниям несущая способность цилиндрической стенки бункера должна быть проверена по следующим критериям, указанным в Разделе 4 СН РК EN 1993-1-6:

- общая устойчивость и статическое равновесие;

LS1: пластическое предельное состояние

- сопротивление разрушению, разрыву, механизму пластического разрушения (чрезмерных пластических деформаций по толщине стенки) при действии внутреннего давления или других воздействий;

- несущая способность узлов (соединений);

LS2: циклическая пластичность (малоцикловая усталость)

- сопротивление локальным пластическим деформациям от изгиба;

- локальные эффекты;

LS3: потеря устойчивости

- сопротивление потере устойчивости при осевом сжатии;

- сопротивление потере устойчивости от наружного давления (ветер или вакуум);

- сопротивление потере устойчивости при сдвиге от действия касательных напряжений в результате несимметричных воздействий;

- сопротивление потере устойчивости при сдвиге от действия касательных напряжений возле примыкающих колонн;

- сопротивление местным разрушениям на участках выше опор;

- сопротивление локальным искривлениям возле отверстий;

- сопротивление локальной потере устойчивости в результате несимметричных воздействий;

LS4: усталость

- сопротивление усталостным разрушениям.

5.1.2.2 Стенка цилиндрической оболочки быть проверена на соответствие требованиям СН РК EN 1993-1-6, за исключением тех случаев, когда это соответствие обеспечивается выполнением условий, указанных в Пунктах 5.3 – 5.6.

5.1.2.3 В бункерах класса последствий 1 проверку несущей способности по предельным состояниям циклической пластичности и усталости допускается не выполнять.

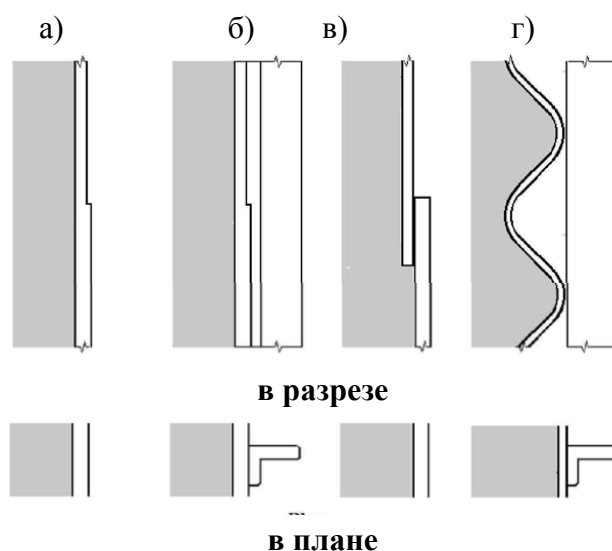
## 5.2 Различия между формами цилиндрических оболочек

5.2.1 Стенка оболочки, изготовленная из плоских прокатных стальных листов, называется «изотропной» (см. Рисунок 5.1), ее несущая способность определяется согласно Пункту 5.3.2.

5.2.2 Стенка оболочки, изготовленная из гофрированных стальных листов с расположением гофров вдоль окружности бункера, называется «горизонтально гофрированной» (см. Рисунок 5.1), ее несущая способность должна определяться согласно Пункту 5.3.4. Стенка оболочки, изготовленная из гофрированных стальных листов с расположением гофров вдоль меридиана бункера, называется «вертикально гофрированной» (см. Рисунок 5.1), ее несущая способность должна определяться согласно Пункту 5.3.5.

5.2.3 Стенка оболочки с наружными ребрами жесткости называется «с наружными ребрами» независимо от шага ребер, ее несущая способность должна определяться согласно Пункту 5.3.3.

5.2.4 Стенка оболочки, листы которой соединяются внахлестку, называется «с соединением внахлестку», ее несущая способность должна определяться согласно Пункту 5.3.2.



а) – изотропная, б) – с наружными ребрами жесткости, в) – с соединением внахлестку; г) – горизонтально гофрированная

**Рисунок 5.1 – Виды цилиндрических оболочек**

### **5.3 Несущая способность стенок цилиндрических бункера**

#### **5.3.1 Общие положения**

Цилиндрическая оболочка должна соответствовать требованиям СН РК EN 1993-1-6. Эти требования выполняются при использовании указанных ниже в этом разделе критериев оценки несущей способности.

#### **5.3.2 Изотропные стенки на сварных или болтовых соединениях**

##### **5.3.2.1 Общие положения**

5.3.2.1.1 Поперечное сечение стенки оболочки должно иметь размеры, достаточные для предотвращения разрушения вследствие разрыва или пластических деформаций по всей толщине стенки.

5.3.2.1.2 Размеры соединений должны выбираться таким образом, чтобы обеспечить несущую способность на разрыв по сечению «нетто» при расчете по пределу прочности стали (предельной прочности при растяжении).

5.3.2.1.3 При расчете прочности соединений на разрыв следует учитывать наличие эксцентриситета в нахлесточных соединениях.

5.3.2.1.4 Размеры стенки оболочки должны обеспечивать достаточную несущую способность для предотвращения потери устойчивости.

##### **5.3.2.2 Определение равнодействующих расчетных напряжений**

5.3.2.2.1 Равнодействующие расчетных напряжений от действия внутреннего давления, сил трения и других расчетных нагрузок должны определяться в каждой точке оболочки для различных значений внутреннего давления и сил трения.

**ПРИМЕЧАНИЕ 1** Каждая совокупность равнодействующих расчетных напряжений от сыпучего материала в бункере должна определяться для одного набора значений параметров, характеризующих свойства хранимого сыпучего твердого материала. Согласно Пункту 3.2 СН РК EN 1991-4 расчет давлений в бункере выполняется для пяти наборов значений параметров. К числу параметров относятся: коэффициент внутреннего трения, коэффициент бокового давления, коэффициент трения о стенку бункера. В каждом из наборов параметры могут принимать верхнее или нижнее значение в зависимости от того, какой вид давления или трения увеличивается вследствие этого.

**ПРИМЕЧАНИЕ 2** Если равнодействующие расчетных напряжений определяются для проверки несущей способности по пластическому предельному состоянию, необходимо выбирать такие значения параметров сыпучего материала, которые дают максимальное внутреннее давление в условиях выгрузки и с учетом местных боковых нагрузок согласно Разделу 5 СН РК EN 1991-4.

**ПРИМЕЧАНИЕ 3** Если равнодействующие расчетные напряжения определяются для проверки несущей способности по предельному состоянию потери устойчивости, необходимо выбирать такие значения параметров сыпучего материала, которые дают максимальное осевое сжатие в условиях выгрузки и с учетом местных боковых нагрузок согласно Пункту 3.2 СН РК EN



1991-4. Тем не менее, если внутреннее давление приводит к повышению несущей способности при потере устойчивости, необходимо учитывать только давление от заполнения вместе с осевыми силами от выгрузки. Это вызвано тем, что благоприятное влияние давления выгрузки может снижаться локально до значений давления от заполнения, даже если осевые силы сжатия определяются для условий выгрузки.

5.3.2.2.2 Если для определения расчетных напряжений в стенке оболочки используется мембранная (безмоментная) теория оболочек, несущая способность оболочки в каждой точке должна быть достаточной для восприятия наибольших давлений.

5.3.2.2.3 Поскольку давление с высокой степенью локализации вызывает меньшие равнодействующие мембранные напряжения, чем определяемые по мембранной теории (для равномерного распределения напряжений), можно использовать приложение А СН РК EN 1993-1-6 для определения мембранных усилий и достижения более экономичного проектного решения. В Пункте 4.2 СН РК EN 1993-1-6 определены требования к следующим методам расчета оболочек: расчет по напряжениям, непосредственный расчет, численный компьютерный расчет.

5.3.2.2.4 Если расчет выполняется по мембранной теории, полученное двумерное поле равнодействующих напряжений  $n_{x,Ed}$ ,  $n_{\theta,Ed}$  и  $n_{x\theta,Ed}$  характеризуется расчетными эквивалентными (приведенными) напряжениями:

$$\sigma_{e,Ed} = \frac{1}{t} \sqrt{n_{x,Ed}^2 + n_{\theta,Ed}^2 - n_{x,Ed}n_{\theta,Ed} + 3n_{x\theta,Ed}^2} \quad (5.1)$$

5.3.2.2.5 Если расчет выполняется по моментной упругой теории оболочек (LA), полученное двумерное поле равнодействующих основных напряжений  $n_{x,Ed}$ ,  $n_{\theta,Ed}$ ,  $n_{x\theta,Ed}$ ,  $m_{\theta,Ed}$ ,  $m_{x\theta,Ed}$  может быть преобразовано в фиктивные компоненты равнодействующих напряжений:

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{n_{x,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x,Ed}}{t^2/4}, \quad \sigma_{\theta,Ed} = \frac{n_{\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{\theta,Ed}}{t^2/4}, \quad (5.2)$$

$$\tau_{x\theta,Ed} = \frac{n_{x\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x\theta,Ed}}{t^2/4}, \quad (5.3)$$

и в эквивалентные (приведенные) расчетные напряжения фон Мизеса:

$$\sigma_{e,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed}\sigma_{\theta,Ed} + 3\tau_{x\theta,Ed}^2} \quad (5.4)$$

ПРИМЕЧАНИЕ Приведенные выше выражения (критерий текучести Илюшина) с запасом дают упрощенные эквивалентные напряжения для использования при проектировании.

### 5.3.2.3 Предельное состояние пластичности

5.3.2.3.1 Проверка несущей способности пластин осуществляется путем сравнения равнодействующих мембранных напряжений с эквивалентным расчетным сопротивлением, как для сварных, так и болтовых конструкций  $f_{e,Rd}$ , определяемым по формуле:

$$f_{e,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.5)$$

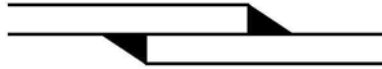
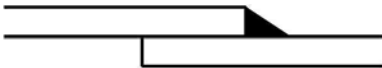
5.3.2.3.2 Несущая способность нахлесточных соединений сварных конструкций должна проверяться по фиктивному прочностному критерию:

$$f_{e,Rd} = \frac{j f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.6)$$

где  $j$  – коэффициент эффективности соединения.

5.3.2.3.3 Коэффициент эффективности соединения с полномерными непрерывными угловыми швами должен быть принят как  $j = j_i$ . Нахлесточное соединение с односторонними угловыми швами не должно применяться, если более 20 % значения  $\sigma_{e,Ed}$  в выражении 5.4 дают изгибающие моменты. Рекомендуемые значения  $j_i$  для соединений различного типа находятся в приведенной ниже таблице (согласно НП.2.10).

**Коэффициент эффективности нахлесточных соединений  $j$**

Тип соединения	Эскиз	Значение $j_i$
Двухстороннее сварное нахлесточное соединение		$j_1 = 1.0$
Одностороннее сварное нахлесточное соединение		$j_2 = 0.35$

5.3.2.3.4 В конструкциях с болтовыми соединениями несущая способность соединения по сечению нетто должна определяться в терминах равнодействующих мембранных напряжений следующим образом:

– несущая способность в меридиональном направлении:

$$n_{x,Rd} = f_u t / \gamma_{M2} \quad (5.7)$$

– несущая способность в окружном направлении:

$$n_{\theta,Rd} = f_u t / \gamma_{M2} \quad (5.8)$$

– несущая способность по касательным напряжениям:

$$n_{x\theta,Rd} = 0,57 f_y t / \gamma_{M0} \quad (5.9)$$

где  $f_u$  – предел прочности (временное сопротивление);

$f_y$  – предел текучести;

$\gamma_{M0} = 1,0$  и  $\gamma_{M2} = 1,25$  – частные коэффициенты (см. Таблицу 2.2).

5.3.2.3.5 Расчет болтовых соединений должно выполняться в соответствии с требованиями СН РК EN 1993-1-8 или СН РК EN 1993-1-3. Влияние отверстий должно учитываться согласно СН РК EN 1993-1-1 с использованием соответствующих требований в зависимости от напряженного состояния – растяжения, сжатия или сдвига.

5.3.2.3.6 Несущая способность при наличии локальных нагрузок от присоединенных деталей должна определяться по Пункту 5.4.6.

5.3.2.3.7 Во всех точках конструкции расчетные напряжения должны удовлетворять следующему условию:

$$\sigma_{e,Ed} \leq f_{e,Rd} \quad (5.10)$$

5.3.2.3.8 Во всех точках конструкции равнодействующие расчетных напряжений должны удовлетворять следующим условиям:

$$n_{x,Ed} \leq n_{x,Rd} \quad (5.11)$$

$$n_{\theta,Ed} \leq n_{\theta,Rd} \quad (5.12)$$

$$n_{x\theta,Ed} \leq n_{x\theta,Rd} \quad (5.13)$$

#### 5.3.2.4 Потеря устойчивости при осевом сжатии

5.3.2.4.1 При наличии осевого сжатия расчетная несущая способность по потере устойчивости должна определяться во всех точках оболочки. При этом должны использоваться значения принятого класса качества допусков на изготовление конструкций, интенсивности гарантированного внутреннего давления  $p$  и равномерно распределенных по окружности сжимающих напряжений. При расчете необходимо рассмотреть все участки стенки оболочки. При расчетах на устойчивость сжимающие мембранные силы должны приниматься со знаком «+» для предотвращения получения отрицательных значений расчетных величин.

5.3.2.4.2 Классы качества допусков на изготовление строительных конструкций должны приниматься в соответствии с Таблицей 5.1.

**Таблица 5.1 – Классы качества допусков на изготовление**

Качество допусков на изготовление строительных	Параметр качества, Q	Ограничения по классу надежности
Стандартное	16	Обязателен, если бункер рассчитан согласно правилам для класса последствий 1
Высокое	25	
Отличное	40	Допускается, только если бункер рассчитан согласно правилам для класса последствий 3

ПРИМЕЧАНИЕ Требования к значениям допусков для различных классов качества допуска на изготовление приведены в Пункте 3.3 СН РК EN 1993-1-6 и СН РК EN 1090.

5.3.2.4.3 Репрезентативное значение амплитуды несовершенства  $w_{ok}$  следует определять по формуле:

$$w_{ok} = \frac{t}{Q} \sqrt{\frac{\bar{r}}{t}} \quad (5.14)$$

5.3.2.4.4 Упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства  $\alpha_0$  в условиях отсутствия давления следует определять по формуле:

$$\alpha_0 = \frac{0,62}{1 + 1,91\psi \left(\frac{w_{ok}}{t}\right)^{1,44}} \quad (5.15)$$

В этой формуле параметр неравномерности напряжений  $\psi$  равен 1 в случае равномерного сжатия по окружности, в случае неравномерного сжатия значение параметра следует принимать по Пункту 5.3.2.4.8.

5.3.2.4.5 Если в бункере имеется внутреннее давление, упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства  $\alpha$  следует принимать как наименьшее из значений двух величин:  $\alpha_{pe}$  и  $\alpha_{pp}$ , которые определяются по значениям локального внутреннего давления  $p$ . Для бункеров, рассчитанных согласно правилам для класса последствий 1, значение упругого понижающего коэффициент  $\alpha$  не должно превышать значение  $\alpha_0$ .

5.3.2.4.6 Упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства и давления  $\alpha_{pe}$  следует определять по наименьшему гарантированному значению локального внутреннего давления. Внутреннее давление принимается в данной расчетной точке и сопровождается действием осевого сжатия.

$$\alpha_{pe} = \alpha_0 + (1 - \alpha_0) \left( \frac{\bar{p}_s}{\bar{p}_s + \frac{0,3}{\sqrt{\alpha_0}}} \right) \quad (5.16)$$

где  $\bar{p}_s$  – минимальное достоверное расчетное значение условного локального внутреннего давления (см. Раздел 5 СН РК EN 1991-4):

$$\bar{p}_s = \frac{p_s r}{t \sigma_{x,Rcr}} \quad (5.17)$$

$\sigma_{x,Rcr}$  – критические напряжения потери устойчивости в упругой стадии (см. Формулу 5.28).

5.3.2.4.7 Пластический понижающий коэффициент при наличии несовершенства  $\alpha_{pp}$  определяется по наибольшему локальному давлению в рассматриваемой точке и сопровождается действием осевого сжатия:

$$\alpha_{pp} = \left\{ 1 - \left( \frac{\bar{p}_g}{\bar{\lambda}_x^2} \right)^2 \right\} \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + s^{3/2}} \right] \left[ \frac{s^2 + 1,21 \bar{\lambda}_x^2}{s(s+1)} \right] \quad (5.18)$$

где

$$\bar{p}_g = \frac{p_g}{\sigma_{x,Rcr}} \cdot \frac{r}{t} \quad (5.19)$$

$$s = \left( \frac{1}{400} \right) \left( \frac{r}{t} \right) \quad (5.20)$$

$$\bar{\lambda}_x^2 = \frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}} \quad (5.21)$$

где  $p_g$  – наибольшее расчетное значение локального внутреннего давления (см. Раздел 5 СН РК EN 1991-4).

5.3.2.4.8 Влияние неравномерности осевых напряжений сжатия по окружности следует учитывать параметром неравномерности напряжений  $\psi$ , который следует

определять по линейному распределению упругих напряжений, возникающих от осевых сжимающих напряжений. Распределение осевых мембранных сжимающих напряжений на заданном уровне в окружном направлении следует преобразовывать в соответствии с Рисунком 5.2. Значение расчетных осевых мембранных сжимающих напряжений  $\sigma_{x,Ed}$  в наиболее напряженной точке с заданной осевой координатой обозначается как  $\sigma_{x0,Ed}$ .

Значение расчетных осевых сжимающих мембранных напряжений во второй точке с той же осевой вертикальной координатой, отстоящей от первой точки на расстояние по окружности

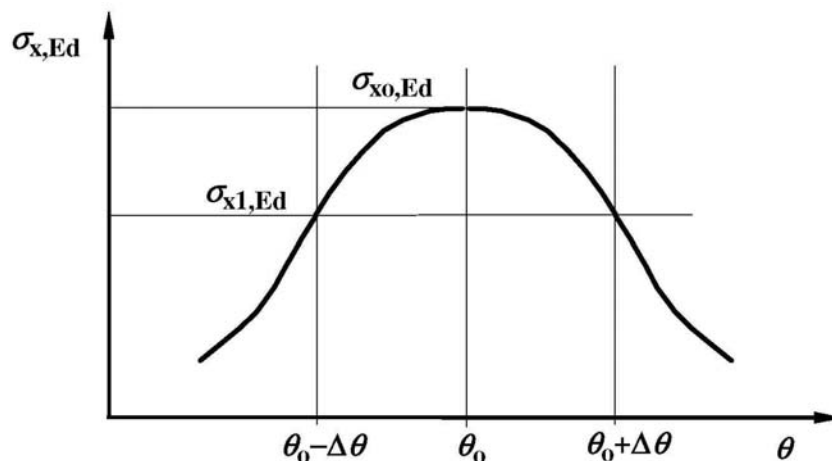
$$y = r\Delta\theta = 4\sqrt{rt} \quad (5.22)$$

следует принимать как  $\sigma_{x1,Ed}$

5.3.2.4.9 Если отношение напряжений

$$s = \left( \frac{\sigma_{x1,Ed}}{\sigma_{x0,Ed}} \right) \quad (5.23)$$

находится в диапазоне  $0,3 < s < 1,0$ , приведенная выше формула для определения положения второй точки является верной. Если значение  $s$  находится за пределами указанного диапазона, следует принять другое значение  $r\Delta\theta$  так, чтобы  $s \approx 0,5$ . Дальнейшие вычисления проводятся для полученной пары значений  $s$  и  $\Delta\theta$ .



**Рисунок 5.2 – Идеализация распределения локальных осевых равнодействующих мембранных напряжений в окружном направлении**

5.3.2.4.10 Эквивалентная гармоника  $j$  распределения напряжений определяется по формуле:

$$j = 0,25 \sqrt{\frac{r}{t}} \cdot \arccos \left( \frac{\sigma_{x1,Ed}}{\sigma_{x0,Ed}} \right) \quad (5.24)$$

а параметр неравномерности напряжений  $\psi$  определяется по формуле:

$$\psi = \frac{1 - b_1 j}{1 + b_2 j} \quad (5.25)$$

где

$$b_1 = 0,5 \sqrt{\frac{r}{t}} \quad (5.26)$$

$$b_2 = \frac{(1 - b_1)}{\psi_b} - 1 \quad (5.27)$$

где  $\psi_b$  – значение параметра неравномерности напряжений в условиях общего изгиба,  $\psi_b = 0,4$  (согласно НП.2.11).

5.3.2.4.11 Значение эквивалентной гармоник  $j$ , при которой несовершенства не вызывают снижения устойчивости оболочки по сравнению со случаем равномерного сжатия, определяется как  $j_\infty = 1/b_1$ . Если  $j > j_\infty$ , то следует принимать  $j = j_\infty$ .

5.3.2.4.12 При использовании горизонтальных нахлесточных соединений возникает эксцентриситет осевых вертикальных сил в узле соединения листов. В этом случае значение  $\alpha$ , определяемое по Пунктам 5.3.2.4.4 – 5.3.2.4.7, должно быть уменьшено до  $\alpha_L$ , если эксцентриситет срединной поверхности пластин превышает  $k_1 t$ , а изменение толщины листов в месте соединения не превышает  $k_2 t$ , где  $t$  – толщина более тонкого листа в соединении ( $k_1 = 0,5$ ,  $k_2 = 0,25$ , согласно НП.2.12). Если эксцентриситет меньше этого значения или разность толщин больше приведенного выше значения, значение  $\alpha$  уменьшать не следует.  $\alpha_L = 0,7\alpha$  (согласно НП.2.12), где вместо  $\alpha$  подставляются  $\alpha_0$ , и  $\alpha_{pe}$  или  $\alpha_{pp}$ .

**ПРИМЕЧАНИЕ** Критические напряжения потери устойчивости снижаются только тогда, когда нижний лист в нахлесточном соединении не имеет достаточной толщины, чтобы предотвратить образование участка потери устойчивости в верхнем более тонком листе, когда несовершенство имеет место непосредственно над соединением.

5.3.2.4.13 Критические напряжения потери устойчивости изотропной стенки определяются по формуле:

$$\sigma_{x,Rcr} = \frac{E}{\sqrt{3(1 - \nu^2)}} \cdot \frac{t}{r} = 0,605E \frac{t}{r} \quad (5.28)$$

5.3.2.4.14 Характеристическое значение критических напряжений потери устойчивости определяется с помощью соответствующего значения  $\alpha$ , указанного в Пунктах 5.3.2.4.4 – 5.3.2.4.8, по формуле:

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x f_y \quad (5.29)$$

**ПРИМЕЧАНИЕ** Специальные обозначения  $\sigma_{Rk}$  и  $\sigma_{Rd}$ , которые используются для характеристического и расчетного значений критических напряжений потери устойчивости, соответствуют требованиям Пункта 8.2 СН РК EN 1993-1-6 для конструкций оболочек и отличаются от обозначений Пункта 1.6 СН РК EN 1993-1-1.

5.3.2.4.15 Коэффициент снижения устойчивости  $\chi_x$  должен определяться в зависимости относительной гибкости оболочки  $\bar{\lambda}_x$  по следующим формулам:

$$\chi_x = 1 \text{ если } \bar{\lambda}_x \leq \bar{\lambda}_0 \quad (5.30)$$

$$\chi_x = 1 - \beta \left( \frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta \text{ если } \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_p \quad (5.31)$$

$$\chi_x = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_x^2} \text{ если } \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}_x \quad (5.32)$$

где

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}}} \quad (5.33)$$

$$\bar{\lambda}_0 = 0.2 \quad (5.34)$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} \quad (5.35)$$

$\alpha$  – выбирается как величина  $\alpha_0$ ,  $\alpha_{pe}$ ,  $\alpha_{pp}$  или  $\alpha_L$ , соответственно.

$\beta = 0,6$ ;  $\eta = 1,0$  (согласно НП.2.13).

5.3.2.4.16 Расчетные мембранные напряжения при потере устойчивости определяется по формуле:

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1} \quad (5.36)$$

где  $\gamma_{M1}$  – определяется по Пункту 2.9.2.

5.3.2.4.17 Во всех точках оболочки для расчетных равнодействующих напряжений должно выполняться условие:

$$n_{x,Ed} \leq t \sigma_{x,Rd} \quad (5.37)$$

5.3.2.4.18 Если листы стенки соединяются внахлестку и соединение удовлетворяет указаниям Пункта 5.3.2.4.18, измерение максимального допустимого несовершенства не следует производить поперек самого соединения внахлестку.

5.3.2.4.19 Расчет устойчивости оболочки под воздействием осевого сжатия над локальной опорой, в зоне кронштейна (например, для поддержки привода конвейера) и вблизи отверстия должен выполняться в соответствии с указаниями Пункте 5.6 СН РК EN 1993-4-1.

### **5.3.2.5 Потеря устойчивости под действием наружного давления, внутреннего вакуума и ветра**

5.3.2.5.1 Оценка устойчивости должна выполняться согласно требованиям Пункта 8.2 EN 1993-1-6, которые могут быть выполнены при использовании нижеследующих оценок расчетной несущей способности.

5.3.2.5.2 Нижний край цилиндрической оболочки должен быть надежно закреплен, чтобы не допускать вертикальные перемещения, см. Пункт 5.4.7.

5.3.2.5.3 Под действием ветра или частичного вакуума стенка бункера должна быть разделена на сегменты, находящиеся между кольцами жесткости или между местами изменения толщины стенки или граничных условий.

5.3.2.5.4 Проверка устойчивости должна выполняться для каждого сегмента или группы сегментов, где может произойти потеря устойчивости, начиная с самого тонкого сегмента и постепенно добавляя другие. Из этих проверок выбирается низшее давление, при котором происходит потеря устойчивости.

5.3.2.5.5 Критическое наружное давление потери устойчивости изотропной стенки определяется по формуле:

$$p_{n,Rcru} = 0,92 C_b C_w E \left( \frac{r}{l} \right) \left( \frac{t}{r} \right)^{2,5} \quad (5.38)$$

где  $t$  – толщина самой тонкой части стенки;

$l$  – расстояние между кольцами жесткости или границами сегмента;

$C_b$  – коэффициент продольного изгиба при наружном давлении;

$C_w$  – коэффициент распределения ветрового давления.

5.3.2.5.6 Коэффициент  $C_b$  должен определяться по граничным условиям верхнего края оболочки по Таблице 5.2.

**Таблица 5.2 – Значения коэффициента продольного изгиба  $C_b$  при наружном давлении**

Граничные условия верхнего края оболочки	Крыша полностью соединена со стенкой (неразрезное соединение)	Кольцо по верхнему краю удовлетворяет Пунктам 5.3.2.5.12 – 5.3.2.5.14	Кольцо по верхнему краю не удовлетворяет Пунктам 5.3.2.5.12 – 5.3.2.5.14
$C_b$	1,0	1,0	0,6

5.3.2.5.7 Если бункер находится в группе близко расположенных бункеров, коэффициент распределения ветрового давления, относящийся к давлению на наветренную сторону бункера, следует принять  $C_w = 1,0$ .

5.3.2.5.8 Если бункер является отдельно стоящим и находится под действием только ветровой нагрузки, коэффициент распределения ветрового давления, относящийся к давлению на наветренную сторону бункера, следует принимать как наибольшее значение из:

$$C_w = \frac{2,2}{\left( 1 + 0,1 \sqrt{C_b \frac{r}{l} \sqrt{\frac{r}{t}}} \right)} \quad (5.39)$$

$$C_w = 1,0 \quad (5.40)$$

5.3.2.5.9 Если бункер является отдельно стоящим и находится под действием ветровой нагрузки и внутреннего вакуума, значение  $C_w$  должно определяться как линейная комбинация из 1,0 и расчетного значения, приведенного в Пункте 5.3.2.5.8, пропорционально значениям наружного давления, возникающего из каждого источника.

5.3.2.5.10 Максимальное расчетное наружное давление, под действием ветра и/или частичного вакуума определяется по формуле:

$$p_{n,Rd} = \alpha_n p_{n,Rcru} / \gamma_{M1} \quad (5.41)$$

где  $\alpha_n = 0,5$  – упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства (согласно НП.2.14);

$\gamma_{M1} = 1,1$  – частный коэффициент при расчетах устойчивости (см. Таблице 2.2).

5.3.2.5.11 Несущая способность для обеспечения устойчивости должна удовлетворять следующему условию:



$$p_{n,Ed} \leq p_{n,Rd} \quad (5.42)$$

где  $p_{n,Ed}$  – расчетное значение максимального наружного давления ветра и/или частичного вакуума.

5.3.2.5.12 Для того, чтобы верхний край цилиндра мог рассматриваться как надежно закрепленный кольцевым ребром, кольцевое ребро (кольцо) должно удовлетворять требованиям по прочности и жесткости. Если не используются численные методы расчета, расчетное значение окружной (кольцевой) силы и окружного изгибающего момента относительно вертикальной оси в кольцевом ребре следует определять по формулам:

$$N_{\theta,Ed} = 0,5rLp_{n,Ed} \quad (5.43)$$

$$M_{\theta,Ed} = M_{\theta,Edo} + M_{\theta,Edw} \quad (5.44)$$

$$M_{\theta,Edo} = 0,0033p_{nS1}r^2L \left( \frac{p_{nS1}}{p_{nS1} - p_{n,Edu}} \right) \quad (5.45)$$

$$M_{\theta,Edw} = 0,17p_{n,Edw}r^2L \left( \frac{p_{n,Edu}}{p_{nS1} - p_{n,Edu}} \right) \quad (5.46)$$

$$p_{nS1} = \frac{6EI_z}{r^3L} \quad (5.47)$$

где  $p_{n,Edu}$  – расчетное значение равномерной составляющей наружного давления ветра и частичного вакуума;

$p_{n,Edw}$  – расчетное значение ветрового давления в точке стагнации;

$p_{nS1}$  – давление для расчета изгибающего момента в кольце;

$M_{\theta,Edo}$  – расчетное значение изгибающего момента, вызванного отклонением от окружности;

$M_{\theta,Edw}$  – расчетное значение изгибающего момента от действия ветра;

$I_z$  – момент инерции площади кольца для изгиба в окружном направлении;

$L$  – общая высота стенки оболочки;

$t$  – толщина самого тонкого пояса оболочки.

5.3.2.5.13 Если кольцо на верхнем крае цилиндра выполнено из холодногнутых профилей, значение  $M_{\theta,Edo}$ , определяемое по Формуле 5.45, должно быть увеличено на 15 %.

5.3.2.5.14 Изгибная жесткость  $EI_z$  кольца на верхнем крае цилиндра относительно его вертикальной оси (изгиб в окружном направлении) должна быть выше наибольшего значения из:

$$EI_{z,min} = k_1ELt^3 \quad (5.48)$$

и

$$EI_{z,min} = 0,08C_wErt^3\sqrt{(r/t)} \quad (5.49)$$

где  $C_w$  – коэффициент распределения давления ветра, определяемый по Пункту 5.3.2.5.7 и Пункту 5.3.2.5.8;

$k_1 = 0,10$  (согласно НП.2.15).

### 5.3.2.6 Мембранный сдвиг

5.3.2.6.1 Если большая часть стенки бункера находится под действием сдвигающей нагрузки (как при наполнении с эксцентриситетом, сейсмической нагрузке и т. п.), несущая способность по потере устойчивости от мембранных касательных напряжений должна приниматься как для случая кручения оболочки на каждом горизонтальном уровне. В расчетах может быть учтена осевая вибрация при сдвиге.

5.3.2.6.2 Критические касательные напряжения потери устойчивости изотропной стенки определяются по формуле:

$$\tau_{x\theta, Rcr} = 0,75E \left(\frac{r}{l}\right)^{0,5} \left(\frac{t}{r}\right)^{1,25} \quad (5.50)$$

где  $t$  – толщина стенки в самом тонком месте;

$l$  – расстояние между кольцами жесткости или границами сегмента.

5.3.2.6.3 Когда кольцо жесткости является границей зоны потери устойчивости при сдвиге, его изгибная жесткость  $EI_z$  относительно оси для изгиба вдоль окружности должна быть не менее, чем:

$$EI_{z,min} = k_s E t^3 \sqrt{r l} \quad (5.51)$$

где  $l$  и  $t$  – значения принимаются по Пункту 5.3.2.6.2 для наиболее критической формы потери устойчивости;

$k_s = 0,10$  (согласно НП.2.16).

5.3.2.6.4 Если касательные напряжения  $\tau$  изменяются линейно по высоте конструкции, критические касательные напряжения в точке с наибольшими касательными напряжениями могут быть увеличены до:

$$\tau_{x\theta, Rcr} = 1,4E \left(\frac{r}{l_0}\right)^{0,5} \left(\frac{t}{r}\right)^{1,25} \quad (5.52)$$

где  $l_0$  определяется по формуле:

$$l_0 = \frac{\tau_{x\theta, Ed, max}}{\left(\frac{d\tau_{x\theta, Ed}}{dx}\right)} \quad (5.53)$$

где  $(d\tau_{x\theta, Ed}/dx)$  – осевой градиент изменения касательных напряжений по высоте, осредненный по участку;

$\tau_{x\theta, Ed, max}$  – максимальное значение касательных напряжений.

Если длина  $l_0$  превышает высоту конструкции, это правило не следует применять, а оболочку следует рассматривать как при равномерных мембранных касательных напряжениях согласно Пункту 5.3.2.6.2.

5.3.2.6.5 Если локальные касательные напряжения вызываются локальными опорами и опорными осевыми ребрами, критические касательные напряжения потери устойчивости определяются в месте соединения ребра и оболочки в месте с наибольшими напряжениями по формуле:

$$\tau_{x\theta, Rcr} = 1,4E \left(\frac{r}{l_0}\right)^{0,5} \left(\frac{t}{r}\right)^{1,25} \quad (5.54)$$

в которой  $l_0$  определяется как:

$$l_0 = \frac{\tau_{x\theta Ed, max}}{\left(\frac{d\tau_{x\theta Ed}}{dy}\right)} \quad (5.55)$$

где  $(d\tau_{x\theta,Ed}/dy)$  – градиент изменения касательных напряжений по окружности в зависимости от изменения расстояния от ребра, осредненный по участку;

$\tau_{x\theta,Ed,max}$  – максимальное значение касательных напряжений.

5.3.2.6.6 Расчетные напряжения потери устойчивости при действии касательных напряжений определяются как наименьшее значение следующих величин:

$$\tau_{x\theta,Rd} = \alpha_\tau \tau_{x\theta,Rcr} / \gamma_{M1} \quad (5.56)$$

и

$$\tau_{x\theta,Rd} = 0,57 f_y / \gamma_{M1} \quad (5.57)$$

где  $\alpha_\tau$  – упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства;

$\gamma_{M1} = 1,1$  – частный коэффициент надежности;

$\alpha_\tau = 0,80$  (согласно НП.2.17).

5.3.2.6.7 Для расчетных равнодействующих напряжений во всех точках конструкции должно выполняться условие:

$$n_{x\theta,Ed} \leq t \tau_{x\theta,Rd} \quad (5.58)$$

### **5.3.2.7 Взаимодействие между меридиональным сжатием, сжатием в окружном направлении и мембранным сдвигом**

5.3.2.7.1 Когда напряженное состояние в стенке бункера содержит существенные компоненты других напряжений помимо сжимающих мембранных напряжений и касательных напряжений, необходимо следовать требованиям Пункта 6.2 СН РК EN 1993-1-6.

5.3.2.7.2 Такое взаимодействие допускается не учитывать, если все, кроме одного, компоненты расчетных напряжений не превышают 20 % от соответствующего расчетного сопротивления при продольном изгибе.

### **5.3.2.8 Усталость, LS4**

5.3.2.8.1 Для бункеров класса последствий 3 необходимо руководствоваться требованиями Раздела 9 СН РК EN 1993-1-6.

5.3.2.8.2 В бункерах класса последствий 2, если в течение проектного срока эксплуатации бункера количество циклов наполнения и разгрузки превышает  $N_f = 10000$  (согласно НП.2.18), должна проводиться проверка на выносливость.

### **5.3.2.9 Цикличная пластичность, LS2**

5.3.2.9.1 Для бункеров класса последствий 3 необходимо следовать требованиям Раздела 7 СН РК EN 1993-1-6. Проверка возможного отказа вследствие цикличной пластичности должна производиться в точках нарушения непрерывности, возле

локальных кольцевых ребер жесткости и возле прикрепления дополнительных элементов к оболочке.

5.3.2.9.2 В бункерах других классов последствий проверка на циклическую пластичность может не проводиться.

### **5.3.3 Изотропные стенки с вертикальными ребрами жесткости**

#### **5.3.3.1 Общие положения**

5.3.3.1.1 Там, где изотропная стенка подкрепляется вертикальными ребрами жесткости (стрингерами), при определении вертикальных сжимающих напряжений в стенке и ребре следует учитывать эффект совместности деформаций укорочения стенки вследствие внутреннего давления.

5.3.3.1.2 Определение расчетных равнодействующих напряжений, несущей способности и ее проверки должны выполняться согласно Пункт 5.3.2 с учетом изложенных здесь дополнительных положений.

#### **5.3.3.2 Предельное состояние по пластичности**

5.3.3.2.1 Несущая способность на разрыв вертикальных швов должна определяться как для изотропной оболочки (см. Пункт 5.3.2 СН РК EN 1993-4-1).

5.3.3.2.2 Там, где конструкция соединения включает ребро жесткости для восприятия сил окружного растяжения, влияние этого растяжения должно учитываться при определении напряжений в ребре и проверке прочности при действии окружного растяжения.

#### **5.3.3.3 Потеря устойчивости при действии осевого сжатия**

5.3.3.3.1 Стенка рассчитывается по критерию потери устойчивости от осевого сжатия без учета ребер жесткости, если шаг ребер жесткости превышает  $2\sqrt{rt}$ , где  $t$  – локальная толщина стенки.

5.3.3.3.2 Если вертикальные ребра жесткости расположены с шагом менее  $2\sqrt{rt}$ , устойчивость всей стенки следует определять по Пункту 5.3.3.3.1, или на основании глобального численного расчета конструкции в целом согласно требованиям СН РК EN 1993-1-6.

5.3.3.3.3 Устойчивость самих ребер жесткости при осевом сжатии должна определяться на основании положений Пункта 6.3 СН РК EN 1993-1-1 или Пункта 6.2 СН РК EN 1993-1-3 (холодногнутые элементы), или Раздела 4 СН РК EN 1993-1-5 в зависимости от конструктивного решения ребер.

5.3.3.3.4 При расчете следует учитывать эксцентриситет ребра жесткости относительно стенки оболочки.

### 5.3.3.4 Потеря устойчивости при действии наружного давления, частичного вакуума или ветра

5.3.3.4.1 Стенка должна рассчитываться по такому же критерию потери устойчивости при действии наружного давления, как и стенка без ребер жесткости, если не потребуются более точные расчеты.

5.3.3.4.2 Если требуются более точные расчеты, площадь сечение ребер жесткости включается в эквивалентную толщину оболочки, при этом напряжения потери устойчивости могут быть определены на основании п. 5.3.4.5 при  $C_\varphi = C_\theta = Et$  и  $C_{\varphi\theta} = 0,38Et$ .

### 5.3.3.5 Мембранный сдвиг

5.3.3.5.1 Если большая часть стенки бункера находится под действием сдвигающей нагрузки (как при наполнении с эксцентриситетом, сейсмической нагрузке и т. п.), несущая способность по потере устойчивости от мембранных касательных напряжений должна определяться как для изотропной стенки без ребер жесткости (см. Пункт 5.3.2.6), при этом значение несущей способности может быть увеличено вследствие учета влияния ребер жесткости.

Эквивалентная длина  $l$  оболочки при сдвиге может быть принята как наименьшее значение из следующих размеров:

- расстояние между кольцевыми ребрами жесткости;
- расстояние между границами цилиндра;
- удвоенное расстояние по горизонтали между вертикальными ребрами жесткости, при условии, что каждое ребро жесткости имеет изгибную жесткость  $EI_y$  при изгибе в вертикальной плоскости (относительно окружной оси) не менее чем:

$$EI_{y,min} = k_s Et^3 \sqrt{rl} \quad (5.59)$$

где значения  $l$  и  $t$  принимаются такими же, как и для наиболее критической формы потери устойчивости;

$k_s = 0,10$  (согласно НП.2.19).

5.3.3.5.2 Если отдельное ребро жесткости резко обрывается в направлении верхнего края оболочки, следует считать, что сила, действующая в ребре жесткости, равномерно перераспределяется по оболочке на длине, не превышающей  $k_t \sqrt{rt}$  ( $k_t = 0,4$ , согласно НП.2.20).

5.3.3.5.3 Если ребра жесткости обрываются, как указано в Пункте 5.3.3.5.2, или используются для передачи локальных сил на оболочку, несущая способность при передаче сил сдвига между ребром жесткости и оболочкой не должна превышать значений, приведенных в Пункте 5.3.2.6 СН РК EN 1993-4-1 для линейного распределения касательных напряжений.

### **5.3.4 Горизонтально гофрированные стенки**

#### **5.3.4.1 Общие положения**

5.3.4.1.1 Все расчеты должны выполняться для толщин листов без учета покрытий и допусков на износ.

5.3.4.1.2 Минимальная толщина стального гофрированного листа стенки должна соответствовать требованиям Пункта 3.2 СН РК EN 1993-1-3. В конструкциях с болтовыми соединениями диаметр болтов должен быть не менее М8.

5.3.4.1.3 Если цилиндрическая стенка изготовлена из гофрированного листа с горизонтальными гофраами и вертикальными ребрами жесткости, прикрепленными к стенке, гофрированная стенка должна рассматриваться как несущая вертикальную нагрузку, если стенка не принимается как ортотропная оболочка, см. Пункт 5.3.4.3.3.

5.3.4.1.4 Особое внимание следует уделить для обеспечения того, чтобы соединительные элементы ребер жесткости и обшивки имели достаточные размеры для восприятия изгиба в меридиональной плоскости, перпендикулярной стенке, так как изгибная неразрезность ребра необходима для обеспечения устойчивости при действии ветра, наружного давления, а также при движении сыпучего хранимого материала.

5.3.4.1.5 Если стенка укреплена вертикальными ребрами жесткости, соединительные элементы между листами обшивки и ребрами жесткости должны иметь размеры, достаточные для передачи касательных нагрузок, действующих на стенку от хранимого материала (сил трения), на ребра жесткости. Толщина листов обшивки должна быть подобрана так, чтобы отсутствовало локальное разрушение соединительных элементов, при этом необходимо учесть снижение прочности соединений к гофрированным листам.

5.3.4.1.6 Определение расчетных равнодействующих напряжений, несущей способности и ее проверки должны выполняться согласно Пункт 5.3.2 с учетом изложенных дополнительных положений в Пунктах 5.3.4.1.1 – 5.3.4.1.5.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Более подробная информация о расчете гофрированных оболочек бункеров имеется в справочных данных, приведенных в приложении D.

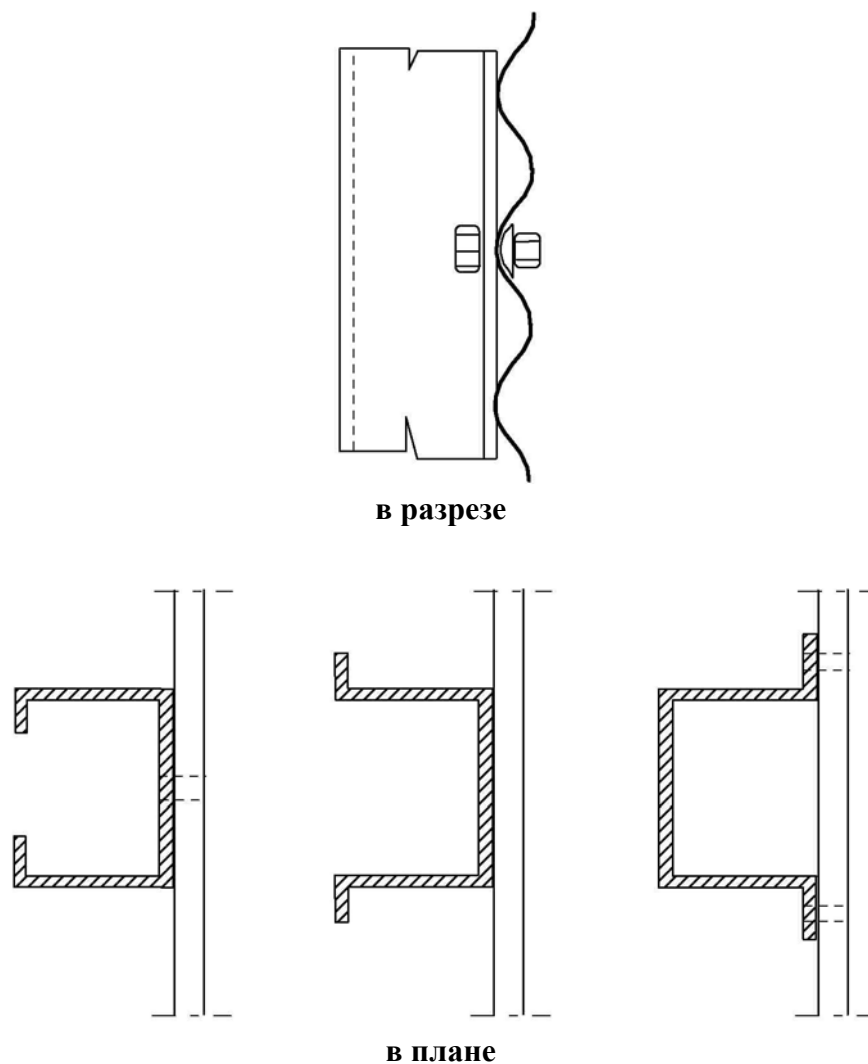
#### **5.3.4.2 Предельное состояние по пластичности**

5.3.4.2.1 Болты для соединения отдельных панелей должны удовлетворять требованиям EN 1993-1-8.

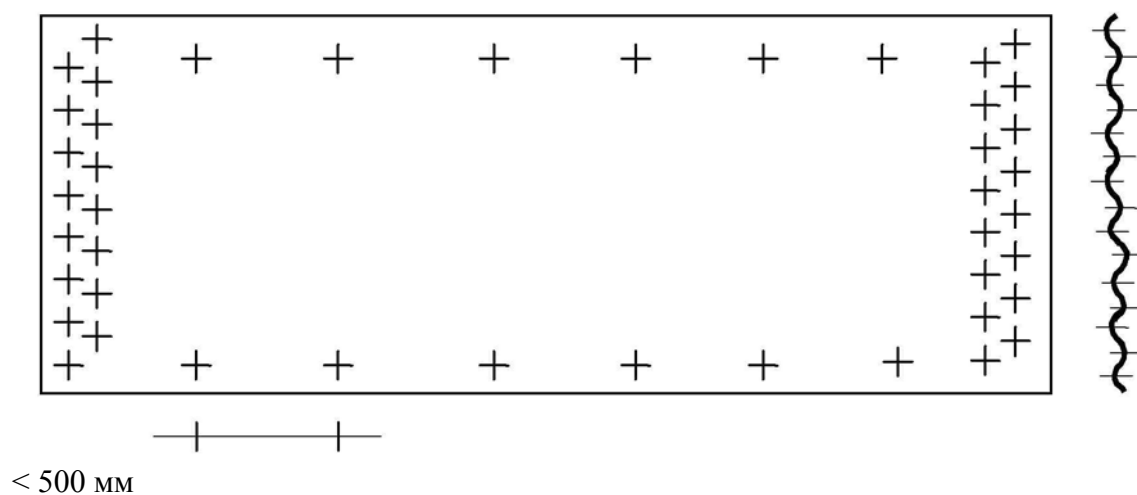
5.3.4.2.2 Элементы крепления панелей между собой должны соответствовать требованиям Раздела 8 СН РК EN 1993-1-3 для соединений, работающих при растяжении или сжатии.

5.3.4.2.3 Шаг между соседними элементами крепления панелей по периметру окружности не должен превышать  $3^\circ$  окружности.

Способы размещения вертикальных ребер жесткости на стенке показаны на Рисунке 5.3. Типичное размещение болтов в соединении панелей показано на Рисунке 5.4.



**Рисунок 5.3 – Схемы расположения вертикальных ребер жесткости на оболочках с горизонтальными гофрами**



**Рисунок 5.4 – Схема размещения болтов на гофрированной панели бункера**

5.3.4.2.4 Если в стенке проделываются сквозные отверстия для люков, дверей, шнеков транспортера и других устройств, в этих местах должен применяться гофрированный лист большей толщины, чтобы гарантировать, что факторы концентрации местных напряжений, связанные с изменением жесткости, не приведут к локальному разрыву.

### 5.3.4.3 Потеря устойчивости при действии осевого сжатия

#### 5.3.4.3.1 Общие положения

1) Расчетная несущая способность при осевом сжатии должна определяться для предписанных классов качества допусков на изготовление строительных конструкций с использованием значения гарантированного внутреннего давления  $p$  при равномерном распределении сжимающих напряжений по окружности. При расчете необходимо рассматривать каждую точку стенки оболочки.

2) Если горизонтально гофрированная стенка укреплена вертикальными ребрами жесткости, расчет устойчивости стенки должен выполняться одним из двух альтернативных методов:

а) расчет потери устойчивости эквивалентной ортотропной оболочки согласно Пункт 5.3.4.3.3, если расстояние между ребрами жесткости по горизонтали удовлетворяет требованиям Пункта 5.3.4.3.3.2;

б) расчет потери устойчивости отдельных ребер жесткости в предположении, что гофрированная стенка не воспринимает осевые силы сжатия, но обеспечивает закрепление для ребер, согласно требованиям Пункта 5.3.4.3.4, если шаг ребер жесткости по горизонтали не удовлетворяет требованиям Пункта 5.3.4.3.3.2.

#### 5.3.4.3.2 Стенка без ребер жесткости

1) Если гофрированная оболочка не имеет вертикальных ребер жесткости, характеристическое сопротивление локальной потере устойчивости в пластической стадии следует определять как наибольшее из значений:

$$n_{x,Rk} = \frac{t^2 f_y}{2d} \quad (5.60)$$

и

$$n_{x,Rk} = R_\phi \frac{t}{r} f_y \quad (5.61)$$

где  $t$  – толщина листа;

$d$  – расстояние между гребнем и впадиной гофра;

$R_\phi$  – локальная кривизна гофра (см. Рисунок 4.2);

$r$  – радиус цилиндра.

Несущая способность по локальной потере устойчивости в пластической стадии  $n_{x,Rk}$  принимается независимой от внутреннего давления  $p_n$ .



ПРИМЕЧАНИЕ Несущая способность по локальной потере устойчивости в пластической стадии – это несущая способность гофра разрыву или сворачиванию.

2) Расчетное сопротивление локальной потере устойчивости в пластической стадии следует определять по формуле:

$$n_{x,Rd} = \alpha_x n_{x,Rk} / \gamma_{M0} \quad (5.62)$$

где  $\alpha_x = 0,80$  – упругий понижающий коэффициент потери устойчивости при наличии несовершенства (согласно НП.2.21);

$\gamma_{M0} = 1,0$  – частный коэффициент.

3) Расчетные равнодействующие напряжения во всех точках конструкции должны удовлетворять следующему условию:

$$n_{x,Ed} \leq n_{x,Rd} \quad (5.63)$$

#### 5.3.4.3.3 Стенка с ребрами жесткости как ортотропная оболочка

1) Если стенка рассматривается как ортотропная оболочка (способ (а) в Пункте 5.3.4.3.1), жесткость обшивки относительно различных осей должна определяться по Пункту 4.4. Результирующая жесткость с учетом ребер считается равномерно распределенной. Эквивалентная срединная поверхность оболочки должна приниматься в качестве центральной оси, от которой измеряется амплитуда несовершенств (см. Рисунок 4.2).

2) Расстояние между ребрами жесткости по горизонтали  $d_s$  должно составлять не более  $d_{s,max}$ :

$$d_{s,max} = k_{dx} \left( \frac{r^2 D_y}{C_y} \right)^{0,25} \quad (5.64)$$

где  $D_y$  – изгибная жесткость на единицу ширины самых тонких листов обшивки, параллельных гофрам;

$C_y$  – жесткость при растяжении на единицу ширины самых тонких листов обшивки, параллельных гофрам;

$r$  – радиус цилиндра.

$k_{dx} = 7,4$  (согласно НП.2.22).

3) Равнодействующая критических напряжений потери устойчивости  $n_{x,Rcr}$  на единицу длины окружности ортотропной оболочки (способ (а) в Пункте 5.3.4.3.1) должна определяться на каждом расчетном уровне бункера путем минимизации нижеследующего выражения по критическому окружному числу волн  $j$  и высоте участка потери устойчивости  $l_i$ :

$$n_{x,Rcr} = \frac{1}{j^2 \omega^2} \left( A_1 + \frac{A_2}{A_3} \right) \quad (5.65)$$

где:

$$A_1 = j^4 [\omega^4 C_{44} + 2\omega^2 (C_{45} + C_{66}) + C_{55}] + C_{22} + 2j^2 C_{25} \quad (5.66)$$

$$A_2 = 2\omega^2 (C_{12} + C_{33}) (C_{22} + j^2 C_{25}) (C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14}) - (\omega^2 C_{11} + C_{33}) (C_{22} + j^2 C_{25})^2 - \omega^2 (C_{22} + \omega^2 C_{33}) (C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14})^2 \quad (5.67)$$

$$A_3 = (\omega^2 C_{11} + C_{33})(C_{22} + C_{25} + \omega^2 C_{33}) - \omega^2 (C_{12} + C_{33})^2 \quad (5.68)$$

в которых:

$$\begin{aligned} C_{11} &= C_\phi + \frac{EA_s}{d_s}, & C_{12} &= \nu \cdot \sqrt{C_\phi C_\theta}, \\ C_{14} &= \frac{e_s EA_s}{rd_s}, & C_{22} &= C_\theta + \frac{EA_r}{d_r}, \\ C_{25} &= \frac{e_r EA_r}{rd_r}, & C_{33} &= C_{\phi\theta}, \\ C_{44} &= \frac{\left[ D_\phi + \frac{EI_s}{d_s} + \frac{EA_s e_s^2}{d_s} \right]}{r^2}, & C_{45} &= \frac{\nu \cdot \sqrt{D_\phi D_\theta}}{r^2}, \\ C_{55} &= \frac{\left[ D_\theta + \frac{EI_r}{d_r} + \frac{EA_r e_r^2}{d_r} \right]}{r^2}, & C_{66} &= \frac{\left[ D_{\phi\theta} + 0,5 \left( \frac{GI_{ts}}{d_s} + \frac{GI_{tr}}{d_r} \right) \right]}{r^2}, \\ & & \omega &= \frac{\pi r}{jl_i}, \end{aligned}$$

где  $l_i$  – половина длины волны возможной формы потери устойчивости в вертикальном направлении;

$A_s$  – площадь поперечного сечения меридионального (вертикального) ребра жесткости (стрингера);

$I_s$  – момент инерции меридионального ребра жесткости относительно окружной оси при изгибе в вертикальной плоскости;

$d_s$  – расстояние между меридиональными ребрами жесткости;

$I_{ts}$  – постоянная равномерного кручения продольного ребра жесткости;

$e_s$  – направленный наружу эксцентриситет меридионального ребра жесткости относительно срединной поверхности;

$A_r$  – площадь поперечного сечения кольцевого ребра жесткости;

$I_r$  – момент инерции кольцевого ребра жесткости относительно вертикальной оси при изгибе в окружном направлении (горизонтальной плоскости);

$d_r$  – расстояние между кольцевыми ребрами жесткости;

$I_{tr}$  – постоянная равномерного кручения кольцевого ребра жесткости;

$e_r$  – направленный наружу эксцентриситет кольцевого ребра жесткости относительно срединной поверхности;

$C_\phi$  – жесткость при растяжении обшивки в осевом направлении (см. Пункты 4.4.5 и 4.4.7);

$C_\theta$  – жесткость при растяжении обшивки в окружном направлении (см. Пункты 4.4.5 и 4.4.7);

$D_\phi$  – изгибная жесткость обшивки в осевом направлении (см. Пункты 4.4.6 и 4.4.7);

$D_\theta$  – изгибная жесткость обшивки в окружном направлении (см. Пункты 4.4.6 и 4.4.7);

$D_{\phi\theta}$  – изгибная жесткость на кручение обшивки при кручении (см. Пункты 4.4.6 и 4.4.7);

$r$  – радиус бункера.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Приведенные выше геометрические характеристики ребер жесткости ( $A$ ,  $I$ ,  $I_t$  и т. д.) относятся только к сечению самого ребра жесткости, т.е. не следует рассматривать расчетное сечение, включающее участки стенки.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 В качестве нижней границы зоны потери устойчивости следует принимать точки, в которых изменяется толщина обшивки или поперечное сечение ребра жесткости. В этих точках необходимо для каждого сечения отдельно проверять устойчивость.

4) Сопротивление потере устойчивости  $n_{x,Rd}$  ортотропной оболочки (способ (а) в Пункте 5.3.4.3.1 СН РК EN 1993-4-1) следует определять как наименьшее значение из:

$$n_{x,Rd} = \alpha_x n_{x,Rcr} / \gamma_{M1} \quad (5.69)$$

и

$$n_{x,Rd} = A_{eff} f_y / (d_s \gamma_{M0}) \quad (5.70)$$

где  $\alpha_x$  – упругий понижающий коэффициент потери устойчивости при наличии несовершенства;

$d_s$  – расстояние между продольными ребрами жесткости;

$A_{eff}$  – расчетная площадь поперечного сечения продольного ребра жесткости;

$\gamma_{M0} = 1,0$  и  $\gamma_{M1} = 1,1$  – частные коэффициенты (см. Таблице 2.2);

$\alpha_x = 0,80$  (согласно НП.2.23).

5) Во всех точках конструкции для расчетных равнодействующих напряжений от внешней нагрузки должно выполняться условие обеспечения несущей способности:

$$n_{x,Ed} \leq n_{x,Rd} \quad (5.71)$$

#### 5.3.4.3.4 Стенка с ребрами жесткости, полностью воспринимающими силы осевого сжатия

1) Если принимается, что гофрированная обшивка не воспринимает осевые силы сжатия (способ б) в Пункте 5.3.4.3.1), это означает, что обшивка обеспечивает закрепление продольных ребер от потери устойчивости только в плоскости стенки. Несущая способность по устойчивости в данном случае определяется одним из двух альтернативных способов:

а) не учитывается поддерживающее воздействие обшивки на устойчивость в направлении, перпендикулярном стенке;

б) учитывается влияние жесткости обшивки на устойчивость в направлении, перпендикулярном стенке;

2) При использовании способа а) по Пункту 5.3.4.3.4.1, несущая способность отдельного ребра жесткости может быть принята как несущая способность ребра при наличии внецентренного сжатия. Расчетная несущая способность по устойчивости  $N_{b,Rd}$  определяется по формуле

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (5.72)$$

где  $A_{eff}$  – расчетная площадь поперечного сечения ребра жесткости.

Понижающий коэффициент  $\chi$  следует определять по Пункту 6.3.3 СН РК EN 1993-1-1 для изгибной формы потери устойчивости перпендикулярно стенке бункера

(относительно окружной оси) с использованием кривой потери устойчивости  $\chi$  независимо от формы сечения (коэффициент несовершенств  $\alpha = 0,49$ ). Расчетная длина сжатой стойки, используемая для определения понижающего коэффициента  $\chi$ , принимается равной расстоянию между соседними кольцевыми ребрами жесткости.

3) Если упругое закрепление ребра жесткости от потери устойчивости, создаваемое стенкой, учитывается в расчет, должны выполняться следующие условия:

а) длина части стенки, которая обеспечивает упругое закрепление, должна быть равна длине стенки между двумя ребрами жесткости, примыкающими к расчётному ребру (см. Рисунок 5.5), с шарнирным закреплением стенки на ребрах;

б) возможная жесткость вследствие сил сцепления хранящегося сыпучего материала не должна учитываться в расчете.

4) Если не выполняются более точные численные расчеты, критическую силу потери устойчивости (несущая способность)  $N_{b,Rd}$  следует определять, исходя из равномерности напряжений сжатия по поперечному сечению на всех уровнях, как наименьшее из двух значений по формулам:

$$N_{b,Rd} = 2 \frac{\sqrt{EI_y K}}{\gamma_{M1}} \quad (5.73)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (5.74)$$

где  $EI_y$  – изгибная жесткость ребра жесткости при изгибе из плоскости стенки ( $\text{Н} \cdot \text{мм}^2$ );

$K$  – изгибная жесткость листовой обшивки ( $\text{Н/мм}$  на  $\text{мм}$  высоты стенки) в пролете между вертикальными ребрами жесткости; см. Рисунок 5.5;

$A_{eff}$  – расчетная площадь поперечного сечения ребра жесткости.

5) Изгибная жесткость листа оболочки  $K$  должна определяться исходя из следующих допущений: пролет обшивки равен расстоянию между ребрами жесткости, примыкающими к рассчитываемому ребру; края листа свободно оперты на ребрах жесткости (см. Рисунок 5.5). Оценку значения  $K$  можно выполнить по формуле:

$$K = k_s \frac{D_y}{d_s^3} \quad (5.75)$$

где  $D_y$  – изгибная жесткость листовой обшивки при изгибе в окружном направлении;

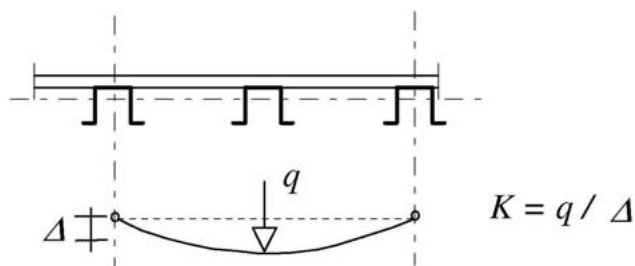
$d_s$  – расстояние между вертикальными ребрами жесткости.

$k_s = 6,0$  (согласно НП.2.24).

Если гофры имеют дугообразную или синусоидальную конфигурацию, значение  $D_y$  можно принять по Пункту 4.4.6. Если применяются гофры иного сечения, изгибная жесткость при изгибе в окружном направлении должна определяться на основании первичных принципов.

6) Во всех точках ребра жесткости расчетная несущая способность по устойчивости (значение критической силы) должна удовлетворять условию:

$$N_{b,Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (5.76)$$



**Рисунок 5.5 – Определение степени закрепления ребра жесткости обшивкой от потери устойчивости**

#### **5.3.4.4 Локальное, деформационное и изгибно-крутильное разрушение ребер жесткости**

Несущая способность ребер жесткости при локальных и деформационных разрушениях, а также при изгибно-крутильной форме потери устойчивости должна определяться в соответствии с Разделом 6 СН РК EN 1993-1-3 (холодногнутые конструкции).

#### **5.3.4.5 Потеря устойчивости при действии наружного давления, частичного вакуума или ветра**

5.3.4.5.1 Эквивалентные мембранные и изгибные параметры следует определять согласно Пункт 4.4.

5.3.4.5.2 Параметры кольцевых и продольных ребер жесткости при изгибе и растяжении, а также направленный наружу эксцентриситет смещения их центра относительно срединной поверхности стенки оболочки должны определяться на основании расстояния между ребрами жесткости  $d_s$ .

5.3.4.5.3 Расстояние между ребрами жесткости в горизонтальной плоскости  $d_s$  не должно превышать значение  $d_{s,max}$ , которое определяется по формуле:

$$d_{s,max} = k_{d\theta} \left( \frac{r^2 D_y}{C_y} \right)^{0,25} \quad (5.77)$$

где  $D_y$  – изгибная жесткость на единицу ширины, параллельной гофрам, самого тонкого листа обшивки;

$C_y$  – жесткость при растяжении на единицу ширины, параллельной гофрам, самого тонкого листа обшивки;

$r$  – радиус цилиндра.

$k_{d\theta} = 7,4$  (согласно НП.2.25).

5.3.4.5.4 Критические напряжения потери устойчивости для равномерного внешнего давления  $p_{n,Rcr}$  должны определяться путем минимизации следующего выражения относительно критического окружного волнового числа  $j$  (количество волн потери устойчивости по окружности):

$$p_{n,Rcru} = \frac{1}{rj^2} \left( A_1 + \frac{A_2}{A_3} \right) \quad (5.78)$$

где:

$$A_1 = j^4 [\omega^4 C_{44} + 2\omega^2 (C_{45} + C_{66}) + C_{55}] + C_{22} + 2j^2 C_{25} \quad (5.79)$$

$$A_2 = 2\omega^2 (C_{12} + C_{33}) (C_{22} + j^2 C_{25}) (C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14}) - \\ - (\omega^2 C_{11} + C_{33}) (C_{22} + j^2 C_{25})^2 - \omega^2 (C_{22} + \omega^2 C_{33}) (C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14})^2 \quad (5.80)$$

$$A_3 = (\omega^2 C_{11} + C_{33}) (C_{22} + C_{25} + \omega^2 C_{33}) - \omega^2 (C_{12} + C_{33})^2 \quad (5.81)$$

при:

$$C_{11} = C_\phi + \frac{EA_s}{d_s}, \quad C_{12} = \nu \sqrt{C_\phi C_\theta}, \\ C_{14} = \frac{e_s EA_s}{r d_s}, \quad C_{22} = C_\theta + \frac{EA_r}{d_r}, \\ C_{25} = \frac{e_r EA_r}{r d_r}, \quad C_{33} = C_{\phi\theta}, \\ C_{44} = \frac{\left[ D_\phi + \frac{EI_s}{d_s} + \frac{EA_s e_s^2}{d_s} \right]}{r^2}, \quad C_{45} = \frac{\nu \sqrt{D_\phi D_\theta}}{r^2}, \\ C_{55} = \frac{\left[ D_\theta + \frac{EI_r}{d_r} + \frac{EA_r e_r^2}{d_r} \right]}{r^2}, \quad C_{66} = \frac{\left[ D_{\phi\theta} + 0,5 \left( \frac{GI_{ts}}{d_s} + \frac{GI_{tr}}{d_r} \right) \right]}{r^2}, \\ \omega = \frac{\pi r}{jl_i},$$

где  $l_i$ ,  $r$ ,  $A_s$ ,  $I_s$ ,  $I_{ts}$ ,  $d_s$ ,  $e_s$ ,  $A_r$ ,  $I_r$ ,  $I_{tr}$ ,  $d_r$  и  $e_r$  имеют значения, определенные в п. 5.3.4.3.3.3.

5.3.4.5.5 Если ребра жесткости или листовая обшивка изменяются по высоте стенки, необходимо рассмотреть несколько возможных участков с длиной зоны потери устойчивости  $l_i$  для того, чтобы определить самый ослабленный участок. При этом необходимо учитывать, что верхний край участка потери устойчивости находится всегда на вершине зоны с самой тонкой листовой обшивкой.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Если зона с более толстой обшивкой находится выше зоны с самой тонкой листовой обшивкой, верхний край вероятного участка потери устойчивости может оказаться либо на вершине самой тонкой зоны, либо на вершине стенки.

5.3.4.5.6 Если более точные вычисления не выполняются, толщина, полученная в приведенных выше расчетах, должна быть принята за толщину самой тонкой части листовой обшивки.

5.3.4.5.7 Если бункер не имеет крыши и в нем возможна потеря устойчивости от действия ветра, то давление, полученное в приведенных выше расчетах, должно быть уменьшено путем умножения на коэффициент 0,6.

5.3.4.5.8 Расчетные напряжения потери устойчивости для стенки должны определяться по методике, приведенной в Пункте 5.3.2.5, при  $C_b = C_w = 1,0$  и  $\alpha_n = 0,5$ , а критическое давление потери устойчивости  $p_{n,Rcru}$  должно быть принято из Пункта 5.3.4.5.4.

#### **5.3.4.6 Мембранные касательные напряжения**

Устойчивость оболочки при действии мембранных касательных напряжений должна определяться с использованием Пункта 8.5 СН РК EN 1993-1-6.

### **5.3.5 Вертикально гофрированные стенки с кольцевыми ребрами жесткости**

#### **5.3.5.1 Общие положения**

5.3.5.1.1 Если цилиндрическая стенка изготовлена из гофрированного листа с гофром, расположенным по вертикали, должны выполняться два следующих условия:

- а) принимается, что гофрированная стенка не воспринимает горизонтальные силы;
- б) пролетом гофрированной листовой обшивки является расстояние между центрами соседних кольцевых ребер, при этом листовая обшивка принимается неразрезной.

5.3.5.1.2 Соединения секций обшивки между собой должны быть рассчитаны так, чтобы обеспечивать принятую в расчете неразрезность обшивки при изгибе.

5.3.5.1.3 При расчете силы осевого сжатия в стенке, возникающей под воздействием сил трения сыпучего материала о стенку, должна быть учтена полная окружность бункера, с учетом формы профиля гофра.

5.3.5.1.4 Если гофрированная обшивка доходит до опорного закрепления в базе, должна быть учтена локальная гибкость обшивки вблизи закрепления в предположении граничных условий с радиальным закреплением.

5.3.5.1.5 Определение расчетных равнодействующих напряжений и несущей способности, а также выполнение проверки несущей способности должны определяться в соответствии с Пунктом 5.3.2 с учетом дополнительных положений, изложенных в Пунктах 5.3.5.2 – 5.3.5.5.

#### **5.3.5.2 Предельное состояние по пластичности**

5.3.5.2.1 При проверке предельного состояния по пластичности, принимается, что гофрированная стенка не воспринимает горизонтальных окружных сил.

5.3.5.2.2 Расстояние между кольцевыми ребрами жесткости определяется на основании расчета на изгиб поперечного сечения гофрированного профиля, исходя из предположения, что стенка в местах установки колец неразрезная, и с учетом различных радиальных деформаций кольцевых ребер, имеющих разные размеры. Напряжения от изгиба должны суммироваться с напряжениями от осевого сжатия при проверке устойчивости при осевом сжатии.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Расчет обшивки на изгиб в вертикальной плоскости можно выполнить, рассматривая обшивку как неразрезную балку на упруго податливых опорах в местах установки колец. Жесткость каждой опоры определяется по жесткости колец при действии радиальных нагрузок.

5.3.5.2.3 Размеры кольцевых ребер жесткости, рассчитанных на восприятие горизонтальных усилий, должны соответствовать требованиям Пункта 6.2 СН РК EN 1993-1-1 или Пункта 6.1 СН РК EN 1993-1-3 в зависимости от сечения ребра.

#### 5.3.5.3 Потеря устойчивости при осевом сжатии

Критические напряжения потери устойчивости при изгибе стенки должны определяться с использованием положений Пунктов 5.5 и 5.6 СН РК EN 1993-1-3 (для холодногнутых профилей). Поперечное сечение гофрированной обшивки должно рассматриваться как сечение стойки между кольцевыми ребрами жесткости. Расчетную длину стойки следует принимать не менее расстояния между центрами тяжести поперечного сечения соседних колец.

#### 5.3.5.4 Потеря устойчивости от наружного давления, частичного вакуума или ветра

Расчетная несущая способность при действии наружного давления должна определяться таким же образом, как в горизонтально гофрированных бункерах (см. Пункт 5.3.4.5), но с учетом изменения ориентации гофра, как отмечено в Пункте 4.4.7.

#### 5.3.5.5 Мембранные касательные напряжения

Расчетная несущая способность при действии мембранных касательных напряжений должна определяться так же, как и в бункерах с горизонтальными гофрами, см. Пункт 5.3.4.6.

ПРИМЕР 1 Расчет изотропной стенки бункера.

1 Исходные данные

1.1 Параметры бункера (по данным Заказчика)

Радиус  $r = 2,25$  м, половинный угол у вершины конуса воронки  $\beta = 30^\circ$ ; высота цилиндрической части  $h_c = 6,5$  м, диаметр бункера  $d_c = 2r = 2 \cdot 2,25 = 4,5$  м. Схема бункера приводится на Рисунке 1.

Марка стали конструкций бункера – S235 по EN 10025-2 с характеристиками (Таблица 3.1 СН РК EN 1993-1-1):

– предел текучести  $f_y = 23,5$  кН/см<sup>2</sup>;

– временное сопротивление  $f_u = 36$  кН/см<sup>2</sup>.

Количество циклов нагрузки в течение срока службы не превышает 8000.

Площадь внутреннего поперечного сечения бункера  $A = \pi r^2 = 3,14 \cdot 2,25^2 = 15,904$  м<sup>2</sup>.

Периметр поперечного сечения бункера  $U = 2\pi r = 2 \cdot 3,14 \cdot 2,25 = 14,137$  м.

Коэффициент асимметрии заполнения  $e_f = 0,1d_c = 0,1 \cdot 4,5 = 0,45$ .

Коэффициент асимметрии выходного отверстия  $e_0 = 0 \cdot d_c = 0$ .



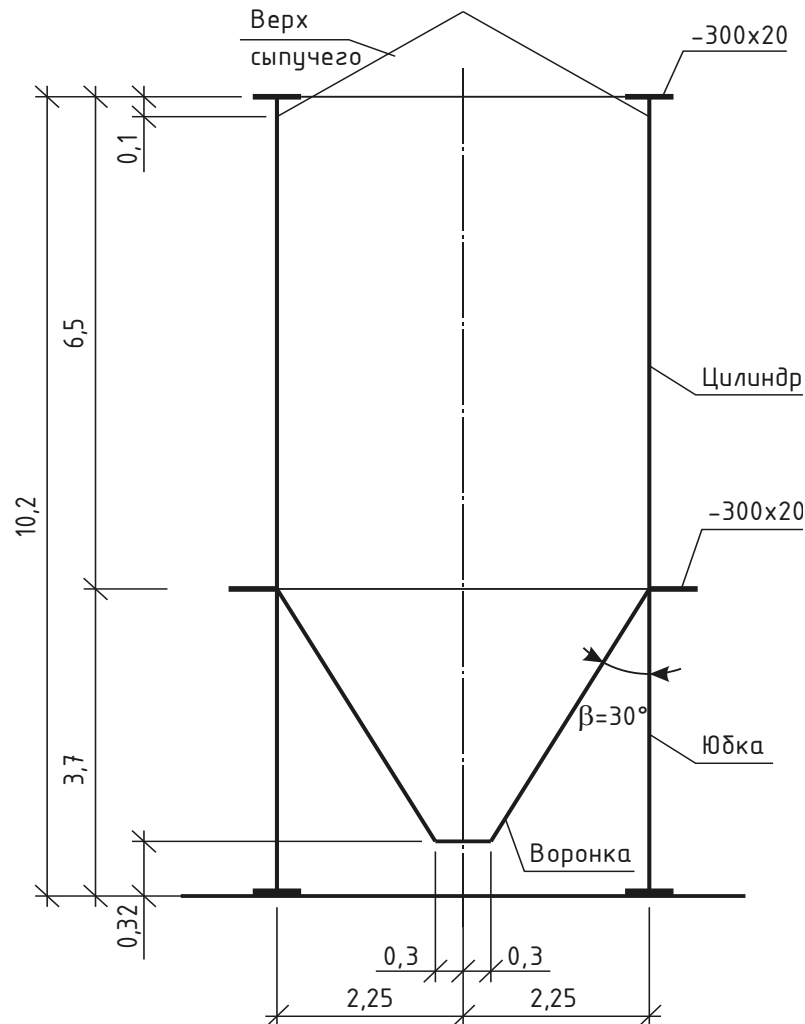


Рисунок 1 – Схема бункера

## 1.2 Характеристики бункера:

- объем 124 м<sup>3</sup>;
- емкость – 205 т;
- класс последствий – 2 по СН РК EN 1993-4-1, Пункт 2.2 (3);
- бункер – средней гибкости по СН РК EN 1991-4, п. 1.5.21;
- класс требований – 2 по СН РК EN 1991-4, п. 2.5.

## 2 Сбор нагрузок

## 2.1 Давление сыпучего материала

## 2.2.1 Условия для расчета нагрузок:

а) Поскольку канал течения всегда находится внутри сыпучего материала – давление разгрузки на вертикальные стенки учитываем (п. 3.3 (4) СН РК EN 1991-4). Согласно Пункту 5.3.2.1(3),(4) СН РК EN1991-4 давления при разгрузке составляют (Формулы 5.82 и 5.83 СН РК EN1991-4):

$$p_{he} = C_h \cdot p_{hf} ;$$

$$p_{we} = C_w \cdot p_{wf} .$$

б) Загрузка несимметричная – эксцентриситет заполнения учитываем при определении частичной поверхностной нагрузки.

в) Разгрузочное отверстие симметрично – эксцентриситет разгрузки не учитываем.

- г) Оборудование, которое опирается на силос, – не установлено.
- д) Бункер находится вне помещения – учитываем давление ветра.
- е) Тип воронки – крутая (п. 6.1.1 (2) СН РК EN 1991-4).

## 2.2.2 Расчет давлений

В данном примере определение давлений на вертикальную стенку и на воронку не рассматривается.

Расчет симметричных нормальных и касательных давлений выполнен по СН РК EN 1991-4 для пяти случаев нагрузки:

- случай нагрузок 1 – максимальное нормальное давление на вертикальную стенку;
- случай нагрузок 2 – максимальные силы трения на вертикальной стенке;
- случай нагрузок 3 – максимальное вертикальное давление на воронку;
- случай нагрузок 4 – максимальное давление на стенку воронки в заполненном бункере;
- случай нагрузок 5 – максимальное давление на стенку воронки при разгрузке заполненного бункера.

Наибольшие давления создают случаи 1 и 3 для цилиндрической части и воронки, соответственно. Результаты расчета давлений представлены на Рисунке 2 и в Таблицах 1 и 2. Поскольку бункер класса требований 2, учитывалась частичная поверхностная нагрузка по п. 5.2.3 СН РК EN 1991-4, которая задавалась вместе с симметричными нагрузками. Схема приложения частичной поверхностной нагрузки представлена на Рисунке 3.

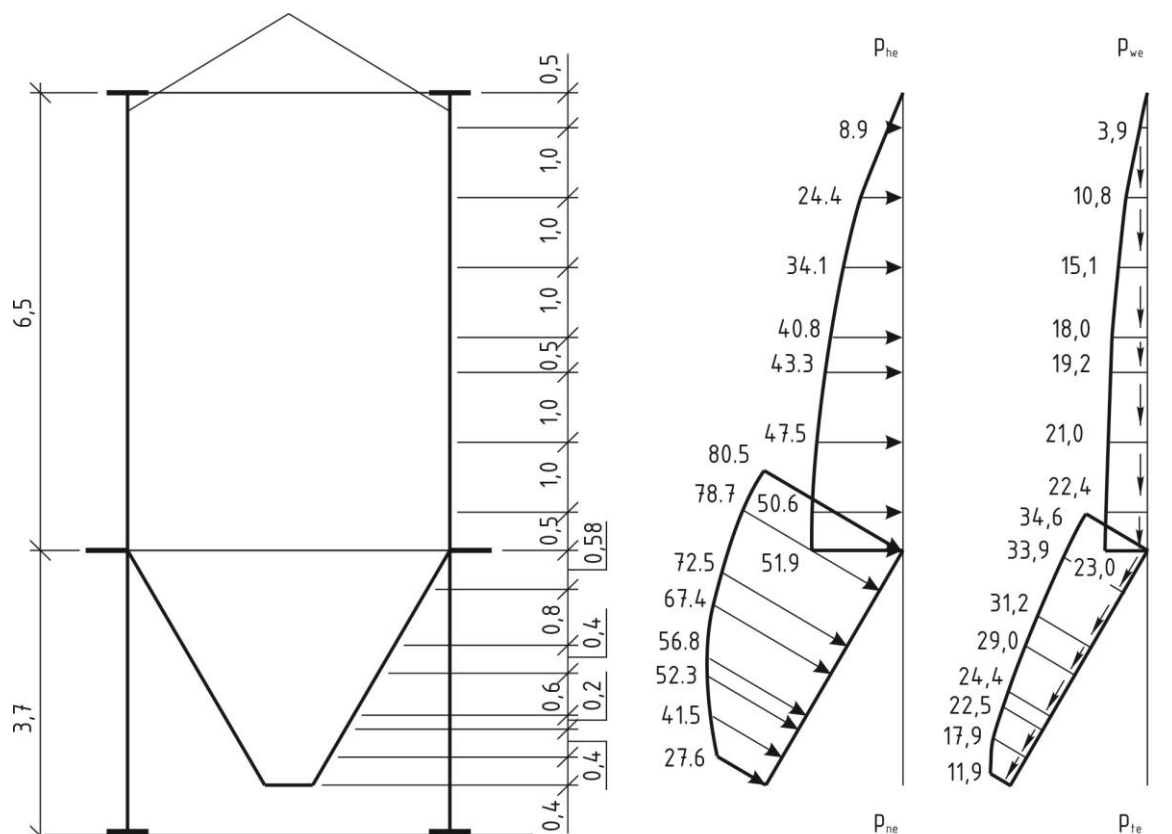


Рисунок 2 – Расчетные давления на стенку и воронку (случай нагрузки 1)

Таблица 1 – Характеристические значения давлений на стенку бункера, кПа

	Расстояние от верхнего края цилиндра							
Давление	0,50	1,50	2,50	3,50	4,00	5,00	6,00	6,50
	Случай нагрузки 1							
$P_{he}$	5,93	16,25	22,76	27,18	28,89	31,64	33,73	34,59
$P_{we}$	2,62	7,19	10,06	12,02	12,78	13,99	14,91	15,30
	Случай нагрузки 3							
$P_{he}$	4,26	12,51	18,34	22,65	24,40	27,32	29,64	30,63
$P_{we}$	1,89	5,53	8,11	10,01	10,79	12,08	13,11	13,54

Таблица 2 – Характеристические значения давлений на воронку бункера, кПа

	Расстояние от низа воронки							
Давление	0,00	0,40	0,80	1,00	1,60	2,00	2,80	3,38
	Случай нагрузки 1							
$P_{ne}$	18,41	27,69	34,89	37,89	44,96	48,34	52,49	53,65
$P_{te}$	7,92	11,91	15,00	16,29	19,33	20,78	22,57	23,06
	Случай нагрузки 3							
$P_{ne}$	23,37	35,56	45,27	49,42	59,60	64,79	72,09	75,20
$P_{te}$	10,05	15,29	19,46	21,25	25,62	27,85	30,99	32,33

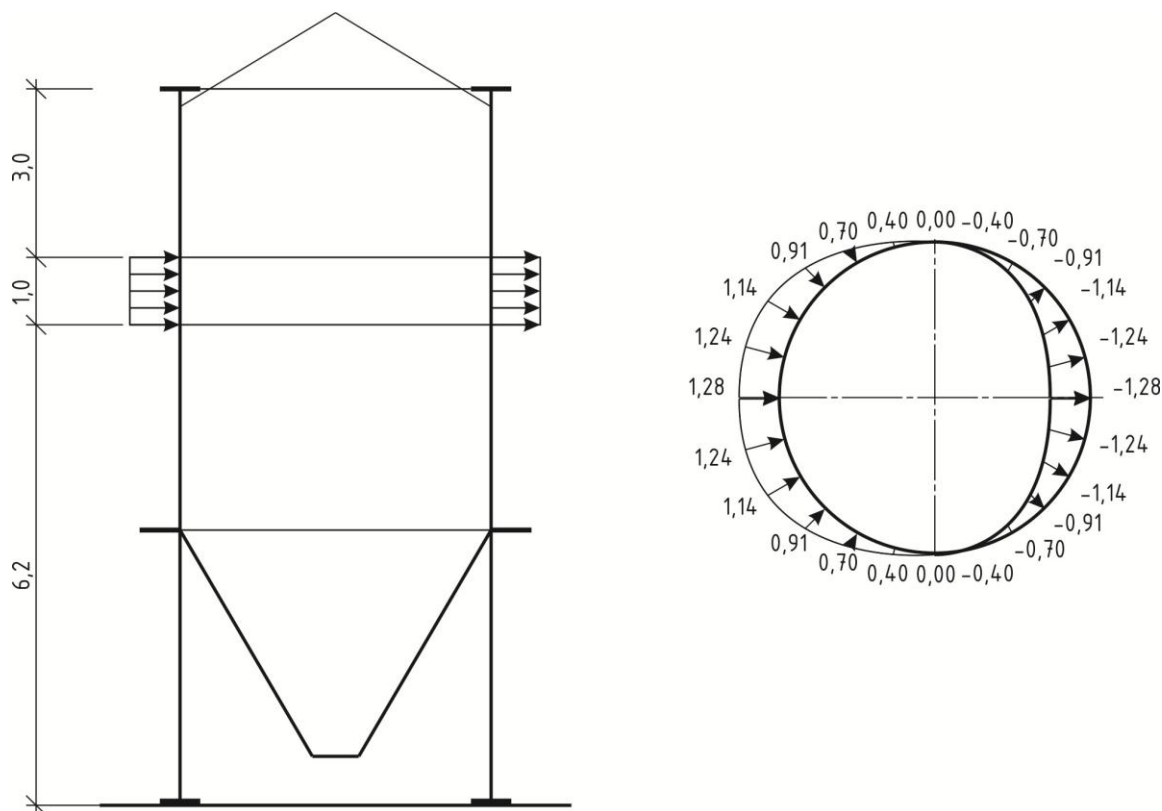


Рисунок 3 – Схема приложения расчетной частичной поверхностной нагрузки, кПа

2.2.3 Ветровая нагрузка была определена по приложению С СН РК EN 1993-4-1. Схема приложения и значения ветровых нагрузок представлены на Рисунках 4, 5.

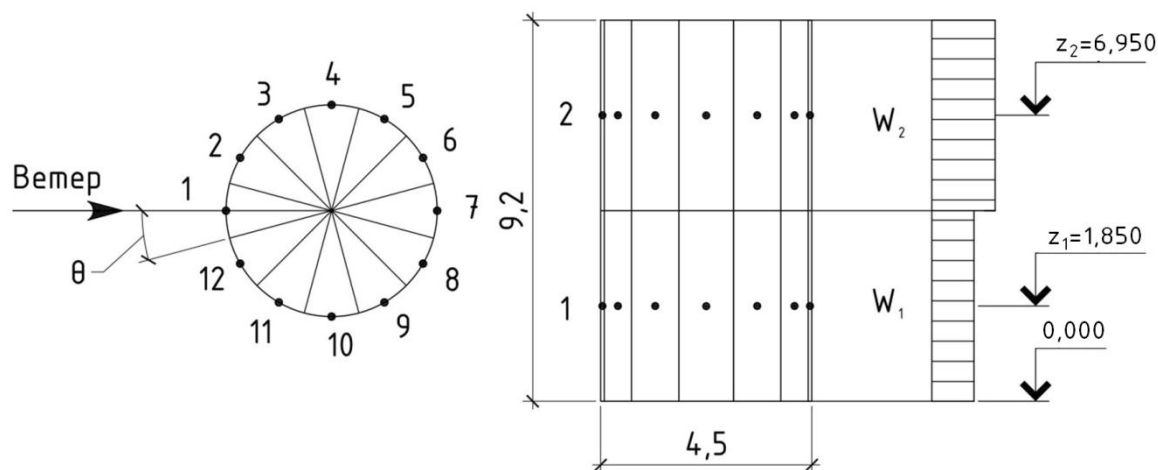


Рисунок 4 – Схема приложения ветровой нагрузки

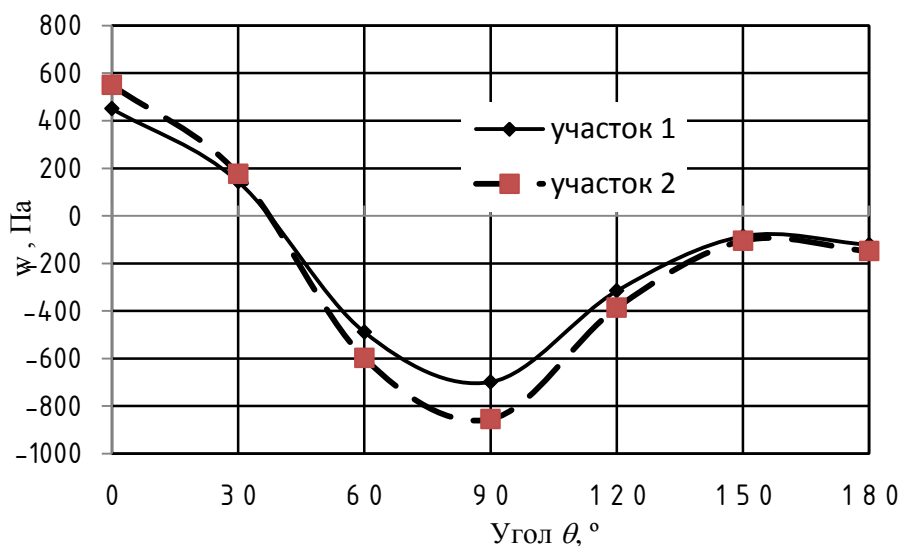


Рисунок 5 – Характеристические значения ветровой нагрузки по окружности бункера

### 2.3 Сочетания нагрузок

Расчетные комбинации воздействий и коэффициенты сочетаний  $\psi_{o,i}$  получены на основании Пункта А.4 СН РК EN 1991-4 и приведены в Таблице 3. Частные коэффициенты для нагрузок  $\gamma_F$  приняты на основании НП.2.2.3.3 к СН РК EN 1990.

Таблица 3 – Типы расчетных сочетаний воздействий

Обозначение	Состав нагрузок	Тип нагрузки	Частные коэффициенты для нагрузок	$\psi_{o,i}$
D	Хранимый сыпучий материал	Q1	1,50	—
	Собственный вес	G	1,35	—
WF	Ветер	Q2	1,5	1,0
	Ветер	Q1	1,5	—
	Собственный вес	G	1,35	—
	Выгрузка сыпучего материала	Q2	1,5	1,0

Таблица 3 – Типы расчетных сочетаний воздействий (продолжение)

Обозначение	Состав нагрузок	Тип нагрузки	Частные коэффициенты для нагрузок	$\psi_{o,i}$
WE	Ветер	Q1	1,50	–
	Собственный вес	G	1,35	–
	Заполнение сыпучим материалом отсутствует (бункер пустой)	Q2	0,0	0,0

ПРИМЕЧАНИЕ Обозначения в таблице: G – постоянная нагрузка, Q1 – доминирующая переменная нагрузка, Q2 – сопутствующая переменная нагрузка (переменная нагрузка 2).

Значение расчетного усилия определяется по Формуле 6.10 СН РК EN 1990:

$$N_p = \gamma_G N_G + \gamma_{Q1} N_{Q1} + \gamma_{Q2} N_{Q2} \psi_{o,2},$$

где  $N_G$  – усилие от постоянной нагрузки;

$N_{Q1}$  – усилие от доминирующей переменной нагрузки;

$N_{Q2}$  – усилие от сопутствующей переменной нагрузки;

$\gamma_G, \gamma_{Q1}, \gamma_{Q2}$  – частные коэффициенты для нагрузок.

3 Расчет равнодействующих напряжений

3.1 Пространственный расчет кругового бункера с применением МКЭ для определения равнодействующих напряжений.

Поскольку бункер относится к классу последствий 2 по СН РК EN 1993-4-1, расчет напряжений выполняется численными методами по моментной теории оболочек (Пункт 4.2.2.3.1). Расчетная схема бункера представляет собой пространственную тонкостенную конструкцию, состоящую из трех конструктивных элементов (цилиндр, воронка и юбка), соединяемых между собой на отм. +3,7 м. Моделирование элементов оболочки бункера производилось с применением КЭ 44 (универсальный четырехугольный конечный элемент оболочки в ПК ЛИРА). Расчетная модель представлена на Рисунке 6. Опорное закрепление юбки принято жестким, неподвижным типа BC1r по Таблице 5.1 СН РК EN 1993-1-6, что моделирует действительное закрепление бункера нижним опорным кольцом согласно Пункту 2.3 СН РК EN 1993-1-6.

Определение напряжений в элементах бункера производилось для трех расчетных сочетаний нагрузок с коэффициентами из Таблицы 3:

– сочетание 1 – «постоянная +(случай нагрузки 1 + частичная поверхностная нагрузка) + ветер»;

– сочетание 2 – «постоянная + (случай нагрузки 3 + частичная поверхностная нагрузка) + ветер»;

– сочетание 3 – «постоянная + ветер».

Определение напряжений в элементах бункера производилось для каждого сочетания, при этом нагрузки задавались одновременно вместе с коэффициентами сочетаний.

Деформированная схема бункера по сочетанию 1 приведена на Рисунке 7, по сочетанию 2 – на Рисунке 8, по сочетанию 3 – на Рисунке 9. Деформированная схема бункера от действия частичной поверхностной нагрузки приведена на Рисунке 10, от действия ветровой нагрузки – на Рисунке 11.

По результатам статического расчета получены нормальные напряжения и изгибные моменты в элементах бункера.

Распределение нормальных окружных напряжений в стенке цилиндра от действия нагрузок первого расчетного сочетания приведены на Рисунке 12а, от второго расчетного сочетания – на

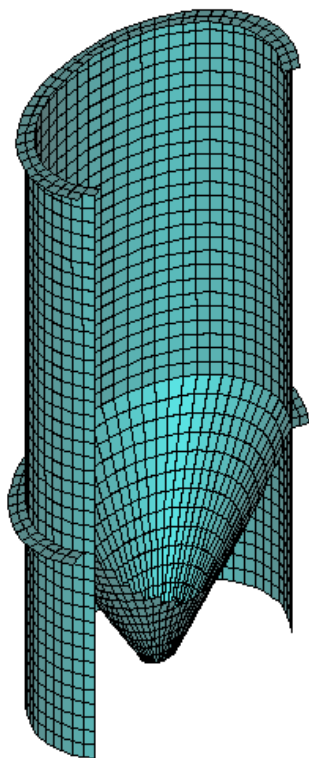
Рисунке 126. Распределение нормальных меридиональных напряжений в стенке цилиндра от действия нагрузок первого расчетного сочетания приведены на Рисунке 13а, от второго расчетного сочетания – на Рисунке 13б, от третьего расчетного сочетания – на Рисунке 13в. Нормальные напряжения в оболочке по результатам статического расчета получены в МПа.

### 3.2 Результаты расчета

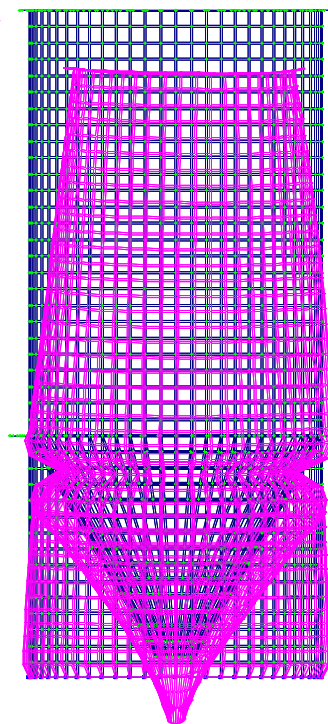
На основании значений напряжений, полученных при статическом расчете (значения напряжений получены в МПа для заданных толщин стенки), необходимо определить напряжения на сантиметр длины оболочки, которые используются в дальнейшем для проверки прочности и устойчивости элементов бункера. В Таблицах 4, 5 и 6 приводятся максимальные равнодействующие напряжений на участках стенки бункера. Напряжения в элементах оболочки бункера приведены отдельно для трех расчетных сочетаний, поскольку для разных элементов бункера максимальные напряжения не совпадают.

**Таблица 4 – Расчетные равнодействующие напряжений для сочетания 1**

№ участка	Компоненты напряженного состояния					
	$n_{\theta,Ed}$	$m_{\theta,Ed}$	$n_{x,Ed}$	$m_{x,Ed}$	$n_{x\theta,Ed}$	$m_{x\theta,Ed}$
	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см
4	0,658	0,001	0,192	0,001	0,031	$1,3 \times 10^{-4}$
3	0,932	0,001	0,446	0,001	0,022	$7,3 \times 10^{-5}$
2	1,074	0,001	0,751	0,001	0,050	$1,1 \times 10^{-4}$
1	1,258	0,008	0,744	0,008	0,069	$3,3 \times 10^{-4}$



**Рисунок 6 – Фрагмент расчетной модели бункера**



**Рисунок 7 – Деформированное состояние для первого сочетания нагрузок**

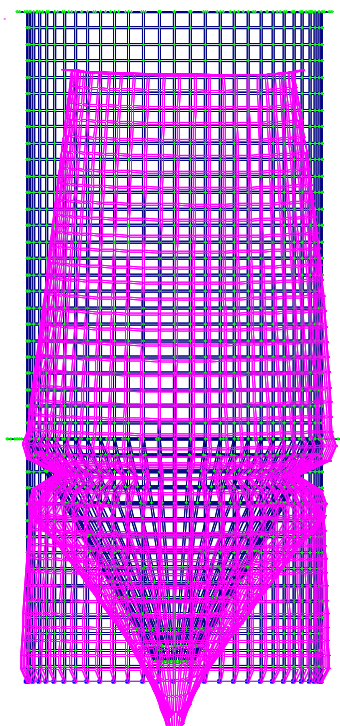


Рисунок 8 – Деформированное состояние бункера для второго сочетания нагрузок

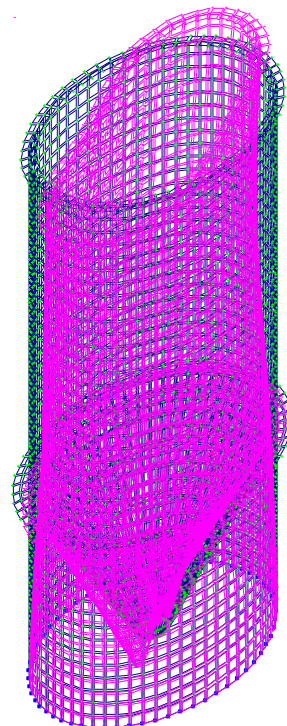


Рисунок 9 – Деформированное состояние бункера для третьего сочетания нагрузок

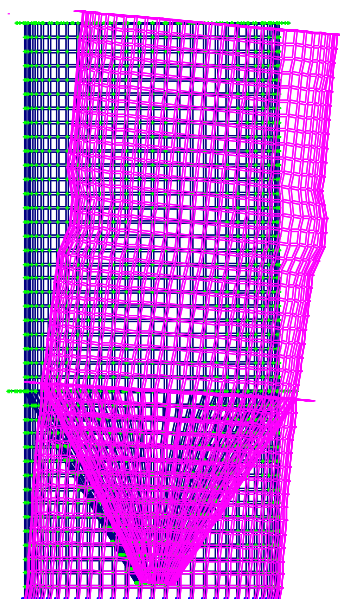


Рисунок 10 – Деформированное состояние бункера от частичной поверхностной нагрузки

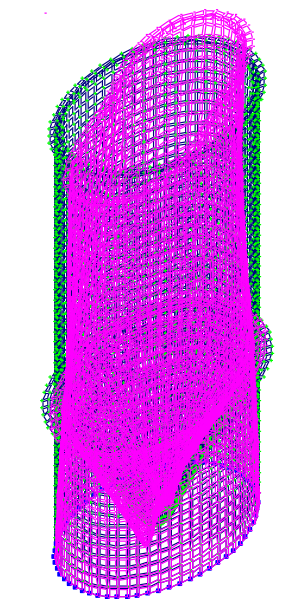


Рисунок 11 – Деформированное состояние бункера от ветровой нагрузки (ветер слева)

а)

б)



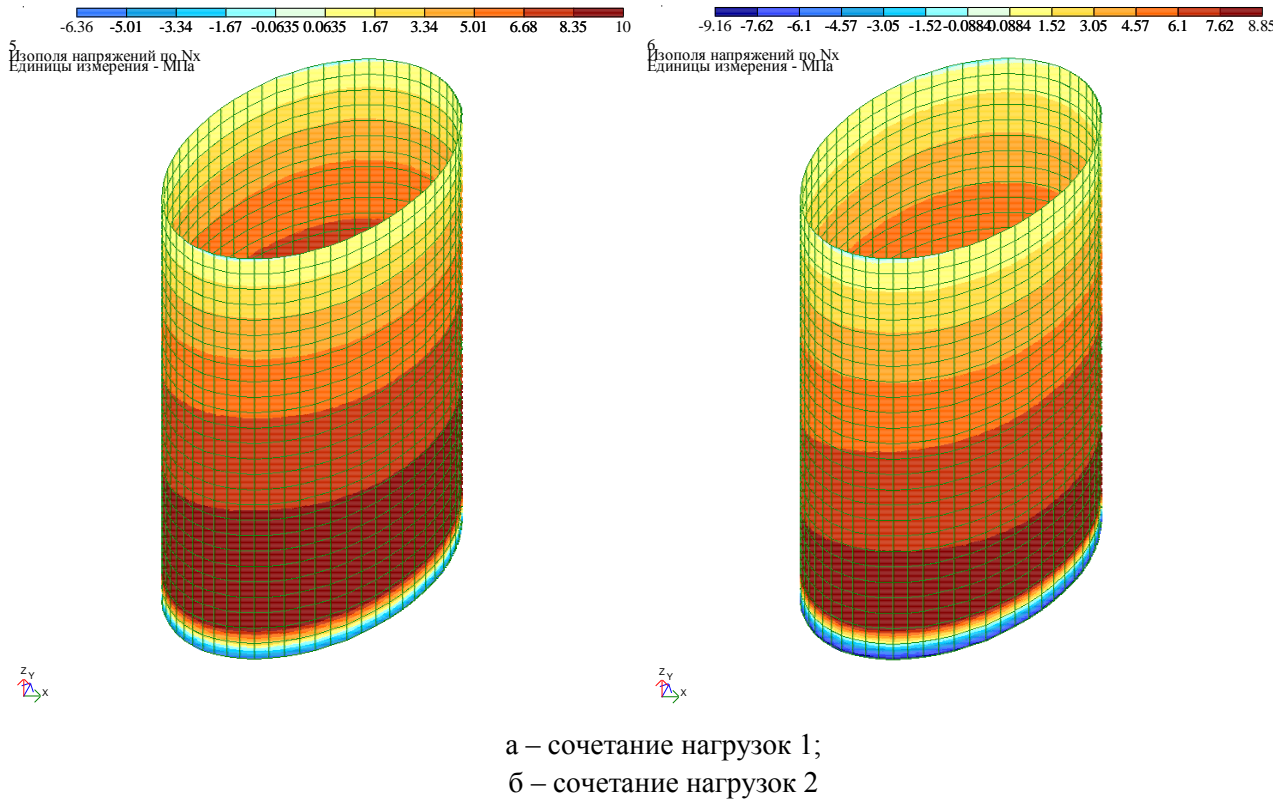


Рисунок 12 – Распределение кольцевых напряжений в стенке цилиндра, МПа

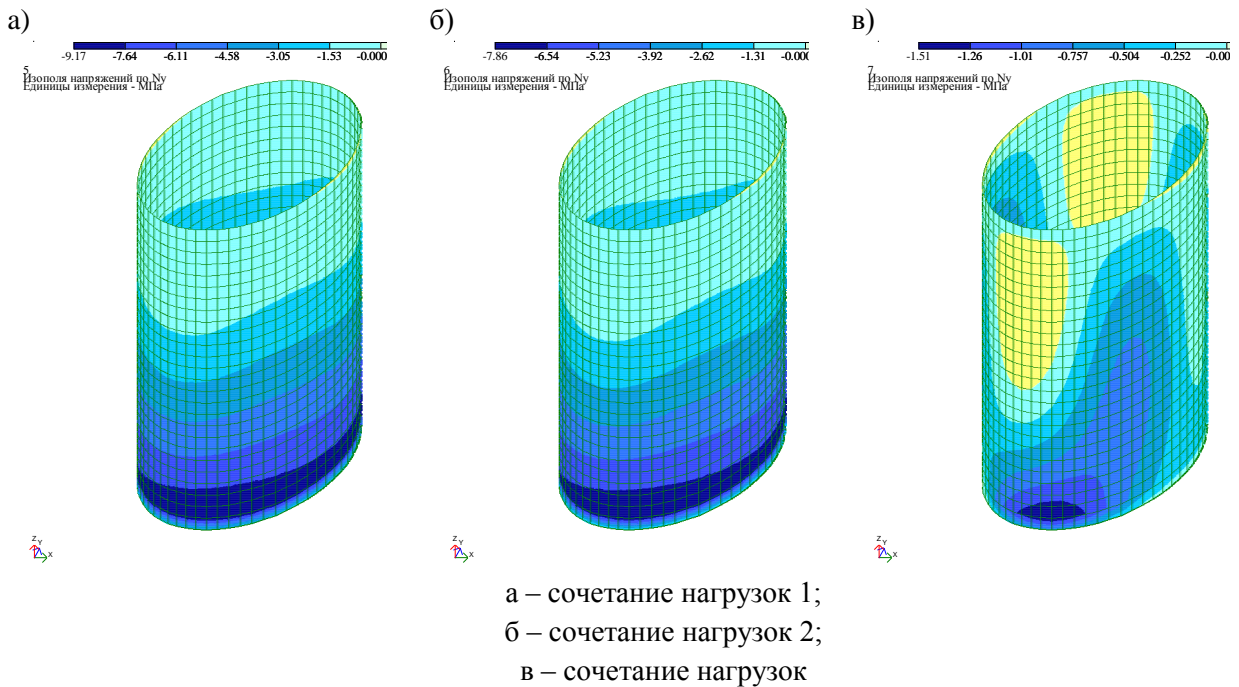


Рисунок 13 – Распределение меридиональных нормальных напряжений в стенке цилиндра, МПа



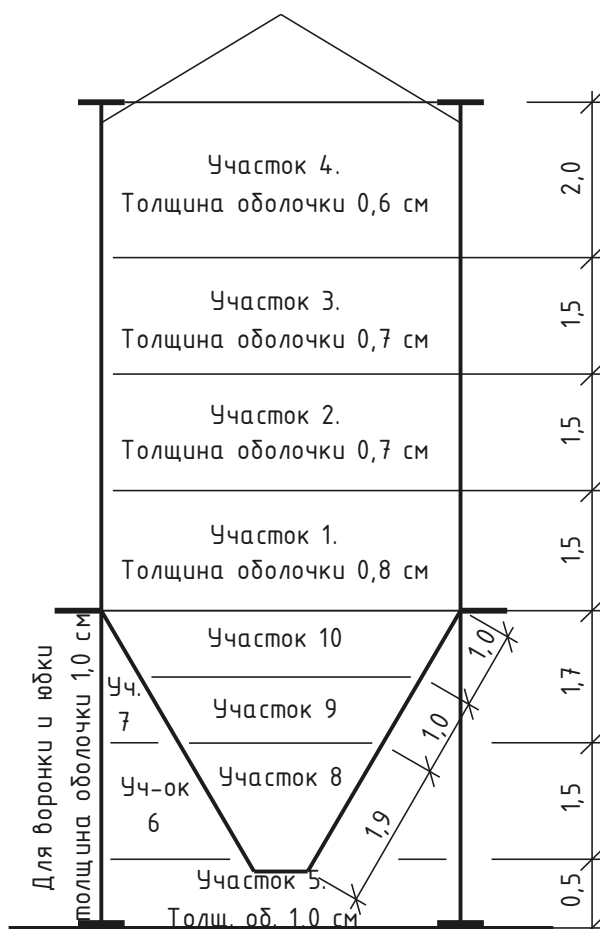


Рисунок 14 – Схема расположения участков бункера

Таблица 5 – Расчетные равнодействующие напряжений для сочетания 2

№ участка	$n_{\theta,Ed}$	Компоненты $m_{\theta,Ed}$	напряженного $n_{x,Ed}$	состояния $m_{x,Ed}$	$n_{x\theta,Ed}$	$m_{x\theta,Ed}$
	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см
4	0,521	0,001	0,160	0,001	0,031	$1,3 \times 10^{-4}$
3	0,780	0,001	0,368	0,0005	0,022	$7,3 \times 10^{-4}$
2	0,928	0,001	0,631	$4,0 \times 10^{-4}$	0,050	$1,1 \times 10^{-4}$
1	1,146	0,011	0,975	0,039	0,069	$3,3 \times 10^{-4}$

Таблица 6 – Расчетная равнодействующая напряжений для сочетания 3

№ участка	$n_{x,Ed}$
4	0,079
3	0,100
2	0,110
1	0,193

Компоненты напряженного состояния, приведенные в Таблицах 4, 5, 6:

$n_{x,Ed}$  — расчетная равнодействующая меридиональных мембранных нормальных напряжений на единицу длины окружности;

$n_{\theta,Ed}$  – расчетная равнодействующая окружных (кольцевых) мембранных нормальных напряжений на единицу высоты оболочки;

$n_{x\theta,Ed}$  – расчетная равнодействующая мембранных касательных напряжений на единицу ширины оболочки;

$m_{x,Ed}$  – расчетный меридиональный изгибающий момент на единицу длины окружности;

$m_{\theta,Ed}$  – расчетный окружной (кольцевой) изгибающий момент на единицу высоты оболочки;

$m_{x\theta,Ed}$  – расчетный крутящий момент от касательных напряжений на единицу ширины оболочки.

#### 4 Расчет цилиндрической стенки

##### 4.1 Расчет по пластическому предельному состоянию (расчет на прочность)

###### 4.1.1 Методика расчета

а) Поскольку расчет был выполнен по моментной упругой теории оболочек (ЛА), полученное двумерное поле равнодействующих основных напряжений преобразуется в фиктивные компоненты равнодействующих напряжений (Формулы 5.2 и 5.3):

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{n_{x,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x,Ed}}{t^2/4}, \quad \sigma_{\theta,Ed} = \frac{n_{\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{\theta,Ed}}{t^2/4}, \quad \tau_{x\theta,Ed} = \frac{n_{x\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x\theta,Ed}}{t^2/4},$$

где обозначения приняты по п. 3.2 примера (см. выше).

б) определение приведенных расчетных напряжений фон Мизеса (Формула 5.4):

$$\sigma_{e,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed}\sigma_{\theta,Ed} + 3\tau_{x\theta,Ed}^2}$$

в) эквивалентная расчетная несущая способность для сварных конструкций (Формула 5.5):

$$f_{e,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}},$$

где  $\gamma_{M0}$  – частный коэффициент для несущей способности по пластическому предельному состоянию  $\gamma_{M0} = 1,00$  (Таблица 2.2).

г) проверка несущей способности по приведенным равнодействующим напряжениям (Формула 5.10):

$$\sigma_{e,Ed} \leq f_{e,Rd}$$

д) несущая способность по отдельным равнодействующим

– несущая способность в меридиональном направлении (Формула 5.7):

$$n_{x,Rd} = \frac{f_u t}{\gamma_{M2}};$$

– несущая способность в окружном направлении (Формула 5.8):

$$n_{\theta,Rd} = \frac{f_u t}{\gamma_{M2}};$$

– несущая способность по касательным напряжениям (Формула 5.9):

$$n_{x\theta,Rd} = \frac{0,57 f_y t}{\gamma_{M0}};$$

е) проверка по отдельным равнодействующим (Формулы 5.11–5.13):

$$n_{x,Ed} \leq n_{x,Rd}, \quad n_{\theta,Ed} \leq n_{\theta,Rd}, \quad n_{x\theta,Ed} \leq n_{x\theta,Rd}.$$

##### 4.1.2 Расчет участков

###### 4.1.2.1 Участок 4:

а) фиктивные компоненты равнодействующих напряжений:

$$\sigma_{x,Ed4} = \frac{n_{x,Ed4}}{t_4} + \frac{m_{x,Ed4}}{t_4^2/4} = \frac{0,192}{0,6} + \frac{0,001}{0,6^2/4} = 0,331 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

$$\sigma_{\theta,Ed4} = \frac{n_{\theta,Ed4}}{t_4} + \frac{m_{\theta,Ed4}}{t_4^2/4} = \frac{0,658}{0,6} + \frac{0,001}{0,6^2/4} = 1,108 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

$$\tau_{x\theta,Ed4} = \frac{n_{x\theta,Ed4}}{t_4} + \frac{m_{x\theta,Ed4}}{t_4^2/4} = \frac{0,031}{0,6} + \frac{1,3 \cdot 10^{-4}}{0,6^2/4} = 0,053 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

б) определение приведенных расчетных напряжений фон Мизеса:

$$\sigma_{e,Ed4} = \sqrt{\sigma_{x,Ed4}^2 + \sigma_{\theta,Ed4}^2 - \sigma_{x,Ed4}\sigma_{\theta,Ed4} + 3\tau_{x\theta,Ed4}^2} =$$

$$= \sqrt{0,331^2 + 1,108^2 - 0,331 \cdot 1,108 + 3 \cdot 0,053^2} = 0,99 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

в) эквивалентная расчетная несущая способность для сварных конструкций:

$$f_{e,Rd4} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1,00} = 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где  $\gamma_{M0}$  – частный коэффициент для несущей способности по пластическому предельному состоянию,  $\gamma_{M0} = 1,00$ ;

$f_y$  – предел текучести листа стенки оболочки,  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

г) проверка несущей способности по приведенным равнодействующим напряжениям:

$$\sigma_{e,Ed4} \leq f_{e,Rd4}, \quad 0,99 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} - \text{условие выполняется.}$$

д) несущая способность по отдельным равнодействующим:

– несущая способность в меридиональном направлении:

$$n_{x,Rd4} = \frac{f_u t_4}{\gamma_{M2}} = 36 \cdot \frac{0,6}{1,25} = 17,28 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

– несущая способность в окружном направлении:

$$n_{\theta,Rd4} = \frac{f_u t_4}{\gamma_{M2}} = 36 \cdot \frac{0,6}{1,25} = 17,28 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

– несущая способность по касательным напряжениям:

$$n_{x\theta,Rd4} = \frac{0,57 f_y t_4}{\gamma_{M0}} = 0,57 \cdot 23,5 \cdot \frac{0,6}{1,00} = 8,04 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

где  $f_u$  – временное сопротивление,  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ ;

$\gamma_{M0}, \gamma_{M2}$  – частные коэффициенты для несущей способности:  $\gamma_{M0} = 1,00$ ,  $\gamma_{M2} = 1,25$  (Таблица 2.2).

е) проверка по отдельным равнодействующим:

$$n_{x,Ed4} \leq n_{x,Rd4}, \quad 0,192 < 17,28 - \text{условие выполняется};$$

$$n_{\theta,Ed4} \leq n_{\theta,Rd4}, \quad 0,658 < 17,28 - \text{условие выполняется};$$

$$n_{x\theta,Ed4} \leq n_{x\theta,Rd4}, \quad 0,031 < 8,04 - \text{условие выполняется.}$$

#### 4.1.2.2 Участок 3

а) фиктивные компоненты равнодействующих напряжений:

$$\sigma_{x,Ed3} = \frac{n_{x,Ed3}}{t_3} + \frac{m_{x,Ed3}}{t_3^2/4} = \frac{0,446}{0,7} + \frac{0,001}{0,7^2/4} = 0,645 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

$$\sigma_{\theta,Ed3} = \frac{n_{\theta,Ed3}}{t_3} + \frac{m_{\theta,Ed3}}{t_3^2/4} = \frac{0,932}{0,7} + \frac{0,001}{0,7^2/4} = 1,34 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

$$\tau_{x\theta,Ed3} = \frac{n_{x\theta,Ed3}}{t_3} + \frac{m_{x\theta,Ed3}}{t_3^2/4} = \frac{0,022}{0,7} + \frac{7,3 \cdot 10^{-5}}{0,7^2/4} = 0,032 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

б) определение приведенных расчетных напряжений фон Мизеса:

$$\sigma_{e,Ed3} = \sqrt{\sigma_{x,Ed3}^2 + \sigma_{\theta,Ed3}^2 - \sigma_{x,Ed3}\sigma_{\theta,Ed3} + 3\tau_{x\theta,Ed3}^2} =$$

$$= \sqrt{0,645^2 + 1,34^2 - 0,645 \cdot 1,34 + 3 \cdot 0,032^2} = 1,16 \text{ кН/см}^2$$

в) эквивалентная расчетная несущая способность для сварных конструкций:

$$f_{e,Rd3} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1,00} = 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где  $\gamma_{M0}$  – частный коэффициент для несущей способности по пластическому предельному состоянию,  $\gamma_{M0} = 1,00$ ;

$f_y$  – предел текучести листа стенки оболочки,  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

г) проверка несущей способности по приведенным равнодействующим напряжениям:

$$\sigma_{e,Ed3} \leq f_{e,Rd3}, \quad 1,16 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} - \text{условие выполняется.}$$

д) несущая способность по отдельным равнодействующим:

– несущая способность в меридиональном направлении:

$$n_{x,Rd3} = \frac{f_u t_3}{\gamma_{M2}} = 36 \cdot \frac{0,7}{1,25} = 20,16 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

– несущая способность в окружном направлении:

$$n_{\theta,Rd3} = \frac{f_u t_3}{\gamma_{M2}} = 36 \cdot \frac{0,7}{1,25} = 20,16 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

– несущая способность по касательным напряжениям:

$$n_{x\theta,Rd3} = \frac{0,57 f_y t_3}{\gamma_{M0}} = 0,57 \cdot 23,5 \cdot \frac{0,7}{1,00} = 9,38 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

где  $f_u$  – временное сопротивление,  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ ;

$\gamma_{M0}, \gamma_{M2}$  – частные коэффициенты для несущей способности (Таблица 2.2),

$\gamma_{M0} = 1, \gamma_{M2} = 1,25$ .

е) проверка по отдельным равнодействующим:

$$n_{x,Ed3} \leq n_{x,Rd3}, \quad 0,446 < 20,16 - \text{условие выполняется.}$$

$$n_{\theta,Ed3} \leq n_{\theta,Rd3}, \quad 0,932 < 20,16 - \text{условие выполняется.}$$

$$n_{x\theta,Ed3} \leq n_{x\theta,Rd3}, \quad 0,022 < 9,38 - \text{условие выполняется.}$$

#### 4.1.2.3 Участок 2

а) фиктивные компоненты равнодействующих напряжений:

$$\sigma_{x,Ed2} = \frac{n_{x,Ed2}}{t_2} + \frac{m_{x,Ed2}}{t_2^2/4} = \frac{0,715}{0,7} + \frac{0,001}{0,7^2/4} = 1,081 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

$$\sigma_{\theta,Ed2} = \frac{n_{\theta,Ed2}}{t_2} + \frac{m_{\theta,Ed2}}{t_2^2/4} = \frac{1,074}{0,7} + \frac{0,001}{0,7^2/4} = 1,542 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

$$\tau_{x\theta,Ed2} = \frac{n_{x\theta,Ed2}}{t_2} + \frac{m_{x\theta,Ed2}}{t_2^2/4} = \frac{0,05}{0,7} + \frac{1,1 \cdot 10^{-4}}{0,7^2/4} = 0,072 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

б) определение приведенных расчетных напряжений фон Мизеса:

$$\sigma_{e,Ed2} = \sqrt{\sigma_{x,Ed2}^2 + \sigma_{\theta,Ed2}^2 - \sigma_{x,Ed2} \sigma_{\theta,Ed2} + 3 \tau_{x\theta,Ed2}^2} =$$

$$= \sqrt{1,081^2 + 1,542^2 - 1,081 \cdot 1,542 + 3 \cdot 0,072^2} = 1,38 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

в) эквивалентная расчетная несущая способность для сварных конструкций:

$$f_{e,Rd2} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1,00} = 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где  $\gamma_{M0}$  – частный коэффициент для несущей способности по пластическому предельному состоянию,  $\gamma_{M0} = 1,00$ ;

$f_y$  – предел текучести,  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

г) проверка несущей способности по приведенным равнодействующим напряжениям:

$$\sigma_{e,Ed2} \leq f_{e,Rd2} \quad 1,38 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} - \text{условие выполняется.}$$

д) несущая способность по отдельным равнодействующим:

– несущая способность в меридиональном направлении:

$$n_{x,Rd2} = \frac{f_u t_2}{\gamma_{M2}} = 36 \cdot \frac{0,7}{1,25} = 20,16 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

– несущая способность в окружном направлении:

$$n_{\theta,Rd2} = \frac{f_u t_2}{\gamma_{M2}} = 36 \cdot \frac{0,7}{1,25} = 20,16 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

– несущая способность по касательным напряжениям:

$$n_{x\theta,Rd2} = \frac{0,57 f_y t_2}{\gamma_{M0}} = 0,57 \cdot 23,5 \cdot \frac{0,7}{1,00} = 9,38 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

где  $f_u$  – временное сопротивление,  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ ;

$\gamma_{M0}, \gamma_{M2}$  – частные коэффициенты для несущей способности,  $\gamma_{M0} = 1, \gamma_{M2} = 1,25$ .

е) проверка по отдельным равнодействующим:

$$n_{x,Ed2} \leq n_{x,Rd2}, \quad 0,751 < 20,16 - \text{условие выполняется.}$$

$$n_{\theta,Ed2} \leq n_{\theta,Rd2}, \quad 1,074 < 20,16 - \text{условие выполняется.}$$

$$n_{x\theta,Ed2} \leq n_{x\theta,Rd2}, \quad 0,05 < 9,38 - \text{условие выполняется.}$$

#### 4.1.2.4 Участок 1

а) фиктивные компоненты равнодействующих напряжений:

$$\sigma_{x,Ed1} = \frac{n_{x,Ed1}}{t_1} + \frac{m_{x,Ed1}}{t_1^2/4} = \frac{0,744}{0,8} + \frac{0,008}{0,8^2/4} = 0,98 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

$$\sigma_{\theta,Ed1} = \frac{n_{\theta,Ed1}}{t_1} + \frac{m_{\theta,Ed1}}{t_1^2/4} = \frac{1,258}{0,8} + \frac{0,008}{0,8^2/4} = 1,623 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

$$\tau_{x\theta,Ed1} = \frac{n_{x\theta,Ed1}}{t_1} + \frac{m_{x\theta,Ed1}}{t_1^2/4} = \frac{0,069}{0,8} + \frac{3,3 \cdot 10^{-4}}{0,8^2/4} = 0,088 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

б) определение приведенных расчетных напряжений фон Мизеса:

$$\sigma_{e,Ed1} = \sqrt{\sigma_{x,Ed1}^2 + \sigma_{\theta,Ed1}^2 - \sigma_{x,Ed1} \sigma_{\theta,Ed1} + 3 \tau_{x\theta,Ed1}^2};$$

$$\sigma_{e,Ed1} = \sqrt{0,98^2 + 1,623^2 - 0,98 \cdot 1,623 + 3 \cdot 0,088^2} = 1,423 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

в) эквивалентная расчетная несущая способность для сварных конструкций:

$$f_{e,Rd1} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1,00} = 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где  $\gamma_{M0}$  – частный коэффициент для несущей способности по пластическому предельному состоянию,  $\gamma_{M0} = 1,00$ ;

$f_y$  – предел текучести,  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

г) проверка несущей способности по приведенным равнодействующим напряжениям:

$$\sigma_{e,Ed1} \leq f_{e,Rd1}, \quad 1,423 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} - \text{условие выполняется.}$$

д) несущая способность по отдельным равнодействующим:

– несущая способность в меридиональном направлении:

$$n_{x,Rd1} = \frac{f_u t_1}{\gamma_{M2}} = 36 \cdot \frac{0,8}{1,25} = 23,04 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

– несущая способность в окружном направлении:

$$n_{\theta,Rd1} = \frac{f_u t_1}{\gamma_{M2}} = 36 \cdot \frac{0,8}{1,25} = 23,04 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

– несущая способность по касательным напряжениям:

$$n_{x\theta,Rd1} = \frac{0,57 f_y t_1}{\gamma_{M0}} = 0,57 \cdot 23,5 \cdot \frac{0,8}{1,00} = 10,72 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

где  $f_u$  – временное сопротивление,  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ ;

$\gamma_{M0}, \gamma_{M2}$  – частные коэффициенты для несущей способности (Таблица 2.2),

$\gamma_{M0} = 1, \gamma_{M2} = 1,25$ .

е) проверка по отдельным равнодействующим:

$$n_{x,Ed1} \leq n_{x,Rd1}, \quad 0,975 < 23,04 \text{ – условие выполняется.}$$

$$n_{\theta,Ed4} \leq n_{\theta,Rd4}, \quad 1,258 < 23,04 \text{ – условие выполняется.}$$

$$n_{x\theta,Ed4} \leq n_{x\theta,Rd4}, \quad 0,069 < 10,72 \text{ – условие выполняется.}$$

4.2 Расчет по предельному состоянию потери устойчивости (расчет стенки на устойчивость)

4.2.1 Исходные условия для расчета устойчивости:

Качество допуска на изготовление – стандартное с параметром качества  $Q = 16$  по Таблице

5.1.

Кольцевые и продольные (меридиональные) ребра жесткости по оболочке – отсутствуют.

4.2.2 Методика расчета на устойчивость при наличии внутреннего давления:

а) репрезентативное значение амплитуды несовершенства  $w_{ok}$  (Формула 5.14):

$$w_{ok} = \frac{t}{Q} \sqrt{\bar{r}};$$

б) упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства в условиях отсутствия давления (Формула 5.15):

$$\alpha_0 = \frac{0,62}{1 + 1,91 \psi \left( \frac{w_{ok}}{t} \right)^{1,44}},$$

где параметр неравномерности напряжений  $\psi = 1,0$ , т.к. имеет место случай равномерного сжатия по окружности.

в) упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства и давления  $\alpha_{pe}$  определяется в следующей последовательности:

– критические напряжения потери устойчивости в упругой стадии (Формула 5.28):

$$\sigma_{x,Rcr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \frac{t}{r} = 0,605 E \frac{t}{r};$$

– минимальное достоверное расчетное значение условного локального внутреннего давления в данной расчетной точке (Формула 5.17):

$$\bar{p}_s = \frac{p_s r}{t \sigma_{x,Rcr}},$$

где  $p_s$  – минимальное локальное внутреннее давление в данной расчетной точке, принимается по Таблице 1 для случая нагрузки 3;

– значение упругого понижающего коэффициента (Формула 5.16):

$$\alpha_{pe} = \alpha_0 + (1 - \alpha_0) \left( \frac{\bar{p}_s}{\bar{p}_s + \frac{0,3}{\sqrt{\alpha_0}}} \right);$$

г) пластический понижающий коэффициент при наличии несовершенства определяется в следующей последовательности:

– наибольшее условное локальное давление в рассматриваемой точке (Формула 5.19):

$$\bar{p}_g = \frac{p_g}{\sigma_{x,Rcr}} \cdot \frac{r}{t},$$

где  $p_g$  – наибольшее расчетное значение локального внутреннего давления в данной расчетной точке, принимается по Таблице 1 с коэффициентом 1,5 или по Рисунку 2.

– параметр (Формула 5.20):

$$s = \left( \frac{1}{400} \right) \left( \frac{r}{t} \right);$$

– квадрат условной гибкости (Формула 5.21):

$$\bar{\lambda}_x^2 = \frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}};$$

– значение коэффициента (Формула 5.18):

$$\alpha_{pp} = \left\{ 1 - \left( \frac{\bar{p}_g}{\bar{\lambda}_x^2} \right)^2 \right\} \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + s^{3/2}} \right] \left[ \frac{s^2 + 1,21\bar{\lambda}_x^2}{s(s+1)} \right].$$

д) поскольку в бункере имеется внутреннее давление, упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства  $\alpha$  следует принимать как наименьшее из значений двух величин:  $\alpha_{pe}$  и  $\alpha_{pp}$ , но не менее  $\alpha_0$  (п. 5.3.2.4.5);

е) коэффициент снижения устойчивости  $\chi_x$  определяется как функция относительной гибкости оболочки  $\bar{\lambda}_x$  (Формулы 5.30 – 5.35):

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}}}, \quad \bar{\lambda}_0 = 0,2, \quad \bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}};$$

$$\chi_x = 1 \text{ если } \bar{\lambda}_x \leq \bar{\lambda}_0;$$

$$\chi_x = 1 - \beta \left( \frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta \text{ если } \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_p;$$

$$\chi_x = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_x^2} \text{ если } \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}_x,$$

где:  $\beta = 0,6$  и  $\eta = 1,0$  (согласно НП.2.13).

ж) характеристическое значение критических напряжений потери устойчивости (Формула 5.29):

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x f_y;$$

з) расчетные мембранные критические напряжения потери устойчивости (Формула 5.36):

$$\sigma_{x,Rd} = \frac{\sigma_{x,Rk}}{\gamma_{M1}},$$

где  $\gamma_{M1}$  – частный коэффициент для несущей способности по предельному состоянию устойчивости,  $\gamma_{M1} = 1,10$  по Таблице 2.2.

и) проверка устойчивости оболочки (Формула 5.37):

$$n_{x,Ed} \leq t\sigma_{x,Rd}.$$

#### 4.2.3 Расчет участков оболочки

##### 4.2.3.1 Участок 4

а) репрезентативное значение амплитуды несовершенства  $w_{ok}$ :

$$w_{ok4} = \frac{t_4}{Q} \sqrt{\frac{r}{t_4}} = \frac{0,6}{16} \sqrt{\frac{225}{0,6}} = 0,73 \text{ см};$$

б) упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства  $\alpha_0$  в условиях отсутствия давления:

$$\alpha_{04} = \frac{0,62}{1 + 1,91\psi \left(\frac{W_{ok4}}{t_4}\right)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot 1 \left(\frac{0,73}{0,6}\right)^{1,44}} = 0,176,$$

где параметр неравномерности напряжений  $\psi = 1$ , т.к. имеет место случай равномерного сжатия по окружности.

в) упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства и давления  $\alpha_{pe}$  определяется в следующей последовательности:

– критические напряжения потери устойчивости в упругой стадии:

$$\sigma_{x,Rcr4} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \frac{t_4}{r} = 0,605E \frac{t_4}{r} = 0,605 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot \frac{0,6}{225} = 33,88 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

– минимальное достоверное расчетное значение условного локального внутреннего давления в данной расчетной точке:

$$\bar{p}_{s4} = \frac{p_{s4}r}{t_4\sigma_{x,Rcr4}} = \frac{23,13 \cdot 10^{-4} \cdot 225}{0,6 \cdot 33,88} = 0,026,$$

где  $p_s$  – расчетное значение локального внутреннего давления в данной расчетной точке, принимается по интерполяции значений по Таблице 1,  $p_{s4} = 15,42 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5 = 23,13 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2$ .

– значение упругого понижающего коэффициента:

$$\alpha_{pe4} = \alpha_{04} + (1 - \alpha_{04}) \left( \frac{\bar{p}_{s4}}{\bar{p}_{s4} + \frac{0,3}{\sqrt{\alpha_{04}}}} \right) = 0,176 + (1 - 0,176) \left( \frac{0,026}{0,026 + \frac{0,3}{\sqrt{0,176}}} \right) = 0,205;$$

г) пластический понижающий коэффициент при наличии несовершенства:

– наибольшее условное локальное давление в рассматриваемой точке, определяется по Рисунку 2,  $p_{g4} = 29,27 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2$ :

$$\bar{p}_{g4} = \frac{p_{g4}}{\sigma_{x,Rcr4}} \cdot \frac{r}{t_4} = \frac{29,27 \cdot 10^{-4}}{33,88} \cdot \frac{225}{0,6} = 0,033;$$

– параметр:

$$s_4 = \left( \frac{1}{400} \right) \left( \frac{r}{t_4} \right) = \left( \frac{1}{400} \right) \left( \frac{225}{0,6} \right) = 0,938;$$

– квадрат условной гибкости:

$$\bar{\lambda}_{x4}^2 = \frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr4}} = \frac{23,5}{33,88} = 0,694;$$

– значение коэффициента:

$$\alpha_{pp4} = \left\{ 1 - \left( \frac{\bar{p}_{g4}}{\bar{\lambda}_{x4}^2} \right)^2 \right\} \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + s_4^{3/2}} \right] \left[ \frac{s_4^2 + 1,21\bar{\lambda}_{x4}^2}{s_4(s_4 + 1)} \right];$$

$$\alpha_{pp4} = \left\{ 1 - \left( \frac{0,033}{0,694} \right)^2 \right\} \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + 0,938^{3/2}} \right] \left[ \frac{0,938^2 + 1,21 \cdot 0,694}{0,938(0,938 + 1)} \right] = 0,479.$$

д) т.к.  $\alpha_{04} < \alpha_{pe4} < \alpha_{pp4}$  то  $\alpha_4 = 0,176$ .

е) коэффициент снижения устойчивости  $\chi_x$  определяется как функция относительной гибкости оболочки:

$$\bar{\lambda}_{x4} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr4}}} = \sqrt{\frac{23,5}{33,88}} = 0,833; \bar{\lambda}_0 = 0,2 \text{ и } \bar{\lambda}_{p4} = \sqrt{\frac{\alpha_4}{1 - \beta}} = \sqrt{\frac{0,176}{1 - 0,6}} = 0,664,$$

где  $\beta = 0,6$ .



$$\text{т. к. } \bar{\lambda}_{p4} \leq \bar{\lambda}_{x4} \text{ то } \chi_{x4} = \frac{\alpha_4}{\bar{\lambda}_{x4}^2} = \frac{0,176}{0,694} = 0,254.$$

ж) характеристическое значение критических напряжений потери устойчивости:

$$\sigma_{x,Rk4} = \chi_{x4} f_y = 0,254 \cdot 23,5 = 5,98 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

з) расчетные мембранные критические напряжения потери устойчивости:

$$\sigma_{x,Rd4} = \frac{\sigma_{x,Rk4}}{\gamma_{M1}} = \frac{5,98}{1,10} = 5,43 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где  $\gamma_{M1}$  – частный коэффициент для несущей способности по предельному состоянию устойчивости,  $\gamma_{M1} = 1,10$  по Таблице 2.2.

и) проверка устойчивости оболочки:

$$n_{x,Ed4} \leq t_4 \sigma_{x,Rd4};$$

$$t_4 \sigma_{x,Rd4} = 0,6 \cdot 5,43 = 3,26 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

$$0,192 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < 3,26 \frac{\text{кН}}{\text{см}} - \text{условие выполняется.}$$

#### 4.2.3.2 Участок 3

а) репрезентативное значение амплитуды несовершенства  $w_{ok}$ :

$$w_{ok3} = \frac{t_3}{Q} \sqrt{\frac{r}{t_3}} = \frac{0,7}{16} \sqrt{\frac{225}{0,7}} = 0,784 \text{ см};$$

б) упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства в условиях отсутствия давления:

$$\alpha_{03} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \psi \left( \frac{w_{ok3}}{t_3} \right)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot 1 \left( \frac{0,784}{0,7} \right)^{1,44}} = 0,191,$$

где параметр неравномерности напряжений  $\psi = 1$ , т.к. имеет место случай равномерного сжатия по окружности.

в) упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства и давления  $\alpha_{pe}$ :

– критические напряжения потери устойчивости в упругой стадии:

$$\sigma_{x,Rcr3} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \frac{t_3}{r} = 0,605 E \frac{t_3}{r} = 0,605 \cdot 2,10 \cdot 10^4 \cdot \frac{0,7}{225} = 39,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

– минимальное достоверное расчетное значение условного локального внутреннего давления в данной расчетной точке:

$$\bar{p}_{s3} = \frac{p_{s3} r}{t_3 \sigma_{x,Rcr3}} = \frac{33,98 \cdot 10^{-4} \cdot 225}{0,7 \cdot 39,5} = 0,028,$$

где  $p_{s3}$  – локальное внутреннее давление в данной расчетной точке, принимается по Таблице 1,  $p_{s3} = 22,65 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5 = 33,98 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2$ .

– значение упругого понижающего коэффициента:

$$\alpha_{pe3} = \alpha_{03} + (1 - \alpha_{03}) \left( \frac{\bar{p}_{s3}}{\bar{p}_{s3} + \frac{0,3}{\sqrt{\alpha_{03}}}} \right) = 0,191 + (1 - 0,191) \left( \frac{0,028}{0,028 + \frac{0,3}{\sqrt{0,191}}} \right) = 0,222;$$

г) пластический понижающий коэффициент при наличии несовершенства:

– наибольшее условное локальное давление в рассматриваемой точке, определяется по Рисунку 2,  $p_{g3} = 40,77 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}$ :

$$\bar{p}_{g3} = \frac{p_{g3}}{\sigma_{x,Rcr3}} \cdot \frac{r}{t_3} = \frac{40,77 \cdot 10^{-4}}{39,5} \cdot \frac{225}{0,7} = 0,033;$$

– параметр:

$$s_3 = \left(\frac{1}{400}\right) \left(\frac{r}{t_3}\right) = \left(\frac{1}{400}\right) \left(\frac{225}{0,7}\right) = 0,804;$$

– квадрат условной гибкости:

$$\bar{\lambda}_{x3}^2 = \frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr3}} = \frac{23,5}{39,5} = 0,595;$$

– значение коэффициента:

$$\begin{aligned} \alpha_{pp3} &= \left\{ 1 - \left( \frac{\bar{p}_{g3}}{\bar{\lambda}_{x3}^2} \right)^2 \right\} \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + s_3^{3/2}} \right] \left[ \frac{s_3^2 + 1,21 \bar{\lambda}_{x3}^2}{s_3(s_3 + 1)} \right] = \\ &= \left\{ 1 - \left( \frac{0,033}{0,595} \right)^2 \right\} \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + 0,804^{3/2}} \right] \left[ \frac{0,804^2 + 1,21 \cdot 0,595}{0,804(0,804 + 1)} \right] = 0,430. \end{aligned}$$

д) т. к.  $\alpha_{03} < \alpha_{pe3} < \alpha_{pp3}$ , то  $\alpha_3 = 0,191$ ;

е) Коэффициент снижения устойчивости  $\chi_x$  определяется как функция относительной гибкости оболочки:

$$\bar{\lambda}_{x3} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr3}}} = \sqrt{\frac{23,5}{39,5}} = 0,771; \bar{\lambda}_0 = 0,2 \text{ и } \bar{\lambda}_{p3} = \sqrt{\frac{\alpha_3}{1 - \beta}} = \sqrt{\frac{0,191}{1 - 0,6}} = 0,691,$$

где  $\beta = 0,6$ .

$$\text{т. к. } \bar{\lambda}_{p3} \leq \bar{\lambda}_{x3} \text{ то } \chi_{x3} = \frac{\alpha_3}{\bar{\lambda}_{x3}^2} = \frac{0,191}{0,595} = 0,321,$$

ж) характеристическое значение критических напряжений потери устойчивости:

$$\sigma_{x,Rk3} = \chi_{x3} f_y = 0,321 \cdot 23,5 = 7,54 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

з) расчетные мембранные напряжения при потере устойчивости:

$$\sigma_{x,Rd3} = \frac{\sigma_{x,Rk3}}{\gamma_{M1}} = \frac{7,54}{1,10} = 6,86 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где  $\gamma_{M1}$  – частный коэффициент для несущей способности по предельному состоянию устойчивости.

и) проверка устойчивости оболочки:

$$n_{x,Ed3} \leq t_3 \sigma_{x,Rd3};$$

$$t_3 \sigma_{x,Rd3} = 0,7 \cdot 6,86 = 4,80 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

$$0,446 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < 4,80 \frac{\text{кН}}{\text{см}} - \text{условие выполняется.}$$

#### 4.2.3.3 Участок 2

а) репрезентативное значение амплитуды несовершенства  $w_{ok}$ :

$$w_{ok2} = \frac{t_2}{Q} \sqrt{\frac{r}{t_2}} = \frac{0,7}{16} \sqrt{\frac{225}{0,7}} = 0,784 \text{ см};$$

б) упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства  $\alpha_0$  в условиях отсутствия давления:

$$\alpha_{02} = \frac{0,62}{1 + 1,91\psi \left(\frac{w_{ок2}}{t_2}\right)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot 1 \left(\frac{0,784}{0,7}\right)^{1,44}} = 0,191,$$

где параметр неравномерности напряжений  $\psi = 1$ , т.к. имеет место случай равномерного сжатия по окружности.

в) упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства и давления  $\alpha_{pe}$  определяется в следующей последовательности:

– критические напряжения потери устойчивости в упругой стадии:

$$\sigma_{x,Rcr2} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \frac{t_2}{r} = 0,605E \frac{t_2}{r} = 0,605 \cdot 2,10 \cdot 10^4 \cdot \frac{0,7}{225} = 39,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

– минимальное достоверное расчетное значение условного локального внутреннего давления в данной расчетной точке:

$$\bar{p}_{s2} = \frac{p_{s2}r}{t_2\sigma_{x,Rcr2}} = \frac{40,98 \cdot 10^{-4} \cdot 225}{0,7 \cdot 39,5} = 0,033,$$

где  $p_{s2}$  – локальное внутреннее давление в данной расчетной точке, принимается по Таблице 1,  $p_{s2} = 27,32 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5 = 40,98 \cdot 10^{-4}$  кН/см<sup>2</sup>.

– значение упругого понижающего коэффициента:

$$\alpha_{pe2} = \alpha_{02} + (1 - \alpha_{02}) \left( \frac{\bar{p}_{s2}}{\bar{p}_{s2} + \frac{0,3}{\sqrt{\alpha_{02}}}} \right) = 0,191 + (1 - 0,191) \left( \frac{0,033}{0,033 + \frac{0,3}{\sqrt{0,191}}} \right) = 0,228;$$

г) пластический понижающий коэффициент при наличии несовершенства определяется в следующей последовательности:

– наибольшее условное локальное давление в рассматриваемой точке, определяется по Таблице 1 или Рисунку 2,  $p_{g2} = 47,46 \cdot 10^{-4}$  кН/см<sup>2</sup>:

$$\bar{p}_{g2} = \frac{p_{g2}}{\sigma_{x,Rcr2}} \cdot \frac{r}{t_2} = \frac{47,46 \cdot 10^{-4}}{39,5} \cdot \frac{225}{0,7} = 0,039;$$

– параметр:

$$s_2 = \left( \frac{1}{400} \right) \left( \frac{r}{t_2} \right) = \left( \frac{1}{400} \right) \left( \frac{225}{0,7} \right) = 0,804;$$

– квадрат условной гибкости:

$$\bar{\lambda}_{x2}^2 = \frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr2}} = \frac{23,5}{39,5} = 0,595;$$

– значение коэффициента:

$$\begin{aligned} \alpha_{pp2} &= \left\{ 1 - \left( \frac{\bar{p}_{g2}}{\bar{\lambda}_{x2}^2} \right)^2 \right\} \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + s_2^{3/2}} \right] \left[ \frac{s_2^2 + 1,21\bar{\lambda}_{x2}^2}{s_2(s_2 + 1)} \right] = \\ &= \left\{ 1 - \left( \frac{0,039}{0,595} \right)^2 \right\} \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + 0,804^{3/2}} \right] \left[ \frac{0,804^2 + 1,21 \cdot 0,595}{0,804(0,804 + 1)} \right] = 0,429. \end{aligned}$$

д) т.к.  $\alpha_{02} < \alpha_{pe2} < \alpha_{pp2}$  то  $\alpha_2 = 0,191$ .

е) коэффициент снижения устойчивости  $\chi_x$  определяется как функция относительной гибкости оболочки  $\bar{\lambda}_x$ :

$$\bar{\lambda}_{x2} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr2}}} = \sqrt{\frac{23,5}{39,5}} = 0,771; \bar{\lambda}_0 = 0,2 \text{ и } \bar{\lambda}_{p2} = \sqrt{\frac{\alpha_2}{1 - \beta}} = \sqrt{\frac{0,191}{1 - 0,6}} = 0,691;$$

где:  $\beta = 0,6$ .

$$m. k. \bar{\lambda}_{p2} \leq \bar{\lambda}_{x2} \text{ то } \chi_{x2} = \frac{\alpha_2}{\bar{\lambda}_{x2}^2} = \frac{0,191}{0,595} = 0,321.$$

ж) характеристическое значение критических напряжений потери устойчивости:

$$\sigma_{x,Rk2} = \chi_{x2} f_y = 0,321 \cdot 23,5 = 7,54 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

з) расчетные мембранные напряжения при потере устойчивости:

$$\sigma_{x,Rd2} = \frac{\sigma_{x,Rk2}}{\gamma_{M1}} = \frac{7,54}{1,10} = 6,86 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где  $\gamma_{M1}$  – частный коэффициент для несущей способности по предельному состоянию устойчивости.

и) проверка устойчивости оболочки:

$$n_{x,Ed2} \leq t_2 \sigma_{x,Rd2};$$

$$t_2 \sigma_{x,Rd2} = 0,7 \cdot 6,86 = 4,80 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

$$0,751 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < 4,80 \frac{\text{кН}}{\text{см}} - \text{условие выполняется.}$$

#### 4.2.3.4 Участок 1

а) репрезентативное значение амплитуды несовершенства  $w_{ok}$ :

$$w_{ok1} = \frac{t_1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t_1}} = \frac{0,8}{16} \sqrt{\frac{225}{0,8}} = 0,839 \text{ см};$$

б) упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства  $\alpha_0$  в условиях отсутствия давления:

$$\alpha_{01} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \psi \left( \frac{w_{ok1}}{t_1} \right)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot 1 \left( \frac{0,839}{0,8} \right)^{1,44}} = 0,204,$$

где параметр неравномерности напряжений  $\psi = 1$ , т.к. имеет место случай равномерного сжатия по окружности.

в) упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства и давления  $\alpha_{pe}$  определяется в следующей последовательности:

– критические напряжения потери устойчивости в упругой стадии:

$$\sigma_{x,Rcr1} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \frac{t_1}{r} = 0,605 E \frac{t_1}{r} = 0,605 \cdot 2,10 \cdot 10^4 \cdot \frac{0,8}{225} = 45,17 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

– минимальное достоверное расчетное значение условного локального внутреннего давления в данной расчетной точке:

$$\bar{p}_{s1} = \frac{p_{s1} r}{t_1 \sigma_{x,Rcr1}} = \frac{45,95 \cdot 10^{-4} \cdot 225}{0,8 \cdot 44,31} = 0,029,$$

где  $p_{s1}$  – локальное внутреннее давление в данной расчетной точке, принимается по Таблице 1,  $p_{s1} = 30,63 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5 = 45,95 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2$ .

– значение упругого понижающего коэффициента:

$$\alpha_{pe1} = \alpha_{01} + (1 - \alpha_{01}) \left( \frac{\bar{p}_{s1}}{\bar{p}_{s1} + \frac{0,3}{\sqrt{\alpha_{01}}}} \right) = 0,204 + (1 - 0,204) \left( \frac{0,029}{0,029 + \frac{0,3}{\sqrt{0,204}}} \right) = 0,237;$$

г) пластический понижающий коэффициент при наличии несовершенства определяется в следующей последовательности:

– наибольшее условное локальное давление в рассматриваемой точке, определяется по

Рисунку 2,  $p_{g1} = 51,89 \cdot 10^{-4}$  кН/см<sup>2</sup>:

$$\bar{p}_{g1} = \frac{p_{g1}}{\sigma_{x,Rcr1}} \cdot \frac{r}{t_1} = \frac{51,89 \cdot 10^{-4}}{44,31} \cdot \frac{225}{0,8} = 0,032;$$

– параметр:

$$s_1 = \left(\frac{1}{400}\right) \left(\frac{r}{t_1}\right) = \left(\frac{1}{400}\right) \left(\frac{225}{0,8}\right) = 0,703;$$

– квадрат условной гибкости:

$$\bar{\lambda}_{x1}^2 = \frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr1}} = \frac{23,5}{45,17} = 0,52;$$

– значение коэффициента:

$$\begin{aligned} \alpha_{pp1} &= \left\{ 1 - \left( \frac{\bar{p}_{g1}}{\bar{\lambda}_{x1}^2} \right)^2 \right\} \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + s_1^{3/2}} \right] \left[ \frac{s_1^2 + 1,21 \bar{\lambda}_{x1}^2}{s_1(s_1 + 1)} \right] = \\ &= \left\{ 1 - \left( \frac{0,032}{0,52} \right)^2 \right\} \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + 0,703^{3/2}} \right] \left[ \frac{0,703^2 + 1,21 \cdot 0,52}{0,703(0,703 + 1)} \right] = 0,389. \end{aligned}$$

д) т. к.  $\alpha_{01} < \alpha_{pe1} < \alpha_{pp1}$ , то  $\alpha_1 = \alpha_{01} = 0,204$ .

е) коэффициент снижения устойчивости  $\chi_x$  определяется как функция относительной гибкости оболочки  $\bar{\lambda}_x$ :

$$\bar{\lambda}_{x1} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr1}}} = \sqrt{\frac{23,5}{45,17}} = 0,721; \quad \bar{\lambda}_0 = 0,2 \text{ и } \bar{\lambda}_{p1} = \sqrt{\frac{\alpha_1}{1 - \beta}} = \sqrt{\frac{0,204}{1 - 0,6}} = 0,714,$$

где:  $\beta = 0,6$ .

$$\text{т. к. } \bar{\lambda}_{p1} \leq \bar{\lambda}_{x1}, \quad \text{то } \chi_{x1} = \frac{\alpha_1}{\bar{\lambda}_{x1}^2} = \frac{0,204}{0,52} = 0,392$$

ж) характеристическое значение критических напряжений потери устойчивости:

$$\sigma_{x,Rk1} = \chi_{x1} f_y = 0,392 \cdot 23,5 = 9,20 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

з) расчетные мембранные критические напряжения потери устойчивости:

$$\sigma_{x,Rd1} = \frac{\sigma_{x,Rk1}}{\gamma_{M1}} = \frac{9,03}{1,1} = 8,37 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где  $\gamma_{M1}$  – частный коэффициент для несущей способности по предельному состоянию устойчивости.

и) проверка устойчивости оболочки:

$$n_{x,Ed1} \leq t_1 \sigma_{x,Rd1};$$

$$t_1 \sigma_{x,Rd1} = 0,8 \cdot 8,37 = 6,69 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

$$0,744 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < 6,69 \frac{\text{кН}}{\text{см}} - \text{условие выполняется.}$$

4.2.4 Методика расчета на устойчивость пустого бункера при действии давления ветра:

а) критическое наружное давление потери устойчивости изотропной стенки определяется по Формуле 5.38:

$$p_{n,Rcr1} = 0,92 \cdot C_b \cdot C_w \cdot E \cdot \left(\frac{r}{l}\right) \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{2,5},$$

где  $t$  – толщина самой тонкой части стенки (см);

$r = 225$  см – радиус бункера;

$l = 650$  см – расстояние между кольцами жесткости или границами сегмента;

$E = 2,10 \cdot 10^4$  кН/см<sup>2</sup> – модуль упругости стали;

$C_b$  – коэффициент продольного изгиба под воздействием наружного давления, принимается по Таблице 5.2.

$C_w$  – коэффициент распределения ветрового давления.

Поскольку бункер является отдельно стоящим и находится под действием только ветровой нагрузки, коэффициент распределения ветрового давления, относящийся к давлению на наветренную сторону бункера, принимается как наибольшее значение (Пункт 5.3.2.5.8):

$$C_w = \max \left\{ \frac{2,2}{\left( 1 + 0,1 \cdot \sqrt{C_b \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}} \right)}; 1,0 \right\};$$

б) максимальное допустимое расчетное наружное критическое давление, под действием ветра и/или частичного вакуума определяется по Формуле 5.41:

$$p_{n,Rd} = \frac{\alpha_n \cdot p_{n,Rcru}}{\gamma_{M1}},$$

где  $\alpha_n$  – упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства,  $\alpha_n = 0,5$  (согласно НП.2.14);

$\gamma_{M1}$  – частный коэффициент для несущей способности по предельному состоянию устойчивости,  $\gamma_{M1} = 1,10$  по Таблице 2.2.

в) несущая способность для обеспечения устойчивости должна удовлетворять следующему условию:

$$p_{n,Ed} \leq p_{n,Rd},$$

где  $p_{n,Ed}$  – расчетное значение максимального наружного давления ветра.

#### 4.2.5 Расчет устойчивости стенки бункера по участкам при действии давления ветра

##### 4.2.5.1 Определение коэффициента $C_b$

Предварительно задаемся наименьшим значением  $C_b = 0,6$  из Таблицы 5.2 и определяем коэффициент распределения ветрового давления для верхнего участка стенки:

$$C_w = \max \left\{ \frac{2,2}{\left( 1 + 0,1 \cdot \sqrt{C_b \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}} \right)}; 1,0 \right\} = \max \left\{ \frac{2,2}{\left( 1 + 0,1 \cdot \sqrt{0,6 \cdot \frac{225}{650} \cdot \sqrt{\frac{225}{0,6}}} \right)}; 1,0 \right\} = 1,83$$

Определяем минимально допустимые значения изгибной жесткости верхнего кольцевого ребра относительно вертикальной оси по Пункту 5.3.2.5.14:

$$EI_{z,min1} = k_1 E l t^3 = 0,1 \cdot 2,10 \cdot 10^4 \cdot 650 \cdot 0,6^3 = 2,95 \cdot 10^5 \text{ кН} \cdot \text{см}^2$$

$$EI_{z,min2} = 0,08 C_w E r t^3 \sqrt{r/t} = 0,08 \cdot 1,83 \cdot 2,10 \cdot 10^4 \cdot 225 \cdot 0,6^3 \sqrt{225/0,6} = 2,89 \cdot 10^6 \text{ кН} \cdot \text{см}^2$$

Изгибная жесткость верхнего кольца относительно вертикальной оси (размеры кольца см. Рисунок 1):

$$EI_k = E \frac{t_k b_k^3}{12} = 2,10 \cdot 10^4 \cdot \frac{2,0 \cdot 30,0^3}{12} = 9,45 \cdot 10^7 \text{ кН} \cdot \text{см}^2$$

$$EI_k > EI_{z,min1} \text{ и } EI_k > EI_{z,min2} - \text{условие выполняется.}$$

Проверка несущей способности при действии максимальных напряжений в кольце из статического расчета по п. 5.3.2.5.12:

$$\sigma_{\theta,Ed} = 10,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1,00} = 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} - \text{условие выполняется,}$$

где  $\sigma_{\theta,Ed} = 10,5 \text{ кН/см}^2$  – максимальные нормальные напряжения определены на основании численного расчета (Пункт 3.1 данного примера).

По Таблице 5.2 принимаем значение  $C_b = 1,0$ , поскольку выполняются требования Пунктов 5.3.2.5.12 – 5.3.2.5.14.

#### 4.2.5.2 Участок 1

Определяем коэффициент распределения ветрового давления:

$$C_w = \max \left\{ \frac{2,2}{\left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{C_b \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}}\right)}, \frac{2,2}{1,0} \right\} = \max \left\{ \frac{2,2}{\left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{1,0 \cdot \frac{225}{650} \cdot \sqrt{\frac{225}{0,8}}}\right)}, \frac{2,2}{1,0} \right\} = 1,773$$

Определяем критическое наружное давление потери устойчивости изотропной стенки:

$$\begin{aligned} p_{n,Rcru} &= 0,92 \cdot C_b \cdot C_w \cdot E \cdot \left(\frac{r}{l}\right) \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{2,5} = \\ &= 0,92 \cdot 1,0 \cdot 1,773 \cdot 2,10 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{225}{650}\right) \cdot \left(\frac{0,8}{225}\right)^{2,5} = 8,938 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}. \end{aligned}$$

Определяем максимальное расчетное наружное критическое давление под действием ветра:

$$p_{n,Rd} = \frac{\alpha_n \cdot p_{n,Rcru}}{\gamma_{M1}} = \frac{0,5 \cdot 8,938 \cdot 10^{-3}}{1,10} = 3,985 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Расчетное максимальное наружное давление ветра

$$p_{n,Ed} = 0,710 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5 = 1,07 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где  $0,710 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2$  – характеристическое давление ветра по Рисунку 5.

Проверка устойчивости:

$$p_{n,Ed} = 1,07 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < p_{n,Rd} = 3,985 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Устойчивость пустого бункера при давлении ветра на участке 1 обеспечена.

#### 4.2.5.3 Участки 2 и 3

Определяем коэффициент распределения ветрового давления:

$$C_w = \max \left\{ \frac{2,2}{\left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{C_b \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}}\right)}, \frac{2,2}{1,0} \right\} = \max \left\{ \frac{2,2}{\left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{1,0 \cdot \frac{225}{650} \cdot \sqrt{\frac{225}{0,7}}}\right)}, \frac{2,2}{1,0} \right\} = 1,761$$

Определяем критическое наружное давление потери устойчивости изотропной стенки:

$$\begin{aligned} p_{n,Rcru} &= 0,92 \cdot C_b \cdot C_w \cdot E \cdot \left(\frac{r}{l}\right) \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{2,5} = \\ &= 0,92 \cdot 1 \cdot 1,761 \cdot 2,10 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{225}{650}\right) \cdot \left(\frac{0,7}{225}\right)^{2,5} = 6,36 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}. \end{aligned}$$

Определяем максимальное расчетное наружное критическое давление под действием ветра:

$$p_{n,Rd} = \frac{\alpha_n \cdot p_{n,Rcru}}{\gamma_{M1}} = \frac{0,5 \cdot 6,36 \cdot 10^{-3}}{1,10} = 2,89 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Расчетное максимальное наружное давление ветра

$$p_{n,Ed} = 0,86 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5 = 1,29 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где  $0,860 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2$  – характеристическое давление ветра по Рисунку 5.

Проверка устойчивости:

$$p_{n,Ed} = 1,29 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < p_{n,Rd} = 2,89 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Устойчивость пустого бункера при давлении ветра на участках 2 и 3 обеспечена.

#### 4.2.5.4 Участок 4

Определяем коэффициент распределения ветрового давления:

$$C_w = \max \left\{ \frac{2,2}{1 + 0,1 \cdot \sqrt{C_b \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}}}; \frac{2,2}{1,0} \right\} = \max \left\{ \frac{2,2}{1 + 0,1 \cdot \sqrt{1,0 \cdot \frac{225}{650} \cdot \sqrt{\frac{225}{0,6}}}}; \frac{2,2}{1,0} \right\} = 1,748$$

Определяем критическое наружное давление потери устойчивости изотропной стенки:

$$\begin{aligned} p_{n,Rcrui} &= 0,92 \cdot C_b \cdot C_w \cdot E \cdot \left(\frac{r}{l}\right) \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{2,5} = \\ &= 0,92 \cdot 1 \cdot 1,748 \cdot 2,10 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{225}{650}\right) \cdot \left(\frac{0,6}{225}\right)^{2,5} = 4,29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}. \end{aligned}$$

Определяем максимальное расчетное наружное критическое давление под действием ветра:

$$p_{n,Rd} = \frac{\alpha_n \cdot p_{n,Rcrui}}{\gamma_{M1}} = \frac{0,5 \cdot 4,29 \cdot 10^{-3}}{1,10} = 1,95 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Расчетное максимальное наружное давление ветра  $p_{n,Ed} = 1,238 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2$ .

Проверка устойчивости:

$$p_{n,Ed} = 1,238 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < p_{n,Rd} = 1,95 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Устойчивость пустого бункера при давлении ветра на участке 4 обеспечена.

4.2.6 Расчет устойчивости с учетом касательных напряжений не выполнялся, поскольку отсутствует существенная асимметрия нагрузок (Пункт 5.3.2.6.1).

4.2.7 Расчет устойчивости с учетом взаимодействия между меридиональным сжатием, сжатием в окружном направлении мембранным сдвигом не выполнялся, поскольку выполняются требования Пункта 5.3.2.7.1.

4.3 Проверку предельного состояния по выносливости выполнять не требуется, поскольку бункер относится к классу последствий 2 и количество циклов нагрузки не превышает 10000 (Пункт 5.3.2.8.2).

4.4 Проверка предельного состояния по циклической пластичности не требуется, поскольку бункер относится к классу последствий 2 (Пункт 5.3.2.9.2).

4.5 Проверка предельных состояний по эксплуатационной пригодности

4.5.1 Общее отклонение по горизонтали:

а) предельное значение (Формула 5.90):

$$w_{max} = k_{d2} \cdot H = 0,02 \cdot 920,0 = 18,4 \text{ см},$$

где  $H = 920,0 \text{ мм}$  – высота конструкции бункера;

$k_{d2} = 0,02$  – согласно НП.2.31.

б) расчетное значение прогиба определено на основании статического расчета по Пункту 3:

сочетание нагрузок 1 –  $w_1 = 0,045 \text{ см}$ ;

сочетание нагрузок 2 –  $w_2 = 0,044 \text{ см}$ .



в) проверка предельного состояния:

$$w_1 = 0,045 \text{ см} < 18,4 \text{ см.}$$

Вывод: общее отклонение по горизонтали не превышает допустимого отклонения.

4.5.2 Локальный радиальный прогиб (отклонение поперечного сечения от окружности) под воздействием ветра:

а) предельное значение принимается как наименьшее из Формул 5.91 и 5.92 СН РК EN 1993-4-1:

$$w_{r,max} = k_{d3} \cdot r = 0,05 \cdot 225,0 = 11,25 \text{ см};$$

$$w_{r,max} = k_{d4} \cdot t = 20 \cdot 0,6 = 12,0 \text{ см},$$

где  $t = 0,6 \text{ см}$  – локальная толщина самой тонкой части в стенке оболочки;

$k_{d3} = 0,05$  – согласно НП.2.32;

$k_{d4} = 20$  – согласно НП.2.32.

б) расчетное значение прогиба определено на основании статического расчета по Пункту 2 для сочетания нагрузок 3 –  $w_r = 0,062 \text{ см}$ .

в) проверка предельного состояния:

$$w_r = 0,062 \text{ см} < 11,25 \text{ см.}$$

Вывод: локальный радиальный прогиб не превышает предельно допустимого значения.

## 5.4 Специальные требования к опиранию цилиндрических стенок

### 5.4.1 Оболочки с днищем, полностью опертым или установленным на балочную клетку

5.4.1.1 Если низ цилиндрической оболочки имеет сплошное опирание (на плоское основание), в стенке оболочки допускается учитывать силы и моменты только от действия несимметричных и локальных боковых нагрузок, как это изложено в Разделе 5 СН РК EN 1991-4.

5.4.1.2 Если стенка усилена ребрами жесткости, то вертикальные ребра жесткости должны полностью опираться на базу и присоединяться к опорному кольцу.

### 5.4.2 Оболочка с опиранием на юбку

5.4.2.1 При опирании оболочки на юбку (см. Рисунок 5.6) оболочка может считаться равномерно опертой, если юбка удовлетворяет одному из следующих условий:

а) сама юбка полностью и равномерно опирается на фундамент;

б) толщина юбки не менее чем на 20 % больше толщины оболочки, а процедуры проектирования кольцевой балки, приведенные в Разделе 8, используются с целью расчета размеров юбки и смежных с ней полок.

5.4.2.2 Юбки должна быть рассчитана на восприятие сил осевого сжатия стенки бункера без благоприятного влияния внутреннего давления.

### 5.4.3 Опираение цилиндрической стенки на примыкающие колонны

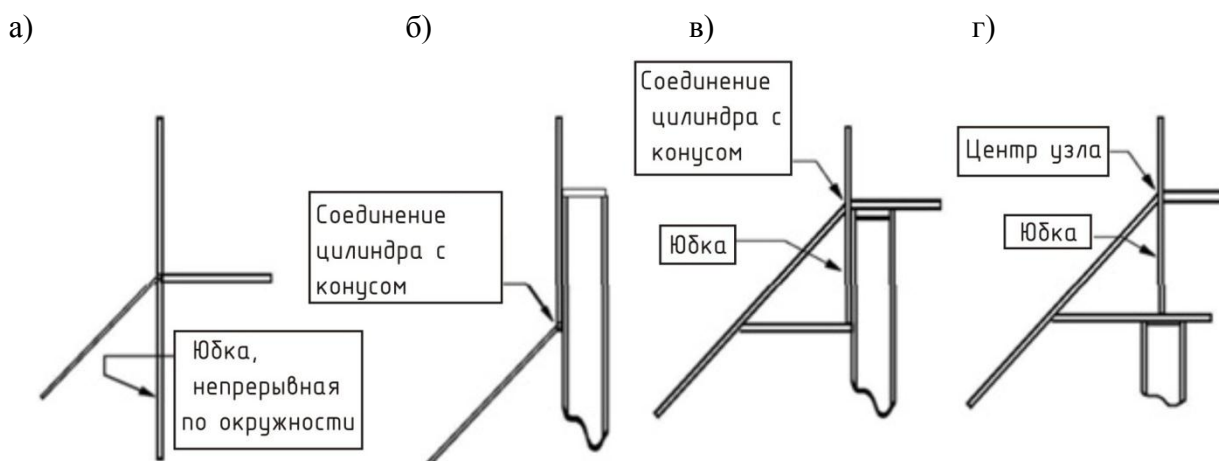
5.4.3.1 Если оболочка опирается на отдельные колонны, которые прикрепляются к стенке цилиндра (см. Рисунок 5.6, б), наличие сосредоточенных сил от этих опор должно быть учтено при определении внутренних усилий в оболочке бункеров классов последствий 2 и 3.

5.4.3.2 Длина крепления стенки к опорной колонне должна определяться в соответствии с Пунктом 5.4.6.

5.4.3.3 Длина ребра жесткости должна быть выбрана с учетом предельного состояния продольного изгиба при сдвиге элементов, смежных с ребром, см. Пункт 5.3.2.6.

### 5.4.4 Цилиндрическая оболочка на отдельных опорах

5.4.4.1 Если оболочка опирается на отдельные колонны или опоры, наличие сосредоточенных сил от этих опор должно быть учтено при определении внутренних усилий в оболочке бункеров. Наличие сосредоточенных сил допускается не учитывать при выполнении требований Пункт 5.4.4.2 и 5.4.4.3.



а) – опирание оболочки на юбку; б) – прикрепление колонн к цилиндрической оболочке; в) – колонна прикреплена к юбке с эксцентриситетом; г) – расположение колонн юбки или цилиндра

**Рисунок 5.6 – Разные схемы опирания бункера с воронкой**

5.4.4.2 Если расчет оболочки выполняется только по мембранной теории оболочек при осесимметричной нагрузке, должны быть удовлетворены все четыре из нижеследующих критериев:

- а) отношение радиуса к толщине  $r/t$  должно быть не более  $(r/t)_{max}$ ;
- б) эксцентриситет опоры ниже стенки оболочки должен быть не более  $k_1 t$ ;
- в) цилиндрическая стенка должна быть жестко соединена с воронкой, толщина стенки которой должна составлять не менее  $k_2 t$  в переходном узле;

г) ширина каждой опоры должна быть не менее  $k_3\sqrt{rt}$ .

Значения параметров составляют  $(r/t)_{max} = 400$ ;  $k_1 = 2,0$ ;  $k_2 = 1,0$ ;  $k_3 = 1,0$  (НП.2.26).

5.4.4.3 Если расчет оболочки выполняется только по мембранной теории оболочек при осесимметричной нагрузке, должен выполняться один из следующих критериев:

а) граничные условия верхнего края оболочки должны оставаться круговыми (т.е. форма окружности верхнего края оболочки не должна изменяться) за счет достаточно прочного соединения оболочки с крышей;

б) граничные условия верхнего края оболочки должны оставаться круговыми посредством установки верхнего кольца жесткости с изгибной жесткостью  $EI_z$  при изгибе в плоскости кольца большей, чем  $EI_{z,min}$ , определяемой по формуле:

$$EI_{z,min} = k_s E r t^3 \quad (5.82)$$

где  $t$  – толщина самого тонкого участка стенки;

$k_s = 0,1$  (НП.2.27).

в) Высота оболочки  $L$  должна быть не менее значения  $L_{s,min}$ , которое определяется по формуле:

$$L_{s,min} = k_L r \sqrt{\left(\frac{r}{t}\right) \cdot \frac{1}{n(n^2 - 1)}} \quad (5.83)$$

где  $n$  – количество опор, расположенных по периметру окружности оболочки;

$k_L = 4,0$  (НП.2.28).

5.4.4.4 Если используется линейная теория изгиба оболочек (безмоментная теория) или более точный численный метод расчета, влияние высоких локальных напряжений над опорами должно быть включено в проверку предельного состояния потери устойчивости при осевом сжатии, как это подробно рассмотрено в Пункте 5.3.2.4.

5.4.4.5 Опоры для оболочки должны иметь пропорции, удовлетворяющие положениям п. 5.4.5 или п. 5.4.6.

#### 5.4.5 Бункер с опиранием на колонны, расположенные под воронкой

5.4.5.1 Бункер следует рассматривать как имеющий опоры под воронкой, если вертикальная линия над центром тяжести сечения опорного элемента более чем на толщину оболочки  $t$  находится внутри бункера по отношению к срединной поверхности цилиндрической оболочки, расположенной выше опоры.

5.4.5.2 Бункер, опертый на стойки, расположенные под воронкой, должен удовлетворять требованиям Раздела 6 по расчету воронок.

5.4.5.3 Расчет бункера, опертого на стойки, расположенные под воронкой, должен выполняться по линейной теории изгиба оболочек или с применением более точного численного метода. Локальные эффекты изгиба опор и меридиональное сжатие, которые возникают в верхней части воронки, должны учитываться в расчетах при проверках как предельного состояния по пластичности, так и предельного состояния по устойчивости. Такие проверки должны выполняться в соответствии с требованиями Разделов 6 и 8 СН РК EN 1993-1-6.

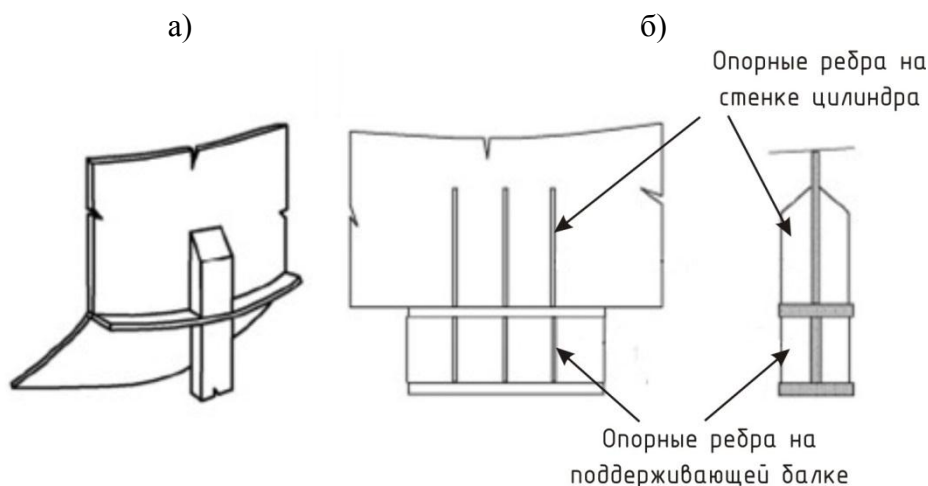
## 5.4.6 Элементы локальных опор и ребра для передачи усилий на цилиндрические стенки

### 5.4.6.1 Локальные опоры под стенкой цилиндра

5.4.6.1.1 Размеры элементов опорных узлов под стенкой цилиндра должны быть подобраны так, чтобы предавать расчетные усилия на поддерживающие конструкции без образования необратимых местных деформаций в стенке цилиндра и элементах опоры. Для этого в опорном узле устанавливаются специальные вертикальные и горизонтальные ребра, которые передают усилия и разгружают вертикальные стенки цилиндра и поддерживающих конструкций.

5.4.6.1.2 Размеры элементов опор должны обеспечивать закрепление края цилиндра от кручения в вертикальном, кольцевом и меридиональном направлении. Некоторые конструктивные решения опорных узлов показаны на Рисунке 5.7.

5.4.6.1.3 Длина закрепления опоры должна выбираться с учетом предельного состояния устойчивости стенки, примыкающей к опоре, при действии касательных напряжений, см. Пункт 5.3.2.6.



- а) локальное опирание на колонну в уровне переходного кольцевого ребра;  
 б) возможное размещение опорных ребер на цилиндрической стенке при больших опорных усилиях

**Рисунок 5.7 – Конструктивные решения обычных опорных узлов**

5.4.6.1.4 Если отдельные опоры применяются без кольцевой балки, ребра жесткости над каждой опорой должны:

- а) или присоединяться к оболочке до свеса крыши;  
 б) или присоединяться к оболочке на расстоянии не менее  $L_{min}$ , которое определяется по формуле:

$$L_{min} = 0,4r \sqrt{\left(\frac{r}{t}\right) \cdot \frac{1}{n(n^2 - 1)}} \quad (5.84)$$

где  $n$  – количество опорных стоек, расположенных по периметру окружности оболочки.

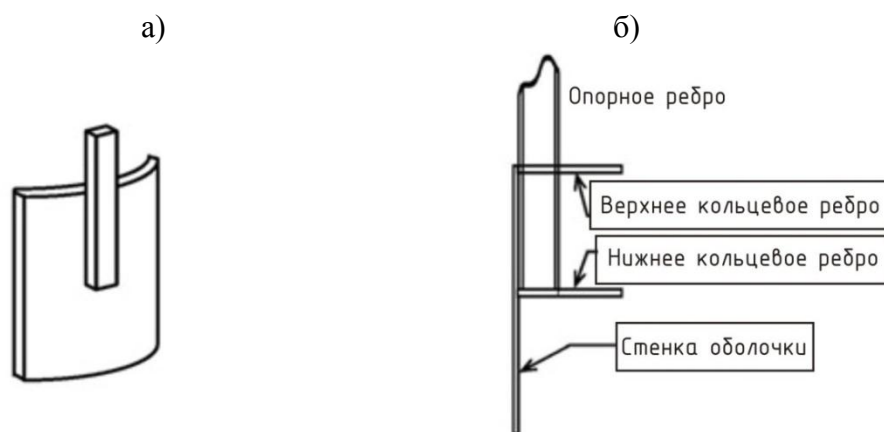
#### 5.4.6.2 Локальные ребра для передачи усилий на цилиндрические стенки

5.4.6.2.1 Размеры локальных опорных ребер должны быть подобраны так, чтобы предавать расчетные усилия на стенку цилиндра без образования необратимых местных деформаций в стенке цилиндра и элементах опоры.

5.4.6.2.2 Длина крепления опорного ребра к оболочке должна приниматься с учетом расчета устойчивости оболочки от действия касательных напряжений на участках, примыкающих к ребру.

5.4.6.2.3 При проектировании опорных ребер необходимо закрепить их от кручения для предотвращения локальных радиальных деформации стенки цилиндра. При необходимости для предотвращения радиальных деформаций должны применяться кольца жесткости.

ПРИМЕЧАНИЕ Возможные конструктивные решения узла передачи усилий на оболочку с помощью локальных ребер показаны на Рисунке 5.8.



а) – локальное ребро без кольца присоединено к цилиндрической стенке; б) – локальное ребро с кольцами жесткости для предотвращения радиальных перемещений

**Рисунок 5.8 – Конструктивные решения опорных ребер**

#### 5.4.7 Анкерное крепление базы бункера

5.4.7.1 При проектировании анкерного крепления следует учитывать неравномерность по окружности действительных воздействий на стенку оболочки. Следует обратить особое внимание на необходимость обеспечения высокой несущей способности анкеров для восприятия ветровых нагрузок.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Силы, возникающие в анкерах, обычно занижаются, если бункер рассматривается как изгибаемая консольная балка, что связано с кольцевой формой опорной плиты, передающей усилия сжатия на фундамент.

5.4.7.2 Расстояние между анкерами не должно превышать значения, получаемого из расчета опорного кольца по Пункту 8.5.3.

5.4.7.3 Если более тщательные расчеты с использованием численных методов не производятся, то анкерное крепление должно иметь несущую способность, достаточную для восприятия локальной отрывающей силы  $n_{x,Ed}$  на единицу окружности:

$$n_{x,Ed} = p_{n,Edw} \left( \frac{L^2}{2r} \right) \left[ C_1 + \sum_{m=2}^M m^2 C_m \left\{ 1 - \frac{3}{4} \left( \frac{a_1}{a_2 + a_3} \right) \right\} \right] \quad (5.85)$$

где

$$a_1 = 1 + 10,4 \left( \frac{r}{mL} \right)^2 \quad (5.86)$$

$$a_2 = 1 + 7,8 \left( \frac{r}{mL} \right)^2 \quad (5.87)$$

$$a_3 = 3 \frac{r^3 t}{I_z} \left( \frac{r}{L} \right)^3 \left( \frac{1}{m^4 (m^2 - 1)^2} \right) \quad (5.88)$$

где  $p_{n,Edw}$  – расчетное значение давления в точке стагнации при ветре;

$L$  – общая высота стенки цилиндрической оболочки;

$t$  – средняя толщина стенки цилиндрической оболочки;

$I_z$  – момент инерции сечения кольца на верхней кромке цилиндра относительно его вертикальной оси (изгиба в окружном направлении);

$C_m$  – гармонические коэффициенты распределения ветрового давления по окружности;

$M$  – высшая гармоника в распределении ветрового давления.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Значения гармонических коэффициентов распределения ветрового давления  $C_m$ , соответствующие особым условиям. Далее приведены простые рекомендации для бункеров класса 1 и 2:  $M = 4$ ,  $C_1 = +0,25$ ,  $C_2 = +1,0$ ,  $C_3 = +0,45$  и  $C_4 = -0,15$  (НП.2.29). Для бункеров класса 3 рекомендуются более точные коэффициенты распределения, которые представлены в приложении С СН РК EN 1993-4-1, а именно:  $M = 4$  для обособленных бункеров и  $M = 10$  для бункеров, расположенных группами (НП.2.29).

## ПРИМЕР 2 Расчет опорных конструкций бункера (юбки)

### 1 Исходные данные

Геометрические размеры бункера и условия расчета приняты по Примеру 1.

Опираение бункера осуществляется по периметру на цилиндрическую юбку диаметром 4,5 м.

### 2 Сбор нагрузок – см. Пример 1

### 3 Статический расчет

Приняты результаты расчета по Примеру 1.

3.1 Условия выполнения расчета и деформированные схемы бункера по отдельным загрузкам и сочетаниям – см. Пример 1.

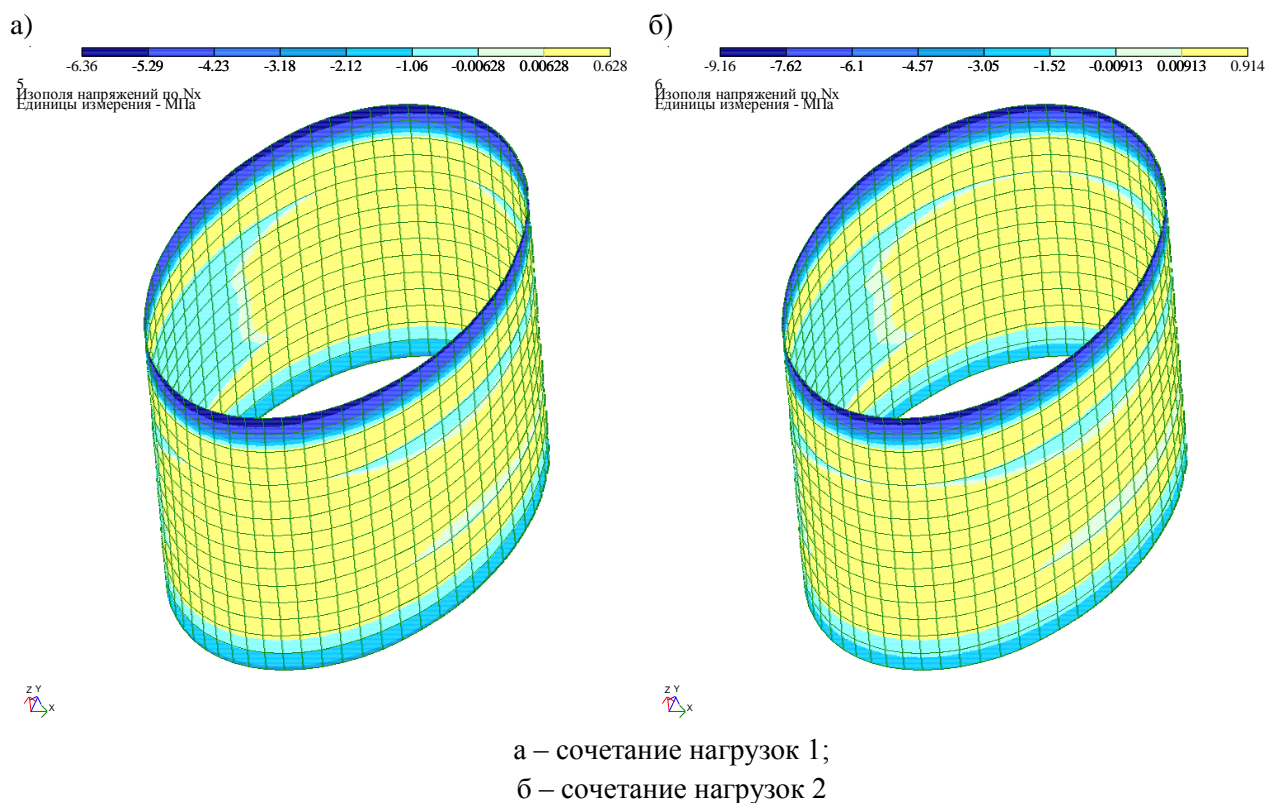
### 3.2 Результаты расчета юбки.

По результатам статического расчета получены нормальные напряжения и изгибающие моменты в элементах юбки бункера.

Распределение нормальных кольцевых напряжений в стенке юбки от действия нагрузок первого расчетного сочетания приведено на Рисунке 1а, от второго расчетного сочетания – на Рисунке 1б. Распределение нормальных меридиональных напряжений в стенке юбки от действия нагрузок первого расчетного сочетания приведено на Рисунке 2а, от второго расчетного сочетания – на Рисунке 2б, от третьего расчетного сочетания – на Рисунке 2в. Нормальные напряжения в оболочке по результатам статического расчета получены в МПа.

Для перехода от значений напряжений, полученных при статическом расчете (значения напряжений получены в МПа для заданных толщин стенки), к расчетным значениям равнодействующих напряжений, используемых в дальнейшем для проверки прочности и устойчивости элементов юбки, были сформированы Таблицы 1, 2 и 3. В указанных таблицах приведены максимальные равнодействующие напряжений на расчетных участках элементов юбки. Результаты представлены в виде компонентов напряженного состояния оболочки, полученные путем перехода от напряжений при конкретной толщине оболочки к напряжениям на сантиметр длины оболочки.

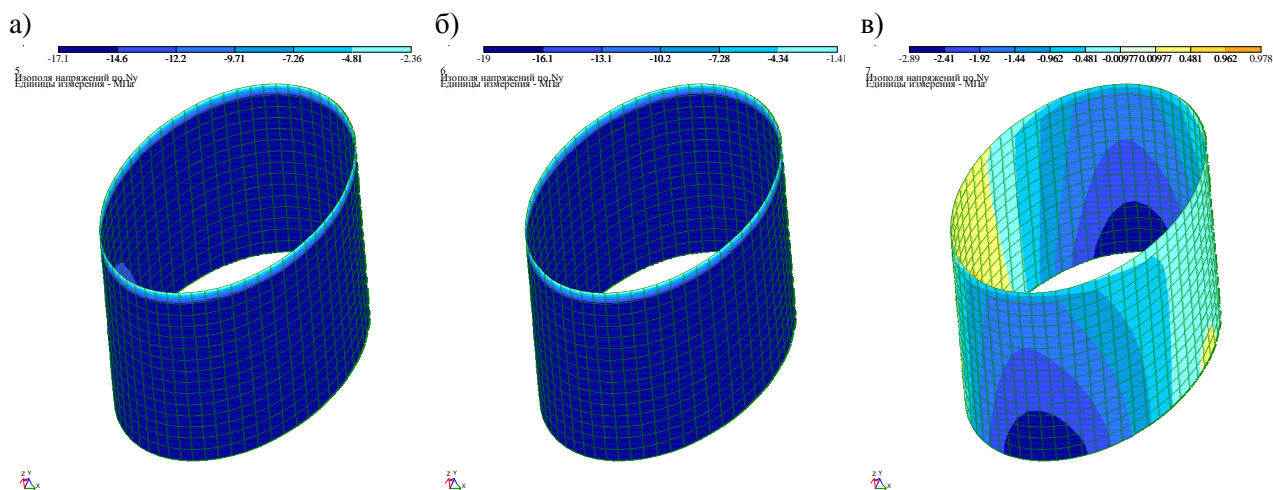
Напряжения в элементах оболочки бункера приведены отдельно для трех расчетных сочетаний, поскольку в различных проверках компоненты НДС не совпадают.



**Рисунок 1 – Распределение окружных (кольцевых) мембранных нормальных напряжений  $n_\theta$  в стенке юбки, МПа**

Таблица 1 – Расчетные равнодействующие напряжений для сочетания 1

№ участка	Компоненты напряженного состояния	напряженного состояния				
	$n_{\theta,Ed}$	$m_{\theta,Ed}$	$n_{x,Ed}$	$m_{x,Ed}$	$n_{x\theta,Ed}$	$m_{x\theta,Ed}$
	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см
7	1,534	0,010	2,603	0,010	0,001	$3,7 \times 10^{-4}$
6	0,018	0,0005	2,661	$5,0 \times 10^{-4}$	0,055	$1,4 \times 10^{-4}$
5	0,392	0,003	2,731	0,003	0,071	$3,0 \times 10^{-4}$



а – сочетание нагрузок 1;  
 б – сочетание нагрузок 2;  
 в – сочетание нагрузок 3

Рисунок 2 – Распределение меридиональных мембранных нормальных напряжений  $n_x$  в стенке юбки, МПа

Таблица 2 – Расчетные равнодействующие напряжений для сочетания 2

№ участка	Компоненты напряженного состояния	напряженного состояния	состояния			
	$n_{\theta,Ed}$	$m_{\theta,Ed}$	$n_{x,Ed}$	$m_{x,Ed}$	$n_{x\theta,Ed}$	$m_{x\theta,Ed}$
	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см
7	1,989	0,013	2,922	0,040	0,041	$3,7 \times 10^{-4}$
6	0,018	$3,0 \times 10^{-4}$	2,974	$2,0 \times 10^{-4}$	0,055	$1,4 \times 10^{-4}$
5	0,437	0,003	3,04	0,010	0,071	$3,0 \times 10^{-4}$

Таблица 3 – Расчетные равнодействующие напряжений для сочетания 3

№ участка	Меридиональное напряжение, $n_{x,Ed}$
	кН/см
7	0,304
6	0,370
5	0,463

Пояснения к компонентам напряженного состояния, приведенным в Таблицах 1, 2 и 3, – см. Пункт 3.2 Примера 1.



## 4 Расчет цилиндрической юбки

## 4.1 Расчет по пластическому предельному состоянию (расчет на прочность)

## 4.1.1 Методика расчета.

Методика расчета приведена в Пункте 4.1.1 Примера 1.

## 4.1.2 Расчет участков

## Участок 7

а) фиктивные компоненты равнодействующих напряжений (Формулы 5.2 и 5.3):

$$\begin{aligned}\sigma_{x,Ed7} &= \frac{n_{x,Ed7}}{t_7} + \frac{m_{x,Ed7}}{t_7^2/4} = \frac{2,922}{1,0} + \frac{0,04}{1,0^2/4} = 3,082 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}; \\ \sigma_{\theta,Ed7} &= \frac{n_{\theta,Ed7}}{t_7} + \frac{m_{\theta,Ed7}}{t_7^2/4} = \frac{1,989}{1,0} + \frac{0,013}{1,0^2/4} = 2,041 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}; \\ \tau_{x\theta,Ed7} &= \frac{n_{x\theta,Ed7}}{t_7} + \frac{m_{x\theta,Ed7}}{t_7^2/4} = \frac{0,041}{1,0} + \frac{3,7 \cdot 10^{-4}}{1,0^2/4} = 0,042 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.\end{aligned}$$

б) определение приведенных расчетных напряжений фон Мизеса (Формула 5.4):

$$\begin{aligned}\sigma_{e,Ed7} &= \sqrt{\sigma_{x,Ed7}^2 + \sigma_{\theta,Ed7}^2 - \sigma_{x,Ed7}\sigma_{\theta,Ed7} + 3\tau_{x\theta,Ed7}^2}; \\ \sigma_{e,Ed7} &= \sqrt{3,082^2 + 2,041^2 - 3,082 \cdot 2,041 + 3 \cdot 0,042^2} = 2,717 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.\end{aligned}$$

в) эквивалентное расчетное сопротивление для сварных конструкций (Формула 5.5):

$$f_{e,Rd4} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1,0} = 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где  $\gamma_{M0}$  – частный коэффициент для несущей способности по пластическому предельному состоянию,  $\gamma_{M0} = 1,00$  (Таблица 2.2);

$f_y$  – предел текучести листа стенки оболочки,  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

г) проверка несущей способности по приведенным равнодействующим напряжениям (Формула 5.10):

$$\sigma_{e,Ed7} \leq f_{e,Rd7}, \quad 2,717 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} - \text{условие выполняется.}$$

д) несущая способность по отдельным равнодействующим

– несущая способность в меридиональном направлении (Формула 5.7):

$$n_{x,Rd7} = \frac{f_u t_7}{\gamma_{M2}} = 36 \cdot \frac{1,0}{1,25} = 28,8 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

– несущая способность в окружном направлении (Формула 5.8):

$$n_{\theta,Rd7} = \frac{f_u t_7}{\gamma_{M2}} = 36 \cdot \frac{1,0}{1,25} = 28,8 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

– несущая способность по касательным напряжениям (Формула 5.9):

$$n_{x\theta,Rd7} = \frac{0,57 f_y t_7}{\gamma_{M0}} = 0,57 \cdot 23,5 \cdot \frac{1,0}{1,00} = 13,4 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

где  $f_u$  – временное сопротивление,  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ ;

$\gamma_{M0}, \gamma_{M2}$  – частные коэффициенты для несущей способности:  $\gamma_{M0} = 1,00$ ,  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

е) проверка по отдельным равнодействующим (Формулы 5.11-5.13):

$$n_{x,Ed7} \leq n_{x,Rd7}, \quad 2,922 < 28,8 - \text{условие выполняется};$$

$$n_{\theta,Ed7} \leq n_{\theta,Rd7}, \quad 1,989 < 28,8 - \text{условие выполняется};$$

$$n_{x\theta,Ed7} \leq n_{x\theta,Rd7}, \quad 0,041 < 13,4 - \text{условие выполняется.}$$

## Участок 6

а) фиктивные компоненты равнодействующих напряжений (Формулы 5.2 и 5.3):

$$\begin{aligned}\sigma_{x,Ed6} &= \frac{n_{x,Ed6}}{t_6} + \frac{m_{x,Ed6}}{t_6^2/4} = \frac{2,974}{1,0} + \frac{0,0002}{1,0^2/4} = 2,975 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}; \\ \sigma_{\theta,Ed6} &= \frac{n_{\theta,Ed6}}{t_6} + \frac{m_{\theta,Ed6}}{t_6^2/4} = \frac{0,018}{1,0} + \frac{0,0003}{1,0^2/4} = 0,019 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}; \\ \tau_{x\theta,Ed6} &= \frac{n_{x\theta,Ed6}}{t_6} + \frac{m_{x\theta,Ed6}}{t_6^2/4} = \frac{0,055}{1,0} + \frac{1,4 \cdot 10^{-4}}{1,0^2/4} = 0,056 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.\end{aligned}$$

б) определение приведенных расчетных напряжений фон Мизеса (Формула 5.4):

$$\begin{aligned}\sigma_{e,Ed6} &= \sqrt{\sigma_{x,Ed6}^2 + \sigma_{\theta,Ed6}^2 - \sigma_{x,Ed6}\sigma_{\theta,Ed6} + 3\tau_{x\theta,Ed6}^2}; \\ \sigma_{e,Ed6} &= \sqrt{2,975^2 + 0,019^2 - 2,975 \cdot 0,019 + 3 \cdot 0,056^2} = 2,967 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.\end{aligned}$$

в) эквивалентное расчетное сопротивление для сварных конструкций (Формула 5.5):

$$f_{e,Rd6} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1,00} = 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где  $\gamma_{M0}$  – частный коэффициент для несущей способности по пластическому предельному состоянию,  $\gamma_{M0} = 1,00$ ;

$f_y$  – предел текучести листа стенки оболочки,  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

г) проверка несущей способности по приведенным равнодействующим напряжениям (Формула 5.10):

$$\sigma_{e,Ed6} \leq f_{e,Rd6} \quad 2,967 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} - \text{условие выполняется.}$$

д) несущая способность по отдельным равнодействующим:

– несущая способность в меридиональном направлении (Формула 5.7):

$$n_{x,Rd6} = \frac{f_u t_6}{\gamma_{M2}} = 36 \cdot \frac{1,0}{1,25} = 28,8 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

– несущая способность в окружном направлении (Формула 5.8):

$$n_{\theta,Rd6} = \frac{f_u t_6}{\gamma_{M2}} = 36 \cdot \frac{1,0}{1,25} = 28,8 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

– несущая способность по касательным напряжениям (Формула 5.9):

$$n_{x\theta,Rd6} = \frac{0,57 f_y t_6}{\gamma_{M0}} = 0,57 \cdot 23,5 \cdot \frac{1,0}{1,00} = 13,4 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

где  $f_u$  – временное сопротивление,  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ ;

$\gamma_{M0}, \gamma_{M2}$  – частные коэффициенты для несущей способности,  $\gamma_{M0} = 1,00, \gamma_{M2} = 1,25$ .

е) проверка по отдельным равнодействующим (Формулы 5.11–5.13):

$$\begin{aligned}n_{x,Ed6} &\leq n_{x,Rd6}, & 2,974 < 28,8 - \text{условие выполняется.} \\ n_{\theta,Ed6} &\leq n_{\theta,Rd6}, & 0,018 < 28,8 - \text{условие выполняется.} \\ n_{x\theta,Ed6} &\leq n_{x\theta,Rd6}, & 0,055 < 13,4 - \text{условие выполняется.}\end{aligned}$$

Участок 5

а) фиктивные компоненты равнодействующих напряжений (Формулы 5.2 и 5.3):

$$\begin{aligned}\sigma_{x,Ed5} &= \frac{n_{x,Ed5}}{t_5} + \frac{m_{x,Ed5}}{t_5^2/4} = \frac{3,040}{1,0} + \frac{0,010}{1,0^2/4} = 3,08 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}; \\ \sigma_{\theta,Ed5} &= \frac{n_{\theta,Ed5}}{t_5} + \frac{m_{\theta,Ed5}}{t_5^2/4} = \frac{0,437}{1,0} + \frac{0,003}{1,0^2/4} = 0,449 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}; \\ \tau_{x\theta,Ed5} &= \frac{n_{x\theta,Ed5}}{t_5} + \frac{m_{x\theta,Ed5}}{t_5^2/4} = \frac{0,071}{1,0} + \frac{3 \cdot 10^{-4}}{1,0^2/4} = 0,072 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.\end{aligned}$$

б) определение приведенных расчетных напряжений фон Мизеса (Формула 5.4):

$$\sigma_{e,Ed5} = \sqrt{\sigma_{x,Ed5}^2 + \sigma_{\theta,Ed5}^2 - \sigma_{x,Ed5}\sigma_{\theta,Ed5} + 3\tau_{x\theta,Ed5}^2};$$

$$\sigma_{e,Ed5} = \sqrt{3,08^2 + 0,449^2 - 3,08 \cdot 0,449 + 3 \cdot 0,072^2} = 2,884 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

в) эквивалентное расчетное сопротивление для сварных конструкций (Формула 5.5):

$$f_{e,Rd5} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1,00} = 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где  $\gamma_{M0}$  – частный коэффициент для несущей способности по пластическому предельному состоянию,  $\gamma_{M0} = 1,00$ ;

$f_y$  – предел текучести листа стенки оболочки,  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

г) проверка несущей способности по приведенным равнодействующим напряжениям (Формула 5.10):

$$\sigma_{e,Ed5} \leq f_{e,Rd5}, \quad 2,884 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} - \text{условие выполняется.}$$

д) несущие способности по отдельным равнодействующим:

– несущая способность в меридиональном направлении (Формула 5.7):

$$n_{x,Rd5} = \frac{f_u t_5}{\gamma_{M2}} = 36 \cdot \frac{1,0}{1,25} = 28,8 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

– несущая способность в окружном направлении (Формула 5.8):

$$n_{\theta,Rd5} = \frac{f_u t_5}{\gamma_{M2}} = 36 \cdot \frac{1,0}{1,25} = 28,8 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

– несущая способность по касательным напряжениям (Формула 5.9):

$$n_{x\theta,Rd5} = \frac{0,57 f_y t_5}{\gamma_{M0}} = 0,57 \cdot 23,5 \cdot \frac{1,0}{1,00} = 13,4 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

где  $f_u$  – временное сопротивление,  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ ;

$\gamma_{M0}, \gamma_{M2}$  – частные коэффициенты для несущей способности,  $\gamma_{M0} = 1,00, \gamma_{M2} = 1,25$ .

е) проверка по отдельным равнодействующим (Формулы 5.11-5.13):

$$n_{x,Ed5} \leq n_{x,Rd5}, \quad 3,04 < 28,8 - \text{условие выполняется};$$

$$n_{\theta,Ed5} \leq n_{\theta,Rd5}, \quad 0,437 < 28,8 - \text{условие выполняется};$$

$$n_{x\theta,Ed5} \leq n_{x\theta,Rd5}, \quad 0,071 < 13,4 - \text{условие выполняется.}$$

#### 4.2 Проверка устойчивости цилиндрической оболочки юбки

Качество допуска на изготовление – стандартное с параметром качества  $Q = 16$  по Таблице 5.1 СН РК EN 1993-4-1.

Кольцевые и продольные ребра жесткости по оболочке – отсутствуют.

а) репрезентативное значение амплитуды несовершенства  $w_{ok}$  (Формула 5.14 СН РК EN 1993-4-1):

$$w_{ok} = \frac{t}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{1,0}{16} \sqrt{\frac{225}{1,0}} = 0,938 \text{ см.}$$

б) упругий понижающий коэффициент при наличии несовершенства  $\alpha_0$  в условиях отсутствия давления (Формула 5.15 СН РК EN 1993-4-1):

$$\alpha_0 = \frac{0,62}{1 + 1,91 \psi \left( \frac{w_{ok}}{t} \right)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot 1 \cdot \left( \frac{0,938}{1,0} \right)^{1,44}} = 0,226,$$

где параметр неравномерности напряжений  $\psi = 1$ , т.к. имеет место случай равномерного сжатия по окружности.

в) критические напряжения потери устойчивости в упругой стадии (Формула 5.28):

$$\sigma_{x,Rcr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \frac{t}{r} = 0,605E \frac{t}{r} = 0,605 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot \frac{1,0}{225} = 56,467 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

е) коэффициент снижения устойчивости  $\chi_x$  определяется как функция относительной гибкости оболочки  $\bar{\lambda}_x$  (Формулы 5.30 – 5.35):

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}}} = \sqrt{\frac{23,5}{56,467}} = 0,645; \quad \bar{\lambda}_0 = 0,2 \text{ и } \bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_0}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0,226}{1-0,6}} = 0,752;$$

$$\text{т.к. } \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_p, \quad \text{то } \chi_x = 1 - \beta \left( \frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta = 1 - 0,6 \left( \frac{0,645 - 0,2}{0,752 - 0,2} \right)^{1,0} = 0,516,$$

где:  $\beta = 0,6$  и  $\eta = 1,0$ .

ж) характеристическое значение критических напряжений потери устойчивости (Формула 5.29):

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x f_y = 0,516 \cdot 23,5 = 12,126 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

з) расчетные мембранные критические напряжения потери устойчивости (Формула 5.36):

$$\sigma_{x,Rd} = \frac{\sigma_{x,Rk}}{\gamma_{M1}} = \frac{12,126}{1,10} = 11,024 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где  $\gamma_{M1}$  – частный коэффициент для несущей способности по предельному состоянию устойчивости,  $\gamma_{M1} = 1,10$  (Таблица 2.2).

и) проверка устойчивости оболочки (Формула 5.37).

Т.к. толщина юбки по всей высоте одинаковая, то принимаем расчетные равнодействующие меридиональных мембранных напряжений  $n_{x,Ed}$  равными максимальному значению на участках 5, 6 и 7,  $n_{x,Ed} = 3,04 \text{ кН/см}$ .

$$n_{x,Ed} \leq t \sigma_{x,Rd};$$

$$t \sigma_{x,Rd} = 1,0 \cdot 11,024 = 11,024 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

$$3,04 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < 11,024 \frac{\text{кН}}{\text{см}} - \text{условие выполняется.}$$

#### 4.3 Расчет опорного кольца в основании юбки

Бункер, который имеет постоянные опоры на уровне земли, должен быть оснащен опорным кольцом в основании и деталями для анкерного устройства.

4.3.1 Интервал по периметру окружности между анкерными болтами или другими точками крепления анкеров не должен превышать  $4\sqrt{rt}$ , где  $t$  – локальная толщина листа оболочки (Пункт 8.5.3 (2) СН РК EN 1993-4-1).

Определяем длину окружности юбки:

$$l_{\text{окр}} = 2\pi r = 2 \cdot 3,14 \cdot 225 = 1,414 \cdot 10^3 \text{ см.}$$

Определяем предельно допустимую длину сегмента между закреплениями:

$$l_{\text{segm,max}} = 4\sqrt{rt} = 4 \cdot \sqrt{225 \cdot 1} = 60 \text{ см,}$$

где  $t = 1,0 \text{ см}$  – толщина стенки юбки;

$r = 225 \text{ см}$  – радиус основания юбки.

Определяем минимальное количество участков между анкерными болтами:

$$n_{a,min} = \frac{l_{\text{окр}}}{l_{\text{segm,max}}} = \frac{1,414 \cdot 10^3}{60} = 23,56.$$

Принимаем число анкерных болтов  $n_a = 24$ .

Тогда расстояние между анкерными болтами составит:

$$l_{segm} = \frac{l_{окр}}{n_a} = \frac{1,414 \cdot 10^3}{24} = 58,92 \text{ см.}$$

4.3.2 Опорное кольцо в основании бункера должно иметь изгибную жесткость  $EI_z$  вокруг вертикальной оси (чтобы воспринимать продольный изгиб в окружном направлении) больше минимального значения  $EI_{z,min}$ , определяемого по Формуле 8.54 СН РК EN 1993-4-1:

$$EI_{z,min} = kErt^3 = 0,10 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 225 \cdot 1,0^3 = 4,725 \cdot 10^5 \text{ кН} \cdot \text{см}^2,$$

где  $t = 1,0 \text{ см}$  принимается как толщина стенки пояса, смежного с опорным кольцом;  
 $k = 0,10$  согласно НП.2.41.

Принимаем опорное кольцо из пластины  $b_{op} = 20,0 \text{ см}$ ,  $t_{op} = 2,0 \text{ см}$ , тогда изгибная жесткость опорного кольца вокруг вертикальной оси составит:

$$EI_z = E \frac{t_{op} b_{op}^3}{12} = 2,1 \cdot 10^4 \cdot \frac{2,0 \cdot 20,0^3}{12} = 280 \cdot 10^5 \text{ кН} \cdot \text{см}^2;$$

Проверка условия:

$$EI_z = 280 \cdot 10^5 \text{ кН} \cdot \text{см}^2 > EI_{z,min} = 4,725 \cdot 10^5 \text{ кН} \cdot \text{см}^2.$$

Условие выполняется. Изгибная жесткость опорного кольца больше минимальной предельно допустимой жесткости.

#### 4.4 Анкерное крепление

Анкерное крепление должно иметь несущую способность, достаточную для восприятия локальной отрывающей силы  $n_{x,Ed}$  на единицу длины окружности (Формулы 5.85 – 5.88):

Коэффициенты для Формулы 5.85 при  $m = 4$ :

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 + 10,4 \left( \frac{r}{mL} \right)^2 = 1 + 10,4 \cdot \left( \frac{225}{4 \cdot 370} \right)^2 = 1,24; \\ a_2 &= 1 + 7,8 \left( \frac{r}{mL} \right)^2 = 1 + 7,8 \cdot \left( \frac{225}{4 \cdot 370} \right)^2 = 1,18; \\ a_3 &= 3 \frac{r^3 t}{I_z} \left( \frac{r}{L} \right)^3 \left( \frac{1}{m^4(m^2 - 1)^2} \right) = 3 \cdot \frac{225^3 \cdot 1}{1,333 \cdot 10^3} \cdot \left( \frac{225}{370} \right)^3 \cdot \left( \frac{1}{4^4 \cdot (4^2 - 1)^2} \right) = 0,1, \end{aligned}$$

где

$L = 370 \text{ см}$  – общая высота стенки цилиндрической оболочки;

$t = 1 \text{ см}$  – средняя толщина стенки цилиндрической оболочки;

$I_z$  – момент инерции сечения кольца на верхней кромке цилиндра относительно его вертикальной оси (изгиба в окружном направлении):

$$I_z = \frac{t_{op} b_{op}^3}{12} = \frac{2 \cdot 20^3}{12} = 1,333 \cdot 10^3 \text{ см}^4.$$

Значения коэффициентов  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  соответственно для  $m = 2$ ,  $m = 3$ ,  $m = 4$  сведены в таблицу.

$m$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$m^2 C_m \left\{ 1 - \frac{3}{4} \left( \frac{a_1}{a_2 + a_3} \right) \right\}$
2	1,96	1,72	40,03	3,86
3	1,43	1,32	1,11	2,27
4	1,24	1,18	0,10	-0,656

Отрывающая сила  $n_{x,Ed}$  на единицу длины окружности:

$$n_{x,Ed} = p_{n,Edw} \left( \frac{L^2}{2r} \right) \left[ C_1 + \sum_{m=2}^M m^2 C_m \left\{ 1 - \frac{3}{4} \left( \frac{a_1}{a_2 + a_3} \right) \right\} \right] =$$

$$= 1,24 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \frac{370^2}{2 \cdot 225} \right) [0,25 + (3,86 + 2,27 - 0,656)] = 0,216 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

где  $p_{n,Edw} = 0,825 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5 = 1,24 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^2$  – расчетное значение ветрового давления (см. Рисунок 5 Примера 1).

$C_m$  – гармонические коэффициенты распределения ветрового давления по окружности; поскольку бункер относится к классу последствий 2, приняты значения коэффициентов

$C_1 = +0,25$ ,  $C_2 = +1,0$ ,  $C_3 = +0,45$  и  $C_{x4} = -0,15$  (согласно НП.2.29).

$M$  – высшая гармоника в распределении ветрового давления,  $M = 4$  (согласно НП.2.29).

Определяем силу, которую воспринимает один болт:

$$N_1 = \frac{n_{x,Ed} \cdot l_{segm}}{j} = \frac{0,216 \cdot 58,91}{2} = 6,362 \text{ кН},$$

где  $j = 2$  – число анкерных болтов на участке.

Расчетное сопротивление анкерного болта:

$$f_y = \frac{f_{yb}}{\gamma_{M2}} = \frac{19}{1,25} = 15,2 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

где  $f_{yb} = 19 \text{ кН/см}^2$  – прочность анкерного болта при диаметре не более 2 см (принимая фундаментные болты по ГОСТ 535 из стали Ст3кп2-И).

$\gamma_{M5} = 1,25$  – частный коэффициент для несущей способности болтов (Таблица 2.1 СН РК EN 1993-1-8).

Требуемая площадь анкерного болта:

$$A_b = \frac{N_1}{f_y} = \frac{6,61}{15,2} = 0,438 \text{ см}^2.$$

Принимаем анкерный болт диаметром 2 см с площадью  $A_b = 2,25 \text{ см}^2$  по СТ СЭВ 182-75.

## 5.5 Конструктивные решения отверстий в цилиндрических стенках

### 5.5.1 Общие положения

Отверстия в стенке бункера должны быть усилены вертикальными и горизонтальными ребрами жесткости, которые закрепляются рядом с отверстием. Если между отверстием и ребром жесткости расположен участок стенки оболочки, при расчетах его не следует учитывать.

### 5.5.2 Прямоугольные отверстия

5.5.2.1[5.5.2(1)] Размер усиления по периметру прямоугольного отверстия в вертикальном направлении (см. Рисунок 5.9) должен быть таким, чтобы площадь поперечного сечения ребер жесткости была не менее площади поперечного сечения вырезанной части стенки, но не превышала эту площадь более чем в два раза.

5.5.2.2[5.5.2(2)] Размер усиления по горизонтали должен быть таким, чтобы площадь поперечного сечения ребер жесткости была не менее площади поперечного сечения вырезанной части стенки.

5.5.2.3 Изгибная жесткость ребер жесткости, перпендикулярных направлению равнодействующих мембранных напряжений, должна быть выбрана такой, чтобы

относительное перемещение  $\delta$  стенки оболочки в направлении равнодействующих напряжений, расположенных на центральной линии отверстия и вызванных наличием отверстия, было не более величины  $\delta_{max}$ , которая определяется по формуле:

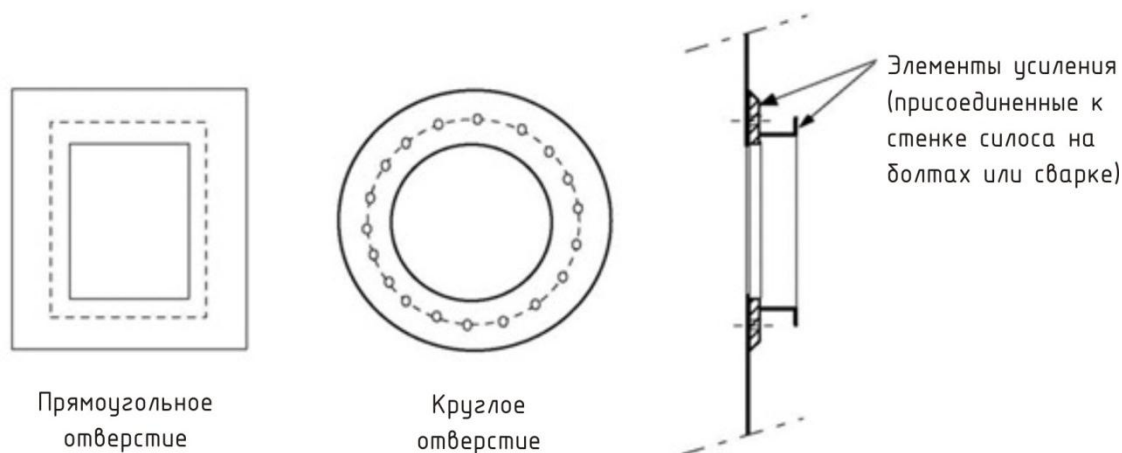
$$\delta_{max} = k_{d1} \sqrt{\frac{t}{r}} \cdot d \quad (5.89)$$

где  $d$  – ширина отверстия, измеренная перпендикулярно направлению равнодействующих напряжений;

$k_{d1} = 0,02$  (НП.2.30).

5.5.2.4 Вертикальные усиливающие ребра жесткости должны выступать за верхнюю и нижнюю границу отверстия не менее чем на величину  $2\sqrt{rt}$ .

5.5.2.5 Оболочка должна быть запроектирована так, чтобы не допустить локальной потери устойчивости стенки в зонах, примыкающих к окончанию ребер жесткости, с использованием положений Пунктах 5.4.5 и 5.4.6 СН РК EN 1993-4-1 для 825 локальных нагрузок.



**Рисунок 5.9 – Обычные схемы размещения ребер для усиления отверстий в стенках бункера**

## 5.6 Предельные состояния по эксплуатационной пригодности

### 5.6.1 Основные положения

5.6.1.1 В качестве предельных состояний по эксплуатационной пригодности листовых стенок цилиндрических бункеров следует принимать:

- деформации или прогибы, которые неблагоприятно влияют на эффективное использование конструкции;
- деформации, прогибы, вибрации или колебания, которые вызывают повреждения как несущих, так и второстепенных конструктивных элементов.

5.6.1.2 Деформации, прогибы и вибрации должны быть ограничены (иметь предельные значения), чтобы удовлетворить указанным выше критериям.

5.6.1.3 Конкретные предельные значения для каждой области применения, должны быть согласованы между проектной организацией, заказчиком и соответствующим

надзорным органом с учетом области применения и природы хранящихся твердых материалов.

### 5.6.2 Отклонения

5.6.2.1 Предельное значение общего отклонения по горизонтали определяется по формуле:

$$w_{max} = k_{d2}H \quad (5.90)$$

где  $H$  – высота конструкции, измеренная от фундамента до крыши.

ПРИМЕЧАНИЕ Значение  $k_{d2}$  может быть задано в национальном приложении. Рекомендуется значение  $k_{d2} = 0,02$  (НП.2.31).

5.6.2.2 Предельное значение локального радиального прогиба (отклонение поперечного сечения от окружности) под воздействием ветра должно быть принято как наименьшее значение из:

$$w_{r,max} = k_{d3}r \quad (5.91)$$

$$w_{r,max} = k_{d4}t \quad (5.91)$$

где  $t$  – локальная толщина самой тонкой части в стенке оболочки.

ПРИМЕЧАНИЕ Значения  $k_{d3}$  и  $k_{d4}$  могут быть заданы в национальном приложении. Рекомендуются значения  $k_{d3} = 0,05$  и  $k_{d4} = 20$  (НП.2.32).

## 6 ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНИЧЕСКИХ ВОРОНОК

### 6.1 Основы расчета

#### 6.1.1 Общие положения

6.1.1.1 Размеры конических воронок следует назначать такими, чтобы выполнялись основные расчетные требования по предельным состояниям несущей способности согласно требованиям Пункта 4.1.

6.1.1.2 Оценка надежности конических оболочек должна проводиться в соответствии с положениями СН РК EN 1993-1-6.

#### 6.1.2 Проектирование стенок воронки

6.1.2.1 Коническая стенка воронки должна быть проверена на то, чтобы в течение срока службы были обеспечены:

- несущая способность на разрыв под действием внутреннего давления и сил трения о стенки;
- несущая способность по локальной текучести при изгибе в переходной зоне;
- несущая способность по усталостному разрушению;



- несущая способность узлов и соединений;
- несущая способность по потере устойчивости при поперечных нагрузках от разгрузочных устройства и механизмов;
- несущая способность от локальных воздействий.

6.1.2.2 Стенка оболочки должна удовлетворять положениям СН РК EN 1993-1-6. В качестве альтернативы, удовлетворительные результаты могут быть получены при выполнении Пунктов 6.3 ÷ 6.5 норм СН РК EN 1993-4-1.

6.1.2.3 Правила Пунктов 6.3 ÷ 6.5 СН РК EN 1993-4-1 могут применяться только к воронкам с половинным углом в вершине (угол наклона стенки воронки к вертикали)  $\beta$  от  $0^\circ$  до  $70^\circ$ .

6.1.2.4 Для воронок бункеров класса последствий 1 можно не выполнять проверки по предельными состояниями усталости и малоциклового усталости, если выполняются следующие условия:

- а) Расчет на разрыв в переходной зоне выполнен с использованием измененного частного коэффициента  $\gamma_{M0} = \gamma_{M0g} = 1,4$  (НП.2.33);
- б) В зоне, примыкающей к переходному узлу, отсутствуют меридиональные ребра жесткости или отдельные опорные узлы.

## 6.2 Различия между формами оболочек воронки

- 1) Стенка воронки, изготовленная из гнутых стальных листов, называется изотропной.
- 2) Стенка воронки с наружными ребрами жесткости называется «стенка с внешним усилением».
- 3) Воронка с более чем одним разгрузочным отверстием называется многоканальной.
- 4) Воронка, которая представляет собой часть бункера с обособленными опорными стойками или кронштейнами, должен называться отдельно опертой, несмотря на то, что обособленные опоры не расположены непосредственно под воронкой.

## 6.3 Несущая способность конических воронок

### 6.3.1 Общие положения

6.3.1.1 Коническая воронка должна соответствовать требованиям СН РК EN 1993-1-6. Эти требования выполняются при использовании способов оценки расчетной несущей способности согласно Пункту 6.3 СН РК EN 1993-4-1.

6.3.1.2 Особое внимание необходимо обратить на возможность того, что различные части бункера могут испытывать максимальные усилия от действия различных эпюр давлений в загруженном состоянии и в процессе выгрузки.

6.3.1.3 Равнодействующие напряжения в элементах воронки, в общем случае, определяются по мембранной теории оболочек. Дополнительная информация о различных

эпюрах нагрузки и расчет возникающих при этом равнодействующих напряжений по мембранной теории оболочек представлена в приложении В СН РК EN 1993-4-1.

### **6.3.2 Воронки с изотропной стенкой без ребер жесткости на сварных или болтовых соединениях**

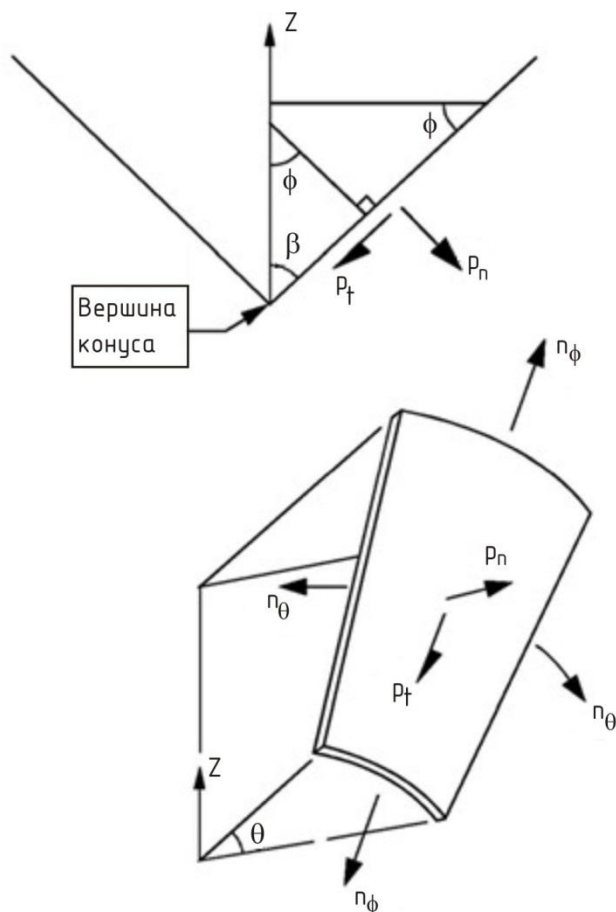
#### **6.3.2.1 Общие положения**

Коническая воронка должна рассматриваться как оболочка с учетом взаимосвязи меридиональных и окружных реакций от опорных усилий.

#### **6.3.2.2 Пластический механизм или разрыв оболочки воронки**

6.3.2.2.1 Расчет прочности на разрыв должен учитывать, что воронка может подвергаться нагрузкам с различными изменяющимися по стенке эпюрами давления. Поскольку разрушение при разрыве может легко распространяться по стенке и, в общем случае, не является вязким, каждая точка воронки должна иметь достаточную несущую способность для восприятия максимальных расчетных воздействий.

6.3.2.2.2 Сварные и болтовые соединения вдоль меридиана конической воронки должны иметь в каждой точке достаточные размеры, чтобы воспринимать максимальные мембранные усилия, возникающие в результате давления, соответствующего условиям заполнения и выгрузки.



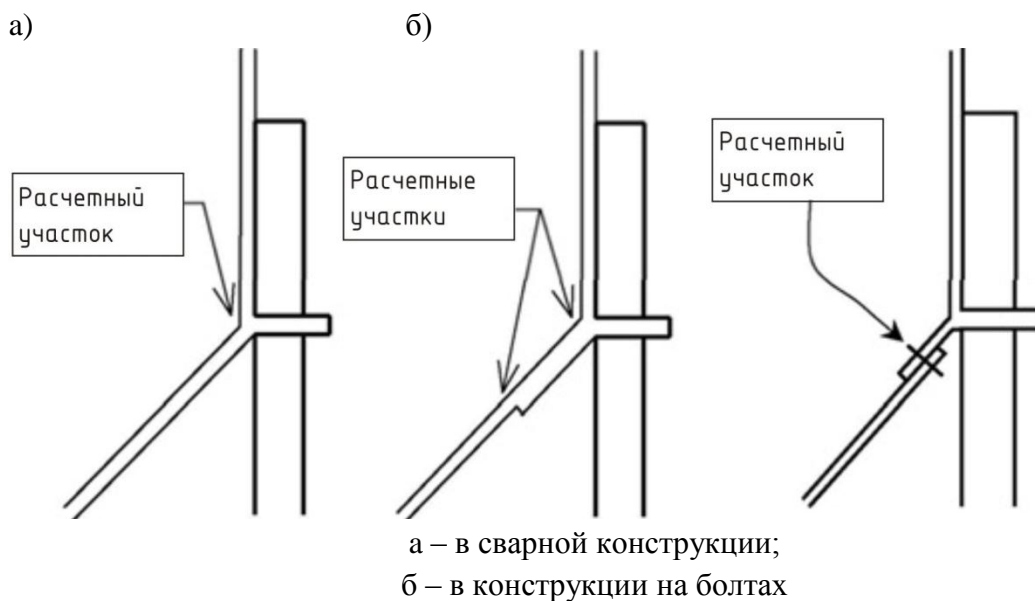
**Рисунок 6.1 – Сегмент оболочки воронки**

6.3.2.2.3 Сварные или болтовые соединения, направленные вдоль окружности воронки, должны иметь пропорции, способные выдержать максимальный общий вес твердых материалов, который может быть приложен ниже такого соединения.

ПРИМЕЧАНИЕ Вес материалов определяется по СН РК EN 1991-4.

### **6.3.2.3 Разрыв в переходном соединении**

6.3.2.3.1 Окружной узел присоединения воронки в переходном соединении должен быть рассчитан на восприятие максимальной меридиональной нагрузки, которую воспринимает воронка, с учетом возможной неравномерности нагрузок.



**Рисунок 6.2 – Переходное соединение воронки с возможностью разрушения:**

6.3.2.3.2 Когда рассматриваются только нагрузки от силы тяжести и движения хранящегося материала, меридиональное усилие на единицу окружности  $n_{\phi h, Ed, s}$  определяется из условий статического равновесия (вес материала, деленный на площадь соединения). Меридиональное усилие возникает в результате симметричного давления, определенного по СН РК EN 1991-4, и передается через переходное соединение. Расчетное значение локального меридионального усилия на единицу окружности  $n_{\phi h, Ed}$  с учетом неравномерности нагрузки определяется по формуле:

$$n_{\phi h, Ed} = g_{asym} n_{\phi h, Ed, s} \quad (6.1)$$

где  $n_{\phi h, Ed, s}$  – расчетное значение меридионального мембранного усилия на единицу длины окружности в верхней части воронки, полученное из условия симметричности нагрузок (приложение В СН РК EN 1993-4-1);

$g_{asym} = 1,2$  – коэффициент увеличения напряжений вследствие эксцентриситета (НП.2.34).

6.3.2.3.3 В бункерах класса последствий 2 расчет воронки должен выполняться по моментной теории оболочек, если имеются несимметричные и сосредоточенные силы от дискретных опор, эксцентриситета загрузки, разгрузочных устройств и механизмов, давления материала и т.п. На основании расчета определяются максимальные локальные значения меридиональных усилий на единицу длины окружности, которые передаются от стенки воронки на переходное соединение.

6.3.2.3.4 Несущая способность воронки в переходном соединении  $n_{\phi h, Rd}$  определяется по формуле:

$$n_{\phi h, Rd} = k_r t f_u / \gamma_{M2} \quad (6.2)$$

где  $f_u$  – предел прочности при растяжении;

$k_r = 0,90$  (НП.2.35).

### 6.3.2.4 Проверка прочности по пластичности на участках изменения толщины или в переходном соединении

6.3.2.4.1 Несущая способность воронки по механизму пластического разрушения определяется по равнодействующим меридиональным мембранным напряжениям  $n_\phi$  на верхней границе конуса или в точке изменения толщины листа.

6.3.2.4.2 Расчетная несущая способность  $n_{\phi,Rd}$  определяется по формуле

$$n_{\phi,Rd} = \frac{\left( \frac{rtf_y}{r - 2,4 \sqrt{\frac{rt}{\cos\beta}} \cdot \sin\beta} \right) \left( \frac{0,91\mu + 0,27}{\mu + 0,15} \right)}{\gamma_{M0}} \quad (6.3)$$

где  $t$  – локальная толщина стенки;

$r$  – радиус воронки в верхней точке механизма пластического разрушения (по верхнему краю воронки или в верхней точке изменения толщины листов);

$\beta$  – половинный угол воронки;

$\mu$  – максимальный коэффициент трения материала о стенку воронки.

6.3.2.4.3 Во всех расчетных точках оболочки расчетная несущая способность должна удовлетворять условию:

$$n_{\phi,Ed} \leq n_{\phi,Rd} \quad (6.4)$$

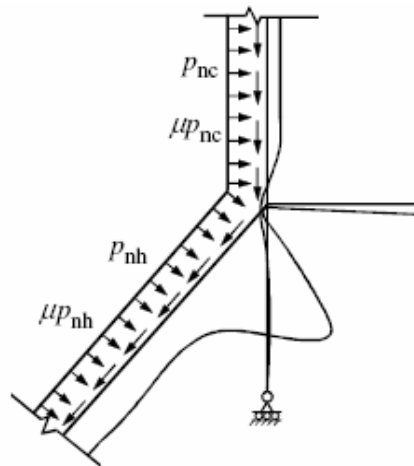


Рисунок 6.3 – Пластическое разрушение конической воронки

### 6.3.2.5 Локальный изгиб в зоне переходного соединения

6.3.2.5.1 Для предотвращения малоциклового пластичности и усталостного разрушения воронка должна быть запроектирована таким образом, чтобы выдерживать резкий изгиб в верхней части воронки, который возникает от совместности деформаций (цилиндра и конуса) и условий равновесия.

6.3.2.5.2 Для бункеров класса последствий 1 это требование допускается не выполнять.

6.3.2.5.3 Если расчет конструкций методом конечных элементов не выполняется, значение локальных напряжений изгиба в верхней части воронки должно определяться по нижеследующей методике.

6.3.2.5.4 Расчетная радиальная сила  $F_{e,Ed}$  и момент  $M_{e,Ed}$ , действующие на кольцевое ребро в переходном узле следует определять по формулам:

$$F_{e,Ed} = n_{\phi h,Ed} \sin \beta - F_h - F_c \quad (6.5)$$

$$M_{e,Ed} = F_c x_c - F_h x_h \quad (6.6)$$

при:

$$F_c = 2x_c p_{nc} \quad (6.7)$$

$$F_h = 2x_h (0,85 - 0,15 \mu \operatorname{ctg} \beta) p_{nh} \quad (6.8)$$

$$x_c = 0,39 \sqrt{rt_c} \quad (6.9)$$

$$x_h = 0,39 \sqrt{\frac{rt_h}{\cos \beta}} \quad (6.10)$$

где  $t_h$  – локальная толщина стенки воронки;

$t_c$  – локальная толщина стенки цилиндра в переходном соединении;

$r$  – радиус переходного соединения (в верхней части воронки);

$\beta$  – половинный угол воронки;

$\mu$  – максимальный коэффициент трения материала о стенку воронки;

$n_{\phi h,Ed}$  – расчетное значение равнодействующей меридиональных мембранных напряжений в верхней части воронки;

$p_{nh}$  – локальное значение нормального давления на воронку непосредственно под переходным соединением;

$p_{nc}$  – локальное значение нормального давления на цилиндр непосредственно над переходным соединением.

6.3.2.5.5 Локальные напряжения изгиба  $\sigma_{b\phi h,Ed}$  в верхней части воронки определяются по формуле:

$$\sigma_{b\phi h,Ed} = \left(\frac{6}{\Delta}\right) \{ (a_2 - 2a_1\eta) M_{e,Ed} - \rho (a_3 - a_2\eta) F_{e,Ed} \} - \left(\frac{6}{t_h^2}\right) F_h x_h \quad (6.11)$$

при:

$$\Delta = 2a_1 a_3 - a_2^2 \quad (6.12)$$

$$\rho = 0,78 \sqrt{r} \quad (6.13)$$

$$\eta = \sqrt{t_h \cos \beta} \quad (6.14)$$

$$a_1 = t_s^{3/2} + t_c^{3/2} + \frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos \beta}} + \frac{A_{ep}}{\rho} \quad (6.15)$$

$$a_2 = t_s^2 - t_c^2 + t_h^2 \quad (6.16)$$

$$a_3 = t_s^{5/2} + t_c^{5/2} + t_h^{5/2} \sqrt{\cos \beta} \quad (6.17)$$

где  $t_h$  – локальная толщина стенки воронки;

$t_c$  – локальная толщина стенки цилиндра в переходном соединении;

$t_s$  – локальная толщина стенки юбки ниже переходного соединения;

$A_{ep}$  – площадь поперечного сечения кольцевого ребра в переходном соединении (без учета площади примыкающих сегментов оболочки);

$r$  – радиус переходного соединения (в верхней части воронки).

### 6.3.2.6 Воронки, входящие в состав бункера, опертые на дискретные опоры

6.3.2.6.1 При опирании бункера на отдельные опоры или колонны следует учитывать относительную жесткость кольцевой балки в переходном соединении, стенки цилиндра и воронки при определении неравномерности меридиональных мембранных напряжений в воронке.

6.3.2.6.2 В бункерах класса последствий 1 это требование допускается не выполнять.

6.3.2.6.3 Воронка должна быть запроектирована таким образом, чтобы выдерживать наибольшие значения локальных меридиональных растягивающих усилий в верхней части воронки, примыкающей к опорам, в соответствии с Пунктами 6.3.2.3 и 6.3.2.4.

### 6.3.2.7 Потеря устойчивости стенки воронки

6.3.2.7.1 В бункерах класса последствий 1 устойчивость стенки воронки допускается не проверять.

6.3.2.7.2 Несущая способность воронки при потере устойчивости должна быть проверена от действия горизонтальных сил от разгрузочных устройств и механизмов или от несимметричных вертикальных воздействий.

6.3.2.7.3 Несущая способность воронки при потере устойчивости  $n_{\phi h, Rd}$  в верхней части воронки определяется по формуле:

$$n_{\phi h, Rd} = 0,6\alpha_{xh}E\left(\frac{t_h^2}{r}\right)\cos\beta/\gamma_{M1} \quad (6.18)$$

где  $\alpha_{xh} = 0,1$  – коэффициент чувствительности к несовершенствам при потере устойчивости (НП.2.36);

$t_h$  – локальная толщина стенки воронки;

$r$  – радиус воронки в переходном соединении;

$\gamma_{M1} = 1,10$ .

Значение  $n_{\phi, Rd}$ , определенное по Формуле (6.18), не должно превышать

$$n_{\phi, Rd} = t_h f_y / \gamma_{M1}$$

6.3.2.7.4 Меридиональное усилие в верхней части воронки должно удовлетворять условию:

$$n_{\phi h, Ed} \leq n_{\phi h, Rd} \quad (6.19)$$

#### ПРИМЕР 3 Расчет конической воронки бункера

##### 1 Исходные данные

1.1 Исходные данные для расчета приняты по Примеру 1. Схема воронки приводится на Рисунке 1 в Примере 1.

##### 1.2 Условия расчета:

а) допускается применять правила, содержащиеся в Пунктах 6.3 – 6.5 СН РК EN 1993-4-1,

поскольку половинный угол вершины воронки  $0^\circ < \beta = 30^\circ < 70^\circ$ ;

б) стенка воронки – изотропная без ребер жесткости.

2 Сбор нагрузок – см. Пример 1.

3 Статический расчет – см. Пример 1.

3.1 Деформированные схемы бункера – см. Пример 1.

3.2 Результаты расчета

На основании статического расчета (см. Пункт 3.1 Примера 1) получены нормальные напряжения и изгибающие моменты в элементах воронки бункера.

Распределение окружных (кольцевых) мембранных нормальных напряжений  $n_\theta$  в стенке воронки от действия нагрузок первого расчетного сочетания приведено на Рисунке 1а, от второго расчетного сочетания – на Рисунке 1б. Распределение меридиональных мембранных нормальных напряжений  $n_x$  в стенке воронки от действия нагрузок первого расчетного сочетания приведено на Рисунке 2а, от второго расчетного сочетания – на Рисунке 2б, от третьего расчетного сочетания – на Рисунке 2в. Нормальные напряжения в оболочке по результатам статического расчета получены в МПа.

Для перехода от напряжений, полученных при статическом расчете (значения напряжений получены в МПа для заданных толщин стенки), к расчетным значениям равнодействующих напряжений, используемых в дальнейшем для проверки прочности и устойчивости элементов бункера, были сформированы Таблицы 1, 2 и 3. В таблицах приведены максимальные значения напряженного состояния оболочки, полученные путем перехода от напряжений при конкретной толщине оболочки к напряжениям на сантиметр длины оболочки. Напряжения в элементах оболочки бункера приведены раздельно для трех расчетных сочетаний, поскольку в различных проверках компоненты напряженно-деформированного состояния не совпадают.

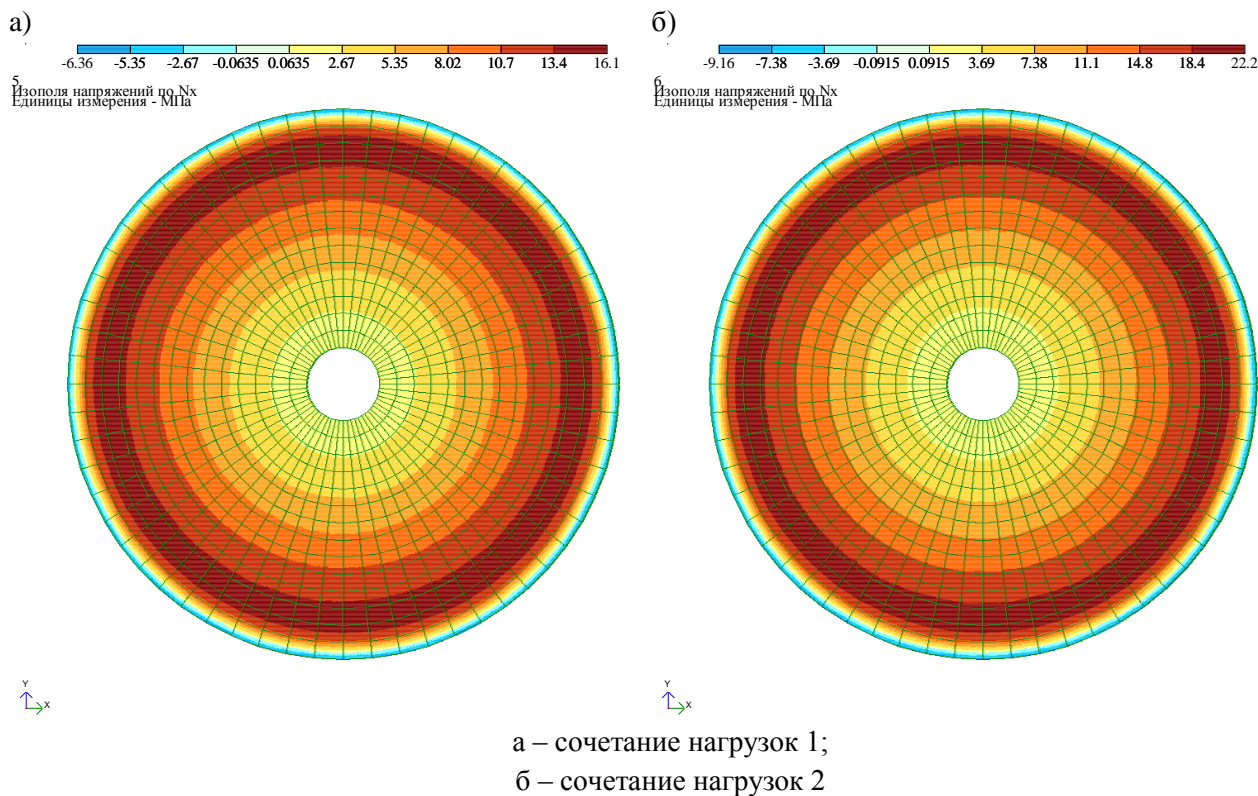
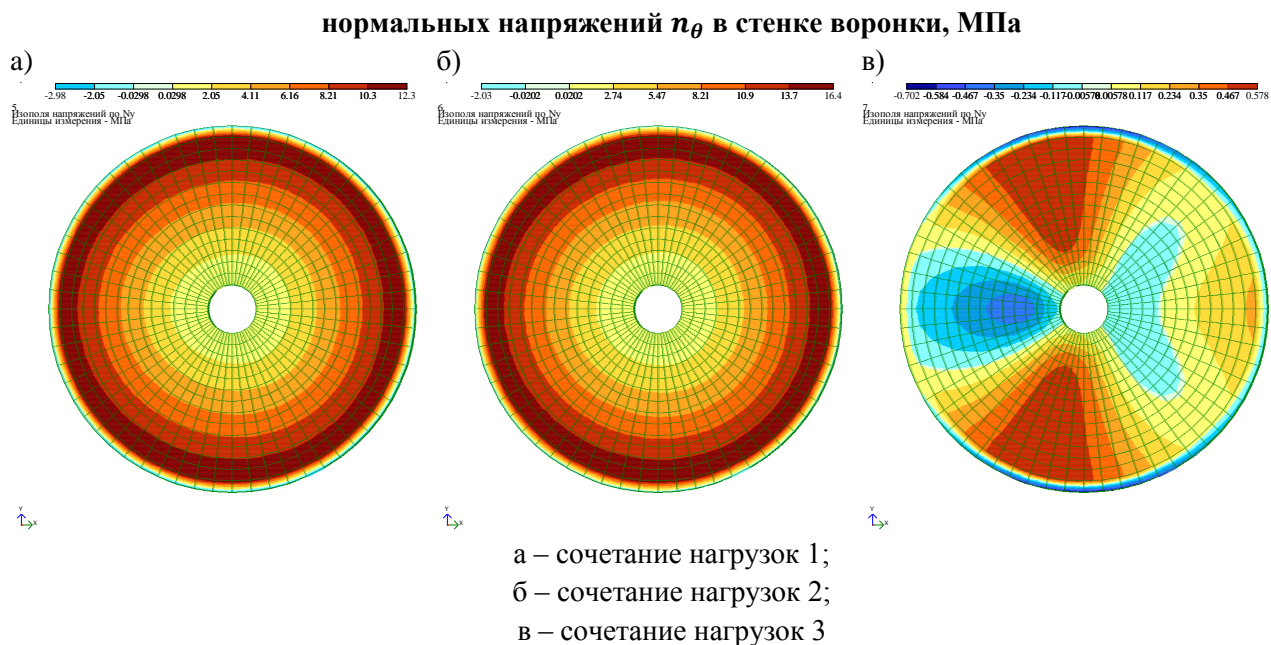


Рисунок 1 – Распределение окружных (кольцевых) мембранных





**Рисунок 2 – Распределение меридиональных мембранных нормальных напряжений в стенке воронки, МПа**

**Таблица 1 – Расчетные равнодействующие напряжений для сочетания 1**

№ участка	$n_{\theta,Ed}$	$m_{\theta,Ed}$	$n_{\phi,Ed}$	$m_{\phi,Ed}$	$n_{\phi\theta,Ed}$	$m_{\phi\theta,Ed}$
	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см
10	2,041	0,050	1,524	0,170	0,006	$2,7 \times 10^{-3}$
9	1,554	0,010	1,165	$4,0 \times 10^{-3}$	0,005	$2,2 \times 10^{-3}$
8	0,943	0,140	0,663	0,100	0,020	0,020

**Таблица 2 – Расчетные равнодействующие напряжений для сочетания 2**

№ участка	$n_{\theta,Ed}$	$m_{\theta,Ed}$	$n_{\phi,Ed}$	$m_{\phi,Ed}$	$n_{\phi\theta,Ed}$	$m_{\phi\theta,Ed}$
	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см	кН/см	кН·см/см
10	2,839	0,070	2,037	0,220	0,060	$2,7 \times 10^{-3}$
9	2,110	0,010	1,531	$5,0 \times 10^{-3}$	0,050	$2,2 \times 10^{-3}$
8	1,246	0,140	0,858	0,110	0,200	0,020

**Таблица 3 – Расчетные равнодействующие напряжений для сочетания 3**

№ участка	$n_{\phi,Ed}$
	кН/см
10	0,070
9	0,064
8	0,068

Пояснения к компонентам напряженного состояния, приведенным в Таблицах 1, 2 и 3 – см.

Пункт 3.2 Примера 1.

4 Расчет оболочки конической воронки

4.1 Расчет прочности переходного узла на разрыв:

а) локальная меридиональная сила на единицу длины окружности  $n_{\phi h, Ed}$  с учетом неравномерности нагрузки (6.1) СН РК EN 1993-4-1:

$$n_{\phi h, Ed} = g_{asym} n_{\phi h, Ed, s} = 1,2 \cdot 2,037 = 2,444 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

где  $n_{\phi h, Ed, s}$  – расчетное значение меридионального мембранного усилия на единицу длины окружности в верхней части воронки, полученное при симметричных нагрузках:

$$n_{\phi h, Ed, s} = n_{\phi, Ed} = 2,037 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

где  $n_{\phi, Ed}$  – принимается по Таблице 2 для участка воронки 10 из сочетания 2, в которое входит случай нагрузки 3.

$g_{asym}$  – коэффициент увеличения напряжений вследствие эксцентриситета,  $g_{asym} = 1,2$  (согласно НП.2.34).

б) расчетная несущая способность в переходном соединении (6.2) СН РК EN 1993-4-1:

$$n_{\phi h, Rd} = \frac{k_r t f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 1,0 \cdot 36}{1,25} = 25,92 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

где  $f_u$  – временное сопротивление,  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ ;

$k_r = 0,90$  (согласно НП.2.35);

$\gamma_{M2}$  – частный коэффициент для несущей способности по предельному состоянию прочности сварного соединения на разрыв,  $\gamma_{M2} = 1,25$  (Таблица 2.2) СН РК EN 1993-4-1;

$t = 1,0 \text{ см}$  – толщина стенки воронки в переходном соединении.

в) проверка прочности:

$$n_{\phi h, Ed} = 2,444 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < n_{\phi h, Rd} = 25,92 \frac{\text{кН}}{\text{см}}.$$

Вывод: прочность переходного узла на разрыв обеспечена.

4.2 Расчет прочности в переходном узле по механизму пластичности:

а) расчетное значение равнодействующей меридиональных мембранных напряжений на верхней границе воронки принимается из статического расчета:  $n_{\phi, Ed} = 2,037 \text{ кН/см}$  (Таблица 2).

б) расчетная несущая способность  $n_{\phi, Rd}$  (6.3) СН РК EN 1993-4-1:

$$n_{\phi, Rd} = \frac{\left( \frac{r t f_y}{r - 2,4 \sqrt{\frac{r t}{\cos \beta}} \cdot \sin \beta} \right) \left( \frac{0,91 \mu + 0,27}{\mu + 0,15} \right)}{\gamma_{M0}} =$$

$$= \frac{\left( \frac{225 \cdot 1,0 \cdot 23,5}{225 - 2,4 \sqrt{\frac{225 \cdot 1}{\cos 30^\circ}} \cdot \sin 30^\circ} \right) \left( \frac{0,91 \cdot 0,43 + 0,27}{0,43 + 0,15} \right)}{1,00} = 29,32 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

где  $t = 1,0 \text{ см}$  – локальная толщина стенки;

$r = 225 \text{ см}$  – радиус в верхней точке проверки прочности – в верхней части воронки;

$\beta = 30^\circ$  – половинный угол вершины воронки;

$\mu$  – коэффициент трения о стенку воронки для случая нагрузки 3. Значение трения о стенку принимаем по наибольшему значению  $\mu = \mu_m \cdot a_\mu = 0,46/1,07 = 0,43$  (Пункт 1.3.2 Примера 1).

$\gamma_{M0}$  – частный коэффициент для несущей способности по пластическому предельному состоянию,  $\gamma_{M0} = 1,00$ ;

$f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$  – предел текучести.

в) проверка несущей способности:

$$n_{\phi,Ed} = 2,037 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < n_{\phi,Rd} = 29,32 \frac{\text{кН}}{\text{см}}$$

Вывод: несущая способность по механизму пластичности обеспечена.

4.3 Проверка прочности при локальном изгибе в зоне переходного соединения:

а) расчетное значение равнодействующих меридиональных мембранных напряжений в верхней части воронки:  $n_{\phi h,Ed} = 2,444 \text{ кН/см}$  (Пункт 4.1 данного примера).

б) параметры для определения расчетных значений эффективной радиальной силы  $F_{e,Ed}$  и момента  $M_{e,Ed}$ , воздействующие на переходное кольцо (6.7) – (6.10) СН РК EN 1993-4-1:

$$x_c = 0,39 \sqrt{rt_c} = 0,39 \sqrt{225 \cdot 0,8} = 5,232 \text{ см};$$

$$x_h = 0,39 \sqrt{\frac{rt_h}{\cos \beta}} = 0,39 \sqrt{\frac{225 \cdot 1,0}{\cos 30^\circ}} = 6,286 \text{ см};$$

$$F_c = 2x_c p_{nc} = 2 \cdot 5,232 \cdot 4,594 \cdot 10^{-3} = 0,048 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

$$F_h = 2x_h (0,82 - 0,15 \mu \operatorname{ctg} \beta) p_{nh} =$$

$$= 2 \cdot 6,286 \cdot (0,82 - 0,15 \cdot 0,43 \cdot \operatorname{ctg} 30^\circ) \cdot 11,28 \cdot 10^{-3} = 0,10 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

где  $t_h = 1,0 \text{ см}$  – локальная толщина стенки воронки;

$t_c = 0,8 \text{ см}$  – локальная толщина стенки цилиндра в зоне переходного соединения;

$r = 225 \text{ см}$  – радиус переходного соединения (в верхней части воронки);

$\beta = 30^\circ$  – половинный угол в вершине воронки;

$\mu$  – коэффициент трения о стенку воронки;

$p_{nh}$  – локальная величина нормального давления на воронку непосредственно под переходным соединением:

$$p_{nh} = p_{ne} \cdot \gamma_Q = 7,52 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 = 11,28 \cdot 10^{-3} \text{ кН/см}^2;$$

где  $p_{ne} = 7,52 \cdot 10^{-3} \text{ кН/см}^2$  – по Таблице 2 Примера 1;

$p_{nc}$  – локальная величина нормального давления на цилиндр непосредственно над переходным соединением:

$$p_{nc} = p_{he} \cdot \gamma_Q = 3,063 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 = 4,594 \cdot 10^{-3} \text{ кН/см}^2;$$

где  $p_{he} = 3,063 \cdot 10^{-3} \text{ кН/см}^2$  – по Таблице 1 Примера 1.

в) расчетная радиальная сила, действующая на переходное кольцо (6.5) СН РК EN 1993-4-1:

$$F_{e,Ed} = n_{\phi h,Ed} \sin \beta - F_h - F_c = 2,444 \cdot \sin 30^\circ - 0,10 - 0,048 = 1,074 \frac{\text{кН}}{\text{см}}.$$

г) расчетный момент, действующий на переходное кольцо (6.6) СН РК EN 1993-4-1:

$$M_{e,Ed} = F_c x_c - F_h x_h = 0,048 \cdot 5,232 - 0,10 \cdot 6,286 = -0,38 \frac{\text{кН}}{\text{см}} \cdot \text{см}.$$

д) параметры для определения локальных напряжений изгиба в верхней части воронки (6.12) – (6.17) СН РК EN 1993-4-1:

$$\rho = 0,78 \sqrt{r} = 0,78 \cdot \sqrt{225} = 11,7 \text{ см}^{1/2};$$

$$\eta = \sqrt{t_h \cos \beta} = \sqrt{1,0 \cdot \cos 30^\circ} = 0,931 \text{ см}^{1/2};$$

$$a_1 = t_s^{3/2} + t_c^{3/2} + \frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos \beta}} + \frac{A_{ep}}{\rho} = 1,0^{3/2} + 0,8^{3/2} + \frac{1,0^{3/2}}{\sqrt{\cos 30^\circ}} + \frac{60}{11,7} = 7,918 \text{ см}^{3/2};$$

$$a_2 = t_s^2 - t_c^2 + t_h^2 = 1,0^2 - 0,8^2 + 1,0^2 = 1,36 \text{ см}^2;$$

$$a_3 = t_s^{5/2} + t_c^{5/2} + t_h^{5/2} \sqrt{\cos \beta} = 1,0^{5/2} + 0,8^{5/2} + 1,0^{5/2} \cdot \sqrt{\cos 30^\circ} = 2,503 \text{ см}^{5/2};$$

$$\Delta = 2a_1 a_3 - a_2^2 = 2 \cdot 7,918 \cdot 2,503 - 1,36^2 = 37,79 \text{ см}^4,$$

где  $t_h = 1,0$  см – локальная толщина стенки воронки;

$t_c = 0,8$  см – локальная толщина стенки цилиндра в зоне переходного соединения;

$t_s = 1,0$  см – локальная толщина стенки юбки ниже переходного соединения;

$A_{ep}$  – площадь поперечного сечения кольца в зоне переходного соединения (без учета фактического влияния смежных сегментов оболочки),  $A_{ep} = b_p \cdot t_p = 30,0 \cdot 2,0 = 60 \text{ см}^2$  (размеры кольца – см. на Рисунке 1 Примера 1)

$r = 225$  см – радиус переходного соединения (в верхней части воронки).

е) локальные напряжения изгиба в верхней части воронки (6.11) СН РК EN 1993-4-1:

$$\begin{aligned} \sigma_{b\phi h,Ed} &= \left(\frac{6}{\Delta}\right) \{ (a_2 - 2a_1\eta) M_{e,Ed} - \rho(a_3 - a_2\eta) F_{e,Ed} \} - \left(\frac{6}{t_h^2}\right) F_{e,Ed} x_h = \\ &= \left(\frac{6}{37,79}\right) \{ (1,36 - 2 \cdot 7,918 \cdot 0,931)(-0,38) - 11,7 \cdot (2,503 - 1,36 \cdot 0,931) \cdot 1,074 \} - \\ &\quad - \left(\frac{6}{1,0^2}\right) \cdot 1,074 \cdot 6,286 = -42,16 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}. \end{aligned}$$

ж) проверка прочности:

$$|\sigma_{b\phi h,Ed}| = 42,16 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} > \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1,00} = 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

где  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$  – предел текучести;

$\gamma_{M0} = 1,00$  – частный коэффициент для несущей способности по пластическому предельному состоянию.

Прочность при локальном изгибе в зоне переходного соединения не обеспечена.

Вывод: увеличиваем толщину воронки в локальной зоне на величину  $k$ :

$$k = \frac{|\sigma_{b\phi h,Ed}|}{\left(\frac{f_y}{\gamma_{M0}}\right)} = \frac{42,16}{\left(\frac{23,5}{1,00}\right)} = 1,79.$$

Принимаем толщину стенки в локальной зоне воронки равной 2,0 см из условия:

$$t_{hi} \geq k \cdot t_h = 1,79 \cdot 1,0 = 1,79 \text{ см}.$$

4.4 Расчет на устойчивость:

а) расчетное значение равнодействующих меридиональных мембранных напряжений в верхней части воронки:  $n_{\phi h,Ed} = 2,444 \text{ кН/см}$  (см. Пункт 4.1 данного примера).

б) несущая способность по устойчивости (6.18) СН РК EN 1993-4-1:

$$n_{\phi h,Rd} = 0,6 \alpha_{xh} E \left(\frac{t_h^2}{r}\right) \frac{\cos \beta}{\gamma_{M1}} = 0,6 \cdot 0,10 \cdot 2,10 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{2,0^2}{225}\right) \frac{\cos 30^\circ}{1,10} = 17,64 \frac{\text{кН}}{\text{см}},$$

где  $\alpha_{xh} = 0,10$  – коэффициент чувствительности к несовершенствам при потере устойчивости (согласно НП.2.36);

$E = 2,10 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$  – модуль упругости стали;

$t_h = 2,0$  см – локальная толщина стенки воронки;

$r = 225$  см – радиус переходного соединения (в верхней части воронки);

$\gamma_{M1} = 1,10$  – частный коэффициент для несущей способности по предельному состоянию устойчивости;

в) проверка:  $n_{\phi h, Rd}$  не должно быть больше  $n_{\phi, Rd} = t_h f_y / \gamma_{M1}$  (Пункт 6.3.2.7.3):

$$n_{\phi h, Rd} = 17,64 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < n_{\phi, Rd} = \frac{2,0 \cdot 23,5}{1,10} = 42,73 \frac{\text{кН}}{\text{см}}.$$

г) меридиональное усилие в верхней части воронки должно удовлетворять условию (6.19):

$$n_{\phi h, Ed} \leq n_{\phi h, Rd}$$

$$n_{\phi h, Ed} = 2,444 \frac{\text{кН}}{\text{см}} < n_{\phi h, Rd} = 17,64 \frac{\text{кН}}{\text{см}}.$$

Вывод: несущая способность по устойчивости обеспечена.

## 6.4 Специальные конструкции бункеров

### 6.4.1 Опорные конструкции

Влияние дискретных опор, расположенных ниже воронки, следует определять согласно Пункту 5.4 СН РК EN 1993-4-1. Поддерживающие конструкции следует рассчитывать в соответствии с СН РК EN 1993-1-1, при этом граница между бункером и поддерживающими конструкциями определяется согласно Пункту 1.1.4.

### 6.4.2 Воронка на колоннах

6.4.2.1 Если корпус воронки опирается на отдельные опоры ниже верхнего края воронки, конструкции воронки следует рассчитывать с использованием моментной теории оболочек по правилам, изложенным в СН РК EN 1993-1-6.

6.4.2.2 Конструктивное решение воронки должно обеспечивать восприятие опорных реакций от поддерживающих конструкций.

6.4.2.3 Узлы и соединения воронки должны быть рассчитаны на наибольшие локальные значения равнодействующих напряжений, которые возникают от сил, передаваемых этими соединениями.

6.4.2.4 Расчет несущей способности воронки по потере устойчивости в зонах возникновения сжимающих мембранных напряжений выполняет по СН РК EN 1993-1-6.

### 6.4.3 Несимметричная воронка

Если ось воронки проходит не по вертикали, а наклонно под углом  $\omega$  относительно вертикали (Рисунок 6.4), повышенные меридиональные напряжения на стороне, имеющей крутой уклон, которые ассоциируются с такой геометрией, следует оценить и принять меры с целью обеспечения адекватного локального меридионального сопротивления.

### 6.4.4 Стенка воронки с ребрами жесткости

6.4.4.1 Продольные ребра жесткости должны быть надежно прикреплены к верхней части воронки.

6.4.4.2 Если стенка воронки усилена меридиональными ребрами жесткости, эффект совместности деформаций продольных ребер и стенки должен учитываться в расчете.

Растяжение стенки воронки в окружном направлении вызывает сжатие продольных ребер жесткости, которое необходимо учитывать при их расчете с помощью коэффициента Пуассона.

6.4.2.3 Соединения листов стенки воронки должны иметь достаточные размеры, чтобы воспринимать увеличенные растягивающие усилия, возникающие в результате совместности деформаций.

6.4.2.4 Крепление продольного ребра жесткости и стенки должно быть рассчитано на действие сдвигающих усилий, возникающих между ними.

#### 6.4.5 Конус, состоящий из сегментов

6.4.5.1 Если конус воронки состоит из нескольких сегментов, имеющих разный уклон, должны быть рассчитаны и включены в расчет конструкций соответствующие воздействия сыпучих твердых материалов на каждый сегмент.

6.4.5.2 В местах изменения угла наклона стенки воронки следует определять возникающие сжимающие или растягивающие окружные напряжения для обеспечения необходимой несущей способности.

6.4.5.3 В проекте воронки следует учесть, что на участках изменения наклона возникают зоны с повышенным абразивным износом.

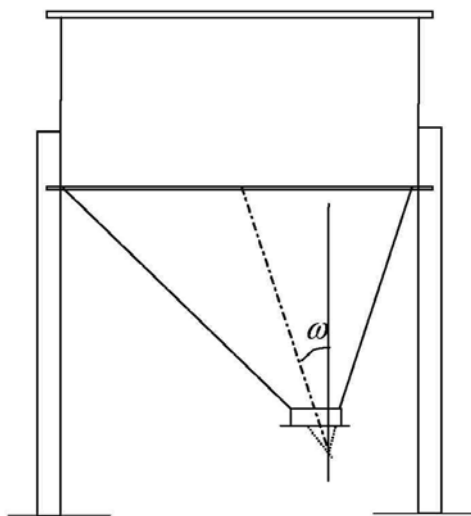


Рисунок 6.4 – Несимметричная воронка с колоннами, прикрепленными к цилиндрической части бункера

#### 6.5 Предельные состояния эксплуатационной пригодности

##### 6.5.1 Основные положения

Если возникнет необходимость в критериях оценки эксплуатационной пригодности воронок, конкретные предельные значения деформаций подлежат согласованию между проектной организацией и заказчиком.

### 6.5.2[6.5.2(1)] Вибрация

В проекте должны быть предусмотрены необходимые меры, гарантирующие, что во время эксплуатации воронка не будет подвержена воздействию чрезмерных вибраций.

## 7 ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ КРУГЛОЙ КОНИЧЕСКОЙ КРЫШИ

### 7.1 Основные положения

7.1.1 При проектировании конструкций крыши в расчетах необходимо учитывать постоянные, временные, технологические, аварийные, ветровые, снеговые нагрузки и воздействие частичного вакуума.

7.1.2 При расчете необходимо учитывать возможность воздействия на крышу сил, направленных вверх, вследствие случайного переполнения или непредвиденного разжижения хранящихся твердых материалов.

### 7.2 Различия между конструктивными формами крыши

#### 7.2.1 Терминология

7.2.1 Коническая крыша в виде оболочки, образованной из гнутых листов, без поддерживающих балок или колец называется крышей-оболочкой (сводом-оболочкой) или неподдерживаемой крышей.

7.2.2 Коническая крыша, в которой оболочка поддерживается балками или решетчатой системой, называется каркасной (стропильной) крышей или поддерживаемой крышей.

### 7.3 Несущая способность круглых конических крыш бункера

#### 7.3.1 Крыши-оболочки

7.3.1.1 Крыши в виде свода-оболочки должны проектироваться в соответствии с требованиями СН РК EN 1993-1-6. Выполнение нижеследующих положений обеспечивает удовлетворение этих требований для конических крыш диаметром не более 5 м и углом наклона крыши к горизонтали  $\varphi$  не более  $40^\circ$ .

7.3.1.2 Приведенные напряжения фон Мизеса при действии мембранных сил и изгибающих моментов должны не превышать значение:

$$f_{e,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (7.1)$$

где  $\gamma_{M0} = 1,0$  – частный коэффициент для несущей способности по предельному состоянию пластичности.

7.3.1.3 Критическое наружное давление потери устойчивости  $p_{n,Rcr}$  для изотропной конической крыши следует определять по формуле:

$$p_{n,Rcr} = 2,65E \left( \frac{t \cos \phi}{r} \right)^{2,43} \cdot (\tan \phi)^{1,6} \quad (7.2)$$

где  $r$  – внешний радиус крыши;

$t$  – наименьшая толщина листа оболочки;

$\phi$  – наклон конуса к горизонтальной плоскости.

7.3.1.4 Расчетное наружное давление потери устойчивости следует определять по формуле:

$$p_{n,Rd} = \frac{\alpha_p p_{n,Rcr}}{\gamma_{M1}} \quad (7.3)$$

где  $\gamma_{M1} = 1,10$  – частный коэффициент для несущей способности по предельному состоянию потери устойчивости;

$\alpha_p = 0,20$  (НП.2.37).

7.3.1.5 Расчетное максимальное наружное давление на крышу, возникающее в результате воздействий, определенных в Пункте 7.1, должно удовлетворять следующему условию:

$$p_{n,Ed} \leq p_{n,Rd} \quad (7.4)$$

### 7.3.2 Каркасные крыши

Каркасные (стропильные), или поддерживаемые крыши, в которых листовая обшивка кровли опирается на балки или решетчатую систему, следует рассчитывать и проектировать согласно положениям Раздела 7 СН РК EN 1993-4-2 (резервуары).

### 7.3.3 Карнизный узел

Расчет узла соединения крыши с вертикальной оболочкой бункера, а также кольцевое ребро жесткости в этом соединении должен выполняться согласно положениям СН РК EN 1993-4-2 (резервуары).

## 8 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И КОЛЬЦЕВЫХ БАЛОК

### 8.1 Основные положения

#### 8.1.1 Общие положения

8.1.1.1 Стальное кольцевое ребро в переходном узле и кольцевая балка должны иметь такие размеры, чтобы выполнялись все основные проектные требования по предельным состояниям несущей способности.

Кольцевое ребро располагается в горизонтальной плоскости, соответственно, воспринимает горизонтальную нагрузку, которая вызывает в нем сжатие. При этом разгружается стенка бункера и, в частности, сварные швы соединения воронки к



цилиндрической части. Кольцевые ребра в переходном узле изображены на Рисунках 5.6, а; 5.7, а; 6.2.

Кольцевая балка, кроме горизонтальных усилий, воспринимает вертикальную нагрузку от цилиндрической части и воронки. Она устанавливается (или совмещается с оболочкой) при дискретном опирании бункера.

8.1.1.2 Оценка надежности кольца должна выполняться на основании требований норм СН РК EN 1993-1-6, за исключением тех случаев, когда соблюдение этих требований обеспечивается настоящим стандартом.

8.1.1.3 В бункерах класса последствий 1 проверки предельных состояний по усталости и малоциклового усталости допускается не выполнять.

### **8.1.2 Проектирование кольцевого ребра**

8.1.2.1 Кольцевое ребро и кольцевая балка должны быть проверены на то, чтобы в течение срока службы были обеспечены:

- несущая способность по предельному состоянию пластичности при действии окружного сжатия;
- несущая способность по потере устойчивости при действии окружного сжатия;
- несущая способность по локальной текучести при действии сжимающих или растягивающих напряжений;
- несущая способность по локальным разрушениям выше опоры;
- несущая способность по кручению;
- несущая способность узлов и соединений.

8.1.2.2 Кольцевая балка должна удовлетворять положениям СН РК EN 1993-1-6, за исключением тех случаев, когда обеспечивается выполнение условий, указанных в Пунктах 8.2 ÷ 8.5.

8.1.2.3 Для бункеров класса последствий 1 циклическую пластичность и многоцикловую усталость допускается не рассматривать.

### **8.1.3 Терминология**

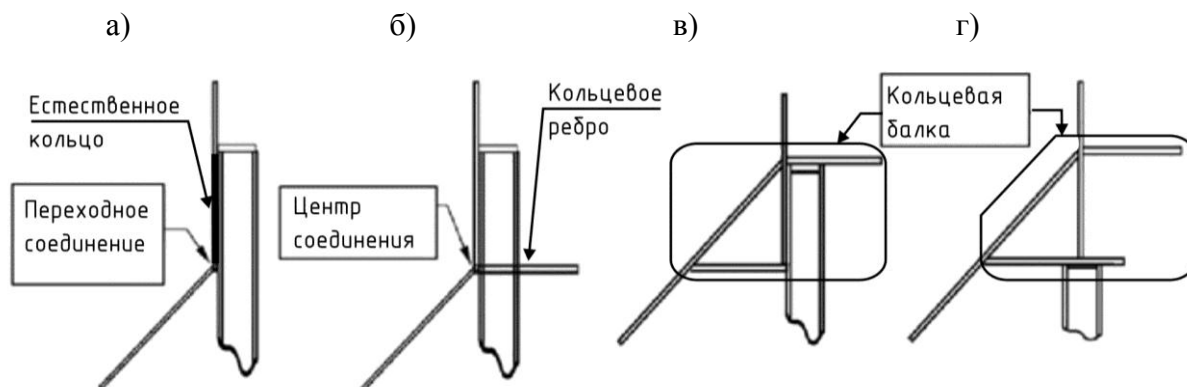
8.1.3.1 Кольцо, предназначенное для восприятия только радиальных усилий от воронки, называется переходным кольцом.

8.1.3.2 Кольцо, предназначенное для передачи вертикальных сил между разными элементами (например, между стенкой цилиндра и дискретными опорами), называется кольцевой балкой.

8.1.3.3 Точка пересечения срединной поверхности листовой оболочки воронки и срединной поверхности стенки цилиндрической оболочки в переходном соединении, называется центром соединения и является точкой отсчета для выполнения проверок по предельным состояниям.

8.1.3.4 Бункер, не имеющий выделенного кольца в переходном соединении (см. Рисунок 8.1), имеет расчетное кольцо, состоящее из примыкающих к узлу элементов оболочек, которое называется естественным кольцом.

8.1.3.5 Кольцевая пластина, расположенная в переходном соединении, называется кольцевым ребром (см. Рисунок 8.1).



- а – естественное кольцо с примыкающей колонной;  
 б – кольцевое ребро с примыкающей колонной;  
 в – треугольная коробчатая балка с колонной, примыкающей к юбке;  
 г – треугольная коробчатая балка с колонной ниже юбки

**Рисунок 8.1 – Формы кольца**

8.1.3.6 Горячекатаный стальной профиль, используемый в качестве кольцевого ребра жесткости в переходном соединении, называется кольцевым ребром прокатного сечения.

8.1.3.7 Прокатный стальной профиль, расположенный по окружности бункера для опирания оболочки ниже переходного соединения, называется кольцевой балкой прокатного сечения.

8.1.3.8 Если сечение балки, расположенной по окружности бункера для опирания оболочки, образовано из отдельных пластин, то она называется составной балкой.

#### **8.1.4 Моделирование соединения**

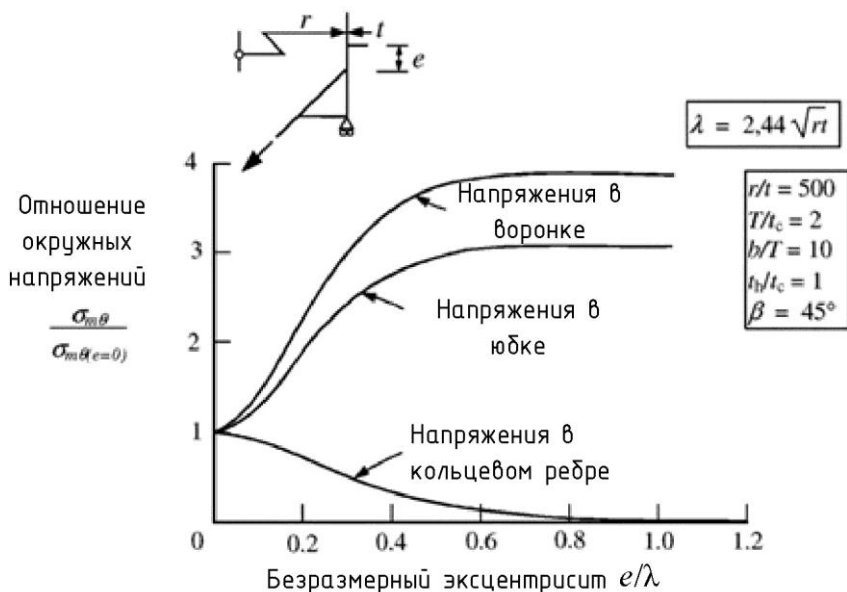
8.1.4.1 Если бункер опирается равномерно по окружности, окружные напряжения в кольцевом ребре принимаются равномерно распределенными по ребру.

8.1.4.2 Если бункер опирается на отдельные опоры или колонны, окружные напряжения в пластинах переходного соединения изменяются радиально в каждой пластине отдельно вследствие влияния искривления пластин.

#### **8.1.5 Ограничения на расположение кольца**

8.1.5.1 Эксцентриситет кольцевого ребра по вертикали относительно центра переходного соединения не должен превышать  $0,2\sqrt{rt}$ , где  $t$  – это толщина оболочки цилиндра, поскольку с увеличением эксцентриситета эффективность кольцевого ребра резко снижается (см. Рисунок 8.2). При больших эксцентриситетах необходимо выполнить расчет изгибающих моментов в оболочке в соответствии с СН РК EN 1993-1-6.

8.1.5.2 Упрощенные правила, приведенные в Пункте 8.2 СН РК EN 1993-4-1, применяются только в тех случаях, когда выполняется это требование.



**Рисунок 8.2 – Изменение мембранных напряжений в кольце и примыкающих оболочках при смещении кольца**

## 8.2 Расчет соединения

8.2.1 Расчет переходного соединения воронки и цилиндрической части бункера следует выполнять согласно указаниям Подраздела 8.2 СН РК EN 1993-4-1.

### 8.3 Несущая способность

8.3.1 Несущая способность конструктивных элементов переходного соединения, кольцевого ребра и кольцевой балки должна определяться в соответствии с Пунктом 8.3 СН РК EN 1993-4-1.

## 8.4 Проверки по предельным состояниям

8.4.1 Проверки по предельным состояниям конструктивных элементов переходного соединения, кольцевого ребра и кольцевой балки должны выполняться в соответствии с Пунктом 8.4 СН РК EN 1993-4-1.

#### ПРИМЕР 4 Расчет кольцевой балки

### 1 Исходные данные для расчета

Марка стали конструкций бункера – S235 по EN 10025-2 с характеристиками (Таблица 3.1 СН РК EN 1993-1-1):

- предел текучести  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ ;
- временное сопротивление  $f_u = 36 \text{ кН/см}^2$ .

Характеристики бункера:

- количество равноудаленных обособленных опор  $j = 4$ ;
- радиус центра тяжести опор  $r_s = 225$  см;
- радиус срединной поверхности цилиндра  $r = 225,6$  см;
- внутренний радиус оболочки цилиндра  $r_c = 225$  см;
- угол  $Q_0 = \frac{\pi}{j} = 0,785$  радиан;
- угол наклона воронки к вертикали  $\beta = 30^\circ$ ;
- полная высота балки  $h_b = 60$  см;
- толщина стенки воронки  $t_h = 1,2$  см;
- толщина стенки цилиндра  $t_c = 1,2$  см;
- толщина стенки юбки  $t_s = 1,2$  см;
- толщина верхнего ребра  $t_{p1} = 2,0$  см;
- толщина нижнего ребра  $t_{p2} = 2,0$  см;
- ширина верхнего ребра  $b_{p1} = 30,0$  см;
- ширина выступа нижнего ребра за край стенки  $b_{p2.0} = 30,0$  см;
- ширина нижнего ребра  $b_{p2} = 30 + 1,2 + 32,22 = 63,42$  см;
- расстояние в свету между полками кольцевой балки  $h = h_b - t_{p1} - t_{p2} = 60 - 2 - 2 =$

56 см.

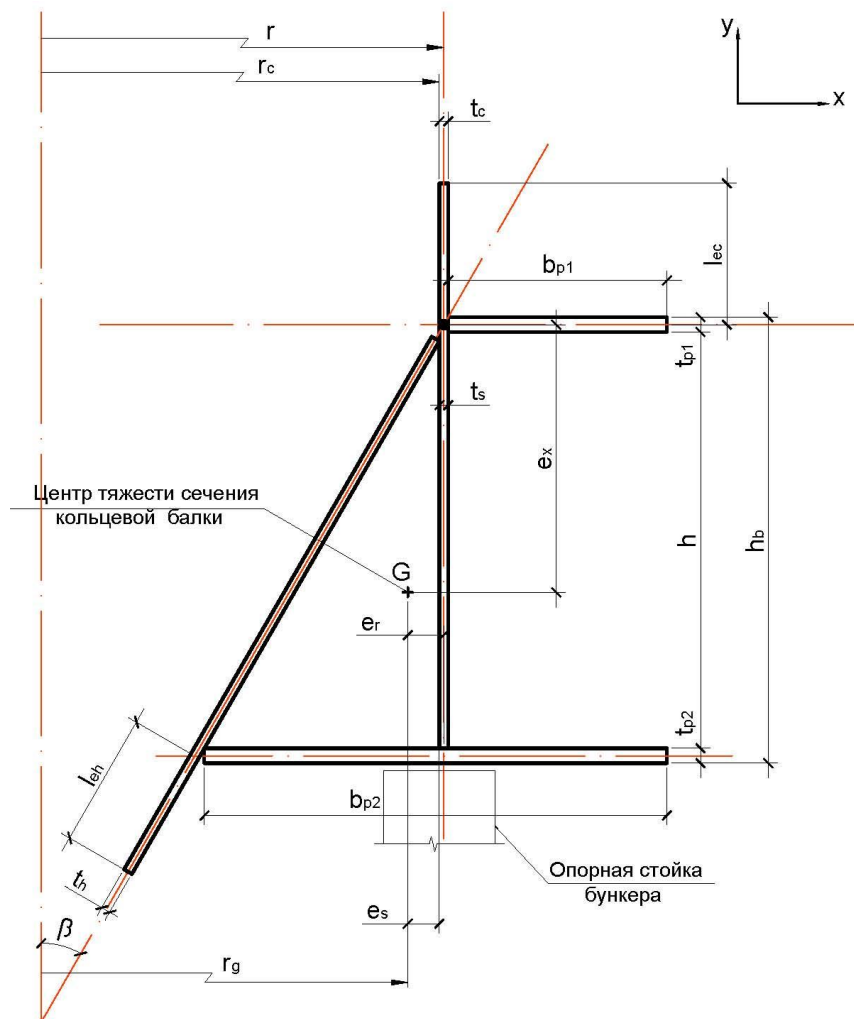


Рисунок 1 – Сечение кольцевой балки

## 2 Определение геометрии кольцевой балки

Высота стенки цилиндра, включенная в работу балки:

$$l_{\text{ec}} = 15 \cdot t_c = 15 \cdot 1.2 = 18 \text{ cm.}$$

Высота стенки балки (совместно со стенкой цилиндра):

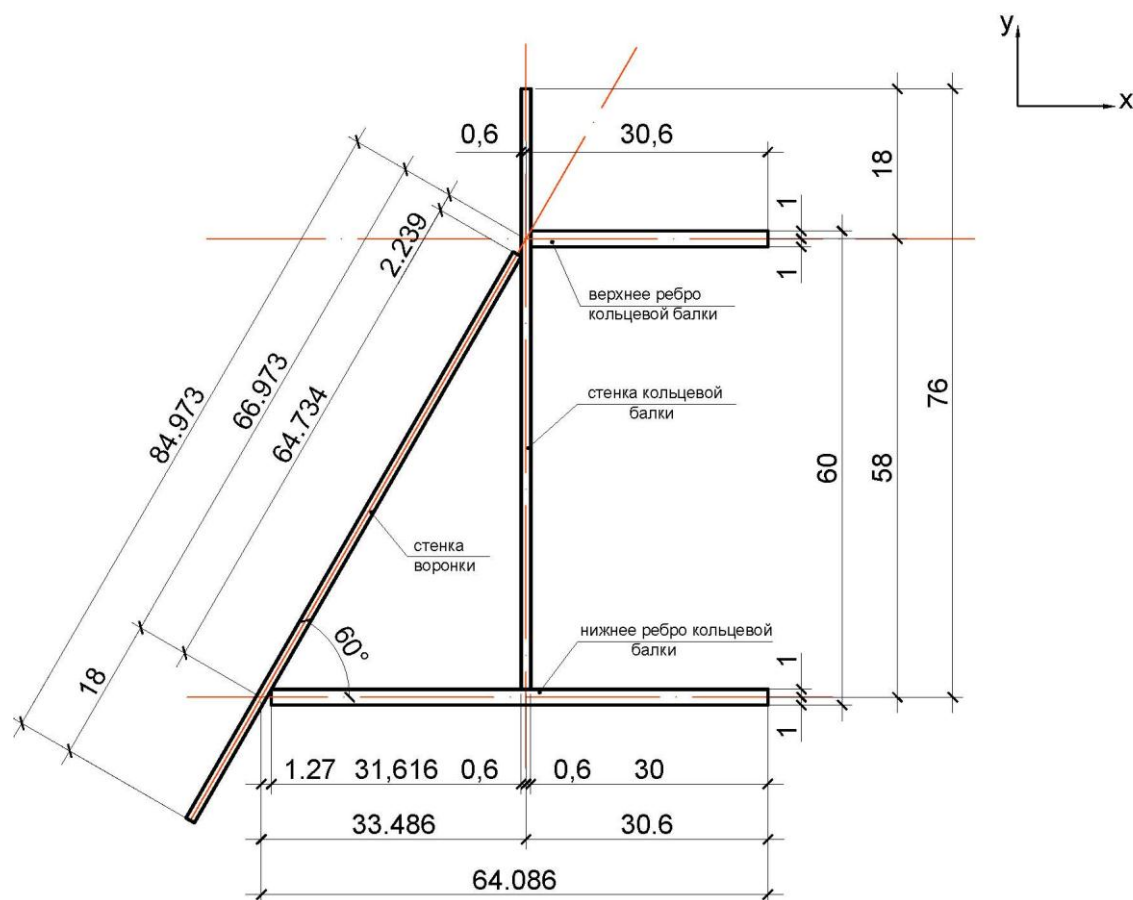
$$h_{cb} = h_b - \frac{t_{p1}}{2} - \frac{t_{p2}}{2} + l_{ec} = 60 - \frac{2}{2} - \frac{2}{2} + 18 = 76 \text{ cm}.$$

Длина стенки воронки, включенная в работу балки (за пределами балки):

$$l_{eh} = 15 \cdot t_h = 15 \cdot 1.2 = 18 \text{ cm.}$$

Полная длина стенки воронки, включенная в работу кольцевой балки (см. Рисунок 2):

$$L_h = \frac{1}{\cos \beta} \cdot \left( h_b - \frac{t_{p1}}{2} - \frac{t_{p2}}{2} \right) + l_{eh} = \frac{1}{\cos 30} \cdot (60 - 1 - 1) + 18,0 = 84,973 \text{ cm.}$$



**Рисунок 2 Основные элементы кольцевой балки  
(размеры даны в сантиметрах)**

### 3 Определение геометрических характеристик сечения кольцевой балки

### 3.1 Определение геометрических характеристик простых сечений

### 3.1.1 Стенка кольцевой балки

Площадь:

$$A_c = t_c \cdot h_{cb} = 1,2 \cdot 76 = 91,2 \text{ cm}^2.$$

Моменты инерции:

$$I_{xoc} = \frac{t_c}{12} \cdot (h_{cb})^3 = \frac{1.2}{12} \cdot (76)^3 = 4.39 \cdot 10^4 \text{ см}^4;$$

$$I_{yoc} = \frac{h_{cb}}{12} \cdot (t_c)^3 = \frac{76}{12} \cdot (1.2)^3 = 10.944 \text{ см}^4.$$

3.1.2 Верхнее ребро кольцевой балки

Площадь:

$$A_{r1} = b_{p1} \cdot t_{p1} = 30,6 \cdot 2 = 61,2 \text{ см}^2.$$

Моменты инерции:

$$I_{xor1} = \frac{b_{p1}}{12} \cdot (t_{p1})^3 = \frac{30,6}{12} \cdot (2)^3 = 20,4 \text{ см}^4;$$

$$I_{yor1} = \frac{t_{p1}}{12} \cdot (b_{p1})^3 = \frac{2}{12} \cdot (30,6)^3 = 4,78 \cdot 10^3 \text{ см}^4.$$

3.1.3 Нижнее ребро кольцевой балки

Площадь:

$$A_{r2} = b_{p2} \cdot t_{p2} = 64,086 \cdot 2 = 128,172 \text{ см}^2.$$

Моменты инерции:

$$I_{xor2} = \frac{b_{p2}}{12} \cdot (t_{p2})^3 = \frac{64,086}{12} \cdot 2^3 = 42,724 \text{ см}^4;$$

$$I_{yor2} = \frac{t_{p2}}{12} \cdot (b_{p2})^3 = \frac{2}{12} \cdot 64,086^3 = 4,387 \cdot 10^4 \text{ см}^4.$$

3.1.4 Стенка воронки

Площадь:

$$A_h = L_h \cdot t_h = 84,973 \cdot 1,2 = 101,968 \text{ см}^2;$$

Моменты инерции:

$$I_{xoh} = \frac{L_h \cdot t_h}{12} \cdot [L_h^2 \cdot \cos^2 \beta + t_h^2 \cdot \sin^2 \beta] = \frac{84,973 \cdot 1,2}{12} \cdot [84,973^2 \cdot \cos^2 30^\circ + 1,2^2 \cdot \sin^2 30^\circ] =$$

$$= 4,602 \cdot 10^4 \text{ см}^4;$$

$$I_{yoh} = \frac{L_h \cdot t_h}{12} \cdot [L_h^2 \cdot \sin^2 \alpha_1 + t_h^2 \cdot \cos^2 \alpha_1] = \frac{84,973 \cdot 1,2}{12} \cdot [84,973^2 \cdot \sin^2 30^\circ + 1,2^2 \cdot \cos^2 30^\circ] =$$

$$= 1,535 \cdot 10^4 \text{ см}^4.$$

3.2 Определение положения центра тяжести сечения кольцевой балки

За начало вспомогательной системы координат принимаем точку пересечения внутренней грани стенки цилиндра и наружной грани стенки воронки.

3.2.1 Определяем координаты центра тяжести элементов кольцевой балки относительно центра сочленения (реперная точка) п.8.1.3(3) СН РК EN 1993-4-1:

– стенка кольцевой балки

$$A = 76 \cdot 1,2 = 91,2 \text{ см}^2$$

$$x = 0 \text{ см}$$

$$y = -\left(\frac{76}{2} - 18\right) = -20 \text{ см}$$

– стенка воронки

$$A = 84,973 \cdot 1,2 = 101,968 \text{ см}^2$$

$$x = -(42,4865 \cdot \cos 60^\circ) = -21,243 \text{ см}$$

$$y = -(42,4865 \cdot \sin 60^\circ) = -36,794 \text{ см}$$

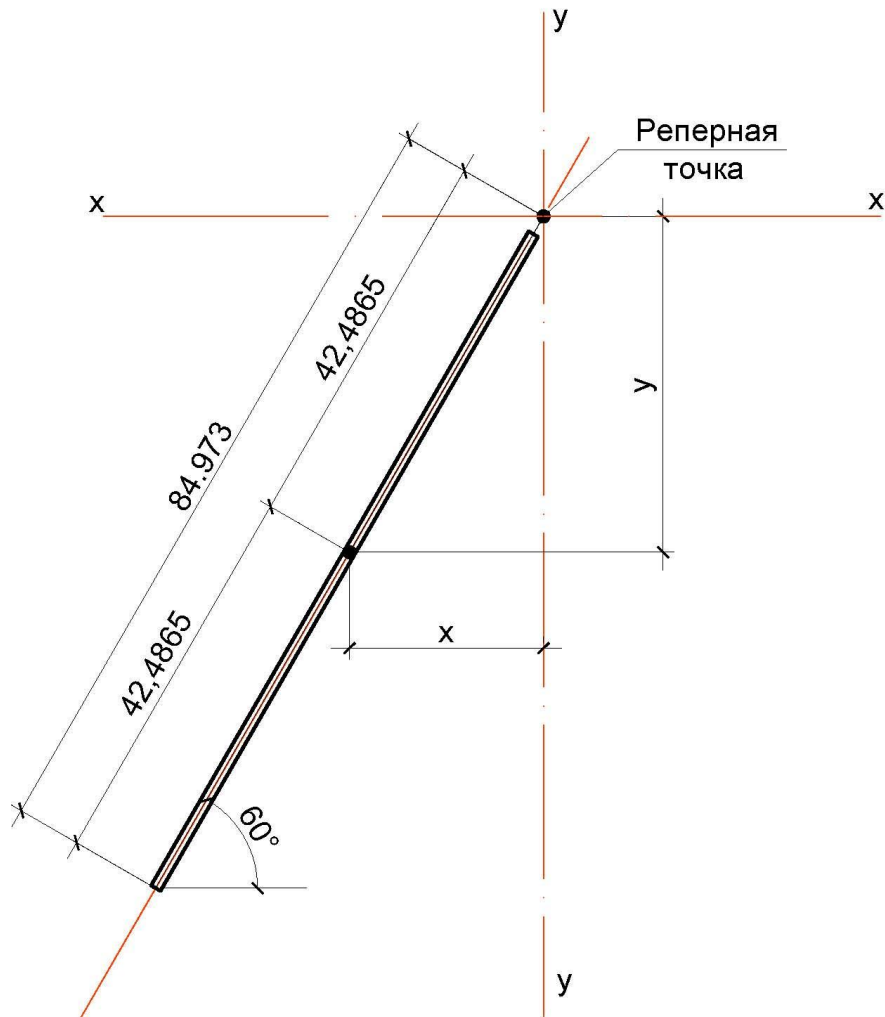


Рисунок 3 - Координаты стенки воронки, включенной в расчет, относительно реперной точки (размеры даны в сантиметрах)

– верхнее ребро кольцевой балки

$$A = 30,6 \cdot 2 = 61,2 \text{ см}^2$$

$$x = \frac{30,6}{2} = 15,3 \text{ см}$$

$$y = 0$$

– нижнее ребро кольцевой балки

$$A = 64,086 \cdot 2 = 128,172 \text{ см}^2$$

$$x = -\left(\frac{64,086}{2} - 30,6\right) = -1,443 \text{ см}$$

$$y = -58 \text{ см}$$

3.2.2 Определяем координаты центра тяжести сечения кольцевой балки относительно центра сочленения (реперная точка):

$$x_k = \frac{91,2 \cdot 0 + 101,968 \cdot (-21,243) + 61,2 \cdot 15,3 + 128,172 \cdot (-1,443)}{91,2 + 101,968 + 61,2 + 128,172} = \frac{-1414,698}{382,54} =$$

$$= -3,698 \text{ см};$$

$$y_k = \frac{91,2 \cdot (-20) + 101,968 \cdot (-36,794) + 61,2 \cdot 0 + 128,172 \cdot (-58)}{91,2 + 101,968 + 61,2 + 128,172} = \frac{-13009,786}{382,54} =$$

$$= -34,009 \text{ см.}$$

3.2.3 Радиус центра тяжести кольцевой балки:

$$r_g = r - |x| = 225,6 - |3,698| = 221,902 \text{ см.}$$

3.2.4 Радиальный эксцентриситет цилиндра относительно центра тяжести кольцевой балки (положительный, если центр тяжести имеет больший радиус):

$$e_r = x_k = -3,698 \text{ см}$$

3.2.5 Вертикальный эксцентриситет центра переходного соединения относительно центра тяжести кольцевой балки (положительный, если центр тяжести находится ниже центра переходного соединения):

$$e_x = y_k = 34,009 \text{ см.}$$

3.2.6 Радиальный эксцентриситет опоры относительно центра тяжести кольцевой балки (положительный, если центр тяжести имеет больший радиус):

$$e_s = x = -3,098 \text{ см.}$$

3.2.7 Определяем расстояние от центра тяжести кольца до центра тяжести составных элементов.

По горизонтали:

– стенка кольцевой балки

$$x = 3,698 \text{ см}$$

$$y = 14,009 \text{ см}$$

– стенка воронки

$$x = -17,545 \text{ см}$$

$$y = -2,785 \text{ см}$$

– верхнее ребро кольцевой балки

$$x = 18,998 \text{ см}$$

$$y = 34,009 \text{ см}$$

– нижнее ребро кольцевой балки

$$x = 2,255 \text{ см}$$

$$y = -23,991 \text{ см}$$

3.2.8 Проверка:

$$S_{xc} = 91,2 \cdot 14,009 + 101,968 \cdot (-2,785) + 61,2 \cdot 34,009 + 128,172 \cdot (-23,991) = 0,016 \text{ см}^3$$

$$S_{yc} = 91,2 \cdot 3,698 + 101,968 \cdot (-17,545) + 61,2 \cdot 18,998 + 128,172 \cdot 2,255 = -0,066 \text{ см}^3$$

Проверка выполняется, положение центра тяжести определено правильно.

3.3 Определение геометрических характеристик всего сечения кольцевой балки

3.3.1 Определяем моменты инерции относительно осей X и Y:

$$I_x = (4,39 \cdot 10^4 + 91,2 \cdot 14,009^2) + (4,602 \cdot 10^4 + 101,968 \cdot 2,785^2) + \left( \frac{20,4 + 61,2}{2} \times 34,009^2 \right) + (42,724 + 128,172 \cdot 23,991^2) = 253228 \text{ см}^4$$

$$I_y = (10,944 + 91,2 \cdot 3,698^2) + (1,535 \cdot 10^4 + 101,968 \cdot 17,545^2) + (4,78 \cdot 10^3 + 61,2 \cdot 18,998^2) + (4,387 \cdot 10^4 + 128,172 \cdot 2,255^2) = 119387 \text{ см}^4$$

3.3.2 Полярный момент инерции:

$$I_p = I_x + I_y = 2,532 \cdot 10^5 + 1,194 \cdot 10^5 = 3,726 \cdot 10^5 \text{ см}^4.$$

3.3.3 Моменты сопротивления:

$$W_x = \frac{I_x}{y} = \frac{2,532 \cdot 10^5}{52,009} = 4,868 \cdot 10^3 \text{ см}^2;$$

$$W_y = \frac{I_y}{x} = \frac{1,194 \cdot 10^5}{39,308} = 3,038 \cdot 10^3 \text{ см}^2,$$



где  $x, y$  – расстояния от центра тяжести до наиболее удаленных точек сечения.

Расстояние от центра кольца до наиболее удаленных волокон сечения вычисляем с учетом Рисунка 2:

– по оси X:

$$x_1 = 30,6 + 3,698 = 34,298 \text{ см}$$

$$x_2 = 84,973 \cdot \cos 60^\circ + 0,6 \cdot \cos 30^\circ - 3,698 = 39,308 \text{ см}$$

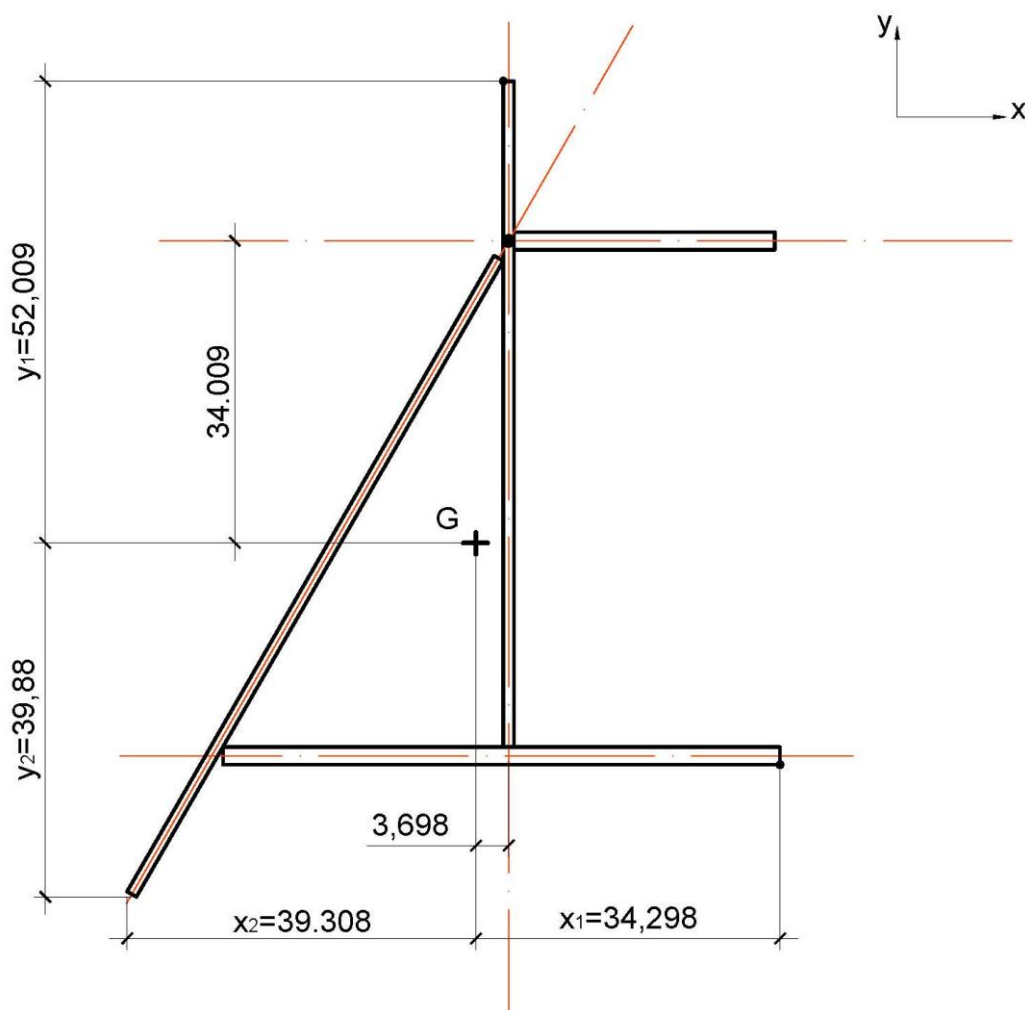
принимаем  $x = 39,308 \text{ см}$

– по оси Y:

$$y_1 = 34,009 + 18 = 52,009 \text{ см}$$

$$y_2 = 84,973 \cdot \sin 60^\circ + 0,6 \cdot \sin 30^\circ - 34,009 = 39,880 \text{ см}$$

Принимаем  $y = 52,009 \text{ см}$



**Рисунок 4 - Расстояние до наиболее удаленных точек сечения от центра тяжести кольца (размеры даны в сантиметрах)**

3.4 Определение эквивалентных геометрических характеристик элементов балки по Пунктам 8.2.2 (1) ÷ (7) СН РК EN 1993-4-1 для расчета напряжений от сжатия:

$$t_{eqA} = t_c = 1,2 \text{ см.}$$

Толщина стенки на участке между ребрами:

$$t_s = t_c = 1,2 \text{ см,}$$

$$t_{eqB} = \sqrt{t_s^2 + t_h^2} = \sqrt{1,2^2 + 1,2^2} = 1,697 \text{ см.}$$

Определяем более тонкую эквивалентную толщину:

$$t_{eqthinner} = \min(t_{eqA}, t_{eqB}) = 1,2 \text{ см.}$$

Определяем более толстую эквивалентную толщину:

$$t_{eqthicker} = \max(t_{eqA}, t_{eqB}) = 1,697 \text{ см,}$$

$$\alpha = \frac{t_{eqthinner}}{t_{eqthicker}} = 0,707$$

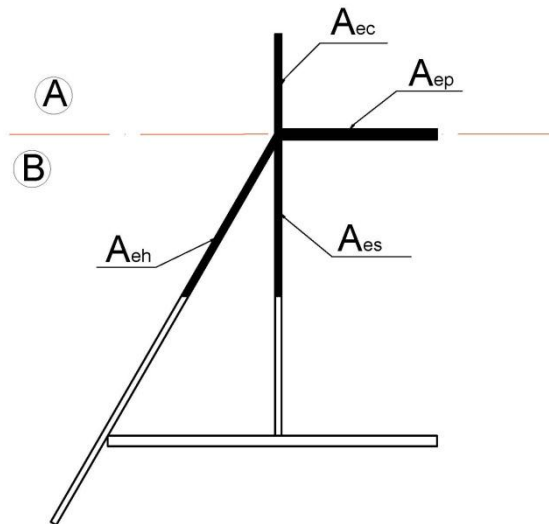


Рисунок 5 - Условные обозначения в сегментах сечения

В группе А эффективная длина сегмента

$$l_{e1} = 0,778 \sqrt{\frac{r \cdot t}{\cos \beta}} = 0,778 \sqrt{\frac{225,6 \cdot 1,2}{\cos 30}} = 13,76 \text{ см.}$$

Полезная площадь верхней части балки стенки кольцевой балки

$$A_{ec} = l_{ec} \cdot t_c = 13,76 \cdot 1,2 = 16,51 \text{ см}^2.$$

где:  $l_{ec} = l_{e1}$

В группе В эффективная длина

$$l_{e2} = 0,389 \cdot [1 + 3\alpha^2 - 2\alpha^3] \cdot \sqrt{\frac{r \cdot t}{\cos \beta}} = 0,389 \cdot [1 + 3 \cdot 0,707^2 - 2 \cdot 0,707^3] \cdot \sqrt{\frac{225,6 \cdot 1,2}{\cos 30}} = 12,33$$

Полезная площадь нижней части стенки кольцевой балки

$$A_{es} = 12,33 \cdot 1,2 = 14,796 \text{ см}^2$$

где:  $l_{es} = l_{e2} = 12,33$ .

Полезная площадь стенки воронки:

$$A_{eh} = 12,33 \cdot 1,2 = 14,796 \text{ см}^2$$

где:  $l_{eh} = 12,33 \text{ см}^2$

Полезная площадь поперечного сечения верхнего кольцевого ребра:

$$A_{ep} = \frac{b_{p1} \cdot t_{p1}}{1 + 0,8 \cdot \frac{b_{p1}}{r}} = \frac{30,6 \cdot 2}{1 + 0,8 \cdot \frac{30,6}{225,6}} = 55,209 \text{ см}^2.$$

Определяем общую полезную площадь:

$$A_{et} = A_{ec} + A_{es} + A_{eh} + A_{ep} = 16,51 + 14,796 + 14,796 + 55,209 = 101,309 \text{ см}^2.$$

#### 4 Определение усилий в балке

4.1 Исходные данные по результатам статического расчета принимаем как для бункера по Примеру 1.

Локальная меридиональная сила на единицу длины окружности  $n_{\phi h, Ed}$  с учетом неравномерности нагрузки (см. Пункт 4.1а Примера 3):

$$n_{\phi h, Ed} = 2,444 \frac{\text{кН}}{\text{см}}.$$

Локальное давление на эффективной длине сегмента цилиндра (см. Пункт 4.3б Примера 3):

$$p_{nc} = 4,594 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Локальное давление на эффективной длине сегмента воронки (см. Пункт 4.3б Примера 3):

$$p_{nh} = 11,28 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Коэффициент трения о стенку воронки:

$$\mu = 0,43.$$

Расчетное значение результирующей сжимающих мембранных напряжений в основании цилиндра (Таблица 5 Примера 1):

$$n_{xc, Ed} = 0,975 \frac{\text{кН}}{\text{см}}.$$

Предел текучести  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

Частный коэффициент для несущей способности по пластическому предельному состоянию:  $\gamma_{Mo} = 1,00$  (Таблица 2.2).

Расчетное сопротивление по пластическому предельному состоянию (Пункт 8.3.2 (2) СН РК EN 1993-4-1):

$$f_{p, Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{23,5}{1,00} = 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Модуль упругости стали  $E = 2,10 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$ .

#### 4.2 Определение усилия сжатия в балке

Усилие сжатия в балке по п. 8.2.3 (3) СН РК EN 1993-4-1:2007/2011:

$$\begin{aligned} N_{\theta, Ed} &= n_{\phi h, Ed} \cdot r \cdot \sin \beta - p_{nc} \cdot r \cdot l_{ec} - p_{nh} \cdot (\cos \beta - \mu \sin \beta) \cdot r_c \cdot l_{eh} = \\ &= 2,444 \cdot 225,6 \cdot \sin 30 - 4,594 \cdot 10^{-3} \cdot 225,6 \cdot 13,76 - 11,28 \cdot 10^{-3} \times \\ &\times (\cos 30 - 0,43 \cdot \sin 30) \cdot 225 \cdot 12,33 = 241,05 \text{ кН}. \end{aligned}$$

4.3 Определение изгибающего момента в кольце относительно радиальной горизонтальной оси (Пункт 8.2.3 (4) СН РК EN 1993-4-1):

$$\theta_0 = \frac{\pi}{j} = \frac{3,14159}{4} = 0,785 \text{ радиан}.$$

Распределение изгибающего момента по кольцу:

$$\begin{aligned} M_{r, Ed} &= n_{v, Ed} \cdot (r_g - e_r) \cdot [(r_g - e_s) \cdot \theta_0 \cdot (\sin \theta + \text{ctg } \theta_0 \cos \theta) - r_g + e_r] + \\ &+ n_{r, Ed} \cdot e_x \cdot (r_g - e_r); \end{aligned} \quad (8.19a)$$

$$h_{v, Ed} = n_{xc, Ed} + n_{\phi h, Ed} \cdot \cos \beta; \quad (8.21a)$$

$$h_{r, Ed} = n_{\phi h, Ed} \cdot \sin \beta \quad (8.21б)$$

имеем

$$h_{v, Ed} = 0,975 + 2,444 \cdot \cos 30^\circ = 2,064 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

$$h_{r, Ed} = 2,444 \cdot \sin 30^\circ = 1,222 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

Угол, при котором возникает наибольший изгибающий момент, полученный из анализа зависимости  $M_{r,Ed}$  от  $\theta$ :  $\theta = 0,79$  радиан. Для этого угла

$$M_{r,Ed}(\theta = 0,79) = 2,064 \cdot (221,902 - (-3,698)) \cdot [(221,902 - (-3,098)) \cdot 0,785 \times \\ \times (\sin(0,79) + \operatorname{ctg}(0,785) \cdot \cos(0,79)) - 221,902 + (-3,698)] + 1,222 \cdot 34,009 \times \\ \times (221,902 - (-3,698)) = 20682 \text{ кНсм}$$

#### 4.4 Определение крутящего момента (Пункт 8.2.3 (4) СН РК EN 1993-4-1)

Распределение крутящего момента по кольцу:

$$T_{\theta,Ed} = n_{v,Ed}(r_g - e_r)[(r_g - e_s)\theta_0(\operatorname{ctg} \theta_0 \sin \theta - \cos \theta) + r_g(\theta_0 - \theta)] \quad (8.19 \text{ б})$$

$$n_{v,Ed} = n_{xc,Ed} + n_{\phi h,Ed} \cdot \cos \beta \quad (8.21a)$$

Имеем  $n_{v,Ed} = 0,975 + 2,444 \cdot \cos 30^\circ = 2,064 \text{ кН/см}$

Угол, при котором возникает наибольший крутящий момент, полученный из анализа зависимости  $T_{\theta,Ed}$  от  $\theta$ :  $\theta = 1,3$  радиан. Для этого угла

$$T_{\theta,Ed}(\theta = 1,3) = 2,064 \cdot (221,902 - (-3,698)) \cdot [(221,902 - (-3,098)) \times \\ \times 0,785 \cdot (\operatorname{ctg}(0,785) \cdot \sin(1,3) - \cos(1,3)) + 221,902 \cdot (0,785 - 1,3)] = 4096 \text{ кНсм}$$

4.5 Определение максимального значения расчетного изгибающего момента относительно радиальной оси над опорой кольца (Пункт 8.2.3 (5) СН РК EN 1993-4-1):

$$M_{rs,Ed} = n_{v,Ed}(r_g - e_r)[(r_g - e_s)\theta_0 \operatorname{ctg} \theta_0 - r_g + e_r] + n_{r,Ed}e_x(r_g - e_r); \quad (8.22)$$

имеем  $n_{v,Ed} = 2,064 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$

$$n_{r,Ed} = 1,222 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

$$M_{rs,Ed} = 2,064 \cdot (221,902 - (-3,698)) \cdot [(221,902 - (-3,098)) \cdot 0,785 \cdot \operatorname{ctg}(0,785) - 221,902 + \\ + (-3,698)] + 1,222 \cdot 34,009 \cdot (221,902 - (-3,698)) = -13363 \text{ кН} \cdot \text{см}$$

4.6 Определение максимального значения расчетного изгибающего момента относительно радиальной оси в середине пролета Формула (8.23) СН РК EN 1993-4-1:

$$M_{rm,Ed} = n_{v,Ed}(r_g - e_r) \left[ \frac{(r_g - e_s)\theta_0}{\sin \theta_0} - r_g + e_r \right] + n_{r,Ed}e_x(r_g - e_r); \quad (8.23)$$

имеем  $n_{v,Ed} = 2,064 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$

$$n_{r,Ed} = 1,222 \frac{\text{кН}}{\text{см}};$$

$$M_{rm,Ed} = 2,064 \cdot (221,902 - (-3,698)) \cdot [(221,902 - (-3,098)) \cdot 0,785 / \sin(0,785) - 221,902 + \\ + (-3,698)] + 1,222 \cdot 34,009 \cdot (221,902 - (-3,698)) = 20684 \text{ кН} \cdot \text{см}$$

Полученное значение соответствует значению момента, определенного по Пункту 4.3 данного примера.

#### 5 Проверки несущей способности

5.1 Определяем наибольшее из двух пиковых меридиональных напряжений (Пункт 8.2.3 (9) СН РК EN 1993-4-1):

– на опоре:

$$\sigma_{c\theta,Ed1} = \frac{N_{\theta,Ed}}{A_{Et}} + \frac{M_{rs,Ed}}{W_x} = \frac{241,05}{101,309} + \frac{13,363 \cdot 10^3}{4,868 \cdot 10^3} = 5,124 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

– в пролете:

$$\sigma_{c\theta,Ed2} = \frac{N_{\theta,Ed}}{A_{Et}} + \frac{M_{rm,Ed}}{W_x} = \frac{241,05}{101,309} + \frac{20,684 \cdot 10^3}{4,868 \cdot 10^3} = 6,628 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

#### 5.2 Определение напряжений от кручения балки.

Кручение воспринимает преимущественно замкнутое сечение балки. Для оценки напряжений от кручения балки определяются геометрические характеристики замкнутого сечения, которое приведено на Рисунке 5.

По результатам расчета получены геометрические характеристики:

$$I_x = \left( \frac{1,2 \cdot 58^3}{12} + 1,2 \cdot 58 \cdot 5,009^2 \right) + \left( \frac{33,486 \cdot 2^3}{12} + 33,486 \cdot 2 \cdot 23,991^2 \right) +$$

$$+ \left[ \frac{66,973 \cdot 1,2}{12} \cdot (66,973^2 \cdot \cos^2 30^\circ + 1,2^2 \cdot \sin^2 30^\circ) + 66,973 \cdot 1,2 \cdot 5,009^2 \right] = 84382 \text{ см}^4;$$

$$I_y = \left( \frac{58 + 1,2^3}{12} + 58 \cdot 1,2 \cdot 3,698^2 \right) + \left( \frac{2 \cdot 33,486^3}{12} + 33,486 \cdot 2 \cdot 13,049^2 \right) +$$

$$+ \left[ \frac{66,973 \cdot 1,2}{12} \cdot (66,973^2 \cdot \sin^2 30^\circ + 1,2^2 \cdot \cos^2 30^\circ) + 66,973 \cdot 1,2 \cdot 13,045^2 \right] =$$

$$= 39815 \text{ см}^4;$$

$$I_p = 84382 + 39815 = 124197 \text{ см}^4;$$

$$W_p = 124197 / 38,248 = 3247 = \text{см}^3.$$

Напряжения от кручения составляют:

$$\tau_{T\theta,Ed} = \frac{T_{\theta,Ed}}{W_p} = \frac{4096}{3247} = 1,261 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

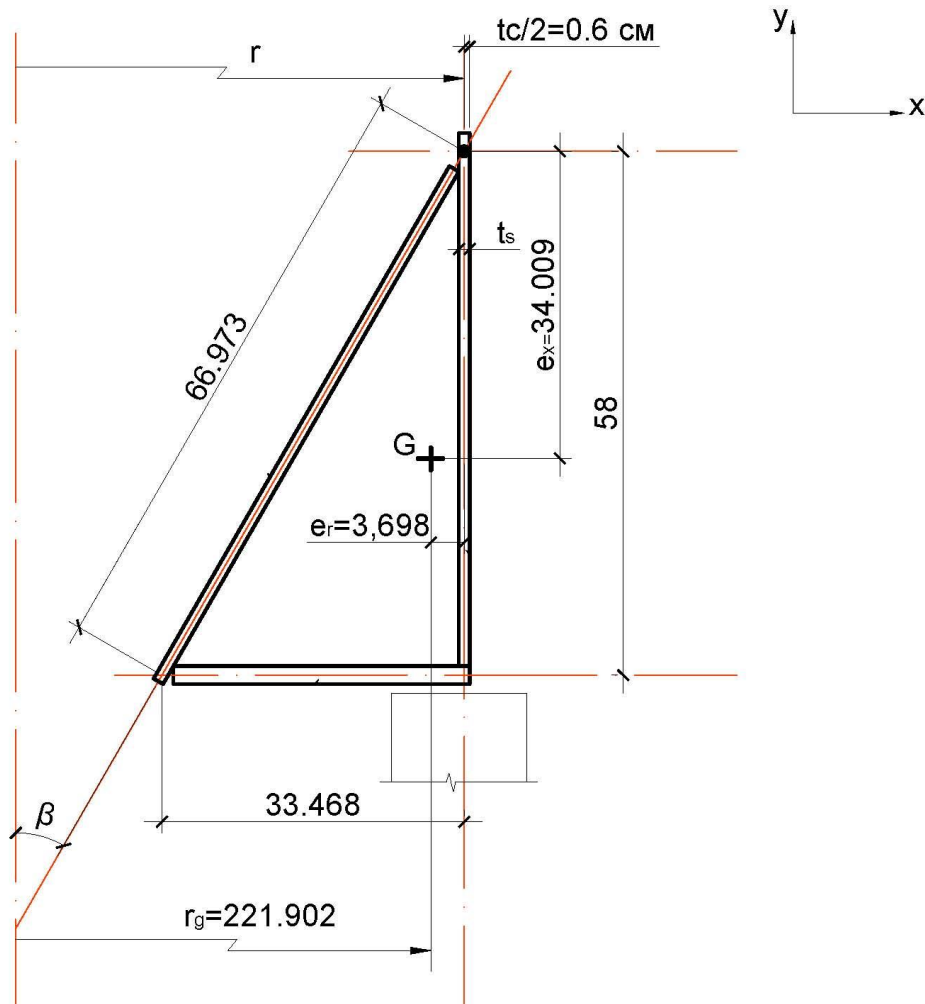


Рисунок 6 – Сечение кольцевой балки для проверки напряжений от кручения (размеры даны в сантиметрах)

5.3 Определяем несущую способность на основании учета пластичности (Пункт 8.3.2.3 СН

РК EN 1993-4-1). Для этого находим:

$$\alpha = \sqrt{\frac{t_c^2}{t_s^2 + t_h^2}} = \sqrt{\frac{1,2^2}{1,2^2 + 1,2^2}} = 0,707,$$

$$\psi = 0,7 + 0,6 \cdot \alpha^2 - 0,3 \cdot \alpha^3 = 0,7 + 0,6 \cdot 0,707^2 - 0,3 \cdot 0,707^3 = 0,894.$$

– для цилиндра:

$$l_{oc} = 0,975 \cdot \sqrt{r \cdot t_c} = 0,975 \cdot \sqrt{225,6 \cdot 1,2} = 16,04 \text{ см};$$

– для юбки:

$$l_{os} = 0,975 \cdot \psi \cdot \sqrt{r \cdot t_s} = 0,975 \cdot 0,894 \cdot \sqrt{225,6 \cdot 1,2} = 14,34 \text{ см};$$

– для сегмента воронки:

$$l_{oh} = 0,975 \psi \sqrt{\frac{r \cdot t_h}{\cos \beta}} = 0,975 \cdot 0,894 \sqrt{\frac{225,6 \cdot 1,2}{\cos 30}} = 15,41 \text{ см}.$$

Таким образом, несущая способность на основании учета пластичности на единицу окружности в верхней части воронки составляет, Формула (8.27) СН РК EN 1993-4-1:

$$n_{\phi h, Rd} = \frac{1}{\sin \beta} \left\{ \left( \frac{A_{ep1} + l_{oc} t_c + l_{os} t_s + l_{oh} t_h}{r} \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} + p_{nc} l_{oc} + p_{nh} (\cos \beta - \mu \sin \beta) l_{oh} \right\} =$$

$$= \frac{1}{\sin 30} \times \left\{ \left( \frac{55,209 + 16,04 \cdot 1,2 + 14,34 \cdot 1,2 + 15,41 \cdot 1,2}{225,6} \right) \cdot \frac{23,5}{1} + 4,594 \cdot 10^{-3} \times 16,04 + \right. \\ \left. + 11,28 \cdot 10^{-3} \cdot (\cos 30 - 0,43 \cdot \sin 30) \cdot 15,41 \right\} =$$

$$= 23,32 \text{ кН/см}.$$

5.4 Расчетная несущая способность по устойчивости в плоскости Формула (8.30) СН РК EN 1993-4-1:

Согласно п. 3.4 имеем  $A_{et} = 97,646 \text{ см}^2$ ;

принимаям  $b_{p1} = \frac{A_{ep1}}{t_{p1}} = \frac{55,209}{2} = 27,6045 \text{ см}.$

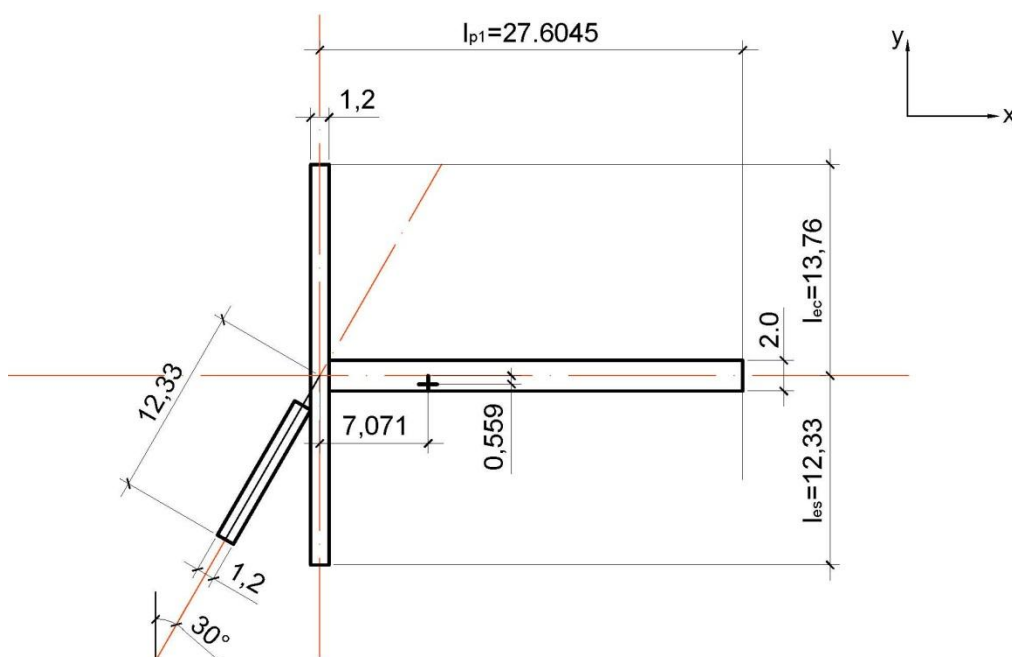


Рисунок 7 - Определение центра тяжести сечения при расчете несущей способности по устойчивости в плоскости (размеры в сантиметрах)

$$x = \frac{55,209 \cdot \frac{27,6045}{2} - 14,796 \cdot \frac{12,33}{2} \cdot \sin 30^\circ}{101,309} = 7,071;$$

$$y = \frac{16,51 \cdot \frac{13,76}{2} - 14,796 \cdot \frac{12,33}{2} - 14,796 \cdot \frac{12,33}{2} \cdot \cos 30^\circ}{101,309} = -0,559 \text{ см};$$

$$I_y = \left[ \frac{(12,33 + 13,76) \cdot 1,2^3}{12} + (16,51 + 14,796) \cdot 7,071^2 \right] +$$

$$+ \left[ \frac{2 \cdot 27,6045^3}{12} + 55,209 \cdot 6,731^2 \right] + \left[ \frac{12,33 \cdot 1,2}{12} \cdot (12,33^2 \cdot \sin^2 30^\circ + 1,2^2 \cdot \cos^2 30^\circ) + \right.$$

$$\left. + 14,496 \cdot (3,0825 + 7,071)^2 \right] = 1568,453 + 6007,129 + 1542,639 = 9118,221 \text{ см}^4;$$

$$\sigma_{ip,Rd} = \frac{4EI_y}{A_{et} \cdot r_g^2} \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}} = \frac{4 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 9118,221}{101,309 \cdot 221,902^2} \cdot \frac{1}{1,1} = 139,581 \frac{\text{кН}}{\text{см}^3}$$

Согласно п.8.3.3 (4) проверка устойчивости к потере устойчивости в одной плоскости может быть опущена, т.к. неполный угол конуса  $\beta > \beta_{lim}$ ,  $\beta = 30^\circ$ ;  $\beta_{lim} = 20^\circ$  (см НП 2.38)

5.5 Расчетная несущая способность  $\sigma_{o,Rd}$  по устойчивости стенок, смежных с переходным соединением, Формула (8.31) СН РК EN 1993-4-1:

– для стенки цилиндра:

$$\sigma_{op,Rdc} = \frac{1}{\gamma_{M1}} \cdot 4,1(\cos \beta)^{0,4} \cdot \left( \frac{t_c}{r} \right)^{1,5} \cdot \left( \frac{Et_c r_g}{A_{et}} \right) =$$

$$= \frac{1}{1,1} \cdot 4,1(\cos 30^\circ)^{0,4} \cdot \left( \frac{1,2}{225,6} \right)^{1,5} \cdot \left( \frac{2,10 \cdot 10^4 \cdot 1,2 \cdot 221,902}{101,309} \right) = 75,35 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

– для стенки воронки:

$$r_h = \frac{r_c}{\cos \beta} = \frac{225,0}{\cos 30^\circ} = 259,81 \text{ см},$$

$$\sigma_{op,Rdh} = \frac{1}{\gamma_{M1}} \cdot 4,1(\cos \beta)^{0,4} \cdot \left( \frac{t_h}{r_h} \right)^{1,5} \cdot \left( \frac{Et_h r_g}{A_{et}} \right) =$$

$$= \frac{1}{1,1} \cdot 4,1(\cos 30^\circ)^{0,4} \cdot \left( \frac{1,2}{259,81} \right)^{1,5} \cdot \left( \frac{2,10 \cdot 10^4 \cdot 1,2 \cdot 221,902}{101,309} \right) = 60,968 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

5.6 Определение несущей способности по устойчивости при боковом выпучивании (Пункт 8.3.4.3 СН РК EN 1993-4-1):

$$\sigma_{op,Rd} = k \cdot E \cdot \frac{t_p}{b} \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}} \quad (8.32)$$

Для этого находим по Формулам (8.33)–(8.37) СН РК EN 1993-4-1:

$$\eta_c = 0,5 \left\{ \left( \frac{t_c}{t_{p1}} \right)^{5/2} + \left( \frac{t_s}{t_{p1}} \right)^{5/2} + \left( \frac{t_h}{t_{p1}} \right)^{5/2} \right\} = 0,5 \left\{ \left( \frac{1,2}{2,0} \right)^{5/2} + \left( \frac{1,2}{2,0} \right)^{5/2} + \left( \frac{1,2}{2,0} \right)^{5/2} \right\} = 0,418,$$

$$\eta_s = 0,43 + 0,1 \left( \frac{r_c}{20b_{p1}} \right)^2 = 0,43 + 0,1 \left( \frac{225,0}{20 \cdot 27,6045} \right)^2 = 0,447;$$

$$k_c = 1,154 + 0,56 \frac{b_{p1}}{r_c} = 1,154 + 0,56 \cdot \frac{27,6045}{225} = 1,223;$$

$$k_s = 0,385 + 0,452 \sqrt{\frac{b_{p1}}{r_c}} = 0,385 + 0,452 \sqrt{\frac{27,6045}{225}} = 0,543;$$

$$k = \frac{\eta_c k_c + \eta_s k_s}{\eta_c + \eta_s} = \frac{0,418 \cdot 1,223 + 0,447 \cdot 0,543}{0,418 + 0,447} = 0,872.$$

Расчетная несущая способность по устойчивости составит, Формула (8.32) СН РК EN 1993-4-1:

$$\sigma_{op,Rdr} = kE \left( \frac{t_{p1}}{b_{p1}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}} = 0,872 \cdot 2,10 \cdot 10^4 \cdot \left( \frac{2,0}{27,6045} \right)^2 \cdot \frac{1}{1,10} = 87,386 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

5.7 Проверки несущей способности по предельным состояниям (Пункт 8.4.2 СН РК EN 1993-4-1):

а) Проверка по пластическому предельному состоянию при расчете в упругой стадии, Формула (8.50) СН РК EN 1993-4-1:

$$\sigma_{c\theta,Ed} = \max(\sigma_{c\theta,Ed1}, \sigma_{c\theta,Ed2}) = 6,628 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

$$\sigma_{c\theta,Ed} = 6,628 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \leq f_{p,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{23,5}{1,00} = 23,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} - \text{условие выполняется.}$$

где  $f_{p,Rd}$  – расчетное значение сопротивления по пластическому предельному состоянию (Пункт 8.3.2.2(2) СН РК EN 1993-4-1);

$\gamma_{M0}$  – частный коэффициент для несущей способности по пластическому предельному состоянию,  $\gamma_{M0} = 1,00$  (Таблица 2.2);

$f_y$  – предел текучести,  $f_y = 23,5 \text{ кН/см}^2$ .

б) Проверка несущей способности стенки воронки по пластическому предельному состоянию при расчете в пластической стадии, Формула (8.46) СН РК EN 1993-4-1:

$$n_{\phi h,Ed} = 2,444 \frac{\text{кН}}{\text{см}} \leq n_{\phi h,Rd} = 23,32 \frac{\text{кН}}{\text{см}} - \text{условие выполняется.}$$

где  $n_{\phi h,Ed}$  – равнодействующая меридиональных нормальных напряжений в воронке (см. Пункт 4.1а Примера 3).

в) Проверка несущей способности по касательным напряжениям при кручении (на основании Пункта 8.2.3 (7) СН РК EN 1993-4-1):

$$\tau_{T\theta,Ed} = 1,261 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{23,5}{1,00 \cdot \sqrt{3}} = 13,6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} - \text{условие выполняется.}$$

г) Проверка по предельному состоянию потери устойчивости в плоскости, Формула (8).51 СН РК EN 1993-4-1:

$$\sigma_{c\theta,Ed} = \sigma_{c\theta,Ed2} = 6,628 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \leq \sigma_{ip,Rd} = 139,581 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} - \text{условие выполняется.}$$

д) Проверка предельного состояния по потере устойчивости из плоскости, Формула (8.53) СН РК EN 1993-4-1. Минимальная несущая способность по Пунктам 5.4 и 5.5 данного примера:

$$\sigma_{op,Rd} = \min(\sigma_{op,Rdc}, \sigma_{op,Rdh}, \sigma_{op,Rdr}) = 60,968 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

Проверка устойчивости:

$$\sigma_{c\theta,Ed} = 6,628 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \leq \sigma_{op,Rd} = 60,968 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} - \text{условие выполняется..}$$

Все условия выполняется, несущая способность кольцевой балки обеспечена.



## 9 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ БУНКЕРОВ С ПЛОСКИМИ БОКОВЫМИ СТЕНКАМИ

### 9.1 Основные положения

9.1.1 Прямоугольный бункер следует рассчитывать как короб с ребрами жесткости, в котором основные несущие элементы работают на изгиб, или как тонкостенную конструкцию, в которой основными являются мембранные напряжения, возникающие после значительных деформаций.

9.1.2 Если короб рассчитывается на действие изгибающих моментов, узлы и соединения должны быть запроектированы таким образом, чтобы характеристики соединений, принятые в расчете, были достигнуты в реальном сооружении.

### 9.2 Классификация конструктивных форм

#### 9.2.1 Неподкрепленные бункеры

9.2.1.1 Конструкция, изготовленная из плоских стальных листов, без прикрепленных к ним ребер жесткости, называется неподкрепленным коробом (короб без усиления).

9.2.1.2 Конструкция, усиленная только вдоль соединений между листами, которые лежат в разных плоскостях, также называется неподкрепленным коробом (короб без усиления).

#### 9.2.2 Бункеры с ребрами жесткости

Конструкция, образованная плоскими листами, к которым прикреплены ребра жесткости в пределах площади листа, называется коробом с ребрами жесткости, или подкрепленным коробом. Ребра жесткости могут располагаться в окружном направлении (горизонтальные ребра), вертикальном направлении или в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

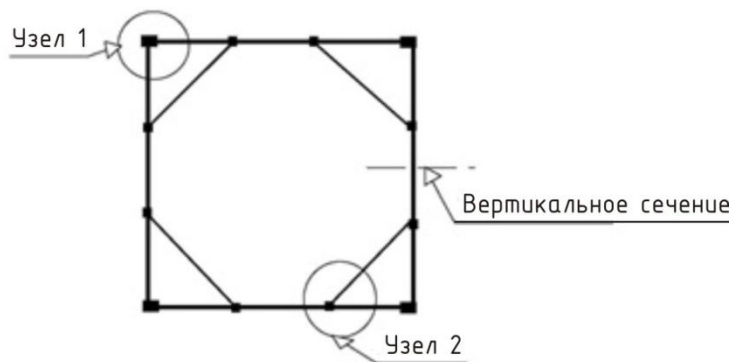


Рисунок 9.1 – Разрез прямоугольного короба с затяжками

### 9.2.3 Бункеры с затяжками

Бункеры с затяжками могут быть квадратными или прямоугольными. Типовые конструктивные элементы 3-х-панельного квадратного (односекционного) бункера показаны на Рисунках 9.1, 9.2.

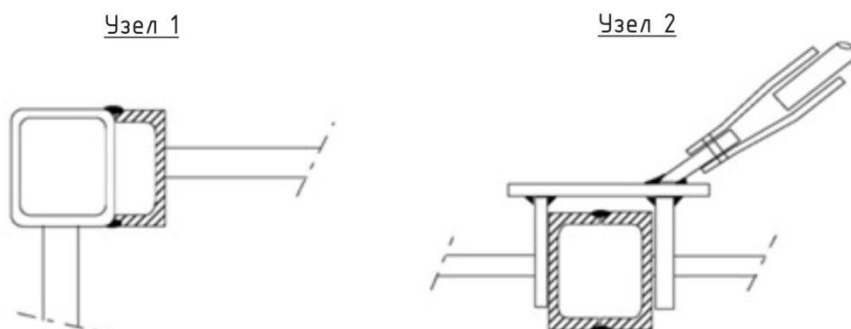


Рисунок 9.2 – Типовые детали соединений затяжек

### 9.3 Несущая способность неподкрепленных вертикальных стенок

Несущую способность неподкрепленных вертикальных стенок следует определять в соответствии с Подразделом 9.3 СН РК EN 1993-4-1.

### 9.4 Несущая способность стенок бункера из гофрированных листов с ребрами жесткости

Несущую способность стенок бункера из гофрированных листов, подкрепленных ребрами жесткости, следует определять в соответствии с Подразделом 9.4 СН РК EN 1993-4-1.

### 9.5 Бункеры с внутренними затяжками

Несущую способность бункеров с расположенными внутри затяжками следует определять в соответствии с Подразделом 9.5 СН РК EN 1993-4-1.

### 9.6 Несущая способность пирамидальных воронок

Несущую способность пирамидальных воронок следует определять в соответствии с Подразделом 9.6 СН РК EN 1993-4-1.

### 9.7 Вертикальные ребра жесткости на стенках короба

9.7.1 Вертикальные ребра жесткости на стенках короба должны быть запроектированы с учетом восприятия:

- постоянных нагрузок;

- нормальных давлений сыпучих материалов;
- силы трения материала на стенку;
- временных нагрузок от крыши;
- осевых сил, возникающих в результате работы боковых стенок как жестких диафрагм.

9.7.2 Эксцентриситет сил трения, приложенных к стенке, относительно центра тяжести сечения ребер жесткости допускается не учитывать.

## 9.8 Предельные состояния эксплуатационной пригодности

### 9.8.1 Основные положения

9.8.1.1 Предельные состояния эксплуатационной пригодности для стенок прямоугольного бункера принимаются следующими:

- деформации или перемещения, которые отрицательно влияют на эксплуатационную пригодность конструкции;
- деформации, перемещения, вибрации и колебания, которые вызывает повреждения в несущие и второстепенных элементах конструкции.

9.8.1.2 Деформации, отклонения и вибрации должны быть ограничены значениями, отвечающими указанным выше критериям.

9.8.1.3 Конкретные предельные значения, отвечающие специфической области применения, должны быть согласованы между проектной организацией, заказчиком и соответствующим надзорным органом с учетом области применения и природы хранящихся твердых материалов.

### 9.8.2 Отклонения

Значения предельных деформаций приведены в Пункте 9.8.2 СН РК EN 1993-4-1.

ПРИМЕР 5 Расчет прямоугольного бункера с плоскими стенками

1 Исходные данные

1.1 Параметры бункера

Марка стали конструкций бункера – S235 по EN 10025-2 с характеристиками (Таблица 3.1 СН РК EN 1993-1-1):

- предел текучести  $f_y = 235 \text{ Н/мм}^2$ ;
- временное сопротивление  $f_u = 360 \text{ Н/мм}^2$ .

Размеры короба в плане —  $B \times B = 5 \times 5 \text{ м}$ , высота —  $H_c = 2 \text{ м}$ . Половинный угол у вершины конуса пирамидальной воронки  $\beta = 40^\circ$ .

Площадь внутреннего поперечного сечения бункера  $A = 5 \times 5 = 25 \text{ м}^2$ .

Периметр поперечного сечения бункера  $U = 4 \times B = 4 \times 5 = 20 \text{ м}$ .

Коэффициент асимметрии заполнения  $e_f = 0,1 \times B = 0,1 \times 5 = 0,5 \text{ м}$ .

Коэффициент асимметрии выходного отверстия  $e_0 = 0 \times B = 0 \text{ м}$ .

Категория поверхности стены D2.

1.2 Характеристики бункера

- объем – 74,8 м<sup>3</sup>;
- емкость – 99 т;
- класс последствий – 1 по СН РК EN 1993-4-1, Пункт 2.2 (3);
- бункер – низкий бункер по СН РК EN 1991-4, п. 1.5.39;
- класс требований – 1 по СН РК EN 1991-4, п. 2.5.

## 2 Сбор нагрузок

### 2.1 Давление сыпучего материала

#### 2.2.1 Условия для расчета нагрузок:

а) Поскольку поток разгружаемого материала находится внутри – давление разгрузки на вертикальные стенки не учитываем.

б) Загрузка симметричная – эксцентриситет заполнения не учитываем.

в) Разгрузочное отверстие симметрично – эксцентриситет разгрузки не учитываем.

г) Оборудование, которое опирается на силос, не установлено.

д) Бункер находится в помещении – давление ветра не учитываем.

е) тип воронки – плоская, по СН РК EN 1991-4, Пункт 1.5.35.

#### 2.2.2 Расчет давлений

В данном примере определение давлений на вертикальную стенку и на воронку не рассматривается.

Определение нормальных и касательных давлений выполняется согласно СН РК EN 1991-4 для 5 случаев нагрузок:

- случай нагрузок 1 – максимальное нормальное давление на вертикальную стенку;
- случай нагрузок 2 – максимальные силы трения на вертикальной стенке;
- случай нагрузок 3 – максимальное вертикальное давление на воронку;
- случай нагрузок 4 – максимальное давление на стенку воронки в заполненном бункере;
- случай нагрузок 5 – максимальное давление на стенку воронки при разгрузке заполненного бункера.

Наибольшие давления создают режимы 1 и 3 для короба и воронки, соответственно. Результаты расчета давлений представлены в Таблицах 1 и 2. Поскольку бункер класса требований 1, частичная поверхностная нагрузка не учитывалась.

**Таблица 1 – Расчетные значения давлений на стенку бункера, кПа**

Давление	Расстояние от верхнего края бункера									
	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
Случай нагрузок 1										
$P_{hf}$	2,52	4,82	6,94	8,88	10,68	12,34	13,88	15,31	16,64	17,88
$P_{wf}$	1,04	2,00	2,87	3,68	4,42	5,10	5,74	6,33	6,88	7,40
Случай нагрузок 3										
$P_{hf}$	2,06	3,98	5,77	7,44	9,01	10,47	11,85	13,14	14,36	15,51
$P_{wf}$	0,85	1,65	2,39	3,08	3,73	4,33	4,90	5,44	5,94	6,42

Таблица 2 – Расчетная значения давлений на воронку бункера, кПа

Давление	Расстояние от верха воронки									
	0,00	0,20	0,60	0,80	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	2,20
Случай нагрузок 1										
$P_{nf}$	30,89	32,79	33,97	34,60	34,76	34,54	34,00	32,10	30,81	27,64
$P_{tf}$	10,94	11,62	12,04	12,26	12,32	12,24	12,05	11,37	10,92	9,79
Случай нагрузок 3										
$P_{nf}$	31,05	32,98	34,19	34,83	35,02	34,82	34,30	32,45	31,17	28,04
$P_{tf}$	11,00	11,69	12,11	12,34	12,41	12,34	12,15	11,50	11,04	9,94

### 3 Расчет конструкции призматического бункера

Необходимо запроектировать конструкцию призматического бункера с плоскими стенками из плоских листов. Требования по расчету призматических бункеров изложены в СН РК EN 1993-1-1, СН РК EN 1993-1-7, СН РК EN 1993-4-1.

#### 3.1 Геометрическая схема бункера и ее расчетные параметры

Геометрическая схема бункера изображена на Рисунках 1 и 2.

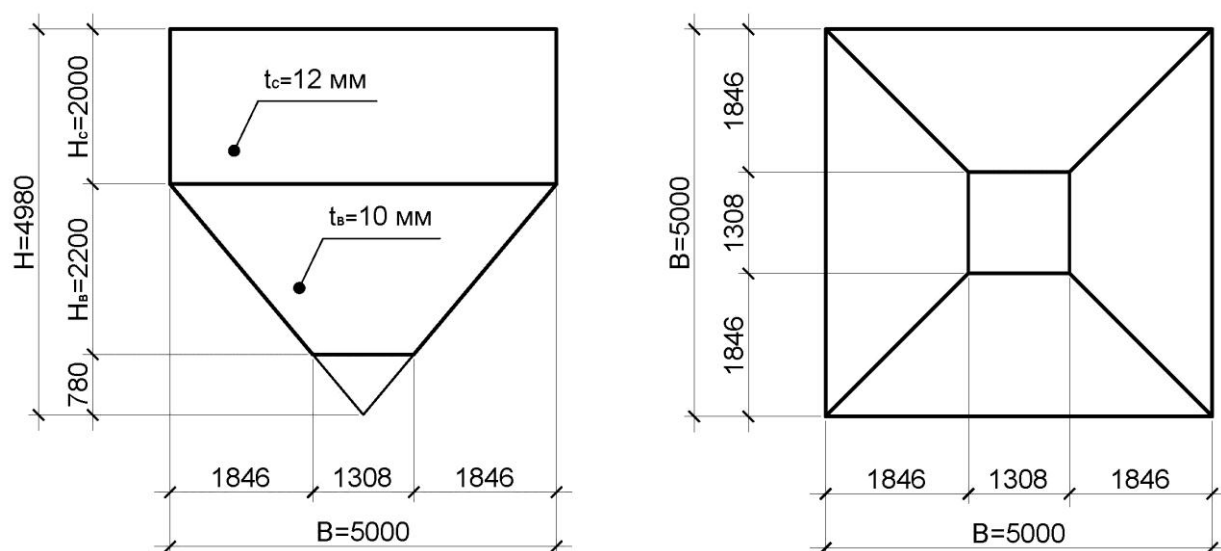
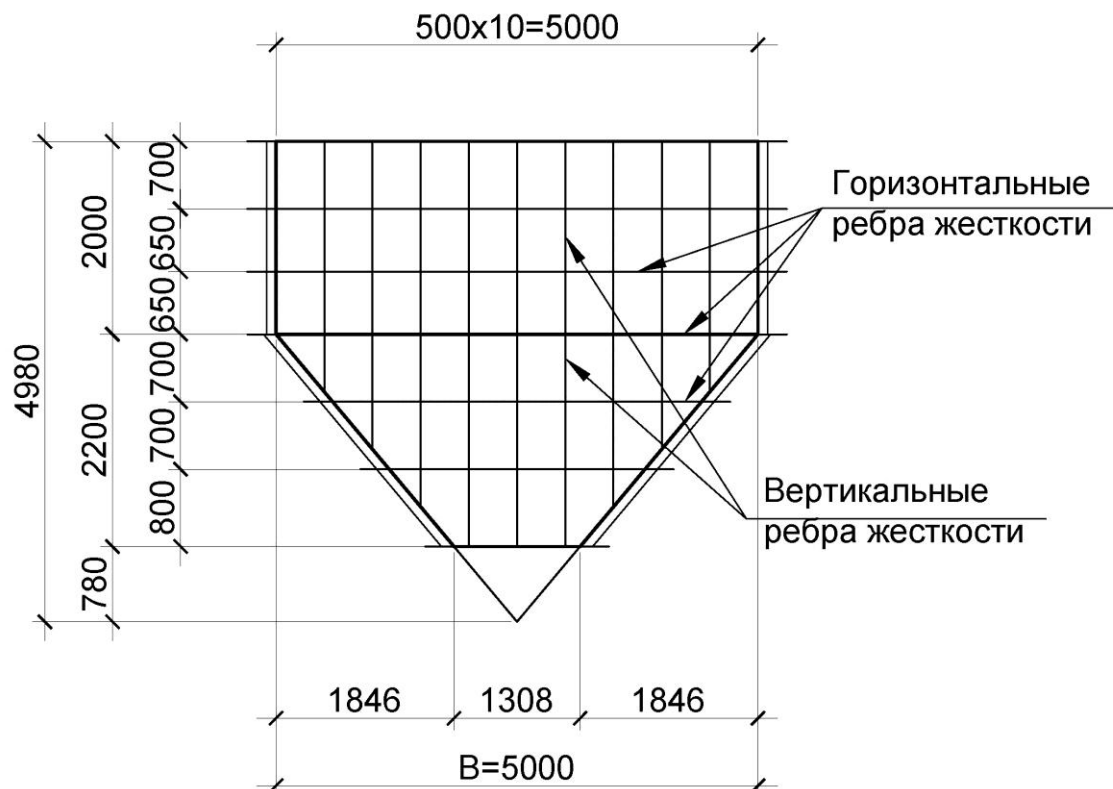
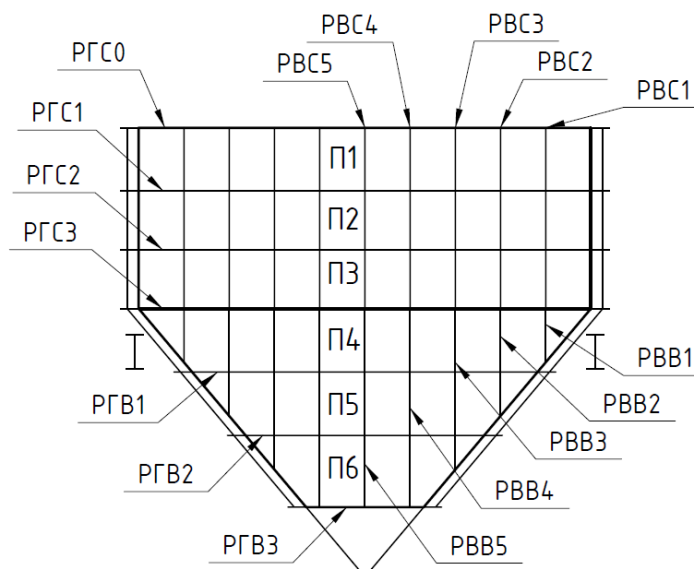


Рисунок 1 – Геометрическая схема призматического бункера.



**Рисунок 2 – Геометрическая схема ребер призматического бункера.**

Конструкция призматического бункера подкреплена горизонтальными и вертикальными ребрами жесткости. Схема маркировки отдельных конструктивных элементов бункера представлена на Рисунке 3.



**Рисунок 3 – Схема маркировки элементов бункера**

В качестве расчетного для вертикальной стенки бункера принимаем случай нагрузок 1. В качестве расчетного нагрузочного режима для стенки воронки бункера принимаем случай нагрузок 3.

Ширина отдельных пластинок стенки бункера в горизонтальном направлении равна шагу вертикальных ребер жесткости  $b_p = 0,5$  м.

Ширина отдельных пластинок вертикальной стенки бункера в вертикальном направлении  $a_{п1} = 0,7$  м,  $a_{п2} = 0,65$  м,  $a_{п3} = 0,65$  м.

Ширина отдельных пластинок стенки воронки бункера в вертикальном направлении

$$a_{\Pi 1} = 0,915 \text{ м}, a_{\Pi 2} = 0,915 \text{ м}, a_{\Pi 3} = 1,040 \text{ м}.$$

Проверим горизонтальные ребра жесткости  $t_{ГР} = 10$  мм,  $b_{ГР} = 200$  мм и вертикальные ребра жесткости  $t_{ВР} = 8$  мм,  $b_{ВР} = 100$  мм.

Модуль Юнга  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа.

Коэффициент Пуассона  $\vartheta = 0,3$ .

Сталь металлоконструкций S235 по EN 10025-2 с характеристиками (Таблица 3.1 СН РК EN 1993-1-1 и НП.2.2 к СН РК EN 1993-1-1):

- предел текучести  $f_y = 235 \text{ Н/мм}^2$ ;
- временное сопротивление  $f_u = 360 \text{ Н/мм}^2$ .

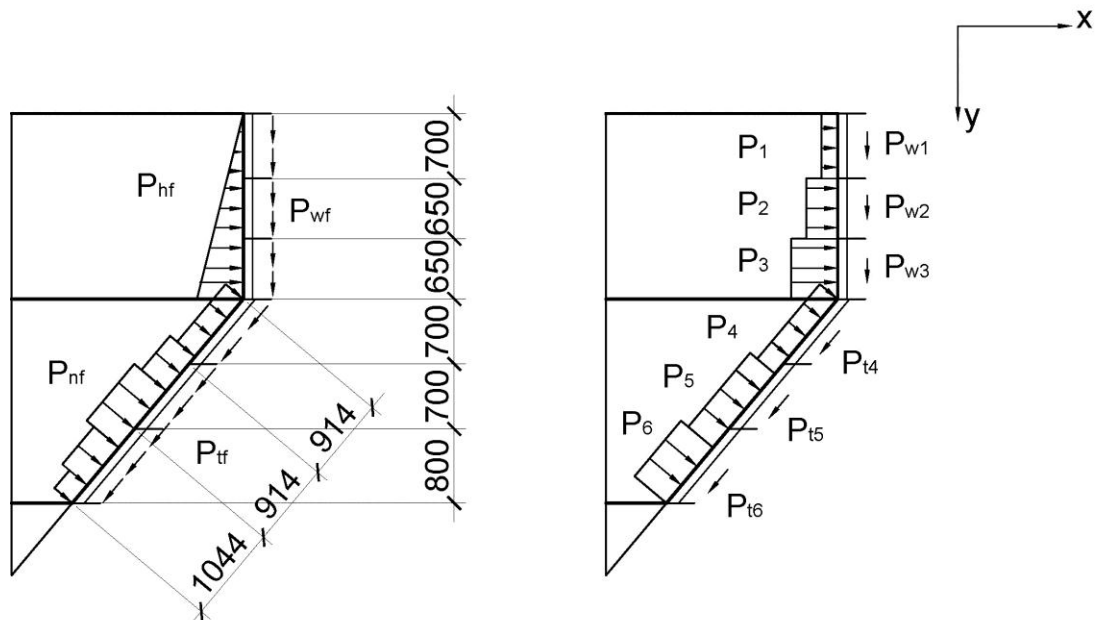
Нагрузки на конструкции бункера. За нулевую точку вертикальной оси координат примем уровень верхней кромки стенки бункера. Ось координат направлена вертикально вниз. Принято, что нагрузка от сыпучего материала равномерно распределена по ширине поверхности бункера. Схема приложения нагрузки изображена на Рисунке 4.

### 3.2 Расчет конструкций вертикальной стенки бункера

### 3.2.1 Расчет пластин вертикальной стенки бункера

Расчет плоской стенки бункера выполняется в соответствии с приложением СН РК EN 1993-1-7 с учетом меридиональных сил и изгибающих моментов.

При расчете рассматриваются отдельные пластинки вертикальной стенки бункера, ограниченные горизонтальными и вертикальными ребрами жесткости (маркировку пластин см. на Рисунке 3). Условно принято, что пластины шарнирно оперты на концах и в пределах каждой пластины действует равномерно распределенная горизонтальная и вертикальная нагрузка.



а – распределенная нагрузка на вертикальную стенку и стенку воронки в соответствии с исходными данными; б – расчетная схема равномерно нагрузок на пластинки

#### Рисунок 4 – Нагрузка на конструкции призматического бункера

3.2.1.1 Определение нагрузок

Определяем равномерно распределенное давление в пределах каждой пластины.

Нормальное давление:

$$P_1 = \left[ \left( \frac{P_{hf1} + 0}{2} + \frac{P_{hf1} + P_{hf2}}{2} + \frac{P_{hf2} + P_{hf3}}{2} \right) \times a_{ш1} + \left( \frac{P_{hf3} + \frac{P_{hf3} + P_{hf4}}{2}}{2} \right) \times \frac{a_{ш1}}{2} \right] \times \frac{1}{a_{п1}} = \left[ \left( \frac{2,52 + 0}{2} + \frac{2,52 + 4,82}{2} + \frac{4,82 + 6,94}{2} \right) \times 0,2 + \frac{6,94 + \frac{6,94 + 8,88}{2}}{2} \times \frac{0,2}{2} \right] \times \frac{1}{0,7} = 4,149 \text{ кПа}$$

$$P_2 = \left[ \frac{P_{hf4} + \frac{P_{hf3} + P_{hf4}}{2}}{2} \times \frac{a_{ш1}}{2} + \left( \frac{P_{hf5} + P_{hf4}}{2} + \frac{P_{hf6} + P_{hf5}}{2} \right) \times a_{ш1} + \frac{P_{hf6} + \left( P_{hf6} + \frac{3 \times (P_{hf7} - P_{hf6})}{4} \right)}{2} \times \left( \frac{3}{4} \times a_{ш1} \right) \right] \times \frac{1}{a_{п2}} = \left[ \frac{8,88 + \frac{6,94 + 8,88}{2}}{2} \times \frac{0,2}{2} + \left( \frac{10,68 + 8,88}{2} + \frac{12,34 + 10,68}{2} \right) \times 0,2 + \frac{12,34 + \left( 12,34 + \frac{3 \times (13,88 - 12,34)}{4} \right)}{2} \times \left( \frac{3 \times 0,2}{4} \right) \right] \times \frac{1}{0,65} = 10,82 \text{ кПа};$$

$$P_3 = \left[ \frac{P_{hf7} + \left( P_{hf6} + \frac{3 \times (P_{hf7} - P_{hf6})}{4} \right)}{2} \times \frac{a_{ш1}}{4} + \left( \frac{P_{hf8} + P_{hf7}}{2} + \frac{P_{hf9} + P_{hf8}}{2} + \frac{P_{hf10} + P_{hf9}}{2} \right) \times a_{ш1} \right] \times \frac{1}{a_{п3}} = \left[ \frac{13,88 + \left( 12,34 + \frac{3 \times (13,88 - 12,34)}{4} \right)}{2} \times \frac{0,2}{4} + \left( \frac{15,31 + 13,88}{2} + \frac{16,64 + 15,31}{2} + \frac{17,88 + 16,64}{2} \right) \times 0,2 \right] \times \frac{1}{0,65} = 15,77 \text{ кПа}$$

где  $P_{hfi}$  – значения нормальных давлений в различных точках по высоте относительно вертикальной оси, кПа;

$a_{ш1}$  – шаг изменения значений давлений по длине оболочки (Таблица 1 данного примера),

м.

Нагрузки за счет трения (касательные давления):

$$P_{w1} = \left[ \left( \frac{P_{wf1} + 0}{2} + \frac{P_{wf1} + P_{wf2}}{2} + \frac{P_{wf2} + P_{wf3}}{2} \right) \times a_{ш1} + \frac{P_{wf3} + \frac{P_{wf3} + P_{wf4}}{2}}{2} \times \frac{a_{ш1}}{2} \right] \times \frac{1}{a_{п1}} = \left[ \left( \frac{1,04 + 0}{2} + \frac{2,00 + 1,04}{2} + \frac{2,87 + 2,00}{2} \right) \times 0,2 + \frac{2,87 + \frac{2,87 + 3,68}{2}}{2} \times \frac{0,2}{2} \right] \times \frac{1}{0,7} = 1,718 \text{ кПа}$$



$$\begin{aligned}
 P_{w2} &= \left[ \left( \frac{P_{wf4} + \frac{P_{wf3} + P_{wf4}}{2}}{2} \cdot \frac{a_{ш1}}{2} \right) + \left( \frac{P_{wf5} + P_{wf4}}{2} + \frac{P_{wf6} + P_{wf5}}{2} \right) \times a_{ш1} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{P_{wf6} + \left( P_{wf6} + \frac{3 \times (P_{wf7} - P_{wf6})}{4} \right)}{2} \times \frac{3}{4} \times a_{ш1} \right] \times \frac{1}{a_{п2}} = \\
 &= \left[ \left( \frac{3,68 + \frac{2,87 + 3,68}{2}}{2} \times \frac{0,2}{2} \right) + \left( \frac{4,42 + 3,68}{2} + \frac{5,10 + 4,42}{2} \right) \times 0,2 + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{5,10 + \left( 5,10 + \frac{3 \times (5,74 - 5,10)}{4} \right)}{2} \times \frac{3}{4} \times 0,2 \right] \times \frac{1}{0,65} = 4,478 \text{ кПа} \\
 P_{w3} &= \left[ \frac{P_{wf7} + \left( P_{wf6} + \frac{3 \times (P_{wf7} - P_{wf6})}{4} \right)}{2} \times \frac{a_{ш1}}{4} + \right. \\
 &\quad \left. + \left( \frac{P_{wf8} + P_{wf7}}{2} + \frac{P_{wf9} + P_{wf8}}{2} + \frac{P_{wf10} + P_{wf9}}{2} \right) \times a_{ш1} \right] \times \frac{1}{a_{п3}} = \\
 &= \left[ \frac{5,74 + \left( 5,10 + \frac{3 \times (5,74 - 5,10)}{4} \right)}{2} \times \frac{0,2}{4} + \left( \frac{6,33 + 5,74}{2} + \frac{6,88 + 6,33}{2} + \frac{7,40 + 6,88}{2} \right) \times 0,2 \right] \times \\
 &\quad \times \frac{1}{0,65} = 6,521 \text{ кПа}
 \end{aligned}$$

где  $P_{wfi}$  – величины давлений в различных точках по длине оболочки, кПа.

Из приведенных расчетов видно, что максимальные давления воспринимает пластина ПЗ. Выполним подбор толщины пластины ПЗ, толщины остальных пластинок вертикальной стенки примем равными толщине ПЗ.

### 3.2.1.2 Расчет напряжений в пластине

Расчет выполняется в соответствии с положениями приложения С.1, СН РК EN 1993-1-7, Таблица С.1 (Граничные условия: ФВС: все ребра шарнирно закреплены, МВС: нормальные напряжения и напряжения сдвига равны нулю).

Параметры по Таблице С.1:

- наименьший размер пластины равен  $a = b_{п} = 0,5 \text{ м}$ ;
- наибольший размер пластины равен  $b = a_{п3} = 0,65 \text{ м}$ ;
- отношение:

$$\gamma = \frac{b}{a} = 1,3;$$

– параметр:

$$Q = \frac{q_{ed} \cdot a^4}{E \cdot t_c^4},$$

где  $q_{ed}$  – расчетное значение равномерно распределенной нагрузки по всей поверхности.

$q_{ed} = P_{Ed3}$ .

$$Q = \frac{q_{ed} \cdot a^4}{E \cdot t_c^4} = \frac{15,77 \times 10^{-3} \times (0,5)^4}{2,1 \cdot 10^5 \times (0,012)^4} = 0,226$$

Коэффициенты в соответствии с Таблицей С.1, СН РК EN 1993-1-7 определяем с помощью линейной интерполяции:

$b/a$	$Q$	$k_{w1}$	$k_{\sigma bx1}$	$k_{\sigma by1}$	$k_{\sigma mx1}$	$k_{\sigma my1}$	$k_{\sigma mx2}$
1	0,226	0,0457299	0,296292	0,296292	0,020214	0,020214	-0,03398
	20	0,0396	0,2431	0,2431	0,0302	0,0302	-0,0589
	40	0,0334	0,1893	0,1893	0,0403	0,0403	-0,0841
1,3	0,226	0,0676377	0,397237	0,284063	0,022962	0,042132	-0,07352
1,5	0,226	0,0822429	0,464534	0,275911	0,024794	0,056745	-0,09988
	20	0,0685	0,3713	0,2156	0,0243	0,0694	-0,1244
	40	0,0546	0,277	0,1546	0,0238	0,0822	-0,1492

– коэффициент для определения прогиба пластины, соответствующий граничным условиям,  $k_{w1} = 0,0676$ ;

– коэффициент для определения изгибного напряжения  $\sigma_{b,x}$  пластины, соответствующий граничным условиям,  $k_{\sigma bx1} = 0,3972$ ;

– коэффициент для определения изгибного напряжения  $\sigma_{b,y}$  пластины, соответствующий граничным условиям,  $k_{\sigma by1} = 0,2841$ ;

– коэффициент для определения мембранного напряжения  $\sigma_{m,x}$  пластины, соответствующий граничным условиям,  $k_{\sigma mx1} = 0,023$ ;

– коэффициент для определения мембранного напряжения  $\sigma_{m,y}$  пластины, соответствующий граничным условиям,  $k_{\sigma my1} = 0,0421$ .

Прогиб  $w$  сегмента пластины, который нагружен равномерно распределенной нагрузкой, определяется по Формуле С.1 СН РК EN 1993-1-7:

$$w = k_{w1} \cdot \frac{q_{Ed} \cdot a^4}{E \cdot t_c^3} = 0,0676 \times \frac{15,77 \times 10^{-3} \times (0,5)^4}{2,06 \times 10^5 \times (0,012)^3} = 1,837 \times 10^{-4} \text{ м.}$$

Напряжения, обусловленные изгибающими моментами, вычисляются по Формулам (С.2) и (С.3) СН РК EN 1993-1-7:

$$\sigma_{bxEd} = k_{\sigma bx} \cdot \frac{q_{Ed} \cdot a^2}{t_c^2} = 0,3972 \times \frac{15,77 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,012)^2} = 10,876 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{byyE} = k_{\sigma by} \cdot \frac{q_{Ed} \cdot a^2}{t_c^2} = 0,2841 \cdot \frac{15,77 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,012)^2} = 7,777 \text{ МПа.}$$

Мембранные напряжения  $\sigma_{m,x}$  и  $\sigma_{m,y}$  в сегменте пластины определяются по Формулам (С.4) и (С.5) СН РК EN 1993-1-7:

$$\sigma_{mxEd} = k_{\sigma mx1} \cdot \frac{q_{Ed} \cdot a^2}{t_c^2} = 0,023 \times \frac{15,77 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,012)^2} = 0,629 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{myEd} = k_{\sigma my1} \cdot \frac{q_{Ed} \cdot a^2}{t_c^2} = 0,0421 \cdot \frac{15,77 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,012)^2} = 1,154 \text{ МПа.}$$

С учетом того, что на вертикальную стенку бункера также действуют силы трения, пересчитываем вертикальные напряжения, обусловленные мембранными силами:

$$\sigma_{myEd} = k_{\sigma my1} \cdot \frac{q_{Ed} \cdot a^2}{t_c^2} + P_{w3} = 0,0421 \times \frac{15,77 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,012)^2} + 6,521 \times 10^{-3} = 1,160 \text{ МПа.}$$

На нагруженной поверхности пластины общие напряжения определяются изгибными и мембранными напряжениями в соответствии с Формулами (С.6) и (С.7), СН РК EN 1993-1-7:

$$\sigma_{xEd} = -\sigma_{bxEd} + \sigma_{mxEd} = -10,876 + 0,629 = -10,247 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{yEd} = -\sigma_{byEd} + \sigma_{myEd} = -7,777 + 1,16 = -6,617 \text{ МПа.}$$

Эквивалентное напряжение для пластины определяется по Формуле (С.10) СН РК EN 1993-

1-7:

$$\sigma_{eqEd} = \sqrt{\sigma_{xEEd}^2 + \sigma_{yEd}^2 - \sigma_{xEEd} \times \sigma_{yEd}} =$$

$$= \sqrt{(-10,247)^2 + (-6,617)^2 - (-10,247) \times (-6,617)} = 9,0 \text{ МПа.}$$

На поверхности пластины без нагрузки общие напряжения определяются изгибными и мембранными напряжениями и рассчитываются по Формулам (С.8) и (С.9), СН РК EN 1993-1-7:

$$\sigma_{xEEd} = \sigma_{bxEEd} + \sigma_{mxEEd} = 10,876 + 0,629 = 11,504 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{yEd} = \sigma_{byEd} + \sigma_{myEd} = 7,777 + 1,160 = 8,937 \text{ МПа.}$$

Эквивалентное напряжение для пластины определяется по Формуле (С.10) СН РК EN 1993-1-7:

$$\sigma_{eqEd} = \sqrt{\sigma_{xEEd}^2 + \sigma_{yEd}^2 - \sigma_{xEEd} \times \sigma_{yEd}} = \sqrt{11,504^2 + 8,937^2 - 11,504 \times 8,937} =$$

$$= 10,46 \text{ МПа.}$$

### 3.2.1.3 Проверки пластины по предельным состояниям

Проверка по пластическому предельному состоянию.

Проверка выполняется по пределу текучести в соответствии с п. 6.2, СН РК EN 1993-1-7.

Частный коэффициент для несущей способности поперечных сечений по прочности независимо от класса сечений определяется согласно НП.2.13 и Пункту 6.1 (1) СН РК EN 1993-1-1:

$$\gamma_{MO} = 1,00.$$

Расчетная несущая способность определяется по Формуле (6.2) СН РК EN 1993-1-7:

$$\sigma_{eqRd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{MO}} = \frac{235}{1,00} = 235 \text{ МПа,}$$

где  $f_{yk}$  – предел текучести.

В качестве расчетного значения действующего напряжения от расчетной нагрузки принимаем максимальное эквивалентное напряжение, выбранное из напряжений на нагруженной поверхности пластины и поверхности без нагрузки.  $\sigma_{eqEd} = \max(\sigma_{eqEd}) = 10,46 \text{ МПа.}$

Проверка предельного состояния по несущей способности выполняется по Формуле (6.1) СН РК EN 1993-1-7:

$$\sigma_{eqEd} \leq \sigma_{eqRd}$$

$$\sigma_{eqEd} = 10,46 \text{ МПа} < \sigma_{eqRd} = 235 \text{ МПа.}$$

Проверка выполняется.

Проверка предельного состояния по эксплуатационной пригодности.

Максимальное отклонение в пределах сечения панели относительно ее краев  $\delta_{max}$  должно быть ограничено по требованиям Пункта 9.8.2 СН РК EN 1993-4-1, Формула (9.10):

$$\delta_{max} = k_3 \cdot L = 0,05 \cdot 0,5 \text{ м} = 0,025 \text{ м,}$$

где  $L$  – размер более короткой стороны листа;

$k_3$  – коэффициент, равный 0,05 (НП.2.46 к СН РК EN 1993-4-1).

$$w_{тр} = \delta_{max}$$

Проверка выполняется по Пункту 8.2, СН РК EN 1993-1-7:

$$w = 1,837 \cdot 10^{-4} \text{ м} < w_{тр} = 0,025 \text{ м.}$$

Условие выполняется.

### 3.2.2 Расчет горизонтальных ребер жесткости вертикальной стенки бункера

3.2.2.1 Расчет ребер выполняется как изгибаемых элементов от действия нормального давления.

Расчет распределенной нагрузки на горизонтальные ребра жесткости РГС1, РГС2, РГС3 (Рисунок 3):

$$P_{ГC0} = \frac{P_1}{2} \cdot a_{П1} = \frac{4,149}{2} \cdot 0,7 = 1,452 \frac{\text{кН}}{\text{м}},$$

$$P_{ГC1} = \frac{P_1}{2} \cdot a_{П1} + \frac{P_2}{2} \cdot a_{П2} = \frac{4,149}{2} \cdot 0,7 + \frac{10,82}{2} \cdot 0,65 = 4,97 \frac{\text{кН}}{\text{м}},$$

$$P_{ГC2} = \frac{P_2}{2} \cdot a_{П2} + \frac{P_3}{2} \cdot a_{П3} = \frac{10,82}{2} \cdot 0,65 + \frac{15,77}{2} \cdot 0,65 = 8,643 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Расчет ребер выполняется как для изгибаемых элементов от горизонтально направленной нагрузки по Формуле (6.12) СН РК EN 1993-1-1. Расчетное значение изгибающего момента  $M_{Ed}$  в каждом поперечном сечении должно удовлетворять условию:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cRd}} \leq 1,$$

где  $M_{Ed}$  – расчетное значение действующего изгибающего момента;

$M_{cRd}$  – расчетное значение несущей способности относительно главной оси.

Расчетные значения несущей способности зависят от классификации поперечных сечений (п. 6.2.1 (3) СН РК EN 1993-1-1). Согласно классификации поперечных сечений (Пункт 5.5 СН РК EN 1993-1-1) ребра жесткости относятся к классу 3. Поперечные сечения класса 3 – это сечения, в которых напряжение в крайних сжатых волокнах стального элемента при упругом распределении напряжений может достигнуть предела текучести, но потеря местной устойчивости препятствует развитию пластических деформаций.

### 3.2.2.2 Расчет ребра по предельному состоянию несущей способности

Расчетное значение несущей способности на изгиб относительно главной оси поперечного сечения  $M_{cRd}$  для сечений класса 3 определяется по Формуле (6.14) Пункта 6.2.5 (2) СН РК EN 1993-1-1:

$$M_{cRd} = M_{elRd} = \frac{W_{elmin} \cdot f_y}{\gamma_{MO}},$$

где  $W_{elmin}$  – момент сопротивления сечения, работающего в упругой стадии,

$f_y = 235 \text{ Н/мм}^2 = 235 \cdot 10^3 \text{ кН/м}^2$  (Таблица 3.1 СН РК EN 1993-1-1).

Проверим горизонтальные ребра сечением  $b_{гр} = 200 \text{ мм}$ ;  $t_{гр} = 10 \text{ мм}$ .

$$W_{elmin} = \frac{t_{гр} b_{гр}^2}{6} = \frac{0,01 \cdot (0,2)^2}{6} = 6,667 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3;$$

$$M_{cRd} = M_{elRd} = \frac{W_{elmin} \cdot f_y}{\gamma_{MO}} = \frac{6,667 \times 10^{-5} \times 235 \times 10^3}{1,025} = 15,28 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Максимальная нагрузка действует на горизонтальное ребро РГС2. Выполним подбор сечения данного элемента. Остальные горизонтальные ребра вертикальной стенки бункера примем такого же сечения.

Расчетный изгибающий момент в ребре РГС2:

$$M_{Ed} = \frac{P_{ГC2} \cdot B^2}{8} = \frac{8,643 \cdot 5^2}{8} = 27,01 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

Проверка выполнения условия:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cRd}} = \frac{27,01}{15,28} = 1,768 > 1.$$

Условие не выполняется.

Увеличиваем поперечные размеры горизонтального ребра жесткости. Принимаем поперечные размеры горизонтальных ребер жесткости  $t_{гр} = 16 \text{ мм}$ ,  $b_{гр} = 300 \text{ мм}$ . Тогда:

$$W_{elmin} = \frac{t_{гр} b_{гр}^2}{6} = \frac{0,016 \cdot (0,3)^2}{6} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3,$$

$$M_{cRd} = \frac{W_{elmin} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{2,4 \cdot 10^{-4} \times 235 \times 10^3}{1,025} = 55,02 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Проверка выполнения условия:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cRd}} = \frac{27,01}{55,02} = 0,491 < 1.$$

Условие выполняется.

Окончательно принимаем поперечные размеры горизонтальных ребер жесткости:

$$t_{ГР} = 16 \text{ мм}, b_{ГР} = 300 \text{ мм}.$$

### 3.2.3 Расчет вертикальных ребер жесткости вертикальной стенки бункера

На вертикальные ребра действуют нормальные нагрузки, а также касательные силы трения сыпучих материалов. Выполняем расчет ребра как сжато-изгибаемого (внецентренно-сжатого) элемента постоянного сечения в соответствии с положениями Пункта 6.3.3 СН РК EN 1993-1-1.

Расчет нормальной распределенной нагрузки на ребра:

$$\begin{aligned} P_{hPBC} &= (P_1 \times a_{П1} + P_2 \times a_{П2} + P_3 \times a_{П3}) \times \frac{1}{H_c} \times b_{П} = \\ &= (4,149 \times 0,7 + 10,82 \times 0,65 + 15,77 \times 0,65) \times \frac{1}{2,0} \times 0,5 = 5,047 \frac{\text{кН}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Расчет касательной распределенной нагрузки на ребра:

$$\begin{aligned} P_{wPBC} &= (P_{w1} \times a_{П1} + P_{w2} \times a_{П2} + P_{w3} \times a_{П3}) \times \frac{1}{H_c} \times b_{П} = \\ &= (1,718 \times 0,7 + 4,478 \times 0,65 + 6,521 \times 0,65) \times \frac{1}{2,0} \times 0,5 = 2,088 \frac{\text{кН}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Продольная осевая сила в ребре:

$$N_{Ed} = \frac{1}{2} \times (L_p \cdot P_{wPBC}) = \frac{1}{2} \times 2,0 \times 2,088 = 2,088 \text{ кН}.$$

Длина ребра  $L_p = H_c = 2,0 \text{ м}$ .

Изгибающий момент:

$$M_{yEd} = \frac{P_{hPBC} \times L_p^2}{8} = \frac{5,047 \times (2,0)^2}{8} = 2,524 \text{ кНм} = 2524 \text{ кНмм}.$$

Сжато-изгибаемые элементы должны удовлетворять условиям Пункта 6.3.3(4) и Формул (6.61) и (6.62) СН РК EN 1993-1-1 соответственно:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} &\leq 1,0; \\ \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} &\leq 1,0. \end{aligned}$$

В данном примере  $M_{z,Ed} = 0$ , нагрузка, вызывающая изгиб ребра жесткости действует в плоскости  $Z - Z$ . Для данного случая Формулы (6.61) и (6.62) СН РК EN 1993-1-1 имеют вид соответственно:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} &\leq 1,0; \\ \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} &\leq 1,0; \end{aligned}$$

где  $N_{Ed}$ ,  $M_{y,Ed}$  – расчетные значения сжимающей силы и изгибающего момента;

$N_{Rk}$ ,  $M_{y,Rk}$  – нормативные значения несущей способности на сжатие и на изгиб

относительно оси Y – Y соответственно;

$\chi_y$  – понижающий коэффициент при плоской форме потери устойчивости, п. 6.3.1;

$\chi_{LT}$  – понижающий коэффициент при проверке устойчивости плоской формы изгиба, Пункт 6.3.2 СН РК EN 1993-1-1;

$k_{yy}$  и  $k_{zy}$  – коэффициенты взаимодействия.

Частный коэффициент безопасности при определении несущей способности по устойчивости (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1):

$$\gamma_{M1} = 1,0$$

Коэффициенты взаимодействия  $k_{yy}$  и  $k_{zy}$  определяем по Приложению А СН РК EN 1993-1-1. В Таблице А1 СН РК EN 1993-1-1 для сечения класса 3:

$$k_{yy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}};$$

$$k_{zy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}};$$

$$C_{m,y} = C_{m,y,0} + (1 - C_{m,y,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}},$$

$$C_{m,LT} = C_{m,y}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} \geq 1,$$

$$\mu_y = \frac{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}{1 - \chi_y \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)};$$

$$\mu_z = \frac{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}{1 - \chi_y \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}.$$

В Таблице А2 для эпюры момента однопролетного стержня с равномерно-распределенной нагрузкой коэффициент  $C_{m,i,0}$  определяется по выражению:

$$C_{m,i,0} = C_{m,y,0} = 1 + 0,03 \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}.$$

Критические длины:

— в плоскости  $L_{cr,y} = 2 \text{ м}$ ;

— из плоскости  $L_{cr,z} = 0,7 \text{ м}$ .

Проверим сечение вертикального ребра  $b_{вр} = 100 \text{ мм}$ ;  $t_{вр} = 8 \text{ мм}$ .

$$A_i = A_{вр} = t_{вр} \cdot b_{вр} = 8 \cdot 100 = 800 \text{ мм}^2,$$

$$W_i = W_{вр} = \frac{t_{вр} \cdot b_{вр}^2}{6} = \frac{8 \cdot 100^2}{6} = 13,33 \cdot 10^3 \text{ мм}^3,$$

$$I_y = \frac{t_{вр} \cdot b_{вр}^3}{12} = \frac{8 \cdot 100^3}{12} = 667 \cdot 10^3 \text{ мм}^4,$$

$$I_z = \frac{b_{вр} \cdot h_{вр}^3}{12} = \frac{100 \cdot 8^3}{12} = 4,27 \cdot 10^3 \text{ мм}^4,$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{667 \cdot 10^3}{800}} = 28,875 \text{ мм},$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{4,27 \cdot 10^3}{800}} = 2,31 \text{ мм}.$$

Момент инерции поперечного сечения при свободном кручении  $I_T$  равен:

$$I_T = \alpha \cdot t_{\text{вп}}^4$$

$b_{\text{вп}}/h_{\text{вп}}$	1,5	2	3	6	10	12,5
$\alpha$	0,294	0,459	0,79	1,789	3,123	3,957

В нашем случае  $\frac{b_{\text{вп}}}{h_{\text{вп}}} = \frac{100}{8} = 12,5$ , по интерполяции  $\alpha=3,957$ :

$$I_T = \alpha \cdot t_{\text{вп}}^4 = 3,957 \cdot 8^4 = 16208 \text{ мм}^4,$$

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2,$$

$y_0 = z_0 = 0$  — центр изгиба и центр тяжести совпадают,

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 = 28,875^2 + 2,31^2 = 839,102 \text{ мм}^2.$$

Имеем нормативные значения несущей способности на сжатие и изгиб относительно оси  $Y - Y$  (Таблица 6.7 СН РК EN 1993-1-1 для класса сечений 3):

$$N_{Rk} = f_y \cdot A_i = 235 \cdot 800 = 0,188 \cdot 10^3 \text{ кН},$$

$$M_{yRk} = f_y \cdot W_i = 235 \cdot 13,33 \cdot 10^3 = 3,132 \cdot 10^3 \text{ кНмм}.$$

Критическая сила плоской формы потери устойчивости относительно оси  $Y - Y$  в упругой стадии  $N_{cr,y}$  и оси  $Z - Z$  —  $N_{cr,z}$ :

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 E I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 667 \cdot 10^3}{2000^2} = 345,258 \text{ кН},$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 4,27 \cdot 10^3}{700^2} = 18,043 \text{ кН}.$$

Критическая сила устойчивости в упругой стадии по крутильной форме:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left( G I_T + \frac{\pi^2 E I_w}{L_T^2} \right)$$

где влиянием стесненного кручения пренебрегаем  $\frac{\pi^2 E I_w}{L_T^2} = 0$ , имеем:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot G I_T = \frac{1}{839,102} \cdot 81 \cdot 16208 = 1564 \text{ кН}.$$

Значение  $\chi$  в зависимости от условной гибкости  $\bar{\lambda}$  следует определять в зависимости от вида соответствующей кривой потери устойчивости по Формуле (6.49) СН РК EN 1993-1-1:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}},$$

где  $\Phi$  — величина, определяемая по формуле:

$$\Phi = 0,5 \cdot (1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2).$$

Условная гибкость  $\bar{\lambda}$  определяется по Формуле (6.50) СН РК EN 1993-1-1:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1},$$

$\lambda_1$  — величина, определяемая по формуле:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3,14 \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5}{235}} = 93,86.$$

Определяем тип кривой потери устойчивости по Таблице 6.2 СН РК EN 1993-1-1 ( $t_f < 40$  мм,  $f_y$  от S235 до S420). Заданным параметрам соответствуют кривые  $a$ ,  $b$ . Принимаем кривую  $a$  при определении коэффициента устойчивости  $\chi_y$  и кривую  $b$  — для  $\chi_z$ .

Рассчитываем понижающий коэффициент при плоской форме потери устойчивости  $\chi_y$ .

По Таблице 6.1 СН РК EN 1993-1-1 определяем величину коэффициента  $\alpha$ , соответствующего кривой  $a$ ,  $\alpha = 0,21$ .

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2000}{28,875} \cdot \frac{1}{93,86} = 0,738,$$

$$\Phi_y = 0,5 \cdot \left( 1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right) = 0,5 \cdot \left( 1 + 0,21 \cdot (0,738 - 0,2) + 0,738^2 \right) = 0,829.$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,829 + \sqrt{0,829^2 - 0,738^2}} = 0,829,$$

$$\mu_y = \frac{1 - \left( \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} \right)}{1 - \chi_y \left( \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} \right)} = \frac{1 - \frac{2,088}{345,258}}{1 - 0,829 \cdot \frac{2,088}{345,258}} = 0,999.$$

Рассчитываем понижающий коэффициент при плоской форме потери устойчивости  $\chi_z$ .

По Таблице 6.1 СН РК EN 1993-1-1 определяем величину коэффициента  $\alpha$ , соответствующего кривой  $b$ ,  $\alpha = 0,34$ .

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{700}{2,31} \cdot \frac{1}{93,86} = 3,228,$$

$$\Phi_z = 0,5 \cdot \left( 1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right) = 0,5 \cdot \left( 1 + 0,34 \cdot (3,228 - 0,2) + 3,228^2 \right) = 6,225,$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{6,225 + \sqrt{6,225^2 - 3,228^2}} = 0,086,$$

$$\mu_z = \frac{1 - \left( \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right)}{1 - \chi_z \left( \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right)} = \frac{1 - \frac{2,088}{18,043}}{1 - 0,086 \cdot \frac{2,088}{18,043}} = 0,893.$$

Понижающий коэффициент  $\chi_{LT}$  (Формула (6.56) СН РК EN 1993-1-1):

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}},$$

но при этом должно соблюдаться условие:

$$\chi_{LT} \leq 1,0 \text{ или } \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2}.$$

Величина  $\Phi_{LT}$  для определения понижающего коэффициента  $\chi_{LT}$  (см. Пункт 6.3.2.3 СН РК EN 1993-1-1):

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right].$$

Коэффициент  $\alpha_{LT}$ , учитывающий начальные несовершенства определяется по Таблице 6.3 СН РК EN 1993-1-1. Коэффициент зависит от типа потери устойчивости. Выбор типа кривой потери устойчивости зависит от вида поперечного сечения (см. Таблицу 6.4 СН РК EN 1993-1-1). В нашем случае тип кривой потери устойчивости –  $d$ .

Таким образом, по Таблице 6.3 СН РК EN 1993-1-1:

$$\alpha_{LT} = 0,76.$$

Определение условной гибкости  $\bar{\lambda}_{LT}$  см. Пункт 6.3.2.2(1) СН РК EN 1993-1-1:



$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}.$$

Определение критического момента потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии  $M_{cr}$ :

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 E I_z}{L^2} \cdot \sqrt{\left[ \frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 G I_T}{\pi^2 E I_z} \right]}.$$

Определение коэффициента  $C_1$  по Таблице А1, коэффициент  $k_c$  по Таблице 6.6 СН РК EN 1993-1-1:

$$C_1 = k_c^{-2} = 0,94^{-2} = 1,132,$$

$$M_{cr} = 1,132 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 4,27 \cdot 10^3}{700^2} \cdot \sqrt{0 + \frac{700^2 \cdot 81 \cdot 16208}{\pi^2 \cdot 210 \cdot 4,27 \cdot 10^3}} = 5,509 \cdot 10^3 \text{ кНм},$$

Имеем:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{13,33 \cdot 10^3 \cdot 235}{5,509 \cdot 10^6}} = 0,754,$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = 0,506,$$

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + 0,76(0,754 - 0,2) + 0,754^2] = 0,995,$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,995 + \sqrt{0,995^2 - 0,754^2}} = 0,761.$$

Условие  $\chi_{LT} = 0,761 < 1,0$  и  $\chi_{LT} = 0,761 \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{0,754^2} = 1,759$  принимаем  $\chi_{LT} = 0,761$ .

Для сечений класса 1, 2 и 3 по Таблице А1:

- относительный эксцентриситет

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \cdot \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{2524}{2,088} \cdot \frac{800}{13,33 \cdot 10^3} = 72,547,$$

- коэффициент, учитывающий несовершенства

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} = 1 - \frac{16208}{667 \cdot 10^3} = 0,976 > 0,$$

$$C_{m,y,0} = 1 + 0,03 \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 1 + 0,03 \cdot \frac{2,088}{345,258} = 1,000181 \approx 1,$$

$$C_{m,y} = C_{m,y,0} + (1 - C_{m,y,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}} = 1,$$

$$C_{m,LT} = C_{m,y}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 1 \cdot \frac{0,976}{\sqrt{\left(1 - \frac{2,088}{18,043}\right) \cdot \left(1 - \frac{2,088}{1564}\right)}} = 1,039 > 1,$$

принимаем  $C_{m,LT} = 1,039$ .

Имеем:

$$k_{yy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1 \cdot 1,039 \cdot \frac{0,999}{1 - \frac{2,088}{345,258}} = 1,044,$$

$$k_{zy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1 \cdot 1,039 \cdot \frac{0,893}{1 - \frac{2,088}{345,258}} = 0,933.$$

Условие устойчивости для сжато-изгибаемых элементов:

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \gamma_{M1}}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{2,088}{0,829 \cdot 188} + 1,044 \cdot \frac{2524}{0,761 \cdot \frac{3132}{1,0}} = 1,119 > 1,0;$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \gamma_{M1}}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{2,088}{0,086 \cdot 188} + 0,933 \cdot \frac{2524}{0,761 \cdot \frac{3132}{1,0}} = 1,117 > 1,0.$$

Условие устойчивости не выполняется, необходимо увеличить сечение.

Проверим сечение вертикального ребра  $b_{bp} = 100$  мм;  $t_{bp} = 10$  мм.

$$A_i = A_{bp} = t_{bp} \cdot b_{bp} = 10 \cdot 100 = 1000 \text{ мм}^2,$$

$$W_i = W_{bp} = \frac{t_{bp} \cdot b_{bp}^2}{6} = \frac{10 \cdot 100^2}{6} = 16,67 \cdot 10^3 \text{ мм}^3,$$

$$I_y = \frac{t_{bp} \cdot b_{bp}^3}{12} = \frac{10 \cdot 100^3}{12} = 833,3 \cdot 10^3 \text{ мм}^4,$$

$$I_z = \frac{b_{bp} \cdot h_{bp}^3}{12} = \frac{100 \cdot 10^3}{12} = 8,333 \cdot 10^3 \text{ мм}^4,$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{833,3 \cdot 10^3}{1000}} = 28,867 \text{ мм},$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{8,333 \cdot 10^3}{1000}} = 2,887 \text{ мм},$$

$$I_T = \alpha \cdot t_{bp}^4$$

$b_{bp}/h_{bp}$	1,5	2	3	6	10
$\alpha$	0,294	0,459	0,79	1,789	3,123

В нашем случае  $b_{bp}/h_{bp} = 100/10 = 10$ , по интерполяции  $\alpha=3,123$ :

$$I_T = \alpha \cdot t_{bp}^4 = 3,123 \cdot 10^4 = 31230 \text{ мм}^4,$$

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 = 28,867^2 + 2,887^2 = 841,638 \text{ мм}^2.$$

Нормативные значения несущей способности на сжатие и изгиб:

$$N_{Rk} = f_y \cdot A_i = 235 \cdot 1000 = 0,235 \cdot 10^3 \text{ кН},$$

$$M_{yRk} = f_y \cdot W_i = 235 \cdot 16,67 \cdot 10^3 = 3,917 \cdot 10^3 \text{ кНмм}.$$

Критическая сила плоской формы потери устойчивости:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 E I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 833,3 \cdot 10^3}{2000^2} = 431,340 \text{ кН},$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 8,333 \cdot 10^3}{700^2} = 35,211 \text{ кН}.$$

Критическая сила устойчивости в упругой стадии по крутильной форме:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot G I_T = \frac{1}{841,638} \cdot 81 \cdot 31230 = 3006 \text{ кН}.$$

Рассчитываем понижающий коэффициент при плоской форме потери устойчивости  $\chi_y$ .

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2000}{28,867} \cdot \frac{1}{93,86} = 0,738,$$

$$\Phi_y = 0,5 \cdot \left( 1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right) = 0,5 \cdot (1 + 0,21 \cdot (0,738 - 0,2) + 0,738^2) = 0,829.$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,829 + \sqrt{0,829^2 - 0,738^2}} = 0,829,$$

$$\mu_y = \frac{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}{1 - \chi_y \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)} = \frac{1 - \frac{2,088}{431,340}}{1 - 0,829 \cdot \frac{2,088}{431,340}} = 0,999.$$

Рассчитываем понижающий коэффициент при плоской форме потери устойчивости  $\chi_z$ .

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{700}{2,887} \cdot \frac{1}{93,86} = 2,583,$$

$$\Phi_z = 0,5 \cdot \left(1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2\right) = 0,5 \cdot (1 + 0,34 \cdot (2,583 - 0,2) + 2,583^2) = 4,241,$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{4,241 + \sqrt{4,241^2 - 2,583^2}} = 0,131,$$

$$\mu_z = \frac{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}{1 - \chi_z \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} = \frac{1 - \frac{2,088}{35,211}}{1 - 0,131 \cdot \frac{2,088}{35,211}} = 0,948.$$

Понижающий коэффициент  $\chi_{LT}$ :

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}.$$

Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии  $M_{cr}$ :

$$C_1 = k_c^{-2} = 0,94^{-2} = 1,132,$$

$$M_{cr} = 1,132 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 8,333 \cdot 10^3}{700^2} \sqrt{0 + \frac{700^2 \cdot 81 \cdot 31230}{\pi^2 \cdot 210 \cdot 8,333 \cdot 10^3}} = 10,683 \cdot 10^3 \text{ кНм},$$

Имеем:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{16,67 \cdot 10^3 \cdot 235}{10,683 \cdot 10^6}} = 0,606,$$

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + 0,76 \cdot (0,606 - 0,2) + 0,606^2] = 0,838,$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,838 + \sqrt{0,838^2 - 0,606^2}} = 0,706.$$

Условие  $\chi_{LT} = 0,706 < 1,0$  и  $\chi_{LT} = 0,706 \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{0,606^2} = 2,723$ , принимаем  $\chi_{LT} = 0,706$ .

Для сечений класса 1, 2 и 3 по Таблице А1:

- относительный эксцентриситет

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \cdot \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{2524}{2,088} \cdot \frac{1000}{16,67 \cdot 10^3} = 72,514,$$

- коэффициент, учитывающий несовершенства

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} = 1 - \frac{31230}{833,3 \cdot 10^3} = 0,962 > 0,$$

$$C_{m,y,0} = 1 + 0,03 \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 1 + 0,03 \cdot \frac{2,088}{431,340} = 1,000145 \approx 1,$$

$$C_{m,y} = C_{m,y,0} + (1 - C_{m,y,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}} = 1,$$

$$C_{m,LT} = C_{m,y}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 1 \cdot \frac{0,962}{\sqrt{\left(1 - \frac{2,088}{35,211}\right) \cdot \left(1 - \frac{2,088}{3006}\right)}} = 0,992 < 1,$$

принимаем  $C_{m,LT} = 1$ .

Имеем:

$$k_{yy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,999}{1 - \frac{2,088}{431,340}} = 1,004,$$

$$k_{zy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,948}{1 - \frac{2,088}{431,340}} = 0,953.$$

Условие устойчивости для сжато-изгибаемых элементов:

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}}}{\gamma_{M1}} = \frac{2,088}{0,829 \cdot 235} + 1,004 \cdot \frac{2524}{0,706 \cdot \frac{3917}{1,0}} = 0,927 < 1,0;$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}}}{\gamma_{M1}} = \frac{2,088}{0,131 \cdot 235} + 0,953 \cdot \frac{2524}{0,706 \cdot \frac{3917}{1,0}} = 0,938 < 1,0.$$

Условие выполняется.

Принимаем вертикальные ребра жесткости стенки бункера сечением  $t_{BP} = 10$  мм,  $b_{BP} = 100$  мм.

### 3.3 Расчет элементов воронок

#### 3.3.1 Расчет пластин стенки воронки бункера

Рассмотрим отдельные пластинки стенки воронки бункера, ограниченные горизонтальными и вертикальными ребрами жесткости. Как и для вертикальной стенки, условно принято, что пластины шарнирно оперты на концах и в пределах каждой пластины действует равномерно распределенные горизонтальная и вертикальная нагрузки.

##### 3.3.1.1 Определение нагрузок

Определяем нагрузки в пределах каждой пластины (маркировку пластин см. на Рисунке 2).

Нормальная нагрузка:

$$P_4 = \left( \frac{P_{nf10} + P_{nf11}}{2} \times a_{ш1} + \frac{P_{nf11} + P_{nf12}}{2} \times a_{ш2} + \frac{P_{nf12} + \frac{P_{nf12} + P_{nf13}}{2}}{2} \times \frac{a_{ш1}}{2} \right) \times \frac{1}{a_{п4}} =$$

$$= \left( \frac{31,05 + 32,98}{2} \times 0,2 + \frac{32,98 + 34,19}{2} \times 0,4 + \frac{34,19 + \frac{34,19 + 34,83}{2}}{2} \times \frac{0,2}{2} \right) \times \frac{1}{0,7} =$$

$$= 33,248 \text{ кПа},$$

$$P_5 = \left( \frac{\frac{P_{nf12} + P_{nf13}}{2} + P_{nf13}}{2} \times \frac{a_{ш1}}{2} + \frac{P_{nf13} + P_{nf14}}{2} \times a_{ш2} + \frac{P_{nf14} + P_{nf15}}{2} \times a_{ш1} \right) \times \frac{1}{a_{п5}} =$$

$$= \left( \frac{\frac{34,19 + 34,83}{2} + 34,83}{2} \times \frac{0,2}{2} + \frac{34,83 + 35,02}{2} \times 0,4 + \frac{35,02 + 34,82}{2} \times 0,2 \right) \times \frac{1}{0,7} =$$

$$= 34,888 \text{ кПа},$$

$$P_6 = \left( \frac{P_{nf15} + P_{nf16}}{2} \times a_{ш1} + \frac{P_{nf16} + P_{nf17}}{2} \times a_{ш1} + \frac{P_{nf17} + P_{nf18}}{2} \times a_{ш1} + \frac{P_{nf18} + P_{nf19}}{2} \times a_{ш1} \right) \times \frac{1}{a_{п6}} =$$

$$= \left( \frac{34,82 + 34,30}{2} \times 0,2 + \frac{34,30 + 32,45}{2} \times 0,2 + \frac{32,45 + 31,17}{2} \times 0,2 + \frac{31,17 + 28,04}{2} \times 0,2 \right) \times \frac{1}{0,8} =$$

$$= 32,338 \text{ кПа},$$

где  $a_{ш1}$ ,  $a_{ш2}$  – шаги изменения нагрузки по длине оболочки, м;

Касательная нагрузка:

$$P_{t4} = \left( \frac{P_{tf10} + P_{tf11}}{2} \times a_{ш1} + \frac{P_{tf11} + P_{tf12}}{2} \times a_{ш2} + \frac{P_{tf12} + \frac{P_{tf12} + P_{tf13}}{2}}{2} \times \frac{a_{ш1}}{2} \right) \times \frac{1}{a_{п4}} =$$

$$= \left( \frac{11,0 + 11,69}{2} \times 0,2 + \frac{11,69 + 12,11}{2} \times 0,4 + \frac{12,11 + \frac{12,11 + 12,34}{2}}{2} \times \frac{0,2}{2} \right) \times \frac{1}{0,7} = 11,78 \text{ кПа},$$

$$P_{t5} = \left( \frac{\frac{P_{tf12} + P_{tf13}}{2} + P_{tf13}}{2} \times \frac{a_{ш1}}{2} + \frac{P_{tf13} + P_{tf14}}{2} \times a_{ш2} + \frac{P_{tf14} + P_{tf15}}{2} \times a_{ш1} \right) \times \frac{1}{a_{п5}} =$$

$$= \left( \frac{\frac{12,11 + 12,34}{2} + 12,34}{2} \times \frac{0,2}{2} + \frac{12,34 + 12,41}{2} \times 0,4 + \frac{12,41 + 12,34}{2} \times 0,2 \right) \times \frac{1}{0,7} =$$

$$= 12,362 \text{ кПа},$$

$$P_{t6} = \left( \frac{P_{tf15} + P_{tf16}}{2} \times a_{ш1} + \frac{P_{tf16} + P_{tf17}}{2} \times a_{ш1} + \frac{P_{tf17} + P_{tf18}}{2} \times a_{ш1} + \frac{P_{tf18} + P_{tf19}}{2} \times a_{ш1} \right) \times \frac{1}{a_{п6}} =$$

$$= \left( \frac{12,34 + 12,15}{2} \times 0,2 + \frac{12,15 + 11,5}{2} \times 0,2 + \frac{11,5 + 11,04}{2} \times 0,2 + \frac{11,04 + 9,94}{2} \times 0,2 \right) \times \frac{1}{0,8} =$$

$$= 11,458 \text{ кПа},$$

Из приведенных расчетов видно, что максимальные нагрузки воспринимает пластина П5. Выполним проверки данных элементов по предельным состояниям.

Угол наклона стенки воронки к вертикали:

$$\alpha = \beta = 40^\circ.$$

Длины вертикальных проекций стенок воронок:

$$a_{вп4} = a_{п4} \times \frac{1}{\cos \alpha} = 0,914 \text{ м},$$

$$a_{вп5} = a_{п5} \times \frac{1}{\cos \alpha} = 0,914 \text{ м},$$

$$a_{вп6} = a_{п6} \times \frac{1}{\cos \alpha} = 1,044 \text{ м}.$$

### 3.3.1.2 Расчет напряжений в пластинах

Расчет выполняется в соответствии с положениями приложения С.1 СН РК EN 1993-1-7, Таблица С.1.

Расчет пластины П5.

Параметры по Таблице С.1:

– наименьший размер пластины равен  $a = b_{п} = 0,5$ ;

– наибольший размер пластины равен  $b = a_{вп5} = 0,914 \text{ м}$ ;

– отношение:

$$\gamma = \frac{b}{a} = 1,83;$$

– параметр:

$$Q = \frac{q_{ed} \cdot a^4}{E \cdot t_c^4},$$

где  $q_{ed}$  – расчетное значение равномерно распределенной нагрузки по всей поверхности.

$$q_{ed} = P_{Ed5}.$$

$$Q = \frac{q_{ed} \cdot a^4}{E \cdot t_B^4} = \frac{34,888 \times 10^{-3} \times (0,5)^4}{2,1 \times 10^5 \times (0,01)^4} = 1,038.$$

Расчетные коэффициенты в соответствии с Таблицей С.1, СН РК EN 1993-1-7 определяем с помощью линейной интерполяции:

$b/a$	$Q$	$k_{w1}$	$k_{\sigma bx1}$	$k_{\sigma by1}$	$k_{\sigma mx1}$	$k_{\sigma my1}$	$k_{\sigma mx2}$
1,5	1,038	0,0822429	0,464534	0,275911	0,024794	0,056745	-0,09988
	20	0,0685	0,3713	0,2156	0,0243	0,0694	-0,1244
	40	0,0546	0,277	0,1546	0,0238	0,0822	-0,1492
1,83	1,038	0,0978865	0,539804	0,266582	0,015351	0,060556	-0,10342
2,0	20	0,0921	0,4909	0,2166	0,0085	0,0801	-0,1346
	1,038	0,1086918	0,592536	0,262014	0,009069	0,06275	-0,10511
	40	0,0746	0,3837	0,1687	0,0079	0,0984	-0,1657

– коэффициент для определения прогиба пластины, соответствующий граничным условиям,  $k_{w1} = 0,0979$ ;

– коэффициент для определения изгибного напряжения  $\sigma_{b,x}$  пластины, соответствующий граничным условиям,  $k_{\sigma bx1} = 0,5398$ ;

– коэффициент для определения изгибного напряжения  $\sigma_{b,y}$  пластины, соответствующий граничным условиям,  $k_{\sigma by1} = 0,2666$ ;

– коэффициент для определения мембранного напряжения  $\sigma_{m,x}$  пластины, соответствующий граничным условиям,  $k_{\sigma mx1} = 0,0154$ ;

– коэффициент для определения мембранного напряжения  $\sigma_{m,y}$  пластины, соответствующий граничным условиям,  $k_{\sigma my1} = 0,0606$ .

Прогиб  $w$  сегмента пластины, который нагружен равномерно распределенной нагрузкой, определяется по Формуле (С.1) СН РК EN 1993-1-7:

$$w = k_{w1} \cdot \frac{q_{ed} \cdot a^4}{E \cdot t_B^3} = 0,0979 \times \frac{34,888 \times 10^{-3} \times (0,5)^4}{2,1 \times 10^5 \times (0,01)^3} = 1,016 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Напряжения, вызванные изгибающими моментами, вычисляются по Формулам (С.2) и (С.3), СН РК EN 1993-1-7:

$$\sigma_{bxEd} = k_{\sigma bx1} \cdot \frac{q_{ed} \cdot a^2}{t_B^2} = 0,5398 \cdot \frac{34,888 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,01)^2} = 47,08 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{byEd} = k_{\sigma by1} \cdot \frac{q_{ed} \cdot a^2}{t_B^2} = 0,2666 \cdot \frac{34,888 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,01)^2} = 23,25 \text{ МПа.}$$

Мембранные напряжения  $\sigma_{m,x}$  и  $\sigma_{m,y}$  в сегменте пластины определяются по Формулам (С.4) и (С.5), СН РК EN 1993-1-7:

$$\sigma_{mxEd} = k_{\sigma mx1} \cdot \frac{q_{ed} \cdot a^2}{t_B^2} = 0,0154 \cdot \frac{34,888 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,01)^2} = 1,343 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{myEd} = k_{\sigma my1} \cdot \frac{q_{ed} \cdot a^2}{t_B^2} = 0,0606 \cdot \frac{34,888 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,01)^2} = 5,286 \text{ МПа}.$$

С учетом того, что на вертикальную стенку бункера также действуют силы трения, пересчитаем вертикальные напряжения, обусловленные мембранными силами:

$$\sigma_{myEd} = k_{\sigma my1} \cdot \frac{q_{ed} \cdot a^2}{t_B^2} + P_{t5} = 0,0606 \cdot \frac{34,888 \times 10^{-3} \times (0,5)^2}{(0,010)^2} + 12,362 \times 10^{-3} = 5,298 \text{ МПа}.$$

На нагруженной поверхности пластины общие напряжения определяются изгибными и мембранными напряжениями в соответствии с Формулами (С.6) и (С.7) СН РК EN 1993-1-7:

$$\sigma_{xEd} = -\sigma_{bxEd} + \sigma_{mxEd} = -47,08 + 1,343 = -45,737 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{yEd} = -\sigma_{byEd} + \sigma_{myEd} = -23,25 + 5,298 = -17,952 \text{ МПа}.$$

Эквивалентное напряжение для пластины определяется по Формуле (С.10) СН РК EN 1993-1-7:

$$\sigma_{eqEdp6} = \sqrt{\sigma_{xEd}^2 + \sigma_{yEd}^2 - \sigma_{xEd} \times \sigma_{yEd}} =$$

$$\sqrt{(-45,737)^2 + (-17,952)^2 - (-45,737) \times (-17,952)} = 39,913 \text{ МПа}$$

На поверхности пластины без нагрузки общие напряжения определяются изгибными и мембранными напряжениями и рассчитываются по Формулам С.8 и С.9 СН РК EN 1993-1-7:

$$\sigma_{xEd} = \sigma_{bxEd} + \sigma_{mxEd} = 47,08 + 1,343 = 48,423 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{yEd} = \sigma_{byEd} + \sigma_{myEd} = 23,25 + 5,298 = 28,548 \text{ МПа}.$$

Эквивалентное напряжение для пластины определяется по Формуле (С.10) СН РК EN 1993-1-7:

$$\sigma_{eqEdp6} = \sqrt{\sigma_{xEd}^2 + \sigma_{yEd}^2 - \sigma_{xEd} \times \sigma_{yEd}} =$$

$$\sqrt{48,423^2 + 28,548^2 - 48,423 \times 28,548} = 42,159 \text{ МПа}$$

### 3.2.1.3 Проверки пластины по предельным состояниям

Проверка по предельному состоянию несущей способности.

Проверка выполняется по пределу упругости в соответствии с Пунктом 6.2, СН РК EN 1993-1-7.

В качестве расчетного значения принимаем максимальное напряжение, выбранное из напряжений в сжатой и растянутой зонах  $\sigma_{eqEd} = \max(\sigma_{eqEd}) = 42,159 \text{ МПа}$ .

Проверка по предельному состоянию несущей способности выполняется по Формуле 6.1 СН РК EN 1993-1-7:

$$\sigma_{eqEd} \leq \sigma_{eqRd} \quad \sigma_{eqEd} = 42,159 \text{ МПа} < \sigma_{eqRd} = 235 \text{ МПа}.$$

Проверка выполняется.

Проверка по предельному состоянию эксплуатационной пригодности.

Максимальное отклонение в пределах сечения панели относительно ее краев  $\delta_{max}$  должно быть ограничено по требованиям Пункта 9.8.2 СН РК EN 1993-4-1, Формула (9.10):

$$\delta_{max} = k_3 \cdot L = 0,05 \cdot 0,5 = 0,025 \text{ м},$$

где  $L$  – размер короткой стороны листа;

$k_3$  – коэффициент, равный 0,05 (НП.2.46 к СН РК EN 1993-4-1).

$$w_{тр} = \delta_{max}$$

Проверка выполняется по Пункту 8.2 СН РК EN 1993-1-7:

$$w = 1,016 \cdot 10^{-3} < w_{тр} = 0,025 \text{ м}.$$

Проверка выполняется.

## 3.3.2 Расчет горизонтальных ребер жесткости

3.3.2.1 Подбор сечений горизонтальных ребер жесткости на участке между соседними стенками бункера.

Ребро жесткости располагается горизонтально.

Расчет горизонтальных ребер жесткости выполняется как изгибаемых элементов от нормального давления.

Предварительно задаемся поперечными размерами горизонтальных ребер жесткости:

$$t_{ГР} = 16 \text{ мм}, b_{ГР} = 300 \text{ мм}.$$

Расчет нормальной распределенной нагрузки на горизонтальные ребра жесткости:

$$P_{ГВ1} = \left( P_4 \cdot \frac{a_{ВП4}}{2} + P_5 \cdot \frac{a_{ВП5}}{2} \right) \times \cos \beta = \left( 33,248 \times \frac{0,914}{2} + 34,888 \times \frac{0,914}{2} \right) \times \cos \beta = 23,853 \frac{\text{кН}}{\text{м}},$$

$$P_{ГВ2} = \left( P_5 \cdot \frac{a_{ВП5}}{2} + P_6 \cdot \frac{a_{ВП6}}{2} \right) \times \cos \beta = \left( 34,888 \times \frac{0,914}{2} + 32,338 \times \frac{1,044}{2} \right) \times \cos \beta = 25,145 \frac{\text{кН}}{\text{м}},$$

$$P_{ГВ3} = P_6 \cdot \frac{a_{ВП6}}{2} \times \cos \beta = 32,338 \times \frac{1,044}{2} \times \cos \beta = 12,931 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

## 3.2.2 Расчет ребра по 1 группе предельных состояний

Длина ребра ГРВ1

$$L = B - 2 \cdot (a_{П4} \cdot \sin \beta) = 5,0 - 2 \cdot (0,7 \cdot 0,6428) = 4,1 \text{ м}.$$

Длина ребра ГРВ2

$$L = B - 2 \cdot ((a_{П4} + a_{П5}) \cdot \sin \beta) = 5,0 - 2 \cdot (1,4 \cdot 0,6428) = 3,2 \text{ м}.$$

Выполним подбор сечения ГРВ1. Остальные горизонтальные ребра стенки воронки примем такого же сечения.

Расчет ребер выполняется как изгибаемых элементов от действия нормальной нагрузки по Формуле (6.12) СН РК EN 1993-1-1:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cRd}} \leq 1.$$

Расчетный изгибающий момент в ребре:

$$M_{Ed} = \frac{P_{ГВ1} \cdot L^2}{8} = \frac{23,853 \cdot 4,1^2}{8} = 50,121 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Расчетное значение несущей способности на изгиб относительно одной из главных осей  $M_{cRd}$  принимается равным соответствующему значению для горизонтального ребра вертикальной стенки. Выполняем проверку:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cRd}} = \frac{50,121}{55,020} = 0,911 < 1.$$

Условие выполняется.

Принимаем поперечные размеры горизонтальных ребер жесткости равными:

$$t_{ГР} = 16 \text{ мм}, b_{ГР} = 300 \text{ мм}.$$

## 3.3.3 Расчет вертикальных ребер стенки воронки бункера

На вертикальные ребра действуют нормальное давление, а также касательное от трения сыпучих материалов. Выполняем расчет ребра как сжато-изгибаемого (внецентренно-сжатого) элемента постоянного сечения в соответствии с положениями Пункта 6.3.3 СН РК EN 1993-1-1.

Расчет нормальной нагрузки на ребра:

$$\begin{aligned} P_{нРВВ} &= (P_4 \times a_{П4} + P_5 \times a_{П5} + P_6 \times a_{П6}) \times \frac{1}{H_B} \times b_{П} = \\ &= (33,248 \times 0,7 + 34,888 \times 0,7 + 32,338 \times 0,8) \times \frac{1}{2,2} \times 0,5 = 16,719 \frac{\text{кН}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Расчет касательной распределенной нагрузки на ребра:



$$P_{tPBB} = (P_{t4} \times a_{BП4} + P_{t5} \times a_{BП5} + P_{t6} \times a_{BП6}) \times \frac{1}{H_B \times \frac{1}{\cos \alpha}} \times b_{П} =$$

$$= (11,78 \times 0,914 + 12,362 \times 0,914 + 11,458 \times 1,044) \times \frac{1}{2,2 \times \frac{1}{\cos 40^\circ}} \times 0,5 = 5,924 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Продольная осевая сила в ребре:

$$N_{Ed} = \frac{1}{2} \times L_p \cdot P_{tPBB} = \frac{1}{2} \times 2,2 \times \frac{1}{\cos 40^\circ} \times 5,924 = 8,506 \text{ кН}.$$

Длина ребра  $L_p = H_{CB} = 2,2 / \cos 40^\circ = 2,872 \text{ м}.$

Изгибающий момент:

$$M_{yEd} = \frac{P_{nPBB} \cdot L_p^2}{8} = \frac{16,719 \cdot (2,872)^2}{8} = 17,238 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Критические длины:

— в плоскости  $L_{cr,y} = 2,872 \text{ м};$

— из плоскости  $L_{cr,z} = 1,044 \text{ м}.$

Проверим сечение вертикального ребра  $b_{BP} = 200 \text{ мм}; t_{BP} = 16 \text{ мм}.$

$$A_i = A_{BP} = t_{BP} \cdot b_{BP} = 16 \cdot 200 = 3200,$$

$$W_i = W_{BP} = \frac{t_{BP} \cdot b_{BP}^2}{6} = \frac{16 \cdot 200^2}{6} = 106,67 \cdot 10^3 \text{ мм}^3,$$

$$I_y = \frac{t_{BP} \cdot b_{BP}^3}{12} = \frac{16 \cdot 200^3}{12} = 10667 \cdot 10^3 \text{ мм}^4,$$

$$I_z = \frac{b_{BP} \cdot h_{BP}^3}{12} = \frac{200 \cdot 16^3}{12} = 68,267 \cdot 10^3 \text{ мм}^4,$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{10667 \cdot 10^3}{3200}} = 57,736 \text{ мм},$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{68,267 \cdot 10^3}{3200}} = 4,619 \text{ мм},$$

$$I_T = \alpha \cdot t_{BP}^4$$

$b_{BP}/h_{BP}$	1,5	2	3	6	10	12,5
$\alpha$	0,294	0,459	0,79	1,789	3,123	3,957

В нашем случае  $b_{BP}/h_{BP} = 200/16 = 12,5$ , по интерполяции  $\alpha=3,957$ :

$$I_T = \alpha \cdot t_{BP}^4 = 3,957 \cdot 16^4 = 259326 \text{ мм}^4,$$

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 = 57,736^2 + 4,619^2 = 3354,78 \text{ мм}^2.$$

Нормативные значения несущей способности на сжатие и изгиб:

$$N_{Rk} = f_y \cdot A_i = 235 \cdot 3200 = 0,752 \cdot 10^3 \text{ кН},$$

$$M_{yRk} = f_y \cdot W_i = 235 \cdot 106,67 \cdot 10^3 = 25,067 \cdot 10^3 \text{ кНмм}.$$

Критическая сила плоской формы потери устойчивости:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 E I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10667 \cdot 10^3}{2872^2} = 2678 \text{ кН},$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 68,267 \cdot 10^3}{1044^2} = 129,685 \text{ кН}.$$

Критическая сила устойчивости в упругой стадии по крутильной форме:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot GI_T = \frac{1}{3354,78} \cdot 81 \cdot 259326 = 6261,336 \text{ кН}.$$

Рассчитываем понижающий коэффициент при плоской форме потери устойчивости  $\chi_y$ .

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2872}{57,736} \cdot \frac{1}{93,86} = 0,53,$$

$$\Phi_y = 0,5 \cdot (1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,21 \cdot (0,53 - 0,2) + 0,53^2) = 0,675.$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,675 + \sqrt{0,675^2 - 0,53^2}} = 0,915,$$

$$\mu_y = \frac{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}{1 - \chi_y \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)} = \frac{1 - \frac{8,506}{2678}}{1 - 0,915 \cdot \frac{8,506}{2678}} = 0,9997.$$

Рассчитываем понижающий коэффициент при плоской форме потери устойчивости  $\chi_z$ .

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1044}{4,619} \cdot \frac{1}{93,86} = 2,408,$$

$$\Phi_z = 0,5 \cdot (1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,34 \cdot (2,408 - 0,2) + 2,408^2) = 3,774,$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{3,774 + \sqrt{3,774^2 - 2,408^2}} = 0,1497,$$

$$\mu_z = \frac{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}{1 - \chi_z \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} = \frac{1 - \frac{8,506}{129,685}}{1 - 0,1497 \cdot \frac{8,506}{129,685}} = 0,944.$$

Понижающий коэффициент  $\chi_{LT}$ :

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}.$$

Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии  $M_{cr}$ :

$$C_1 = k_c^{-2} = 0,94^{-2} = 1,132,$$

$$M_{cr} = 1,132 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 68,267 \cdot 10^3}{1044^2} \cdot \sqrt{0 + \frac{1044^2 \cdot 81 \cdot 259326}{\pi^2 \cdot 210 \cdot 68,267 \cdot 10^3}} = 59,082 \cdot 10^3 \text{ кНм},$$

Имеем:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{106,67 \cdot 10^3 \cdot 235}{59,082 \cdot 10^6}} = 0,651,$$

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + 0,76 \cdot (0,651 - 0,2) + 0,651^2] = 0,883,$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,883 + \sqrt{0,883^2 - 0,651^2}} = 0,676.$$

Условие  $\chi_{LT} = 0,676 < 1,0$  и  $\chi_{LT} = 0,676 \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{0,651^2} = 2,36$ , принимаем  $\chi_{LT} = 0,676$ .

Для сечений класса 1, 2 и 3 по Таблице А1:

- относительный эксцентриситет

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \cdot \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{17238}{8,506} \cdot \frac{3200}{106,67 \cdot 10^3} = 60,795,$$

- коэффициент, учитывающий несовершенства

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} = 1 - \frac{259326}{10667 \cdot 10^3} = 0,976 > 0,$$

$$C_{m,y,0} = 1 + 0,03 \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 1 + 0,03 \cdot \frac{8,506}{2678} = 1,000095 \approx 1,$$

$$C_{m,y} = C_{m,y,0} + (1 - C_{m,y,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}} = 1,$$

$$C_{m,LT} = C_{m,y}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 1 \cdot \frac{0,976}{\sqrt{\left(1 - \frac{8,506}{129,685}\right) \cdot \left(1 - \frac{8,506}{6261,336}\right)}} = 1,046 > 1,$$

принимаем  $C_{m,LT} = 1,046$ .

Имеем:

$$k_{yy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1 \cdot 1,046 \cdot \frac{0,9997}{1 - \frac{8,506}{2678}} = 1,049,$$

$$k_{zy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1 \cdot 1,046 \cdot \frac{0,944}{1 - \frac{8,506}{2678}} = 0,991.$$

Условие устойчивости для сжато-изгибаемых элементов:

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \gamma_{M1}}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{\frac{8,506}{0,915 \cdot 752}}{1,0} + 1,049 \cdot \frac{\frac{17238}{0,676 \cdot \frac{25067}{1,0}}}{1,0} = 1,079 > 1,0;$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \gamma_{M1}}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{\frac{8,506}{0,1497 \cdot 752}}{1,0} + 0,991 \cdot \frac{\frac{17238}{0,676 \cdot \frac{25067}{1,0}}}{1,0} = 1,084 > 1,0.$$

Условие не выполняется.

Проверим сечение вертикального ребра  $b_{bp} = 220$  мм;  $t_{bp} = 16$  мм.

$$A_i = A_{bp} = t_{bp} \cdot b_{bp} = 16 \cdot 220 = 3520,$$

$$W_i = W_{bp} = \frac{t_{bp} \cdot b_{bp}^2}{6} = \frac{16 \cdot 220^2}{6} = 129,067 \cdot 10^3 \text{ мм}^3,$$

$$I_y = \frac{t_{bp} \cdot b_{bp}^3}{12} = \frac{16 \cdot 220^3}{12} = 14197 \cdot 10^3 \text{ мм}^4,$$

$$I_z = \frac{b_{bp} \cdot h_{bp}^3}{12} = \frac{220 \cdot 16^3}{12} = 75,093 \cdot 10^3 \text{ мм}^4,$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{14197 \cdot 10^3}{3520}} = 63,508 \text{ мм},$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{75,093 \cdot 10^3}{3520}} = 4,619 \text{ мм},$$

$$I_T = \alpha \cdot t_{bp}^4$$

$b_{bp}/h_{bp}$	1,5	2	3	6	10	13,75
$\alpha$	0,294	0,459	0,79	1,789	3,123	4,374

В нашем случае  $b_{bp}/h_{bp} = 220/16 = 13,75$ , по интерполяции  $\alpha=4,374$ :

$$I_T = \alpha \cdot t_{bp}^4 = 4,374 \cdot 16^4 = 286654 \text{ мм}^4,$$

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 = 63,508^2 + 4,619^2 = 4054,601 \text{ мм}^2.$$

Нормативные значения несущей способности на сжатие и изгиб:

$$N_{Rk} = f_y \cdot A_i = 235 \cdot 3520 = 0,827 \cdot 10^3 \text{ кН},$$

$$M_{yRk} = f_y \cdot W_i = 235 \cdot 129,067 \cdot 10^3 = 30,331 \cdot 10^3 \text{ кНмм}.$$

Критическая сила плоской формы потери устойчивости:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 14197 \cdot 10^3}{2872^2} = 3564 \text{ кН},$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 EI_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 75,093 \cdot 10^3}{1044^2} = 142,652 \text{ кН}.$$

Критическая сила устойчивости в упругой стадии по крутильной форме:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot GI_T = \frac{1}{4054,601} \cdot 81 \cdot 286654 = 5726,574 \text{ кН}.$$

Рассчитываем понижающий коэффициент при плоской форме потери устойчивости  $\chi_y$ .

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2872}{63,508} \cdot \frac{1}{93,86} = 0,482,$$

$$\Phi_y = 0,5 \cdot (1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,21 \cdot (0,482 - 0,2) + 0,482^2) = 0,646.$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,646 + \sqrt{0,646^2 - 0,482^2}} = 0,929,$$

$$\mu_y = \frac{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)}{1 - \chi_y \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)} = \frac{1 - \frac{8,506}{3564}}{1 - 0,929 \cdot \frac{8,506}{3564}} = 0,9998.$$

Рассчитываем понижающий коэффициент при плоской форме потери устойчивости  $\chi_z$ .

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1044}{4,619} \cdot \frac{1}{93,86} = 2,408,$$

$$\Phi_z = 0,5 \cdot (1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2) = 0,5 \cdot (1 + 0,34 \cdot (2,408 - 0,2) + 2,408^2) = 3,774,$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{3,774 + \sqrt{3,774^2 - 2,408^2}} = 0,1497,$$

$$\mu_z = \frac{1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)}{1 - \chi_z \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} = \frac{1 - \frac{8,506}{142,652}}{1 - 0,1497 \cdot \frac{8,506}{142,652}} = 0,949.$$

Понижающий коэффициент  $\chi_{LT}$ :

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}.$$

Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии  $M_{cr}$ :

$$C_1 = k_c^{-2} = 0,94^{-2} = 1,132,$$

$$M_{cr} = 1,132 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 75,093 \cdot 10^3}{1044^2} \cdot \sqrt{0 + \frac{1044^2 \cdot 81 \cdot 286654}{\pi^2 \cdot 210 \cdot 75,093 \cdot 10^3}} = 65,149 \cdot 10^3 \text{ кНмм},$$

Имеем:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{129,067 \cdot 10^3 \cdot 235}{65,149 \cdot 10^6}} = 0,682,$$

$$\Phi_{LT} = 0,5[1 + 0,76 \cdot (0,682 - 0,2) + 0,682^2] = 0,916,$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,916 + \sqrt{0,916^2 - 0,682^2}} = 0,655.$$

Условие  $\chi_{LT} = 0,655 < 1,0$  и  $\chi_{LT} = 0,655 \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{0,682^2} = 2,15$ , принимаем  $\chi_{LT} = 0,655$ .

Для сечений класса 1, 2 и 3 по Таблице А1:

- относительный эксцентриситет

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \cdot \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{17238}{8,506} \cdot \frac{3520}{129,067 \cdot 10^3} = 55,27,$$

- коэффициент, учитывающий несовершенства

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} = 1 - \frac{286654}{14197 \cdot 10^3} = 0,9798 > 0,$$

$$C_{m,y,0} = 1 + 0,03 \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 1 + 0,03 \cdot \frac{8,506}{3564} = 1,000072 \approx 1,$$

$$C_{m,y} = C_{m,y,0} + (1 - C_{m,y,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}} = 1,$$

$$C_{m,LT} = C_{m,y}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 1 \cdot \frac{0,9798}{\sqrt{\left(1 - \frac{8,506}{142,652}\right) \cdot \left(1 - \frac{8,506}{5726,574}\right)}} = 1,011 > 1,$$

принимаем  $C_{m,LT} = 1,011$ .

Имеем:

$$k_{yy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1 \cdot 1,011 \cdot \frac{0,9998}{1 - \frac{8,506}{3564}} = 1,0132,$$

$$k_{zy} = C_{m,y} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = 1 \cdot 1,011 \cdot \frac{0,949}{1 - \frac{8,506}{3564}} = 0,962.$$

Условие устойчивости для сжато-изгибаемых элементов:

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} = \frac{8,506}{0,929 \cdot 827} + 1,0132 \cdot \frac{17238}{0,655 \cdot \frac{30313}{1,0}} = 0,891 < 1,0;$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} = \frac{8,506}{0,1497 \cdot 827} + 0,962 \cdot \frac{17238}{0,655 \cdot \frac{30313}{1,0}} = 0,904 < 1,0.$$

Условие выполняется.

Принимаем вертикальные ребра жесткости стенки бункера сечением  $t_{BP} = 16$  мм,  $b_{BP} = 220$  мм.

На Рисунках 5 и 6 приведены окончательные параметры конструкции бункера.

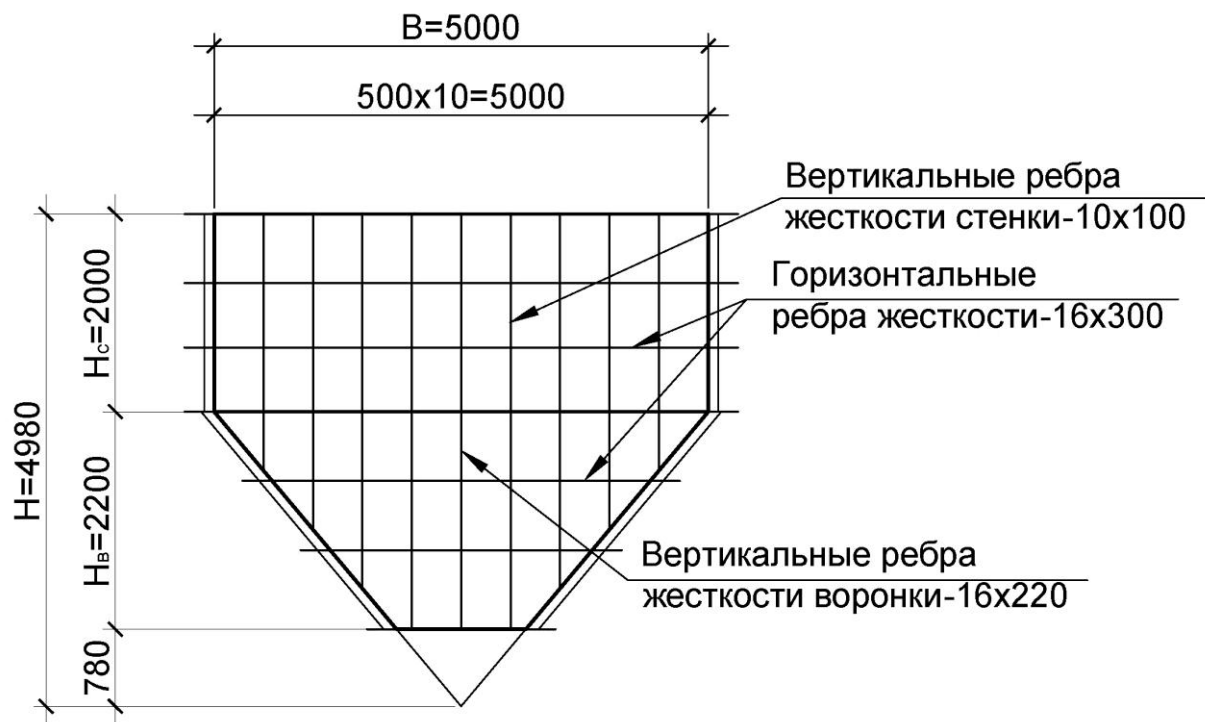


Рисунок 5 – Окончательные параметры конструкции бункера

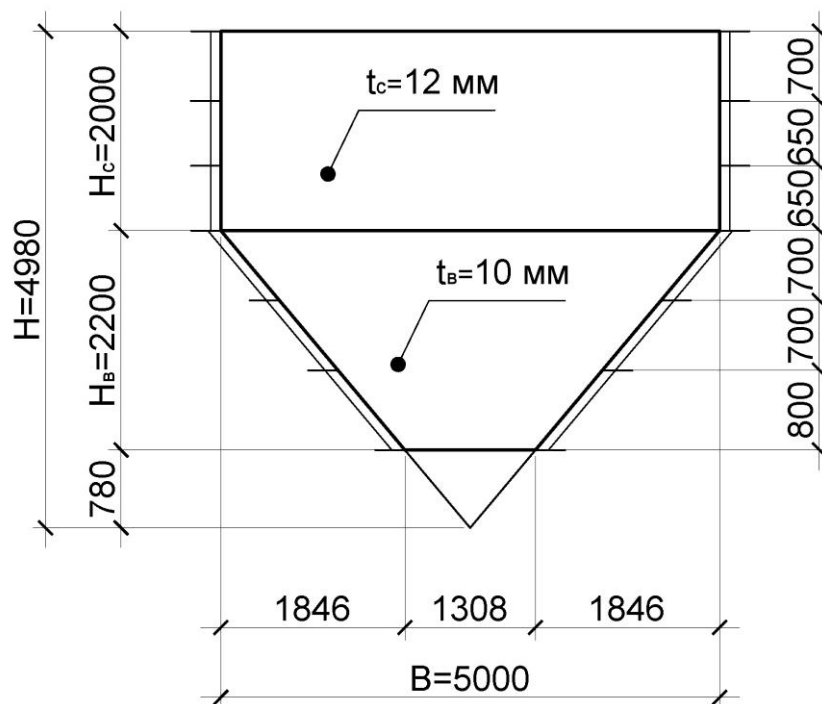


Рисунок 6 – Окончательные параметры конструкции бункера

**УДК 624.014.24**

**МКС 91.010**

---

**Ключевые слова:** стальной бункер, оболочка, лист, конус, цилиндр, плоские боковые стенки, уторный узел, ударная вязкость, прочность, устойчивость.

---

*Ресми басылым*

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЭКОНОМИКА МИНИСТРЛІГІНІҢ  
ҚҰРЫЛЫС, ТҰРҒЫН ҮЙ-КОММУНАЛДЫҚ ШАРУАШЫЛЫҚ ІСТЕРІ ЖӘНЕ  
ЖЕР РЕСУРСТАРЫН БАСҚАРУ КОМИТЕТІ

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ  
НОРМАТИВТІК-ТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРАЛЫ**

**ҚР НТҚ 03-04-1.1-2012  
БОЛАТ КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЖОБАЛАУ.  
БОЛАТ БУНКЕРЛЕР БӨЛІМІ**

Басылымға жауаптылар: «ҚазҚСҒЗИ» АҚ

050046, Алматы қаласы, Солодовников көшесі, 21  
Тел./факс: +7 (727) 392-76-16 – қабылдау бөлмесі

*Издание официальное*

КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ СТРОИТЕЛЬСТВА, ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО  
ХОЗЯЙСТВА И УПРАВЛЕНИЯ ЗЕМЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ МИНИСТЕРСТВА  
НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

**НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

**НТП РК 03-04-1.1-2012  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ЧАСТЬ. СТАЛЬНЫЕ  
БУНКЕРЫ**

Басылымға жауаптылар: «ҚазҚСҒЗИ» АҚ

050046, Алматы қаласы, Солодовников көшесі, 21  
Тел./факс: +7 (727) 392-76-16 – қабылдау бөлмесі