

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**  
**1-10 бөлімі. Көлденең жүктемелердің әсері кезіндегі**  
**жазықтабақ конструкцияларының беріктігі**

---

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**  
**Часть 1-10. Прочность плоских листовых**  
**конструкций при действии поперечных нагрузок**

**ҚР НТҚ 03-01-7.1-2011**  
**(ҚР ҚН EN 1993-1-7/2011 әзірленген)**  
**НТП РК 03-01-7.1-2011**  
**(к СН РК EN 1993-1-7/2011)**

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

1. **ӘЗІРЛЕГЕН:** «ҚазҚСҒЗИ» АҚ, «Астана Строй-Консалтинг» ЖШС
2. **ҰСЫНҒАН:** Қазақстан Республикасы Ұлттық экономика министрлігінің Құрылыс, тұрғын үй-коммуналдық шаруашылық істері және жер ресурстарын басқару комитетінің Техникалық реттеу және нормалау басқармасы
3. **БЕКІТІЛІП, ҚОЛДАНЫСҚА ЕНГІЗІЛГЕН:** 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

1. **РАЗРАБОТАН:** АО «КазНИИСА», ТОО «Астана Строй-Консалтинг»
2. **ПРЕДСТАВЛЕН:** Управлением технического регулирования и нормирования Комитета по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики Республики Казахстан
3. **УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ:** 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

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>V</b>
<b>1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Область применения .....	1
1.2 Нормативные ссылки .....	3
1.3 Условия применения .....	4
1.4 Различия между принципами и правилами проектирования .....	4
1.5 Термины и определения.....	4
1.6 Обозначения.....	4
1.7 Условные обозначения осей элементов .....	5
<b>2 ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....</b>	<b>6</b>
2.1 Требования .....	6
2.2 Принципы расчета по предельным состояниям .....	6
2.3 Воздействия.....	7
2.4 Расчет на основе испытаний.....	7
<b>3 СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ.....</b>	<b>24</b>
<b>4 ДОЛГОВЕЧНОСТЬ.....</b>	<b>26</b>
<b>5 СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ.....</b>	<b>27</b>
5.1 Общие положения .....	27
5.2 Напряженное состояние в пластине .....	27
Пример 1 Определение эффективной площади поперечного сечения .....	41
Пример 2 Аналитический расчет пластины подкрепленной регулярной сеткой ребер жесткости .....	45
<b>6 ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ПЕРВОЙ ГРУППЫ.....</b>	<b>48</b>
6.1 Общие положения .....	48
6.2 Ограничение пластических деформаций .....	49
Пример 3 Расчет численными методами: изгиб изотропной равномерно загруженной прямоугольной пластины, шарнирно закрепленной по краям .....	49
Пример 4 Анализ влияния густоты сетки на точность решения задачи .....	52
6.3 Малоцикловая усталость .....	53
6.4 Потеря устойчивости.....	54
<b>7 УСТАЛОСТЬ.....</b>	<b>57</b>
<b>8 ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВТОРОЙ ГРУППЫ.....</b>	<b>59</b>
8.1 Общие положения .....	59
8.2 Предельные состояния по эксплуатационной пригодности для зданий.....	59
8.3 Прогибы из плоскости.....	60
Пример 5 Продолжение расчета Примера 3 из Раздела 6. ....	61

8.4 Зыбкость.....	62
<b>Приложение А (информационное) Типы расчетов пластин.....</b>	<b>63</b>
Пример 6 Упругий линейный расчет изотропной пластины, шарнирно закрепленной по краям, с использованием приведенного дифференциального уравнения для изгибаемых пластин.....	63
Пример 7 Упругий линейный расчет изотропной пластины, шарнирно закрепленной по двум краям и жестко защемленной по двум другим, с использованием приведенного дифференциального уравнения для изгибаемых пластин .....	67
Пример 8 Нелинейный расчет численными методами: изгиб изотропной равномерно загруженной прямоугольной пластины, шарнирно закрепленной по краям .....	72
<b>Приложение В (информационное) Напряженное состояние свободно опертых пластин по теории малых перемещении .....</b>	<b>76</b>
<b>Приложение С (информационное) Напряженное состояние свободно опертых пластин по теории больших перемещений .....</b>	<b>81</b>
<b>Приложение Д (информационное) Инспекция (контроль качества) строительства (см. В5 EN0) .....</b>	<b>94</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Стратегической целью реформы системы технического регулирования, изложенной в Концепции реформирования системы технического регулирования строительной отрасли Республики Казахстан на 2010-2014 годы, является создание благоприятных условий для формирования в Республике Казахстан устойчивой высокой культуры строительства, которая является характерной чертой и показателем развитого общества.

Основным требованием к реформе является приведение строительного законодательства и нормативных технических документов в области технического регулирования в соответствие с зарубежными аналогами, применяющимися в экономически развитых странах.

Государственные нормативы в области архитектуры градостроительства и строительства Республики Казахстан должны быть усовершенствованы в соответствии с основами правового регулирования архитектурной, градостроительной и строительной деятельности, законодательством и структурой управления на базе действующих в переходный период в Казахстане, а также международных нормативных правовых актов, нормативно-технических документов и иных обязательных и рекомендуемых требований, условий и ограничений.

Главная направленность государственных нормативов – обеспечение охраняемых законом потребностей граждан и общества в создании благоприятной и экологически безопасной среды обитания и жизнедеятельности при осуществлении архитектурной, градостроительной и строительной деятельности, защита прав потребителей проектной и строительной продукции, обеспечение надежности и безопасности строительства, устойчивого функционирования построенных объектов при эксплуатации.

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ НОРМАТИВТІК-ТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРАЛЫ  
НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ РЕСПУБЛИКИ КАЗАКСТАН**

---

**БОЛАТ КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЖОБАЛАУ.  
1-10 бөлімі. Көлденең жүктемелердің әсері кезіндегі жазықтабақ  
конструкцияларының беріктігі**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.  
Часть 1-10. Прочность плоских листовых конструкций при действии поперечных  
нагрузок**

---

Дата введения 2015-07-01

**1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

**1.1 Область применения**

**1.1.1 Общие сведения**

1.1.1.1 Комплекс нормативно-технических пособий к строительным нормам Республики Казахстан, идентичных Еврокоду 3 (далее НТП к СН РК EN 1993) - это перечень нормативных документов, в которых даны:

- а) рекомендации по основным положениям расчета и конструирования стальных конструкций по СН РК EN 1993;
- б) разъяснения ссылочной информации;
- в) численные примеры расчета;
- г) дополнительная справочная информация.

1.1.1.2 Основополагающими документами при разработке комплекса нормативно-технических пособий к СН РК EN 1993, помимо самих 20 частей СН РК EN 1993 «Проектирование стальных конструкций», являются:

- а) СН РК EN 1990 «Основы проектирования несущих конструкций»;
- б) СН РК EN 1991 «Воздействия на конструкции»;
- в) EN 1090 «Изготовление стальных и алюминиевых конструкций».

**1.1.2 Область применения нормативно-технических пособий к СН РК EN 1993**

1.2.1.1 НТП к СН РК EN 1993 применяется для расчета и конструирования стальных конструкций зданий и сооружений гражданского назначения, выполненного согласно СН РК EN 1993.

1.1.2.2 Положения НТП к СН РК EN 1993 охватывают только требования по несущей способности, эксплуатационной пригодности, долговечности и огнестойкости стальных конструкций. Другие требования не отражены в НТП к СН РК EN 1993.

1.1.2.3 НТП к СН РК EN 1993 необходимо использовать совместно со следующими нормативными документами:

- а) НТП к СН РК EN 1990;

б) НТП к СН РК EN 1991;

в) НТП к СН РК EN 1992 - СН РК EN 1999, в тех частях, которые непосредственно затрагивают расчет стальных конструкций или их элементов;

г) стандарты EN, ETAG, ETA и другие соответствующие стандарты на строительные изделия, относящиеся к стальным конструкциям.

1.1.2.4 Комплекс нормативно-технических пособий к СН РК EN состоит из 19 пособий:

- НТП к СН РК EN 1993-1 «Проектирование стальных конструкций. Общие правила» (12 пособий);

- НТП к СН РК EN 1993-2 «Проектирование стальных конструкций. Стальные мосты» (1 пособие);

- НТП к СН РК EN 1993-3 – «Проектирование стальных конструкций. Стальные башни, мачты и дымовые трубы» (1 пособие);

- НТП к СН РК EN 1993-4 «Проектирование стальных конструкций. Стальные бункера, резервуары и трубопроводы» (3 пособия);

- НТП к СН РК EN 1993-5 «Проектирование стальных конструкций. Стальные шпунты» (1 пособие);

- НТП к СН РК EN 1993-6 «Проектирование стальных конструкций. Стальные подкрановые пути» (1 пособие).

1.1.2.5 В НТП к СН РК EN 1993-1 приведены общие рекомендации и указания по проектированию стальных конструкций, которые распространяются на НТП к СП РК EN 1993, имеющие отношение к специальным зданиям и сооружениям: НТП к СН РК EN 1993-2, НТП к СН РК EN 1993, НТП к СН РК EN 1993-4, НТП к СН РК EN 1993-5, НТП к СН РК EN 1993-6.

1.1.2.6 НТП к СН РК EN 1993-1 состоит из 12 пособий:

- НТП к СН РК EN 1993-1-1;

- НТП к СН РК EN 1993-1-2;

- НТП к СН РК EN 1993-1-3;

- НТП к СН РК EN 1993-1-4;

- НТП к СН РК EN 1993-1-5;

- НТП к СН РК EN 1993-1-6;

- НТП к СН РК EN 1993-1-7;

- НТП к СН РК EN 1993-1-8;

- НТП к СН РК EN 1993-1-9;

- НТП к СН РК EN 1993-1-10;

- НТП к СН РК EN 1993-1-11;

- НТП к СН РК EN 1993-1-12.

### **1.1.3 Область применения нормативно-технических пособий к СН РК EN 1993-1-7**

1.1.3.1 В настоящем нормативно-техническом пособии приведены правила проектирования свободно опертых или подкрепленных пластин, представляющих собою либо отдельные пластины, либо части плоских листовых конструкций, испытывающих воздействие поперечных нагрузок.

1.1.3.2 Настоящее пособие состоит из 8 разделов:

Раздел 1: Общие положения;

Раздел 2: Основы проектирования;

Раздел 3: Свойства материалов;

Раздел 4: Долговечность;

Раздел 5: Статический расчет;

Раздел 6: Предельные состояния первой группы;

Раздел 7: Усталость;

Раздел 8: Предельные состояния второй группы.

1.1.3.3 Разделы с 1 по 8 настоящего пособия повторяют структуру норматива СН РК EN 1993.

В них даются разъяснения по разделам и пунктам СН РК EN 1993-1-7. В настоящем пособии номера пунктов к СН РК EN 1993 приведены в скобках.

1.1.3.3.1 Раздел 1 содержит общие положения по проектированию;

1.1.3.3.2 В Разделе 2 приведены основные принципы проектирования листовых конструкций, испытывающих поперечные нагрузки;

1.1.3.3.3 В Разделе 3 рассмотрены свойства материалов для листовых конструкций;

1.1.3.3.4 Требования по обеспечению долговечности листовых конструкций, при воздействии поперечных нагрузок приведены в Разделе 4;

1.1.3.3.5 В Разделе 5 приведены методы статического расчета листов, нагруженных поперечными нагрузками;

1.1.3.3.6 Раздел 6 рассматривает особенности предельных состояний первой группы, включая малоцикловую усталость и потерю устойчивости;

1.1.3.3.7 В Разделе 7 рассмотрено явление усталости плоских листов, подверженных поперечным нагрузкам;

1.1.3.3.8 Раздел 8 дает принципы обеспечения предельных состояний второй группы: по эксплуатационной пригодности, обеспечения жесткости из плоскости листа, зыбкости конструкций.

## **1.2. Нормативные ссылки**

1.2.1. В настоящем пособии ссылки на части СН РК EN 1990 - СН РК EN 1999 (основные ссылки):

- СН РК EN 1990;
- СН РК EN 1991;
- СН РК EN 1992;
- СН РК EN 1993;
- СН РК EN 1994;
- СН РК EN 1995;
- СН РК EN 1996;
- СН РК EN 1997;
- СН РК EN 1998;
- СН РК EN 1999.



1.2.2. В настоящем пособии приведены ссылки на стандарты (вторичные ссылки):

- ISO 2394;
- ISO 3898;
- ISO 8930;
- ISO 8402;
- ISO 6707-1.

### **1.3 Условия применения**

При применении настоящего пособия необходимо учитывать общие требования СН РК EN 1990. Кроме того, все положения настоящего пособия предполагают, что изготовление и сборка стальных конструкций выполнены согласно EN 1090.

### **1.4 Различия между принципами и правилами проектирования**

1.4.1 Различия между принципами и правилами проектирования в настоящем пособии базируются на положениях СН РК EN 1990, где приведены различия между принципами и правилами проектирования конструкций.

1.4.2 Принципы - это такие требования, невыполнение которых не допустимо (если не указано другое).

1.4.3 Правила применения - общепринятые правила, дополняющие и поясняющие принципы.

### **1.5 Термины и определения**

1.5.1 В настоящем пособии используются термины и определения в соответствии:

- с Пунктом 1.5 СН РК EN 1990;
- с Пунктом 1.5 (1) СН РК EN 1993-1-1;
- с Пунктом 1.3 СН РК EN 1993-1-3;
- с Пунктом 1.3 СН РК EN 1993-1-5;
- с Пунктом 1.4 СН РК EN 1993-1-8,

которые необходимы при проектировании листовых конструкций, испытывающих воздействие поперечных нагрузок (из плоскости листа).

1.5.2 Термины и определения, касающиеся термообработки металла – см. EN 10052

### **1.6 Обозначения**

1.6.1 В настоящем пособии используются обозначения символов в соответствии:

- с Пунктом 1.6 СН РК EN 1990;
- с Пунктом 1.6 СН РК EN 1993-1-1;
- с Пунктом 1.4 СН РК EN 1993-1-3;
- с Пунктом 1.4 СН РК EN 1993-1-5;
- с Пунктом 1.5 СН РК EN 1993-1-8,

которые необходимы при проектировании листовых конструкций, испытывающих воздействие поперечных нагрузок (из плоскости листа).

1.6.2 В дополнение к обозначению символов, перечисленных в пункте 1.6.1 настоящего пособия, используются символы согласно пункту 1.8 СН РК EN 1993-1-7.

### **1.7 Условные обозначения осей элементов**

В настоящем пособии используются аналогичное с СН РК EN 1993-1-1, СН РК EN 1993-1-3, СН РК EN 1993-1-5 и СН РК EN 1993-1-8 обозначение осей элемента.

## **2 ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

### **2.1 Требования**

2.1.1.Р Основные требования проектирования должны соответствовать EN 1990.

2.1.2.Р Следующие предельные состояния первой группы должны быть проверены при проектировании плоских листовых конструкций:

- пластическое разрушение, см. 2.2.2;
- малоцикловая усталость, см. 2.2.3;
- потеря устойчивости, см. 2.2.4;
- усталость, см. 2.2.5.

3) Проектирование плоских листовых конструкций должно удовлетворять требованиям по несущей способности, установленным в соответствующих нормативах.

### **2.2 Принципы расчета по предельным состояниям**

#### **2.2.1 Общие положения**

2.2.1.1.Р Принципы расчета по предельным состояниям, приведенные в Разделе 2 СН РК EN 1993-1-1 и в СН РК EN 1993-1-6, должны также применяться к плоским листовым конструкциям.

#### **2.2.2 Пластическое разрушение**

2.2.2.1 Пластическое разрушение — это состояние, при котором часть конструкции претерпевает чрезмерные пластические деформации, связанные с развитием пластического механизма. Нагрузка, вызывающая пластическое разрушение, обычно определяется равновесием механизма, основанным на теории малых деформаций.

#### **2.2.3 Малоцикловая усталость**

2.2.3.1 Малоцикловая усталость должна рассматриваться как предельное состояние для повторяющихся циклов нагрузки и разгрузки, которые вызывают текучесть при

растяжении или сжатии или при том и другом действии, тем самым вызывая повторяющийся процесс пластической работы конструкции. Такая переменная текучесть может привести к местному трещинообразованию в результате уменьшения способности материала поглощать энергию, что и является ограничением малоциклового усталостной прочности. Напряжения, которые связаны с этим предельным состоянием, возникают при комбинации всех воздействий на конструкцию и условий совместности ее деформирования.

#### **2.2.4 Потеря устойчивости**

2.2.4.1 Потерю устойчивости следует рассматривать как состояние, при котором вся конструкция или ее часть получают большие перемещения, вызванные неустойчивым состоянием, под воздействием сжимающих и/или касательных напряжений в пластине. Это приводит в конечном итоге к неспособности элементом воспринимать приращение нагрузки.

2.2.4.2 Местную потерю устойчивости см. СН РК EN 1993-1-5.

2.2.4.3 Устойчивость искривленных, нагруженных кручением и деформированных элементов жесткости см. СН РК EN 1993-1-5.

#### **2.2.5 Усталость**

2.2.5.1 Усталость следует рассматривать как предельное состояние, вызванное появлением и/или ростом трещин при циклически изменяющихся напряжениях.

### **2.3 Воздействия**

2.3.1 Расчетные значение  $F_d$  воздействия  $F$  определяется следующим образом:

$$F_d = \gamma_f F_{rep},$$

Причем

$$F_{rep} = \psi F_k$$

$F_k$  - нормативное (базовое) значение воздействия;

$F_{rep}$  - репрезентативное значение воздействия;

$\gamma_f$  - коэффициент надежности по нагрузке, который учитывает возможность неблагоприятных отклонений воздействия от его репрезентативных значений.

$\psi$  - или 1,00 или  $\psi_0$ ,  $\psi_1$  или  $\psi_2$ .

### **2.4 Расчет на основе испытаний**

#### **2.4.1 Область и пределы применения**

2.4.1.1 Настоящее приложение не заменяет существующие правила сдачи-приемки, установленные в других европейских стандартах на изделия и производство работ.

#### 2.4.2 Символы и условные обозначения

В настоящем приложении действуют следующие символы и условные обозначения:

##### Прописные буквы латинского алфавита

$E(.)$	— среднее значение $(.)$ ;
$V$	— коэффициент вариации [ $V = (\text{стандартное отклонение}/\text{среднее значение})$ ];
$V_X$	— коэффициент вариации для $X$ ;
$V_\delta$	— оценочное значение коэффициента вариации для меры рассеяния $\delta$ ;
$X$	— ряд базисных переменных $j$ $X_1 \dots X_j$ ;
$X_{k(n)}$	— нормативное значение с учетом статистической погрешности из-за числа проб $n$ , но без учета коэффициентов пересчета $\eta$ ;
$\underline{X}_m$	— ряд средних значений базисных переменных;
$\underline{X}_n$	— ряд номинальных значений базисных переменных.

##### Строчные буквы латинского алфавита

$b$	— поправка среднего значения;
$b_i$	— коэффициент поправки для каждого испытания $i$ ;
	— функция сопротивления (базисной переменной $\underline{X}$ ), которая представляет
$g_{\pi}(\underline{X})$	модель расчета;
$k_{d,n}$	— коэффициент фрактиля для расчетных значений;
$k_n$	— коэффициент фрактиля для нормативных значений;
$m_X$	— среднее значение показателя $n$ проб;
$n$	— количество экспериментальных и численных результатов теста;
$r$	— значение функции сопротивления;
$r_d$	— расчетное значение функции сопротивления;
$r_e$	— среднее значение экспериментальных значений сопротивления;
$r_{ee}$	— экстремальное значение (максимум или минимум) экспериментальных значений сопротивления [т. е. значение $r_e$ , которое больше всего отклоняется от среднего значения];
$r_{ei}$	— экспериментальное значение сопротивления для каждого испытания $i$ ;
$r_{em}$	— среднее значение экспериментальных значений сопротивления;
$r_k$	— нормативное значение функции сопротивления;
$r_m$	— значение функции сопротивления, рассчитанное по средним значениям базисной переменной;
$r_n$	— номинальное значение функции сопротивления;
$r_t$	— теоретическая функция сопротивления равнозначная $g_{\pi}(\underline{X})$ ;
$r_{ti}$	— значения теоретической функции сопротивления при использовании измеренных параметров $\underline{X}$ для каждого испытания $i$ ;
$s$	— оценочное значение для стандартного отклонения $\sigma$ ;
$s_\Delta$	— оценочное значение для $\sigma_\Delta$ ;

$s\delta$  — оценочное значение для  $\sigma\delta$ .

### Прописные буквы греческого алфавита

$\Phi$  — кумулятивная функция стандартного нормального распределения;

$\Delta$  — логарифм меры рассеяния  $\delta$ ,  $[\Delta_i = \ln(\delta_i)]$ ;

$\bar{\Delta}$  — оценочное значение для  $E(\Delta)$ .

### Строчные буквы греческого алфавита

$\alpha_E$  — средневзвешенный коэффициент для влияния воздействий по методу надежности 1 порядка FORM;

$\alpha_R$  — средневзвешенный коэффициент для сопротивления по методу надежности 1 порядка FORM;

$\beta$  — индекс надежности;

$\gamma_M^*$  — скорректированный частный коэффициент безопасности для сопротивления,  $\left[ \gamma_M^* = \frac{r_n}{r_d} \text{ или } \gamma_M^* = k_c \gamma_M \right]$ ;

$\delta$  — мера рассеяния;

$\delta_i$  — мера рассеяния для пробы  $i$ ,  $\left[ \delta_i = \frac{r_{ei}}{br_{ii}} \right]$ ;

$\eta_d$  — расчетное значение коэффициента пересчета;

$\eta_k$  — фактор снижения для учета предварительной информации;

$\sigma$  — стандартное отклонение  $\left[ \sigma = \sqrt{\text{рассеяние}} \right]$ ;

$\sigma\Delta^2$  — рассеяние для выражения  $\Delta$ .

## 2.4.3 Различные виды испытаний

### 2.4.3.1 Необходимо различать следующие виды испытаний:

а) испытания по непосредственному определению несущей способности или эксплуатационной пригодности несущих конструкций или их элементов для определенных условий нагрузок. Такие испытания могут, например, проводиться для пожарной нагрузки, нагрузок, приводящих к явлениям усталости, или нагрузок от ударов;

б) испытания по установлению показателей строительных материалов при определенных испытательных условиях, например, исследования грунта на строительной площадке или в лаборатории или испытания с новыми строительными материалами;

с) испытания по уменьшению погрешностей при воздействиях или при вызванных ими влияниях, например, аэродинамические испытания или испытания по определению волновых нагрузок или нагрузок от потоков;

д) испытания по уменьшению погрешностей определенных величин моделей сопротивления, например, испытания элементов конструкции или испытания групп элементов конструкции (например, конструкции кровель и перекрытий);

е) контрольные испытания по проверке качества поставляемых изделий или соответствия показателей изделий, например, испытание канатов для мостов или испытание бетонных кубиков;

f) испытания во время производства работ для подтверждения показателей после монтажа, например, испытание опор или испытание усилия канатов во время производства работ;

g) контрольные испытания для более точного определения показателей несущей конструкции или ее частей после изготовления, например, для определения упругой деформации, собственных колебаний или амортизации;

2.4.3.2 При необходимости определения расчетных значений по результатам испытаний а), b), c) или d) следует применять статистические методы, см. 2.4.5 – 2.4.8.

ПРИМЕЧАНИЕ При проведении испытаний c) могут потребоваться специальные методы.

2.4.3.3 Виды испытаний e), f) или g) можно рассматривать как приемочные испытания, если первоначальный расчет проводится с некоторыми допущениями, которые в последующем должны быть подтверждены испытаниями.

#### **2.4.4 План испытаний**

2.4.4.1 До проведения испытаний следует провести согласование плана испытаний с испытательным органом. План должен содержать цели испытаний и все требования по выбору и изготовлению испытываемых образцов, по проведению и оценке испытаний. В частности план должен содержать:

- цель испытаний;
- прогноз результатов испытаний;
- требования к испытываемым образцам и пробам;
- условия нагружения;
- перечень испытательного оборудования и порядок проведения испытаний;
- план измерений;
- обработку результатов и составление протоколов.

2.4.4.2 Следует четко определить цели испытаний, например, требуемые показатели, влияние определенных параметров, изменяемых в течение испытаний. Следует определить границы возможностей испытаний и требуемые функции передачи нагрузок по принятым моделям.

2.4.4.3 Следует учесть все показатели и обстоятельства, которые могут влиять на прогноз результатов испытаний, например:

- геометрические параметры и их изменение;
- геометрические дефекты;
- показатели строительных материалов;
- влияние методов изготовления и строительства;
- влияние условий окружающей среды и выбора оптимальной последовательности.

Следует описать ожидаемые виды отказа и расчетные модели в сочетании с величинами воздействия. При неопределенности вида отказа план испытаний должен предусматривать предварительные испытания.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Следует проверить возможность различных видов отказа элемента конструкции.

2.4.4.4 Испытываемые образцы следует устанавливать и отбирать таким образом, чтобы они передавали условия строительства. При этом необходимо учитывать следующее:

- размеры и допуски;
- строительные материалы и изготовление прототипов;
- количество испытываемых образцов;
- методы отбора проб;
- способы фиксации и заделки образцов.

Целью метода отбора должно быть получение статистически характерных проб.

Следует иметь в виду возможные различия между испытываемыми образцами и совокупностью элементов конструкции, которые могут повлиять на результаты.

2.4.4.5 Условия нагружения и условия окружающей среды должны включать:

- начало нагрузки;
- нагрузочную и временную характеристику;
- способы фиксации и заделки;
- температуру;
- относительную влажность;
- деформационную или регулируемую по силе нагрузку и т. д.

Последовательность нагружения следует устанавливать таким образом, чтобы она соответствовала предусмотренной нагрузке элемента конструкции, как при нормальных, так и при тяжелых условиях. Следует принимать во внимание возможные взаимосвязи между поведением элемента конструкции и испытательной установкой.

Если поведение элемента конструкции зависит от изменения одного или нескольких воздействий, которые не меняются в испытании, то следует применять характерные значения этих воздействий.

2.4.4.6 Для обеспечения необходимого качества результатов испытаний требуются соответствующее испытательное оборудование и методы измерений.

2.4.4.7 До проведения испытания следует перечислить все показатели, которые должны быть измерены на различных испытываемых образцах. Для этого следует указать:

- а) места измерений;
- б) методы измерений, например:
  - временных характеристик смещений;
  - скоростей смещений;
  - колебаний;
  - удлинений;
  - частоту колебаний;
  - точность измерений;
  - соответствующие измерительные приборы.

2.4.4.8 Особые указания содержатся в 2.4.5 – 2.4.8. Стандарты на испытания и контроль, по которым должны проводиться испытания, необходимо указывать.

## **2.4.5 Получение расчетных значений**

2.4.5.1 Получение расчетных значений для показателей строительных материалов, параметров модели или сопротивлений элементов конструкции по результатам испытаний должно осуществляться следующим образом:

а) посредством определения нормативного значения, которое следует разделить на частный коэффициент безопасности и, возможно, умножить на коэффициент передачи (см. 2.4.7.3 и 2.4.8.3);

б) посредством прямого определения расчетного значения с учетом функции передачи и требуемой надежности (см. 2.4.7.3 и 2.4.8.3).

ПРИМЕЧАНИЕ Как правило, предпочтителен метод а), если частный коэффициент безопасности задается расчетным методом (см. п.2.4.5.3 ниже).

2.4.5.2 При определении нормативного значения по результатам испытаний (метод а)) следует учитывать:

- а) рассеяние результатов испытаний;
- б) статистическую погрешность в результате ограниченного числа испытаний;
- с) статистическую предварительную информацию.

2.4.5.3 При наличии достаточной достоверности между результатами испытаний и расчетами, проводимыми с применением частных коэффициентов безопасности, для нормативного значения следует применять частный коэффициент безопасности соответствующего Еврокода.

2.4.5.4 Если сопротивление строения или элемента конструкции или прочность зависит от воздействий, недостаточно учитываемых при испытаниях, например:

- временные или длительные воздействия;
  - масштаб и величина воздействий;
  - различные условия окружающей среды и приложения нагрузок, граничные условия;
  - воздействия сопротивлений элементов конструкции,
- то эти воздействия необходимо учитывать в расчетных моделях.

2.4.5.5 Если в особых случаях для определения расчетных значений используется метод из 2.4.5.1.б), следует учитывать:

- определяющие предельные состояния;
- требуемый уровень надежности;
- совместимость с допущениями в выражении (С.8а) EN 1990 на стороне воздействия;
- при необходимости, требуемый срок эксплуатации;
- предварительную информацию аналогичных случаев.

ПРИМЕЧАНИЕ Дальнейшие указания см. в 2.4.6, 2.4.7 и 2.4.8.

## **2.4.6 Общие принципы статистической оценки**

2.4.6.1 При обработке результатов испытаний сначала следует сравнить поведение и виды отказа с прогнозируемыми. Если возникают значительные различия, то их необходимо обосновать; это может привести к дополнительным испытаниям, при необходимости — с отклоняющимися условиями, или к изменениям теоретической модели.



2.4.6.2 Обработка результатов испытаний должна производиться статистическими методами при использовании информации о функциях распределения и ее параметров. Методы в настоящем приложении допускается применять при условии распространения статистических данных (включая предварительную информацию) на определенные основные совокупности, являющиеся достаточно однородными, и наличия достаточного количества результатов измерений.

**ПРИМЕЧАНИЕ** При анализе результатов испытаний следует различать следующие три основные категории:

— классическая — статистическая оценка невозможна при проведении только одного испытания или только отдельных испытаний. Только наличие обширной предварительной информации и вариантов объединения этой предварительной информации с результатами испытаний дают возможность сделать статистический вывод (метод Байша, см. ИСО 12491);

— приложение сил и нагрузок;

— классическая — статистическая оценка может быть возможна при наличии большой серии испытаний по определению отдельного параметра. Обычные случаи рассматриваются, например, для данной оценки требуется также наличие предварительной информации о параметре, но в меньшем объеме, чем указано выше;

— классическая — статистическая оценка возможна при проведении серии испытаний с целью проверки расчетной модели (в форме функции) с применением одной или нескольких величин воздействия.

2.4.6.3 Результаты обработки испытаний распространяются только на условия испытаний и условия нагружения. При переносе результатов испытаний на другие условия и нагрузки необходимо использовать предварительную информацию прежних испытаний или полученную теоретически.

## **2.4.7 Статистическое определение отдельного показателя**

### **2.4.7.1 Общие положения**

2.4.7.1.1 В настоящем разделе приведены способы получения расчетных значений для отдельного показателя на основании испытаний видов а) и б) в 2.4.3.1 (например, прочность) при применении методов оценки а) и б) 2.4.5.1.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Указанные здесь функции, в которых используют метод Байша с «неконкретными» предварительными распределениями, приводят примерно к таким же результатам, как и классические методы с уровнем достоверности 75 %.

2.4.7.1.2 Отдельный показатель может заключаться в:

а) сопротивлении  $R$  изделия;

б) показателе  $X$ , способствующем сопротивлению  $R$  изделия.

3) В случае а) можно применять методы в 2.4.7.2 и 2.4.7.3, чтобы непосредственно определить нормативные значения  $R_k$ , расчетные значения  $R_d$  или частные коэффициенты безопасности  $\gamma_m$ .

2.4.7.1.4 В случае б) необходимо учитывать, что расчетное значение сопротивления  $R_d$

может включать:

- действия других показателей  $X$ ;
- погрешность модели;
- другие эффекты (масштаб, объем и т. д.).

2.4.7.1.5 Таблицы и выражения в 2.4.7.2 и 2.4.7.3 основываются на следующих допущениях:

- положенное в их основу распределение представляет собой нормальное распределение или логарифмически-нормальное распределение;
- отсутствие предварительной информации о среднем значении;
- в случае « $V_X$  неизвестно» — отсутствие предварительной информации о коэффициентах вариации;
- в случае « $V_X$  известно» — наличие полной предварительной информации о коэффициентах вариации.

**ПРИМЕЧАНИЕ** При применении логарифмически-нормальных распределений исключаются возможные отрицательные значения, например, размеров или прочности.

На практике рекомендуется использовать случай « $V_X$  известно» в сочетании с верхним оценочным значением  $V_X$  вместо случая « $V_X$  неизвестно». Кроме того, если  $V_X$  неизвестно, следует принимать, минимум, 0,10.

#### **2.4.7.2 Определение значения измеряемого показателя через характерное значение**

2.4.7.2.1 Расчетное значение  $X_d$  определяется следующим образом по (D.1) EN 1990:

$$X_d = \eta_d \cdot \frac{X_{k(n)}}{\gamma_m} = \frac{\eta_d}{\gamma_m} \cdot m_X \{1 - k_n V_X\}.$$

**ПРИМЕЧАНИЕ** Определение коэффициента пересчета  $\eta_d$  в значительной мере зависит от вида испытаний и строительного материала.

Значение  $k_n$  указано в Таблице 2.1.

2.4.7.2.2 При применении Таблицы 2.1 следует учитывать следующее:

- выражение « $V_X$  известно» следует применять, если коэффициент вариации или верхнее оценочное значение известно из предварительной информации.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Предварительная информация исходит из оценки предыдущих сравнимых испытаний, причем сравнимость подлежит инженерной оценке (см. 2.4.7.1.3);

- выражение « $V_X$  неизвестно» следует применять, если коэффициент вариации из предварительной информации неизвестен и определяется по результатам испытаний с применением Формул (D.2) и (D.3) EN 1990:

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \cdot (x_i - m_x)^2,$$

$$V_X = s_x / m_x.$$

2.4.7.2.3 Частный коэффициент безопасности  $\gamma_m$  следует устанавливать в зависимости от области применения, на которую распространяются испытания.

### 2.4.7.3 Прямое определение расчетного значения для подтверждения несущей способности

2.4.7.3.1 Расчетное значение  $X_d$  величины  $X$  следует определять по Формуле EN 1990:

$$X_d = \eta_d X_{od} = \eta_d m_X \{1 - k_n V_X\}.$$

Значение  $\eta_d$  должно охватывать все погрешности, которые не охватываются самими испытаниями.

2.4.7.3.2 Значение  $k_{d,n}$  следует определять по Таблице 2.2.

**Таблица 2.1 — Значения  $k_n$  для нормативных значений (5 %-ный фактиль)**

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$V_X$ известно	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,6	1,67	1,64
$V_X$ неизвестно	—	—	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Данная таблица основывается на нормальном распределении.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 При применении логарифмически-нормального распределения выражение (D.1) EN 1990 имеет вид:

$$X_d = \frac{\eta_d}{\gamma_m} \cdot \exp[m_y - k_n s_y],$$

причем

$$m_y = \frac{1}{n} \sum \ln(x_i).$$

Если  $V_X$  известно из предварительной информации,

$$s_y = \sqrt{\ln(V_X^2 + 1)} \approx V_X.$$

Если  $V_X$  неизвестно из предварительной информации,

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\ln x_i - m_y)^2}.$$

**Таблица 2.2 — Значения  $k_{d,n}$  для расчетного значения для подтверждений несущей способности**

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$V_X$ известно	4,36	3,77	3,56	3,4	3,37	3,33	3,27	3,23	3,16	3,13	3,04
$V_X$ неизвестно	—	—	—	11,	7,85	6,36	5,0	4,51	3,64	3,44	3,04

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Данная таблица основана на допущении, что расчетное значение соответствует произведению  $\alpha_R \beta = 0,8 \cdot 3,8 = 3,04$  (см. Приложение С EN 1990) и  $X$  нормально распределено. Вероятность ошибки составляет примерно 0,1 %.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 При логарифмически-нормальном распределении выражение (D.4) EN 1990 преобразовывается в следующую зависимость:

$$X_d = \eta_d \exp[m_y - k_{d,n} s_y].$$

## 2.4.8 Статистическое определение модели сопротивления

### 2.4.8.1 Общие положения

2.4.8.1.1 В настоящем разделе приведены методы проверки моделей сопротивления и определения расчетных значений на основании результатов испытаний вида d) (см. 2.4.3.1). С этой целью используется предварительная информация (варианты).

2.4.8.1.2 На основании испытаний или теоретических разработок необходимо создать «расчетную модель»  $g_n(X)$ , которая приводит к функции сопротивления  $r_t$ . Действенность данной модели следует проверить при помощи статистической оценки всех имеющихся результатов испытаний. При необходимости, расчетную модель следует усовершенствовать до получения достаточной корреляции между теоретическими значениями и результатами испытаний.

2.4.8.1.3 Рассеяние прогноза при помощи расчетной модели (т. е. вариацию «значения рассеяния  $\delta$ ») следует определять посредством испытаний. Данное рассеяние необходимо комбинировать с рассеянием других величин воздействия в функции сопротивления. Рассеяние других величин воздействия включает:

- рассеяние прочности и жесткости строительного материала;
- рассеяние геометрических показателей.

2.4.8.1.4 Нормативное сопротивление определяется с учетом рассеяния всех величин воздействия.

2.4.8.1.5 Два различных метода определения расчетных значений 2.4.5.1 соответствуют методам оценки 2.4.8.2 и 2.4.8.3. Для этого в 2.4.8.4 указываются некоторые упрощения.

Данные методы указываются в форме отдельных этапов и в сочетании с допущениями по основной совокупности с пояснениями. Допущения представляют лишь рекомендации для обычных случаев испытаний.

## 2.4.8.2 Стандартизированный метод оценки (метод а))

### 2.4.8.2.1 Общие положения

2.4.8.2.1.1 Для стандартизированного метода оценки действуют следующие допущения:

- а) функция сопротивления — это функция независимых переменных  $\underline{X}$ ;
- б) наличие достаточного количества результатов испытаний;
- с) все основные величины являются установленными значениями;
- д) отсутствие корреляции (статистической зависимости) между переменными в функции сопротивления;
- е) все переменные соответствуют нормальному или логарифмически-нормальному распределению.

ПРИМЕЧАНИЕ Применение логарифмически-нормального распределения для всех переменных имеет то преимущество, что не возникает отрицательных значений.

2.4.8.2.1.2 Стандартизированный способ метода 2.4.5.1.а) состоит из семи этапов, которые изложены в 2.4.8.2.2.1 – 2.4.8.2.2.7.

### 2.4.8.2.2 Стандартизированный способ

#### 2.4.8.2.2.1 Этап 1: Разработка расчетной модели

2.4.8.2.2.1.1 Для конструкции или элемента конструкции следует разработать расчетную модель в форме теоретической функции сопротивления  $r_t$ , которая выражается (D.5) EN 1990:

$$r_t = g_{rt}(\underline{X}).$$

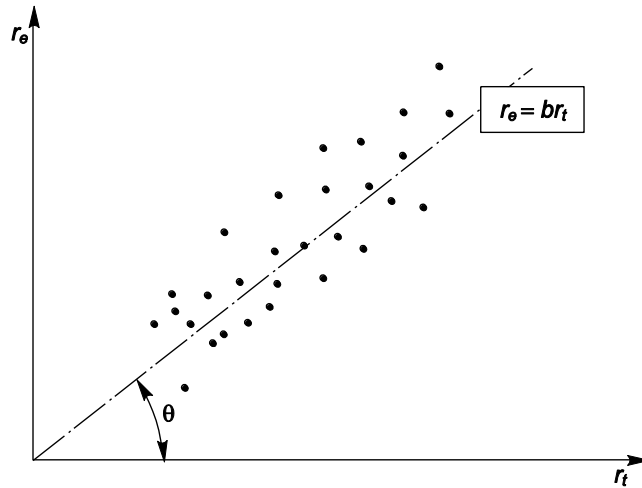
2.4.8.2.2.1.2 Функция сопротивления должна содержать все определяющие основные базисные переменные  $\underline{X}$ , которые оказывают воздействие на рассматриваемое предельное состояние.

2.4.8.2.2.1.3 Для каждого испытываемого образца следует измерить все базисные переменные (допущение с) в 2.4.8.2.1, необходимые для оценки.

#### 2.4.8.2.2.2 Этап 2: Сравнение экспериментальных и теоретических значений

2.4.8.2.2.2.1 Применяя в функции сопротивления действительные измеренные значения показателей, следует определить теоретические значения  $r_{ti}$ , при помощи которых проводится сравнение с экспериментальными значениями  $r_{ei}$ .

2.4.8.2.2.2.2 Точки, представляющие пары значений  $(r_{ti}, r_{ei})$ , необходимо представить на диаграмме, как показано на Рисунке 2.1.

Рисунок 2.1 — Диаграмма  $r_e - r_t$ 

2.4.8.2.2.3 Если бы функция сопротивления была точной и полной, тогда все точки находились бы на биссектрисе. На практике возникают рассеяния. Каждое систематическое отклонение от биссектрисы должно быть исследовано, чтобы установить, нет ли ошибок при испытаниях или в функции сопротивления.

#### 2.4.8.2.2.3 Этап 3: Определение поправки среднего значения $b$

2.4.8.2.2.3.1 Функция сопротивления  $r$  дана в вероятностной форме (D.6) EN 1990:

$$r = b r_t \delta,$$

где  $b$  — отклонение среднего значения, определенное при помощи минимума квадратов отклонения по (D.7) EN 1990:

$$b = \frac{\sum r_e r_t}{\sum r_t^2}.$$

2.4.8.2.2.3.2 Значения теоретической функции сопротивления  $r_m$ , рассчитанные со средними значениями базисных переменных  $\underline{X}_m$ , можно определить по формуле (D.8) EN 1990

$$r_m = b r_t(\underline{X}_m) = b g_{rt}(\underline{X}_m) \delta.$$

#### 2.4.8.2.2.4 Этап 4: Определение коэффициента вариации величины рассеяния $\delta$

2.4.8.2.2.4.1 Величина рассеяния  $\delta_i$  должна быть определена для каждого испытания по определению сопротивления  $r_{ei}$  при помощи выражения (D.9) EN 1990

$$\delta_i = \frac{r_{ei}}{b r_{ti}}.$$

2.4.8.2.2.4.2 При помощи значений  $\delta_i$  необходимо определить оценочное значение  $V_\delta$ .

$$\Delta_i = \ln(\delta_i).$$

2.4.8.2.2.4.3 Оценочное значение  $\bar{\Delta}$  для  $E(\Delta)$  следует из выражения (D.11) EN 1990

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i.$$

2.4.8.2.2.4.4 Оценочное значение  $s_\Delta^2$  для  $s_\Delta^2$  определяется из выражения (D.12) EN 1990

$$s_{\Delta}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2.$$

2.4.8.2.2.4.5 Полученное значение (D.13) EN 1990

$$V_{\delta} = \sqrt{\exp(s_{\Delta}^2) - 1},$$

допускается применять как коэффициент вариации  $V_{\delta}$  для величины рассеяния  $\delta$ .

#### **2.4.8.2.2.5 Этап 5: Проверка совместимости**

2.4.8.2.2.5.1 Как правило, совместимость допущений, сделанных при составлении функции сопротивления, необходимо проверить при помощи результатов испытаний.

2.4.8.2.2.5.2 Если рассеяние значений  $g_{ei}$  и  $g_{ti}$  слишком большое, чтобы получить эффективные функции сопротивления, рассеяние можно уменьшить следующим образом:

а) улучшением расчетной функции посредством учета дополнительных параметров;

б) изменением  $b$  и  $V_{\delta}$  путем разделения основной совокупности на соответствующие подгруппы, для которых воздействие таких дополнительных параметров остается постоянным.

2.4.8.2.2.5.3 Для того чтобы установить, какой параметр имеет наибольшее воздействие на рассеяние, результаты испытаний можно разбить на подгруппы с учетом данных параметров.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Цель заключается в улучшении функции сопротивления посредством отдельной оценки подгрупп стандартизированным способом. Уменьшению рассеяния в каждой подгруппе может противостоять увеличенная статистическая погрешность из-за уменьшенного числа испытаний.

2.4.8.2.2.5.4 При определении коэффициента фактиля  $k_n$  нормативного значения функции сопротивления (см. этап 7) для всех подгрупп можно применять коэффициент, соответствующий общему количеству результатов испытаний.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Следует обращать внимание на то, что статистическое распределение функции сопротивления может быть бимодальным или мультимодальным. Оно может быть представлено в интересующей области при помощи одномодального нормального распределения.

#### **2.4.8.2.2.6 Этап 6: Определение коэффициентов вариации базисных переменных $V_{xi}$**

2.4.8.2.2.6.1 Если можно доказать, что общий объем испытаний характерен для действительных условий рассеяния, то коэффициенты вариации базисных переменных  $V_{xi}$  можно определить из испытаний. Но поскольку, как правило, этого не случается, коэффициенты вариации  $V_{xi}$  определяются на основании предварительной информации.

#### **2.4.8.2.2.7 Этап 7: Определение нормативного значения $g_k$ функции сопротивления**

2.4.8.2.2.7.1 Если функция сопротивления с базисной переменной  $j$  имеет форму

произведения

$$r = br_t = b\{X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_j\} \delta,$$

тогда среднее значение  $E(r)$  можно определить из выражения (D.14a) EN 1990

$$E(r) = b\{E(X_1) \cdot E(X_2) \cdot \dots \cdot E(X_j)\} = bg_{rt}(\underline{X}_m),$$

а коэффициент вариации — из выражения (D. 14b) EN 1990

$$V_r^2 = (V_\delta^2 + 1) \cdot \left[ \prod_{i=1}^j (V_{X_i}^2 + 1) \right] - 1.$$

2.4.8.2.2.7.2 Для малых значений  $V_\delta^2$  и  $V_{X_i}^2$  допускается использовать следующее приближение (D.15a) EN 1990:

$$V_r^2 = V_\delta^2 + V_{rt}^2,$$

при

$$V_{rt}^2 = \sum_{i=1}^j V_{X_i}^2.$$

2.4.8.2.2.7.3 Если функция сопротивления представляет собой комплексную функцию в виде

$$r = br_t \delta = bg_{rt}\{X_1, \dots, X_j\} \delta,$$

тогда среднее значение  $E(r)$  можно определить из выражения (D. 16a) EN 1990:

$$E(r) = bg_{rt}(E(X_1), \dots, E(X_j)) = bg_{rt}(\underline{X}_m),$$

а коэффициент вариации  $V_{rt}$  — из выражения (D. 16b) EN 1990

$$V_{rt}^2 = \frac{VAR[g_{rt}(\underline{X})]}{g_{rt}^2(\underline{X}_m)} = \frac{1}{g_{rt}^2(\underline{X}_m)} \cdot \sum_{i=1}^j \left( \frac{\partial g_{rt}}{\partial X_i} \cdot \sigma_i \right)^2.$$

2.4.8.2.2.7.4 Если число испытаний ограничено до  $n < 100$ , следует учитывать распределение  $\Delta$  для статистических погрешностей. Распределение должно быть принято как центральное распределение  $t^5$  с параметрами  $\bar{\Delta}$ ,  $V_{\Delta(r)}$  и  $n$ .

2.4.8.2.2.7.5 В данном случае нормативное значение функции сопротивления  $r_k$  определяется по Формуле (D.17) EN 1990:

$$r_k = bg_R(\underline{X}_m) \cdot \exp(-k_\infty \alpha_{rt} Q_{rt} - k_n \alpha_\delta Q_\delta - 0,5 Q^2),$$

где

$$Q_{rt} = \sigma_{\ln(rt)} = \sqrt{\ln(V_{rt}^2 + 1)},$$

$$Q_\delta = \sigma_{\ln(\delta)} = \sqrt{\ln(V_\delta^2 + 1)},$$

$$Q = \sigma_{\ln(r)} = \sqrt{\ln(V_r^2 + 1)},$$

$$\alpha_{rt} = \frac{Q_{rt}}{Q},$$

$$\alpha_\delta = \frac{Q_\delta}{Q},$$

где  $k_n$  — коэффициент фактиля для нормативного значения из Таблицы 2.1 для случая « $V_X$  неизвестно»;

$k_\infty$  — значение коэффициента фактиля  $k_n$  для  $n \rightarrow \infty$  [ $k_\infty = 1,64$ ];

$\alpha_{rt}$  — средневзвешенный коэффициент для  $Q_{rt}$ ;

$\alpha_\delta$  — средневзвешенный коэффициент для  $Q_\delta$ .



ПРИМЕЧАНИЕ Значение  $V_\delta$  определяется для соответствующей серии испытаний.

2.4.8.2.2.7.6 Для большого числа испытаний (например,  $n \geq 100$ ) нормативное значение функции сопротивления  $r_k$  допускается определять по Формуле (D.20) EN 1990:

$$r_k = b_{gr}(\underline{X}_m) \cdot \exp(-k_\infty Q - 0,5Q^2).$$

### 2.4.8.3 Стандартизированный метод оценки (метод b))

2.4.8.3.1 В данном случае применяется такой же способ, как в 2.4.8.2, за исключением того, что в этапе 7 коэффициент фактиля для нормативного значения  $k_n$  заменяется на коэффициент фактиля для расчетного значения  $k_{d,n}$ . Расчетное значение функции сопротивления  $r_d$  соответствует произведению

$$k_{d,\infty} = \alpha_R \beta = 0,8 \cdot 3,8 = 3,04 \text{ (см. Приложение С EN 1990)}.$$

2.4.8.3.2 При ограниченном количестве испытаний  $r_d$  определяется по Формуле (D.21) EN 1990:

$$r_d = b_{gr}(\underline{X}_m) \cdot \exp(-k_{d,\infty} \alpha_{rt} Q_{rt} - k_{d,n} \alpha_\delta Q_\delta - 0,5Q^2),$$

где  $k_{d,n}$  — коэффициент фактиля для расчетного значения из Таблицы 2.2 для случая « $V_X$  неизвестно»;

$k_{d,\infty}$  — значение коэффициента фактиля  $k_{d,n}$  для  $n \rightarrow \infty$  [ $k_{d,\infty} = 3,04$ ].

ПРИМЕЧАНИЕ Значение  $V_\delta$  оценивается для рассматриваемых испытаний.

2.4.8.3.3 При большом числе испытаний значение  $r_d$  допускается определять по Формуле (D.22) EN 1990:

$$r_d = b_{gr}(\underline{X}_m) \cdot \exp(-k_{d,\infty} Q - 0,5Q^2).$$

### 2.4.8.4 Использование дополнительной предварительной информации

2.4.8.4.1 Если действительность функции сопротивления  $r_t$  и верхний предел (консервативная оценка) коэффициента вариации  $V_r$  множества испытаний известны, то для дальнейших аналогичных испытаний допускается применять следующий упрощенный способ.

2.4.8.4.2 Если проводится только одно испытание, то нормативное значение  $r_k$  можно определять по результату испытания ( $r_e$ ) по Формуле (D.23) EN 1990:

$$r_k = \eta_k r_e,$$

при этом  $\eta_k$  — коэффициент уменьшения для учета предварительной информации, для определения которого можно использовать выражение (D.24) EN 1990:

$$\eta_k = 0,9 \exp(-2,31 V_r - 0,5 V_r^2),$$

где  $V_r$  — максимальное значение коэффициента вариации, который наблюдался в предыдущих испытаниях.

2.4.8.4.3 Если проводятся два или три испытания, которые приводят к среднему

значению  $r_{em}$ , то нормативное значение  $r_k$  можно определять из среднего значения  $r_{em}$  по Формуле (D.25) EN 1990:

$$r_k = \eta_k r_{em},$$

где  $\eta_k$  — коэффициент уменьшения для учета предварительной информации, для определения которого можно использовать выражение (D.26) EN 1990:

$$\eta_k = \exp(-2,0V_r - 0,5V_r^2).$$

При этом  $V_r$  является максимальным значением коэффициента вариации, который наблюдался в предыдущих испытаниях, а экстремальные значения  $r_{ee}$  (максимумы и минимумы) должны отвечать условию (D.27) EN 1990:

$$|r_{ee} - r_{em}| \leq 0,10r_{em}.$$

2.4.8.4.4 На основании имеющейся предварительной информации из испытаний, которые проводились для определенных типов конструкций, к различным видам отказов можно отнести определенные коэффициенты вариации (см. соответствующие еврокоды). Для различных коэффициентов вариации  $V_r$  в Таблице 2.3 приведены значения коэффициента уменьшения  $\eta_k$  в соответствии с зависимостями (D.24) и (D.26).

**Таблица 2.3 — Коэффициент уменьшения  $\eta_k$**

Коэффициент вариации $V_r$	Коэффициент уменьшения $\eta_k$	
	для одного испытания	для двух или трех испытаний
0,05	0,8	0,90
0,11	0,70	0,80
0,17	0,60	0,70

### 3 СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

3.1 Настоящий стандарт охватывает проектирование плоских листовых конструкций, изготовленных из сталей в соответствии со стандартами, указанными в СН РК EN 1993-1-1 и СН РК EN 1993-1-12.

3.2 Свойства материалов холодноформованных элементов и профилированных листов указаны в СН РК EN 1993-1-3.

3.3 Свойства материалов из нержавеющей стали указаны в пунктах 3.4 – 3.8.

3.4 При проектных расчетах должны браться следующие значения независимо от направления прокатки:

— предел текучести  $f_y$ : номинальное напряжение (0,2 % напряжение при испытании), указанное в Таблице 3.1;

— предел прочности на растяжение  $f_u$ : номинальный предел прочности на растяжение, указанный в Таблице 3.1.

3.5 Требования по вязкости в СН РК EN 1993-1-1, пункт 3.2.2 также применимы к нержавеющей стали. Стали соответствующие одной из марок стали, указанных в Таблице 3.1, должны приниматься как отвечающие этим требованиям.

3.6 Для структурных полых профилей должны использоваться значения по

прочности, указанные в Таблице 3.1 для соответствующей продукции из исходного материала (холоднокатаная полоса, горячекатаная полоса или горячекатаный лист).

3.7 Более высокие значения по прочности, полученные при холодной обработке исходного материала, могут использоваться в проектировании, при условии, что они проверены испытаниями на образцах, взятых из структурного полого профиля в соответствии с Разделом 7 СН РК EN 1993-1-4.

3.8 Для холодно обработанного материала испытания материала, указанные в сертификате материала, требуемые в соответствии с EN 1090, должны быть в таком направлении, что значения прочности, использованные при проектировании, не зависят от направления прокатки или протягивания.

**Таблица 3.1 — Номинальные значения предела текучести  $f_y$  и предела прочности на растяжение  $f_u$  для конструкционной нержавеющей стали по EN 10088<sup>1)</sup>**

Тип нержавеющей стали	Марка	Форма продукции													
		Холоднокатаная полоса		Горячекатаная полоса		Горячекатаный лист		Болванки, пруты и заготовки							
		Номинальная толщина t													
		t≤6 мм		t≤12 мм		t≤75 мм		t≤250 мм							
		f <sub>y</sub>	f <sub>u</sub>	f <sub>y</sub>	f <sub>u</sub>	f <sub>y</sub>	f <sub>u</sub>	f <sub>y</sub>	f <sub>u</sub>						
		Н/мм <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>						
Ферритная сталь	1.4003	280	450	280	450	250 <sup>3)</sup>	450 <sup>3)</sup>	260 <sup>4)</sup>	450 <sup>4)</sup>						
	1.4016	260	450	240	450	240 <sup>3)</sup>	430 <sup>3)</sup>	240 <sup>4)</sup>	400 <sup>4)</sup>						
	1.4512	210	380	210	380	—	—	—	—						
Аустенитная сталь	1.4306							180	460						
	1.4307							220	520	200	520	200	500	175	450
	1.4541												190	500	
	1,4301	230	540	210	520	210	520								
	1.4401	240	530	200	53	220	520	200	500						
	1.4404														
	1.4539														
	1.4571		540		540										
	1.4432	240	550	220	550	220	520	200	500						
	1.4435														
	1.4311	290	550	270	550	270	550	270	550						
	1.4406	300	580	280	580	280	580	280	580						
	1.4439	290		270		270									
	1.4529	300	650	300	650	300	650								
	1.4547	320	650	300	650	300	650	300	650						
	1.4318	350	650	330	650	330	630	—	—						

**Таблица 3.1 — Номинальные значения предела текучести  $f_y$  и предела прочности на растяжение  $f_u$  для конструкционной нержавеющей стали по EN 10088<sup>1)</sup>**

(продолжение)

Аустенитная-	1.4362	420	600	400	600	400	630	400 <sup>2)</sup>	600 <sup>2)</sup>
--------------	--------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-------------------	-------------------

ферритная сталь	1.4462	480	660	460	660	460	640	450	650
<sup>1)</sup> Номинальные значения $f_y$ и $f_u$ , приведенные в этой таблице, могут использоваться в проектировании без обращения специального внимания на анизотропный эффект или эффект механического упрочения. <sup>2)</sup> $t \leq 160$ мм. <sup>3)</sup> $t \leq 25$ мм. <sup>4)</sup> $t \leq 100$ мм.									

#### 4 ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

4.1 Основные требования по долговечности изложены в EN 1990.

4.2 Способы защитной обработки, применяемые вне строительной площадки и на строительной площадке, должны соответствовать EN 1090.

ПРИМЕЧАНИЕ В EN 1090 приведены факторы, возникающие при изготовлении, которые необходимо учитывать при проектировании.

4.3 Элементы, подверженные воздействию коррозии, механическому износу или усталостному разрушению, должны проектироваться таким образом, чтобы была обеспечена возможность осмотра, ремонта и реконструкции, а также необходимый доступ для текущего осмотра и технического обслуживания при эксплуатации.

4.4 В Расчет на выносливость необходимо выполнять для следующих элементов стальных конструкций зданий:

- а) опорных элементов подъемных приспособлений или при колесных нагрузках;
- б) элементов, подверженных повторяющимся циклам напряжений от вибрации оборудования;
- в) элементов, подверженных колебаниям от ветровой нагрузки;
- г) элементов, подверженных колебаниям от веса людей.

4.5 Для элементов, которые не могут быть обследованы, следует предусматривать соответствующий припуск на коррозионный износ.

4.6 В Защиту от коррозии не требуется выполнять для внутренних конструкций зданий и сооружений, если относительная влажность внутри помещения не превышает 80 %.

## 5 СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

### 5.1 Общие положения

5.1.1.Р Расчетные модели должны соответствовать задаче прогнозирования работы конструкции и рассматриваемых предельных состояний.

5.1.2 Если граничные условия могут быть консервативно определены, а именно как ограниченные и неограниченные, плоская листовая конструкция может разбиваться на отдельные сегменты пластин, которые рассчитываются независимо друг от друга.

5.1.3.Р Общая устойчивость всей конструкции должна рассчитываться согласно соответствующим частям СН РК EN 1993.

### 5.2 Напряженное состояние пластины

#### 5.2.1 Общие положения

5.2.1.1 Расчетная модель и основные допущения для определения внутренних напряжений и усилий должны соответствовать поведению конструкции под воздействием нагрузки, вызывающей предельное состояние первой группы.

5.2.1.2 Расчетная модель может быть упрощена таким образом, чтобы упрощения давали повышенный эффект от воздействий.

5.2.1.3 Для плоских листовых конструкций обычно применяется общий упругий расчет. В тех случаях, где разрушение в результате усталости маловероятно, общий расчет с учетом пластических деформаций не применяется.

5.2.1.4 Должны быть учтены возможные отклонения от предполагаемых направлений и мест приложения воздействий.

5.2.1.5 Расчет по образованию линейчатых пластических шарниров может быть применен в том случае, когда сжимающие или сдвигающие напряжения составляют менее 10 % их соответствующего критического значения. Предельный расчетный изгибающий момент в линейчатом пластическом шарнире определяется по формуле

$$m_{Rd} = \frac{0,25f_y t^2}{\gamma_{M0}}.$$

где  $f_y$  - предел текучести (СН РК EN 1993-1-1 п.1.5) принимается в соответствии с СН РК EN 1993-1-1 п. 2.4. При использовании сталей отечественного сортамента соответствует нормативному значению предела текучести  $R_{yn}$  (см. Таблицу 51\* СНиП II-23-81\* «Стальные конструкции»).

$\gamma_{M0}$  - частный коэффициент безопасности при определении несущей способности поперечных сечений по прочности независимо от класса (см. Таблицу 6\* СНиП II-23-81\* «Стальные конструкции»).

**Таблица 5.1 — Номинальные значения предела текучести  $f_y$  и временного сопротивления на растяжение  $f_u$  горячекатаной конструкционной стали**

Стандарт и марка стали	Номинальная толщина элемента $t$ , мм			
	$t \leq 40$		$40 < t \leq 80$	
	$f_y$ , Н/мм <sup>2</sup>	$f_u$ , Н/мм <sup>2</sup>	$f_y$ , Н/мм <sup>2</sup>	$f_u$ , Н/мм <sup>2</sup>
<b>EN 10025-2</b>				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
<b>EN 10025-3</b>				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
<b>EN 10025-4</b>				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
<b>EN 10025-5</b>				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
<b>EN 10025-6</b>				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550
<b>EN 10210-1</b>				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NLH	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550
<b>EN 10219-1</b>				
S 235 H	235	360		
S 275 H	275	430		
S 355 H	355	510		
S 275 NH/NLH	275	370		
S 355 NH/NLH	355	470		
S 460 NH/NLH	460	550		
S 275 MH/MLH	275	360		
S 355 MH/MLH	355	470		
S 420 MH/MLH	420	500		
S 460 MH/MLH	460	530		

### 5.2.2 Граничные условия для пластины

5.2.2.1 Граничные условия, принимаемые в расчетах, должны соответствовать рассматриваемым предельным состояниям.

5.2.2.2.Р Если плоская листовая конструкция разбивается на отдельные сегменты пластин, граничные условия, принимаемые в расчетах для элементов жесткости в сегментах пластин, необходимо указывать в чертежах и проектной документации.

### 5.2.3 Расчетные модели для плоских листовых конструкций

#### 5.2.3.1 Общие требования

5.2.3.1.1 Внутренние напряжения сегмента пластины необходимо определять следующим образом:

- стандартными формулами, см. 5.2.3.2;
- общим анализом, см. 5.2.3.3;
- упрощенными расчетными методами, см. 5.2.3.4.

5.2.3.1.2 Расчетные методы, приведенные в 5.2.3.1.1, должны учитывать линейную или нелинейную теорию изгиба в соответствующих случаях.

5.2.3.1.3 Линейная теория изгиба основана на теории малых перемещений и линейной зависимости нагрузка-деформация. Данное положение применимо, когда сжимающие или сдвигающие напряжения составляют в плоскости пластины менее 10 % их соответствующего критического значения.

5.2.3.1.4 Нелинейная теория изгиба основана на теории больших перемещений и учете влияния деформированной схемы на равновесие конструкции.

5.2.3.1.5 Расчетные модели, приведенные в 5.2.3.1.1, должны основываться на типах расчетов, указанных в Таблице 5.2.

**Таблица 5.2 — Типы расчета**

Тип расчета	Теория изгиба	Закон деформирования материала	Геометрия пластины
Линейный упругий (LA)	Линейная	Линейный	Идеальная
Геометрически нелинейный (GNA)	Нелинейная	Линейный	Идеальная
С учетом физической нелинейности (MNA)	Линейная	Нелинейный	Идеальная
С учетом геометрической и физической нелинейности (GMNA)	Нелинейная	Нелинейный	Идеальная
Геометрически нелинейный с учетом начальных несовершенств (GNIA)	Нелинейная	Линейный	С начальными несовершенствами
Геометрически и физически нелинейный с учетом начальных несовершенств (GMNIA)	Нелинейная	Нелинейный	С начальными несовершенствами

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Определение различных типов расчетов приведено в Приложении А.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 Тип расчета, примененный к конкретной конструкции, должен быть указан в проектной документации.

ПРИМЕЧАНИЕ 3 Использование моделей с идеальной геометрией предполагает, что дефекты геометрического характера либо являются несущественными, либо включены в другие расчетные условия.

ПРИМЕЧАНИЕ 4 Амплитуды геометрических отклонений для конструкций с начальными несовершенствами выбирают таким образом, чтобы результаты вычислений показывали достаточную степень надежности при сравнении с результатами испытаний с использованием опытного контрольного образца, изготовленного с установленными допусками согласно EN 1090-2. Следовательно, данные амплитуды, в целом, отличаются от допусков, приведенных в EN 1090-2.

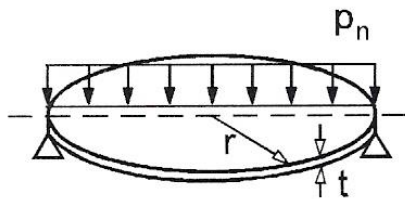
### 5.2.3.2 Применение стандартных формул

5.2.3.2.1 Для отдельных сегментов пластин плоской листовой конструкции внутренние напряжения могут быть вычислены для определенного сочетания расчетных воздействий, с использованием соответствующих расчетных формул, основанных на типах расчетов, приведенных в 5.2.3.1.

ПРИМЕЧАНИЕ В Приложениях В и С приведены таблицы для расчета прямоугольных пластин, не подкрепленных элементами жесткости при действии поперечной нагрузки.

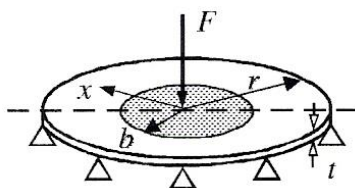
5.2.3.2.2 Приведенные далее расчетные формулы для круглых пластин с осесимметричными граничными условиями могут быть использованы, если надежность конструкции обеспечивается в соответствии с требованиями, приведенными в СН РК EN 1991-1.

а) Равномерная нагрузка, простая поддерживаемая линия раздела



$$p_{n,R} = 1,625 \left( \frac{t}{r} \right)^2 f_y$$

б) Локально распределенная нагрузка, простая поддерживаемая линия раздела



Равномерное давление  $p_n$  на круглую площадь с радиусом  $b$

$$F = p_n \pi b^2$$

с

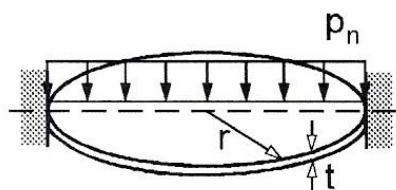
$$K = 1,0 + 1,10 \frac{b}{r} + 1,15 \left( \frac{b}{r} \right)^4 \quad \text{или} \quad K = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{b}{t}$$

в зависимости от того, что меньше

$$F_R = K \frac{\pi}{2} t^2 f_y$$

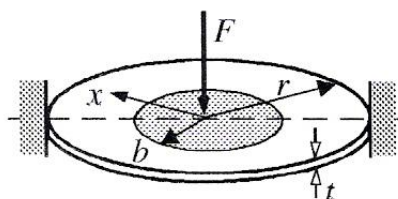


в) Равномерная нагрузка, зажатая линия раздела



$$p_{n,R} = 3,125 \left( \frac{t}{r} \right)^2 f_y$$

г) Локально распределенная нагрузка, зажатая линия раздела



Равномерное давление  $p_n$  на круглую площадь с радиусом  $b$

$$F = p_n \pi b^2$$

с

$$K = 1,40 + 2,85 \frac{b}{r} + 2,0 \left( \frac{b}{r} \right)^4 \text{ или } K = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{b}{t}$$

в зависимости от того, что меньше

$$F_R = K \frac{\pi}{2} t^2 f_y$$

Приведенные расчетные формулы могут быть использованы, если надежность конструкции обеспечивается в соответствии с требованиями, приведенными в СН РК EN 1991-1:

**ПРИМЕЧАНИЕ 1** Настоящий стандарт содержит датированные и недатированные ссылки на стандарты и положения других документов. Нормативные ссылки, перечисленные ниже, приведены в соответствующих местах в тексте. Для датированных ссылок последующие изменения или пересмотр их применяют в настоящем стандарте только при внесении в него изменений или пересмотре. Для недатированных ссылок применяют их последние издания (включая изменения).

ИСО 3898:1997 Основы проектирования несущих конструкций, обозначения, условные и буквенные обозначения

ИСО 2394:1998 Основные положения по надежности несущих конструкций

ИСО 8930:1997 Основные правила по надежности несущих конструкций, перечень эквивалентных терминов

**ПРИМЕЧАНИЕ 2** В обязательных разделах приводятся следующие европейские стандарты, которые являются как действующими, так и находящимися в разработке.

EN 1990 Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций

EN 1991-1-7 Еврокод 1. Воздействия на несущие конструкции. Часть 1-7. Аварийные нагрузки

EN 1991-2 Еврокод 1. Воздействия на несущие конструкции. Часть 2. Транспортные нагрузки на мосты

EN 1991-3 Еврокод 1. Воздействия на несущие конструкции. Часть 3. Воздействия, вызываемые работой кранов и механизмов

EN 1991-4 Еврокод 1. Воздействия на несущие конструкции. Часть 4. Воздействия на силосы и резервуары.

ПРИМЕЧАНИЕ 3 В примечаниях к обязательным разделам приводятся следующие европейские стандарты, которые являются как действующими, так и находящимися в разработке.

EN 1991-1-3 Еврокод 1. Воздействия на несущие конструкции. Часть 1-3. Снеговые нагрузки

EN 1991-1-4 Еврокод 1. Воздействия на несущие конструкции. Часть 1-4. Ветровые нагрузки

EN 1991-1-6 Еврокод 1. Воздействия на несущие конструкции. Часть 1-6. Нагрузки и деформации на этапе строительства.

5.2.3.2.3 В случае плоского напряженного состояния, полученного на основании безмоментной теории, эквивалентные расчетные напряжения  $\sigma_{eq,Ed}$  в пластине (напряжения Мизеса) могут быть определены следующим образом:

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

5.2.3.2.4 В случае плоского напряженного состояния, полученного на основании моментной теории упругих оболочек, эквивалентные расчетные напряжения  $\sigma_{eq,Ed}$  в пластине (напряжения Мизеса) могут быть определены следующим образом:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{y,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed}\sigma_{y,Ed} + 3\tau_{xy,Ed}^2} , \quad (5.2)$$

$$\text{где } \sigma_{x,Ed} = \frac{n_{x,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x,Ed}}{t^2/4} ;$$

$$\sigma_{y,Ed} = \frac{n_{y,Ed}}{t} \pm \frac{m_{y,Ed}}{t^2/4} ;$$

$$\tau_{xy,Ed} = \frac{n_{xy,Ed}}{t} \pm \frac{m_{xy,Ed}}{t^2/4} ;$$

$n_{x,Ed}$ ,  $n_{y,Ed}$ ,  $n_{xy,Ed}$ ,  $m_{x,Ed}$ ,  $m_{y,Ed}$  и  $m_{xy,Ed}$  определены в 1.4.1 и 1.4.2.

ПРИМЕЧАНИЕ Указанные выше формулы дают консервативное эквивалентное расчетное значение напряжения.

5.2.3.2.5 Для каждой нагрузки расчетные значения эффектов ее воздействия ( $E_d$ ) могут быть представлены следующим образом (по (6.2) EN 1990):

$$E_d = \gamma_{sd} E \{ \gamma_{f,i} F_{rep,i} ; a_d \} \quad i \geq 1$$

где:

$a_d$  - расчетные значения геометрических параметров;

$\gamma_{sd}$  - коэффициент надежности, принимающий во внимание погрешности:

ПРИМЕЧАНИЕ Как правило, эффекты воздействий зависят от свойств материала.

5.2.3.2.6 В большинстве случаев, может быть сделано следующее упрощение (по (6.2a) EN 1990):

$$E_d = E \{ \gamma_{F,i} F_{rep,i} ; a_d \} \quad i \geq 1$$

Причём (по (6.2 b) EN 1990):

$$\gamma_{F,i} = \gamma_{sd} \times \gamma_{f,i}$$

ПРИМЕЧАНИЕ В некоторых важных случаях, например, при необходимости учитывать геотехнические воздействия, можно использовать коэффициенты надежности  $\gamma_{F,i}$  для эффекта от каждого воздействия или же допускается использовать единый коэффициент  $\gamma_F$  для эффекта комбинации воздействий, принятых с соответствующими коэффициентами надежности.

### 5.2.3.3 Применение общего анализа: расчет численными методами

5.2.3.3.1 Если внутренние напряжения в плоской листовой конструкции определяются расчетом численными методами, который основывается на физически линейном расчете, максимальное эквивалентное расчетное напряжение  $\sigma_{eq,Ed}$  (напряжение Мизеса) необходимо вычислять для соответствующего сочетания расчетных воздействий.

5.2.3.3.2 Эквивалентное расчетное напряжение  $\sigma_{eq,Ed}$  (напряжение Мизеса) определяется компонентами напряжений, которые возникают в данной точке плоской листовой конструкции:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{y,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed}\sigma_{y,Ed} + 3\tau_{xy,Ed}^2}, \quad (5.3)$$

где  $\sigma_{x,Ed}$ ,  $\sigma_{y,Ed}$  являются положительными в случае растяжения.

5.2.3.3.3.Р При рассмотрении предельного состояния разрыва или большой деформации элемента или соединения (STR и/или GEO) должно быть проверено по (6.8) EN 1990, что:

$$E_d \leq R_d$$

где  $E_d$  - расчетное значение эффекта воздействий, как например, внутренняя сила, момент, которые могут рассматриваться как скалярные или векторные величины;

$R_d$  - соответствующее расчетное сопротивление.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Подробнее методы STR и GEO описаны в Приложении А EN 1990

ПРИМЕЧАНИЕ 2 Выражение (6.8) EN 1990 не охватывает все случаи проверки устойчивости; см. Еврокоды EN 1992 - EN 1999.

5.2.3.3.3 Если расчет численными методами применяется для проверки устойчивости, необходимо учитывать влияние следующих дефектов:

а) дефекты геометрической формы:

— отклонения от номинальной геометрической формы сечения пластины (начальная деформация, прогиб из плоскости);

— неровность сварных швов (малый эксцентриситет);

— отклонения от номинальной толщины;

б) физические дефекты:

— остаточные напряжения, вызванные прокаткой, штамповкой, сваркой, рихтованием;

— неоднородность и анизотропия.

5.2.3.3.4 Геометрические и физические дефекты необходимо вводить в расчет как начальные эквивалентные дефекты геометрической формы идеальной пластины. Форма начальных эквивалентных геометрических дефектов должна выводиться из соответствующей формы изгиба при потере устойчивости.

5.2.3.3.5 Амплитуда начального эквивалентного геометрического дефекта  $e_0$  прямоугольного сегмента пластины может быть получена путем численной калибровки результатов испытаний опытных образцов, которые можно рассматривать как репрезентативные значения кривой при потере устойчивости пластины по СН РК EN 1993-1-5 следующим образом:

$$e_0 = \frac{(1 - \rho \bar{\lambda}_p^2) \cdot (1 - \rho)}{\rho \xi}, \quad (5.4)$$

$$\xi = \frac{6b^2 \cdot (b^2 + va^2)}{t \cdot (a^2 + b^2)^2} \text{ и } \alpha < \sqrt{2},$$

где

$\bar{\lambda}_p$  — относительная гибкость пластины, см. СН РК EN 1993-1-5;

$\rho$  — понижающий коэффициент при потере устойчивости пластины, определяется согласно (4.2) и (4.3) Раздела 4.4 СН РК EN 1993-1-5:

— для сжатой пластины с двухсторонним закреплением:

$$\rho = 1,0 \quad \text{для } \bar{\lambda}_p \leq 0,673;$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{для } \bar{\lambda}_p > 0,673,$$

где  $(3 + \psi) \geq 0$ ;

— для сжатой пластины с односторонним закреплением (свес листа) (4.3) Раздела 4.4 СН РК EN 1993-1-5:

$$\rho = 1,0 \quad \text{для } \bar{\lambda}_p \leq 0,748;$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{для } \bar{\lambda}_p > 0,748,$$

где

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}},$$

здесь  $\psi$  — отношение напряжений, определяемых согласно 4.4.3 и 4.4.4 СН РК EN 1993-1-5;

$\bar{b}$  — расчетная ширина пластины принимается следующей (обозначения см. СН РК EN 1993-1-1, Таблица 5.2):

$b_w$  — для стенки;

$b$  — для элементов поясов с двухсторонним закреплением (кроме прямоугольных полых профилей);

$b - 3t$  — для поясов прямоугольных полых профилей;

$c$  — для свесов поясов с односторонним закреплением;

$h$  — для равнополочных уголков;

$h$  — для неравнополочных уголков;

$k_\sigma$  — коэффициент, учитывающий потерю устойчивости в зависимости от отношения напряжений  $\psi$  по краям пластины и условий их закрепления. Для длинных пластин значения коэффициента  $k_\sigma$  указаны в Таблице 4.1 или Таблице 4.2 СН РК EN 1993-1-5;

$t$  — толщина листа;

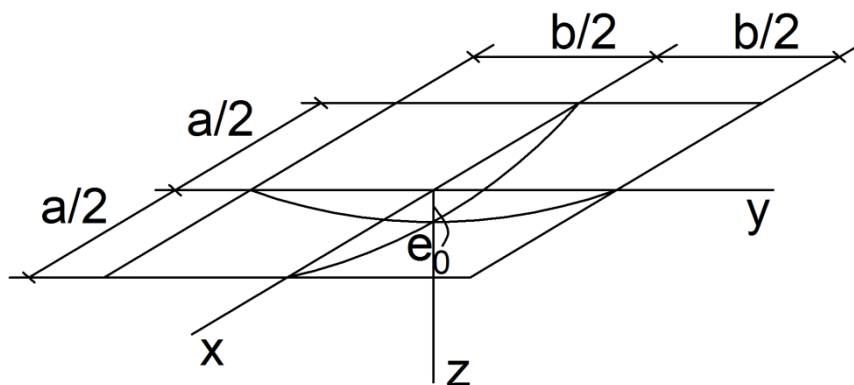
$\sigma_{cr}$  — упругое критическое напряжение потери устойчивости (см. Формулу (А.1) в А.1.2 (Приложение А СН РК EN 1993-1-5) и Таблицы 4.1, 4.2);

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y [\text{Н/мм}^2]}}$$

$a, b$  — геометрические размеры пластины, см. Рисунок 5.1;

$t$  — толщина пластины;

$\alpha$  — соотношение сторон пластины (большей стороны к меньшей)  $a/b < \sqrt{2}$ .



**Рисунок 5.1 – Начальный эквивалентный геометрический дефект  $e_0$  сегмента пластины.**

Начальную форму поверхности покрытия следует принимать по формуле:

$$z = e_0 \left( 1 - \frac{x^n}{(a/2)^n} \right) \left( 1 - \frac{y^n}{(b/2)^n} \right)$$

Где  $a, b$  стороны сегмента пластины,  $e_0$  — начальный эквивалентный геометрический дефект  $e_0$  сегмента пластины,  $x, y$  — текущие координаты. Показатель степени  $n \approx 3$ .

5.2.3.3.6 В запас устойчивости амплитуда может рассматриваться как  $e_0 = a/200$ , где  $b \leq a$ .

5.2.3.3.7 Характер эквивалентных геометрических дефектов должен соответствовать дефектам, которые возникают в процессе производства и сборки.

5.2.3.3.8.Р Во всех случаях точность расчета численными методами должна подтверждаться результатами испытаний или сравнительным анализом.

### 5.2.3.4 Применение упрощенных расчетных методов

#### 5.2.3.4.1 Общие положения

5.2.3.4.1.1 Внутренние силы или напряжения в плоских листовых конструкциях, нагруженных поперечной нагрузкой и нагрузкой в плоскости пластины, можно определить, используя упрощенную расчетную модель, которая дает консервативную оценку.

5.2.3.4.1.2 Следовательно, пластинчатую конструкцию можно разделить на отдельные пластинчатые сегменты, подкрепленные или не подкрепленные элементами жесткости.

#### 5.2.3.4.2 Сегменты пластин, не подкрепленные элементами жесткости

5.2.3.4.2.1 Прямоугольная пластина, не подкрепленная элементами жесткости, под воздействием поперечной нагрузки может моделироваться как эквивалентная балка в направлении доминирующей передачи нагрузки, если выполняются следующие условия:

- соотношение сторон (отношение большей стороны к меньшей)  $a/b$  больше двух;
- пластина нагружена поперечными распределенными нагрузками, которые могут либо быть равномерными, либо изменяться линейно;
- прочность, устойчивость и жесткость рамы или балки, которая поддерживает сегмент пластины, соответствуют допускаемым граничным условиям эквивалентной балки.

5.2.3.4.2.2 Внутренние силы и изгибающие моменты эквивалентной балки определяются путем применения упругого расчета или расчета с учетом пластических деформаций в соответствии с СН РК EN 1993-1-1.

5.2.3.4.2.3 Если прогиб первого порядка при воздействии поперечного нагружения аналогичен форме потери устойчивости при воздействии сил сжатия в плоскости пластины, необходимо принимать в расчет взаимодействие между обоими явлениями.

5.2.3.4.2.4 В случаях, когда ситуация описанная в 5.2.3.4.2.3, имеет место, формула взаимодействия, установленная в 5.2.3.4.2.5 - 5.2.3.4.2.9, может применяться к эквивалентной балке.

5.2.3.4.2.5 Если статический расчет производится по теории второго порядка с учетом начальных несовершенств, указанных в 5.3.2 СН РК EN 1993-1-1, проверку на устойчивость элементов постоянного сечения с двумя осями симметрии, не чувствительных к кручению, следует выполнять в соответствии со следующими пунктами, в которых различают:

- элементы, не испытывающие деформации кручения, например круглые замкнутые сечения или сечения, раскрепленные от кручения;
- элементы, испытывающие деформации кручения, например элементы открытого сечения и не раскрепленные от кручения.

б) Кроме того, несущая способность поперечного сечения по прочности в каждом конце элемента должна удовлетворять требованиям, приведенным в 6.2 СН РК EN 1993-1-1.

**ПРИМЕЧАНИЕ 1** Формулы основаны на анализе работы сжато-изгибаемых (внецентренно сжатых) свободно опертых однопролетных элементов с шарнирным опиранием концов с непрерывным или дискретным боковым раскреплением.

**ПРИМЕЧАНИЕ 2** В случае невыполнения условий, приведенных в 5.2.3.4.2.4 и 5.2.3.4.2.5, см. 6.3.4 СН РК EN 1993-1-1.

5.2.3.4.2.7 Проверка несущей способности по прочности элементов конструктивных систем может выполняться для отдельных однопролетных элементов, «вырезанных» из системы. Эффекты второго рода (Р-Δ-эффекты) в системах, подверженных перекосу, должны учитываться либо введением в элемент концевых моментов, либо изменением соответствующей расчетной длины, см. 5.2.2.3.в) и 5.2.2.8 СН РК EN 1993-1-1.

5.2.3.4.2.8 Для сжато-изгибаемых (внецентренно-сжатых) элементов должны выполняться условия (6.61) и (6.62) СН РК EN 1993-1-1:

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,$$

где  $N_{Ed}$ ,  $M_{y,Ed}$ , и  $M_{z,Ed}$  — расчетные значения сжимающей силы и максимальных моментов относительно осей  $y - y$  и  $z - z$  соответственно;

$\Delta M_{y,Ed}$ ,  $\Delta M_{z,Ed}$  — моменты от смещения центра тяжести относительно осей  $y - y$  и  $z - z$  соответственно по 6.2.9.3 для сечений класса 4, Таблица 5.3;

$\chi_y$  и  $\chi_z$  — понижающие коэффициенты при плоской форме потери устойчивости, см. 6.3.1 СН РК EN 1993-1-1;

$\chi_{LT}$  — понижающий коэффициент при проверке устойчивости плоской формы изгиба, см. 6.3.2 СН РК EN 1993-1-1;

$k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$  — коэффициенты взаимодействия.

**Таблица 5.3 — Значения для вычисления  $N_{Rk} = f_y A_i$ ,  $M_{i,Rk} = f_y W_i$  и  $\Delta M_{i,Ed}$**

Величина	Класс сечений			
	1	2	3	4
$A_i$	A	A	A	$A_{eff}$
$W_y$	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$
$W_z$	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{eff,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{N,y} N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{N,z} N_{Ed}$

ПРИМЕЧАНИЕ Для элементов, не чувствительных к деформациям кручения,  $\chi_{LT} = 1,0$ .

5.2.3.4.2.9 Коэффициенты взаимодействия  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$  зависят от выбранного метода.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Коэффициенты взаимодействия  $k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$  получены двумя альтернативными методами. Значения этих коэффициентов могут быть определены по Приложению А (альтернативный метод 1) СН РК EN 1993-1-1 или по Приложению В (альтернативный метод 2) СН РК EN 1993-1-1.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 Выбор между альтернативными методами 1 и 2 может быть сделан в Национальном Приложении.

ПРИМЕЧАНИЕ 3 С целью упрощения проверки могут осуществляться только в области упругих деформаций.

#### 5.2.3.4.3 Сегменты пластин, подкрепленные элементами жесткости

5.2.3.4.3.1 Подкрепленная пластина или подкрепленный сегмент пластины может моделироваться как ростверк, если он равномерно укреплен в поперечном и продольном направлениях.

5.2.3.4.3.2 Определяя площадь поперечного сечения  $A_i$  взаимодействующих пластины и элемента ростверка, влияние сдвигового запаздывания необходимо учитывать коэффициентом ослабления  $\beta$ , указанным в пунктах 5.2.3.4.3.3 - 5.2.3.4.3.4.

5.2.3.4.3.3 Эффективную<sup>s</sup> ширину  $b_{\text{eff}}$  при учете сдвигового запаздывания в упругой стадии работы, как правило, определяют по Формуле (3.1) СН РК EN 1993-1-5:

$$b_{\text{eff}} = \beta b_0.$$

где коэффициент  $\beta$  указан в Таблице 5.4.

Эффективную<sup>s</sup> ширину допускается применять при оценке эксплуатационной пригодности и усталостной прочности в предельном состоянии.

5.2.3.4.3.4 Если смежные пролеты отличаются не более чем на 50 % или длина консолей составляет не более 50 % примыкающего пролета, то эффективную длину  $L_e$  допускается определять согласно Рисунку 5.2. В других случаях  $L_e$  оценивают как расстояние между двумя нулевыми точками действующих моментов.

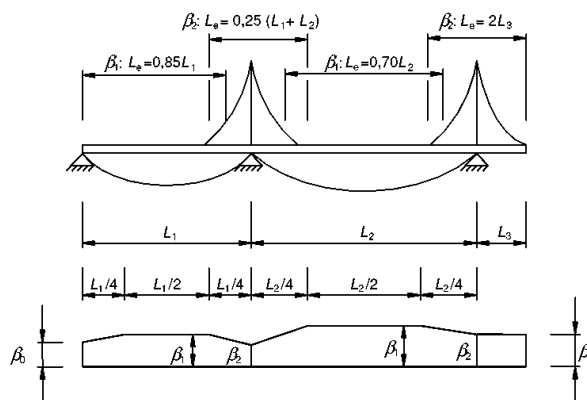
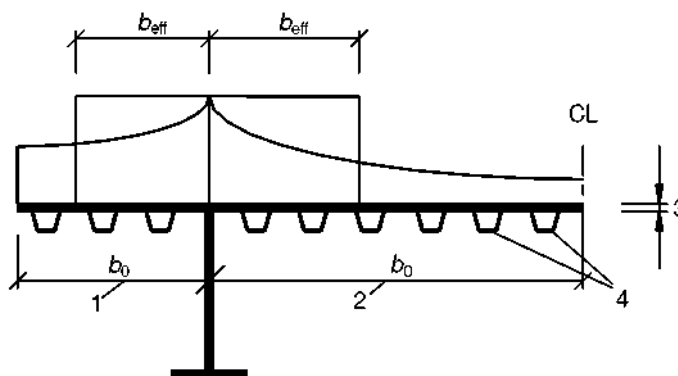


Рисунок 5.2 — Эффективная длина  $L_e$  для неразрезных балок и распределение эффективной<sup>s</sup> ширины

5.2.3.4.3.5 Для  $i$ -того элемента ростверка, параллельного сжимающим силам в плоскости пластины, площадь поперечного сечения  $A_i$  должна определяться с учетом приведенной ширины прилегающих субпанелей при потере устойчивости пластины согласно СН РК EN 1993-1-5.





1 — свес пояса при опирании на одну сторону;

2 — свес пояса при опирании на две стороны;

3 — толщина листа  $t$ ;

4 — продольные элементы жесткости с  $A_{sl} = \Sigma A_{sl_i}$

**Рисунок 5.3 — К определению эффективной ширины**

**Таблица 5.4 — Понижающий коэффициент  $\beta$  для эффективной<sup>s</sup> ширины**

$k$	Место расположения	Значение $\beta$
$k \leq 0,02$		$\beta = 1,0$
$0,02 < k \leq 0,70$	В пролете балки	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4k^2}$
	У опоры балки	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 \cdot \left( k - \frac{1}{2500k} \right) + 1,6k^2}$
$> 0,70$	В пролете балки	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5,9k}$
	У опоры балки	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{8,6k}$
Все $k$	Концевая опора балки	$\beta_0 = (0,55 + 0,025/k) \cdot \beta_1$ , но $\beta_0 < \beta_1$
Все $k$	Консоль балки	$\beta = \beta_2$ — на опоре и на конце консоли
$k = \alpha_0 b_0 / L_e \text{ при } \alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 t}},$ <p>где <math>A_{sl}</math> — площадь сечения всех продольных элементов жесткости в пределах ширины <math>b_0</math>. Другие буквенные обозначения указаны на Рисунках 5.2 и 5.3.</p>		

5.2.3.4.3.6 Взаимодействие между влиянием сдвигового запаздывания и влиянием потери устойчивости (см. Рисунок 5.4) должно учитываться в определении эффективной площади поперечного сечения  $A_i$  согласно следующей формуле

$$A_i = \left[ \rho_c \cdot \left( A_{L,eff} + \sum \rho_{pan,i} b_{pan,i} t_{pan,i} \right) \right] \beta^k, \quad (5.5)$$

где  $A_{L,eff}$  — эффективная площадь поперечного сечения элемента жесткости с учетом местной потери устойчивости элемента жесткости;

$\rho_c$  — понижающий коэффициент для расчета общей потери устойчивости

укрепленного пластинчатого сегмента, как указано в 4.5.4.1 СН РК EN 1993-1-5;

$\rho_{\text{пан},i}$  — понижающий коэффициент для расчета местной потери устойчивости  $i$ -той субпанели, как указано в 4.4.1 СН РК EN 1993-1-5;

$b_{\text{пан},i}$  — ширина  $i$ -той субпанели, как указано в 4.5.1.3 СН РК EN 1993-1-5;

$t_{\text{пан},i}$  — толщина  $i$ -той субпанели;

$\beta$  — коэффициент приведенной ширины для сдвигового запаздывания, см. 3.2.1 СН РК EN 1993-1-5;

$k$  — соотношение, определенное в 3.3 СН РК EN 1993-1-5.

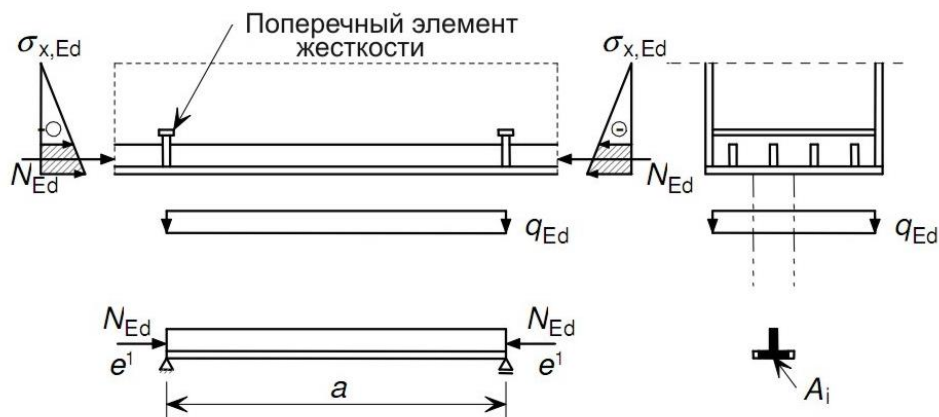


Рисунок 5.4 - Определение площади поперечного сечения  $A_i$

#### ПРИМЕР 1 Определение эффективной площади поперечного сечения.

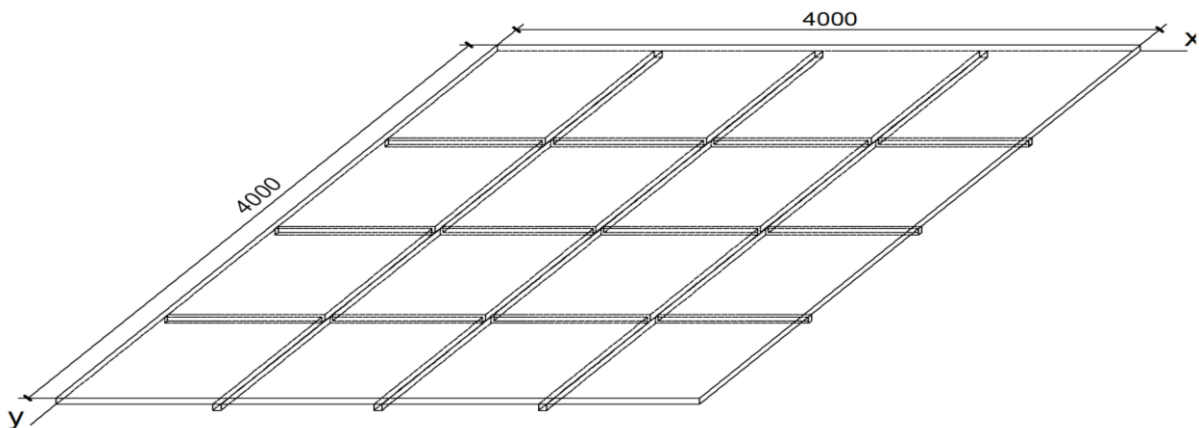


Рисунок 1 – Геометрическая схема пластины

Исходные данные: толщина пластинки  $t = 0.016$  м; размеры пластинки в плане  $a = 4$  м;  $b = 4$  м; коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ ; модуль упругости  $E = 2.06 \cdot 10^{11}$  Па; нормативное значение предела текучести  $f_y = 235 \cdot 10^6$  Па; расстояние между ребрами жесткости  $b_c = 1$  м;

$b_0$  - для пояса с двухсторонней опорой равняется половине расстояния между этими опорами, согласно СН РК EN 1993-1-5 п. 3.1.1

$$b_0 = 0.5 \text{ м.}$$

$A_{sl}$ — площадь сечения всех продольных элементов жесткости в пределах ширины  $b_0$

$$A_{sl} = 5 \cdot 0.05^2 = 0.013 \text{ м.}$$

Коэффициент  $\alpha_0$ , определяемый по формуле Таблицы 3.1 (СН РК EN 1993-1-5)

$$\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 t}} = 1.601.$$

Согласно СН РК EN 1993-1-5 п. 3.2.1.2 эффективная длина  $L_e$ :

$$L_1 = 1 \text{ м}; L_2 = 1 \text{ м}; L_e = 0.25 \cdot (L_1 + L_2) = 0.5 \text{ м.}$$

Коэффициент  $k$ , определяемый по формуле Таблицы 3.1 (СН РК EN 1993-1-5)

$$k = \frac{\alpha_0 b_0}{L_e} = 1.601$$

$$\text{В пролете } \beta_1 = \frac{1}{5.9k} = 0.106; \text{ на опоре } \beta_2 = \frac{1}{8.6k} = 0.073.$$

Согласно Рисунку А.1 (СН РК EN 1993-1-5 Приложение А)

$$\psi_1 = 1; \psi_2 = 1$$

Согласно Рисунку А.1 (СН РК EN 1993-1-5)

$$b_1 = 1 - 0.05 \cdot 2 = 0.9 \text{ м}; b_2 = 1 - 0.05 \cdot 2 = 0.9 \text{ м}$$

$$b_{1,inf} = \frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} b_1 = 0.45 \text{ м}; b_{2,inf} = \frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} b_2 = 0.45 \text{ м}; b_{2,sup} = \frac{2}{5 - \psi_2} b_2 = 0.45 \text{ м.}$$

$$b_{netto} = b - 2(b_1 - b_{1,inf} + b_2 - b_{2,sup} - b_{2,inf}) = 3.1 \text{ м.}$$

Центр тяжести по вертикали поперечного сечения для всей усиленной элементами жесткости пластины (вспомогательная система координат в ц.т. пластины)

$$y_c = \frac{bt \cdot 0 + \left( \frac{-0.05}{2} - \frac{t}{2} \right) A_{sl}}{bt + A_{sl}} = -5.392 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Момент инерции поперечного сечения для всей усиленной элементами жесткости пластины:

$$I_{sl} = \frac{bt^3}{12} + b \cdot t \cdot y_c^2 + \left( \frac{0.05^4}{12} + (0.05 - y_c)^2 \cdot 0.05^2 \right) \cdot 5 = 4.418 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$$

Момент инерции поперечного сечения для изгибаемой пластины:

$$I_p = \frac{b_{netto} \cdot t^3}{12(1 - \nu^2)} = 1.163 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

Площадь сечения брутто пластины:

$$A_p = bt = 0.064 \text{ м}^2$$

Коэффициенты, определяемые по Приложению А (СН РК EN 1993-1-5) п. А.1:

$$\alpha = a/b = 1; \gamma = I_{sl}/I_p = 37.998; \delta = A_{sl}/A_p = 0.195$$

Коэффициенты  $k_{\sigma,p}$  коэффициент потери устойчивости для ортотропной пластины с отдельными элементами жесткости по Приложению А (СН РК EN 1993-1-5) п. А.1:

$$\sqrt[4]{\gamma} = 2.483$$

$$k_{\sigma,P} = \frac{2((1+\alpha^2)^2 + \gamma - 1)}{\alpha^2(\psi_1 + 1)(1 + \delta)} = 34.299$$

Напряжения по Приложению А (СН РК EN 1993-1-5) п. А.1:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E t^2}{12(1-\nu^2)b_{netto}^2} = 4.96 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Упругое критическое напряжение потери устойчивости для эквивалентной ортотропной пластины:

$$\sigma_{cr,P} = k_{\sigma,P} \cdot \sigma_E = 1.701 \cdot 10^8 \text{ Па.}$$

Момент инерции поперечного сечения брутто элемента жесткости и смежных частей пластины соответствующей панели при потере устойчивости

$$I_{sel} = \frac{(b_{1,inf} + 0.05 + b_{2,sup})t^3}{12} + (b_{1,inf} + 0.05 + b_{2,sup})t \cdot y_c^2 + \left( \frac{0.05^4}{12} + (0.05 - y_c)^2 \cdot 0.05^2 \right) = 8.958 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

Площадь поперечного сечения брутто элемента жесткости и смежных частей пластины согласно Рисунку А.1

$$A_{sel} = (b_{1,inf} + 0.05 + b_{2,sup})t + 0.05^2 = 0.018 \text{ м}^2$$

Упругое критическое напряжение потери устойчивости по типу сжатого стержня согласно (СН РК EN 1993-1-5) п. 4.5.3.3

$$\sigma_{cr,s} = \frac{\pi^2 E I_{sel}}{A_{sel} a^2} = 6.431 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

Коэффициент, согласно (СН РК EN 1993-1-5) п. 4.5.4.1

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,P}}{\sigma_{cr,s}} - 1 = 1.645, \text{ принимаем } \xi = 1$$

Коэффициент, согласно (СН РК EN 1993-1-5) п. 4.4.2

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 1$$

Соотношение по Таблице 5.2 согласно (СН РК EN 1993-1-1)

$$\frac{b_c}{t} = 62.5$$

Коэффициент, учитывающий потерю устойчивости в зависимости от отношения напряжений  $\psi$  по краям пластины и условий их закрепления. Согласно СН РК EN 1993-1-1 Таблица 4.1

$$k_\sigma = 1$$

Коэффициент согласно СН РК EN 1993-1-1 п.4.4.1

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_c / t}{28.4 \cdot \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = 2.201$$

Понижающий коэффициент  $\rho$  при потере устойчивости пластины

$$\bar{\lambda}_p = 2.201 > 0.5 + \sqrt{0.085 - 0.055\psi_1} = 0.673$$

$$\frac{\bar{\lambda}_p - 0.055(3 + \psi_1)}{\bar{\lambda}_p^2} = 0.409$$

$$\rho = 0.409$$

Условная гибкость согласно СН РК EN 1993-1-1 п.6.3.1.2 (1-й тип сечения согласно классификации 5.5.2)

$$\bar{\lambda}_1 = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,s}}} = 1.912$$

Кривая потери устойчивости согласно СН РК EN 1993-1-1 Таблице 6.2 - с  
Согласно графику на Рисунке 6.4

$$\chi_c = 0.22$$

Понижающий коэффициент  $\rho_c$  согласно СН РК EN 1993-1-5 п.4.5.4

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c = 0.409$$

Понижающий коэффициент для расчета местной потери устойчивости 1-й субпанели, как указано в СН РК EN 1993-1-5 п. 4.4.1

$$\rho_{pan1} = \rho = 0.409$$

Толщина 1-й панели  $t_{pan1} = t = 0.016$  м

Ширина 1-й панели согласно СН РК EN 1993-1-5 п.4.5.1.3

$$b_{pan1} = 1 \text{ м}$$

Эффективная площадь поперечного сечения элемента жесткости с учетом местной потери устойчивости элемента жесткости

$$A_{Leff} = A_{se1} = 0.018 \text{ м}^2$$

Эффективная площадь поперечного сечения

$$A_1 = (\rho_c (A_{Leff} + \rho \cdot 3 \cdot b_{pan1} \cdot t_{pan1})) \beta^k = 4.195 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

2.3.4.3.5.7 Проверка  $i$ -го элемента ростверка может быть выполнена путем применения формулы взаимодействия согласно 5.2.3.4.2.4 – 5.2.3.4.2.9 с учетом следующих условий нагружения:

- воздействие поперечной нагрузки;
- эквивалентная осевая сила, действующая в поперечном сечении площадью  $A_i$ , вызванная нормальными напряжениями пластины;
- эксцентриситет  $e$  эквивалентной осевой силы  $N_{ed}$  относительно центра тяжести поперечного сечения площадью  $A_i$ .

5.2.3.4.3.8 Если элементы жесткости пластины или сегмента пластины расположены параллельно направлению плоскостных сил сжатия, подкрепленная пластина может моделироваться как эквивалентная балка на упругих пружинах, см. СН РК EN 1993-1-5.

5.2.3.4.3.9 Если ребра жесткости сегмента подкрепленной пластины располагаются в направлении, перпендикулярном плоскостным силам сжатия, взаимодействие между силами сжатия и изгибающими моментами неукрепленных пластинчатых сегментов между ребрами жесткости должно проверяться согласно 5.2.3.4.2.4 - 5.2.3.4.2.9.

5.2.3.4.3.10 Продольные элементы жесткости должны соответствовать требованиям, приведенным в 5.2.3.4.3.11 – 5.2.3.4.3.13.

5.2.3.4.3.11 Требования, касающиеся крутильной формы потери устойчивости, приведенные в 9.2.1.8 и 9.2.1.9 СН РК EN 1993-1-5, распространяются также на продольные

элементы жесткости.

5.2.3.4.3.12 Прерывистые продольные элементы жесткости, которые не проходят через прорезы, сделанные в поперечных элементах жесткости, или при их отсутствии с другой стороны поперечных элементов жесткости, должны:

- применяться только для стенок (т. е. недопустимо для поясов);
- не учитываться в статическом расчете;
- не учитываться при расчете напряжений;
- рассматриваться при определении эффективной<sup>P</sup> ширины стенки отсеков;
- рассматриваться при расчете упругих критических напряжений.

5.2.3.4.3.13 Проверка несущей способности для элементов жесткости выполняется согласно 4.5.3 и 4.6 СН РК EN 1993-1-5.

5.2.3.4.3.14 Поперечные элементы жесткости должны соответствовать требованиям, приведенным в пунктах 5.2.3.4.3.15 - 5.2.3.4.3.17.

5.2.3.4.3.15 Промежуточные поперечные элементы жесткости, которые применяются в качестве жесткой опоры крайней панели стенки, должны быть рассчитаны на прочность и жесткость.

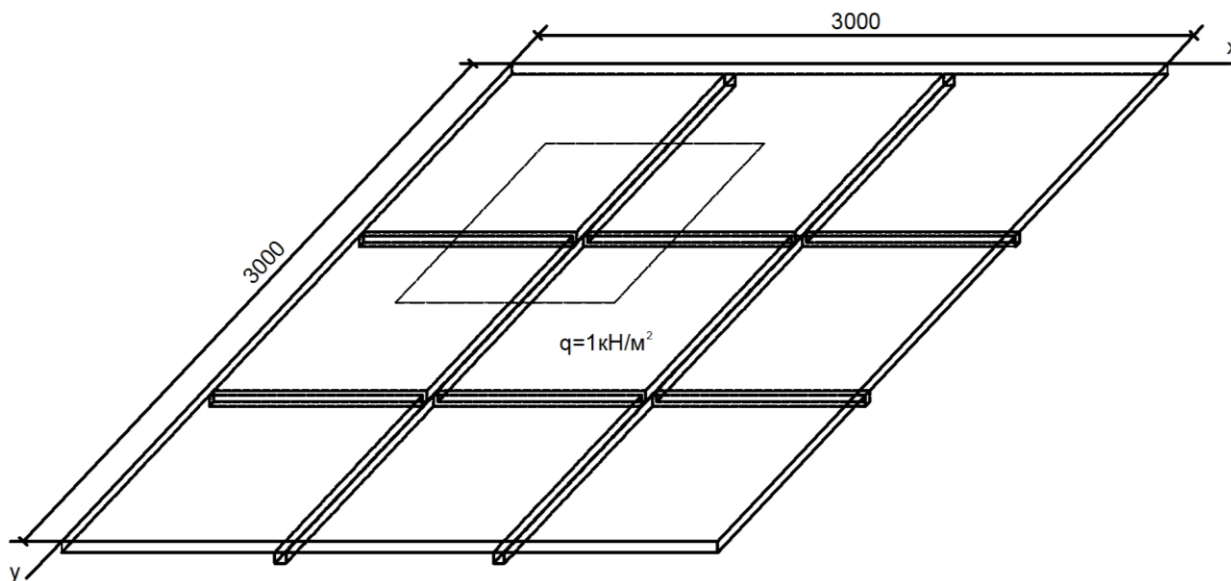
5.2.3.4.3.16 Когда применяются гибкие промежуточные поперечные элементы жесткости, их жесткость должна быть учтена при расчете с  $k_r$  по 5.3.5 СН РК EN 1993-1-5.

5.2.3.4.3.17 Момент инерции площади промежуточных жестких поперечных элементов жесткости вместе с эффективной частью стенки  $I_{st}$  должен соответствовать следующим минимальным значениям по (9.6) СН РК EN 1993-1-5:

$$\begin{aligned} \text{для } a/h_w < \sqrt{2} \quad I_{st} &\geq 1,5h_w^3 t^3 / a^2; \\ \text{для } a/h_w &\geq \sqrt{2} \quad I_{st} \geq 0,75h_w t^3. \end{aligned} \quad (9.6)$$

**ПРИМЕЧАНИЕ** Промежуточные жесткие поперечные элементы жесткости должны быть рассчитаны на осевую силу, равную  $\left( V_{Ed} - \frac{1}{\lambda_w^2} \cdot f_{yw} h_w t / (\sqrt{3} \gamma_{M1}) \right)$  согласно 9.2.1.3 СН РК EN 1993-1-5. В случае переменной поперечной силы производят проверку на расстоянии  $0,5h_w$  от края панели с максимальной поперечной силой.

**ПРИМЕР 2 Аналитический расчет пластины, подкрепленной регулярной сеткой ребер жесткости**



**Рисунок 1** Расчетная схема пластины, подкрепленной регулярной сеткой ребер жесткости.

Рассмотрим изгиб равномерно загруженной прямоугольной пластины, подкрепленной регулярной сеткой ребер жесткости и шарнирно закрепленной по краям (см. Рисунок 1).

Дано:  $E = 2.06 \cdot 10^{11}$  Па,  $\nu = 0.3$ ,  $t = 0.016$  м,  $b = 3$  м,  $a = 3$  м,  $q_0 = 1$  кН/м. Ребра жесткости расположены, как показано на Рисунке 1. Поперечное сечение ребер жесткости  $0.05 \times 0.05$  м.

«Размажем» ребра жесткости по толщине пластины. С учетом этого вычислим приведенную толщину пластины  $t^*$ .

Объем, занимаемый ребрами жесткости:

$$V_{\text{ребер}} = 0.05 \cdot 0.05 \cdot \left( \frac{1 - 0.05}{2} \right) \cdot 4 + 0.05^3 = 0.029 \text{ м}^3$$

Следовательно, приведенная толщина пластины

$$t^* = t + \frac{V_{\text{ребер}}}{a \cdot b} = 0.019 \text{ м}$$

Рассматриваемая пластинка является тонкой, т.к. для нее выполняется неравенство

$$\frac{1}{80} \leq \frac{t^*}{a} = \frac{0.019}{1} \leq \frac{1}{5}$$

Цилиндрическую жесткость пластины с приведенной толщиной определим как

$$D = \frac{Et^{*3}}{12(1-\nu^2)} = \frac{2.06 \cdot 10^{11} \cdot 0.019^3}{12(1-0.3^2)} = 1.328 \cdot 10^5 \text{ Нм}$$

Проведем линейный расчет пластины, для этого воспользуемся уравнением Софи Жермен-Лагранжа при изгибе тонких пластин. Т.к. рассматриваемая пластина шарнирно закреплена, используем решение Навье в виде двойного тригонометрического ряда.

Формулы для определения максимального прогиба и внутренних усилий используем из Примера 7. Для определения неизвестных усилий и прогибов просуммируем 100 первых членов ряда с шагом 2.

Максимальный прогиб при приложении равномерно-распределенной нагрузки возникает в центре пластины:

$$x = a/2 = 1.5 \text{ м}, \quad y = b/2 = 1.5 \text{ м}$$

$$w(x, y) = \frac{16q}{D\pi^6} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}}{mn \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)} = 2.447 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Максимальные изгибающие моменты так же возникают в центре пластины:

$$x = a/2 = 0.5 \text{ м}, \quad y = b/2 = 0.5 \text{ м}$$

$$M_x = \frac{16qa^2}{\pi^4} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m^2 + \nu n^2 \frac{a^2}{b^2}}{mn \left( m^2 + n^2 \frac{a^2}{b^2} \right)^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} = 430.977 \text{ Нм/м}$$

$$M_y = \frac{16qa^2}{\pi^4} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\nu m^2 + n^2 \frac{a^2}{b^2}}{mn \left( m^2 + n^2 \frac{a^2}{b^2} \right)^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} = 430.977 \text{ Нм/м}$$

Максимальные поперечные силы возникают посередине сторон контура пластины:

$$x = 0, \quad y = b/2 = 1.5 \text{ м}$$

$$Q_x = \frac{16qa}{\pi^3} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \left( \frac{m\pi x}{a} \right) \sin \left( \frac{n\pi y}{b} \right)}{n \left( m^2 + n^2 \frac{a^2}{b^2} \right)} = 1006.862 \text{ Нм}$$

$$x = a/2 = 1.5 \text{ м}, \quad y = 0$$

$$Q_y = \frac{16qa}{\pi^3} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \left( \frac{m\pi x}{a} \right) \cos \left( \frac{n\pi y}{b} \right)}{m \left( n^2 + m^2 \frac{b^2}{a^2} \right)} = 1006.862 \text{ Нм}$$

Определение напряжений и проверка несущей способности производится согласно Примера 4 настоящего документа.

## 6 ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ПЕРВОЙ ГРУППЫ

### 6.1 Общие положения

6.1.1.Р При проверке по предельному состоянию статического равновесия (EQU), должно выполняться условие (6.7) EN 1990:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stb}$$

где  $E_{d,dst}$  - расчетное значение эффекта дестабилизирующих воздействий;

$E_{d,stb}$  - расчетное значение эффекта воздействий без потери устойчивости.



6.1.2 В некоторых случаях выражение для предельного состояния статического равновесия может включать в себя дополнительные члены как, например, коэффициент трения между жесткими частями.

6.1.3.Р Все части плоской листовой конструкции должны иметь такие пропорции, чтобы удовлетворять основным требованиям расчета по первой группе предельных состояний, приведенных в Разделе 2.

6.1.4 Для определения частного коэффициента безопасности  $\gamma_M$  плоской листовой конструкции см. соответствующие части СН РК EN 1993.

6.1.5 Для определения частного коэффициента безопасности  $\gamma_M$  соединений плоской листовой конструкции см. СН РК EN 1993-1-8.

Частный коэффициент безопасности  $\gamma_M$  соединений плоской листовой конструкции принимается в соответствии с Таблицей 6.1.

**Таблица 6.1 — Частные коэффициенты безопасности для соединений**

Несущая способность элементов и поперечных сечений	$\gamma_{M0}, \gamma_{M1}$ и $\gamma_{M2}$ , см. СН РК EN 1993-1-1
Несущая способность болтов	$\gamma_{M2}$
Несущая способность заклепок	
Несущая способность штифтов	
Несущая способность сварных швов	
Несущая способность пластин на смятие	
Несущая способность на сдвиг контактных поверхностей:	
в предельном состоянии по несущей способности (категория С)	$\gamma_{M3}$
в предельном состоянии по эксплуатационной пригодности (категория В)	$\gamma_{M3,ser}$
Несущая способность инъекционных болтов на смятие	$\gamma_{M4}$
Несущая способность узлов ферм из замкнутых профилей	$\gamma_{M5}$
Несущая способность штифтов в предельном состоянии по эксплуатационной пригодности	$\gamma_{M6,ser}$
Предварительное натяжение высокопрочных болтов	$\gamma_{M7}$
Несущая способность бетонных элементов	$\gamma_c$ , см. EN 1992

ПРИМЕЧАНИЕ Численные значения коэффициентов безопасности  $\gamma_M$  могут быть определены в Национальном Приложении. Рекомендуются следующие значения:  $\gamma_{M2} = 1,25$ ;  $\gamma_{M3} = 1,25$  и  $\gamma_{M3,ser} = 1,1$ ;  $\gamma_{M4} = 1,0$ ;  $\gamma_{M5} = 1,0$ ;  $\gamma_{M6,ser} = 1,0$ ;  $\gamma_{M7} = 1,1$ .

## 6.2 Ограничение пластических деформаций

### 6.2.1 Общие положения

6.2.1.1 В каждой точке плоской листовой конструкции расчетное эквивалентное напряжение должно удовлетворять условию

$$\sigma_{eq,Ed} \leq \sigma_{eq,Rd}, \quad (6.1)$$

где  $\sigma_{eq,Ed}$  является максимальным значением эквивалентного напряжения (напряжения Мизеса) и определяется в 5.2.3.

6.2.1.2 В упругом расчете прочность сегмента пластины от пластического разрушения или разрушения при растяжении под воздействием совместных осевых сил и изгиба определяется по предельно допустимому эквивалентному напряжению Мизеса  $\sigma_{eq,Rd}$ :

$$\sigma_{eq,Rd} = f_{yk} / \gamma_{M0}. \quad (6.2)$$

ПРИМЕЧАНИЕ Для определения значения  $\gamma_{M0}$  см. 1.1.2.

**ПРИМЕР 3 Расчет численными методами: изгиб изотропной равномерно нагруженной прямоугольной пластины, шарнирно закрепленной по краям.**

Дано:  $E = 2.06 \cdot 10^{11}$  Па,  $\nu = 0.3$ ,  $t = 0.016$  м,  $b = 1$  м,  $a = 1$  м,  $q_0 = 1$  кН/м

Для расчета численными методами можно использовать любой из универсальных программных комплексов, такие как SCAD, ПК Лира, Robot, ANSYS, SolidWorks, Nastran и множество других. Данный пример расчета выполнен с помощью ПК SCAD.

Для рассчитываемого конструктивного элемента генерируем на плоскости прямоугольную сетку из конечных элементов типа «изгибаемая плита» (в данном случае сетка 20x20 ячеек, см. Рисунок 1), для которых в качестве исходной информации задаем начальные данные расчета ( $E$ ,  $t$ ,  $\mu$ ):

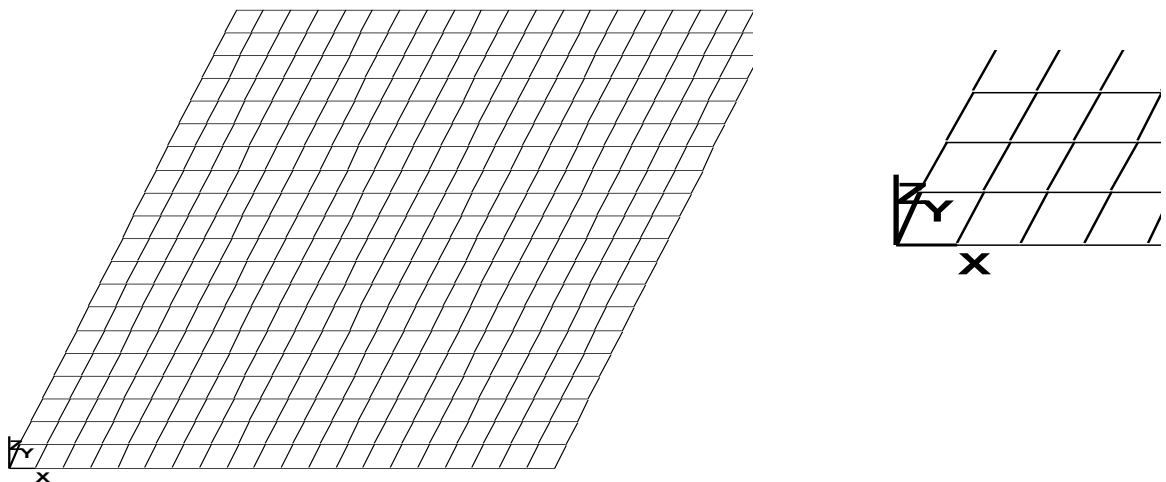


Рисунок 1. Расчетная схема пластины.

С использованием соответствующих опций программного комплекса вводим шарнирные закрепления по краям пластины (см. Рисунок 2):

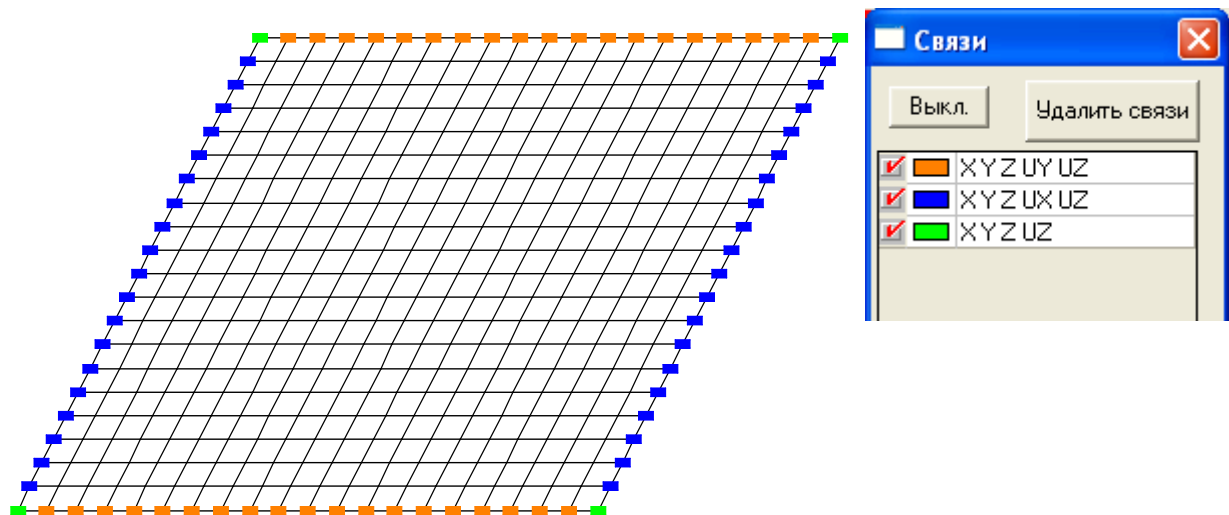


Рисунок 2. Связи.

Аналогично, используя соответствующие опции универсального расчетного комплекса, вводим данные информацию о прикладываемой нагрузке (см. Рисунок 3).

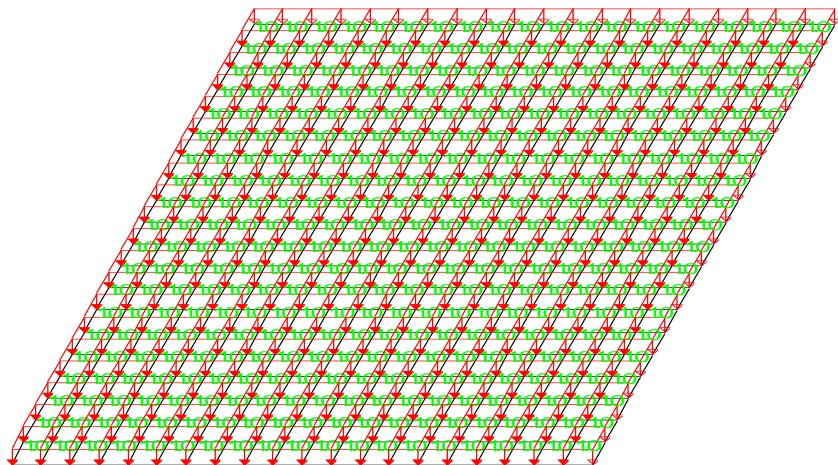


Рисунок 3. Приложение нагрузки.

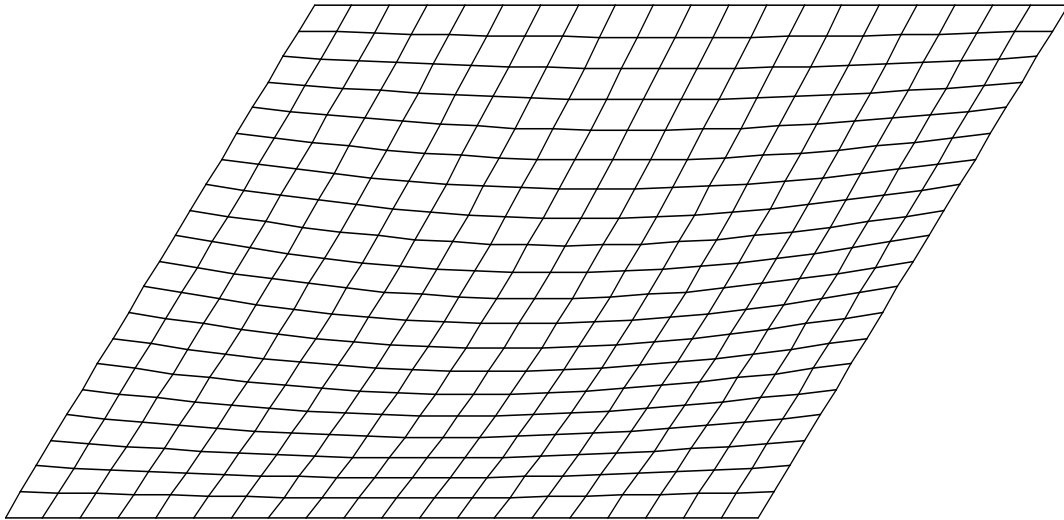
Выполняя на основе задания соответствующих опций УПК расчет напряженно-деформированного состояния конструкции в линейной постановке, получаем значения вертикальных перемещений и внутренних усилий в пластине, максимальные значения которых для рассчитываемого примера приведены в таблице:

Таблица 1. Результаты расчета.

w, мм	M, кНм/м	M <sub>xy</sub> , кНм/м	Q, кН/м
0.0527	0.0481	0.0326	0.3127

Здесь, в силу симметрии пластины, условий закрепления и приложенной нагрузки  $M = M_x = M_y$ ,  $Q = Q_x = Q_y$

Деформированная схема пластины приведена на Рисунке 4:



**Рисунок 4. Деформированная схема пластины.**

**ПРИМЕЧАНИЕ** Сравнение точности результатов полученного расчета и проверка прочности сегмента пластины по формулам (6.1) и (6.2) выполнена в Примере 4.

#### **6.2.2 Дополнительные правила для общего анализа**

6.2.2.1 Если расчет численными методами основывается на расчете без учета физической нелинейности, то прочность при пластическом разрушении или разрушении при растяжении проверяется в соответствии с требованиями 6.2.1.

6.2.2.2 Если физически нелинейный расчет основывается на зависимости напряжений от деформации с  $f_{yd} (= f_y / \gamma_{M0})$  плоская листовая конструкция должна подвергаться нагрузке  $F_{Ed}$ , которая принимается по расчетным значениям воздействий. Нагрузка постепенно увеличивается, чтобы определить коэффициент увеличения нагрузки  $\alpha_R$  для предельного пластического состояния  $F_{Rd}$ .

6.2.2.3 Результат расчета численными методами должен отвечать условию

$$F_{Ed} \leq F_{Rd}, \quad (6.3)$$

где  $F_{Rd} = \alpha_R F_{Ed}$ ,

здесь  $\alpha_R$  — коэффициент увеличения нагрузки для нагрузок  $F_{Ed}$ , при которых достигается предельное состояние первой группы.

#### **ПРИМЕР 4 Анализ влияния густоты сетки на точность решения задачи**

Исходные данные для рассматриваемого примера приведены в 6.2.1

Учитывая, что для континуальных систем решения, получаемые на основе МКЭ всегда являются приближенными, и степень приближения напрямую зависит от густоты используемой расчетной сетки конструкции, в качестве примера процедуры определения необходимой густоты сетки для обеспечения достаточной сходимости рассмотрим расчет пластины с исходными данными Примера 3 при различном количестве ячеек (см. Таблица 1).

Таблица 1. Сравнение результатов расчета при различном количестве ячеек

разбиение сеткой	w, мм	M, кНм/м	Q, кН/м	w %	M %	Q %
5x5	0.0999	0.0946	0.4922	-90%	-98%	-47%
10x10	0.0531	0.0485	0.2877	-1%	-1%	14%
20x20	0.0527	0.0481	0.3127	0%	0%	7%
40x40	0.0526	0.0479	0.3252	0%	0%	3%
аналитическое решение	0.0526	0.0479	0.3356			

В столбце 1 приведены размеры сетки разбиения, в столбцах 2-4 результаты расчета, в столбцах 5-7 сравнение результатов расчета

Из Таблицы 1 видно, где приведены результаты сходимости численных расчетов при различном количестве ячеек разбиения, что достаточная сходимость достигается уже при разбиении сеткой 20x20.

Приведение усилий к эквивалентному напряжению выполняем на основе значений полученных усилий и толщины пластины.

$$\sigma_{bx,Ed} = \sigma_{by,Ed} = \frac{M}{W} = \frac{6M}{t^2} = \frac{6 \cdot 0.048 \cdot 10^{-3}}{0.016^2} = 1.125 \text{ Па}$$

Эквивалентные напряжения определим по (5.2). Точки, для которых изгибные напряжения достигают максимума, находятся на пересечении осей симметрии, поэтому напряжения сдвига  $\tau_{xy,Eq} = 0$ :

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{y,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{y,Ed}} = \sqrt{1.25^2 + 1.25^2 - 1.25^2} = 1.25 \text{ Па}$$

Для стали S 235 согласно п. 5.2.1.5  $f_y = 235 \text{ Н/мм}^2 = 235 \text{ МПа}$

$$\gamma_{M0} = 1.2$$

$$\sigma_{eq,Rd} = f_{yk} / \gamma_{M0} = 235 / 1.2 = 195.83 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{eq,Ed} = 1.25 \text{ МПа} < \sigma_{eq,Rd} = 195.83 \text{ МПа}$$

Следовательно, условие прочности выполняется.

## 6.2.3 Дополнительные правила для расчета упрощенными расчетными методами

### 6.2.3.1 Неподкрепленные пластины

6.2.3.1.1 Если неподкрепленная пластина рассчитывается как эквивалентная балка, прочность ее поперечного сечения должна проверяться сочетанием нагружения в ее плоскости и поперечного нагружения по правилам расчета, указанным в СН РК EN 1993-1-1.

### 6.2.3.2 Подкрепленные пластины

6.2.3.2.1 Если подкрепленный сегмент пластины моделируется как ростверк, описанный в 5.2.3.4, прочность поперечного сечения и прочность при продольном изгибе отдельного  $i$ -го элемента ростверка должны проверяться сочетанием плоскостного и поперечного нагружения по формуле взаимодействия, указанной в 5.2.3.4.2.4 – 5.2.3.4.2.9.

6.2.3.2.2 Если подкрепленный сегмент пластины моделируется как эквивалентная балка, как описано в 5.2.3.4, прочность поперечного сечения и прочность при продольном изгибе эквивалентной балки должны проверяться сочетанием плоскостного и поперечного нагружения по формуле взаимодействия, указанной в 5.2.3.4.2.4 – 5.2.3.4.2.9.

6.2.3.2.3 Внутренние усилия или напряжения субпанели должны проверяться на прочность при пластическом разрушении или разрушении при растяжении согласно 5.2.3.2 – 5.2.3.4.

### 6.3 Малоцикловая усталость

#### 6.3.1 Общие положения

6.3.1.1 В каждой точке плоской листовой конструкции наибольшее значение размаха напряжений  $\Delta\sigma_{Ed}$  должно удовлетворять следующему условию

$$\Delta\sigma_{Ed} \leq \Delta\sigma_{Rd} \quad (6.4)$$

где  $\Delta\sigma_{Ed}$  максимальное значение эквивалентного напряжения Мизеса

$$\Delta\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\Delta\sigma_{x,Ed}^2 + \Delta\sigma_{y,Ed}^2 - \Delta\sigma_{x,Ed}\Delta\sigma_{y,Ed} + 3\Delta\tau_{Ed}^2}.$$

в соответствующей точке пластинчатого сегмента при соответствующем сочетании расчетных воздействий:

6.3.1.2 В физическом линейном расчете прочность сегмента пластины к малоцикловой усталости может проверяться ограничением размаха эквивалентного напряжения  $\Delta\sigma_{Rd}$ :

$$\Delta\sigma_{Rd} = 2,0f_{yk}/\gamma_{M0}. \quad (6.5)$$

ПРИМЕЧАНИЕ Для определения значения  $\gamma_{M0}$  см. 1.1.2.

#### 6.3.2 Дополнительные правила для общего анализа

6.3.2.1 В случае применения физически нелинейного автоматизированного расчета к пластине должны быть приложены расчетные значения воздействий.

6.3.2.2 Общая эквивалентная деформация (Мизеса)  $\varepsilon_{eq,Ed}$  по истечении проектной долговечности конструкции должна оцениваться анализом, который моделирует все циклы нагружения.

6.3.2.3 Если не выполнен точный расчет, то общую эквивалентную пластическую деформацию (Мизеса)  $\varepsilon_{eq,Ed}$  можно рассчитать по формуле:

$$\varepsilon_{eq,Ed} = m\Delta\varepsilon_{eq,Ed}, \quad (6.6)$$

где  $m$  — проектное количество циклов;

$\Delta\varepsilon_{eq,Ed}$  — наибольшее приращение пластических деформаций (Мизеса) в течение одного полного цикла нагружения в любой точке конструкции, происходящее после третьего цикла.

6.3.2.4 Если производится более сложная оценка малоцикловой усталости, проектное значение эквивалентной пластической деформации (Мизеса)  $\varepsilon_{eq,Ed}$  должно удовлетворять следующему условию:

$$\varepsilon_{p,eq,Ed} \leq n_{eq} \cdot \frac{f_{yk}}{E\gamma_{M0}}. \quad (6.7)$$

ПРИМЕЧАНИЕ 1 В Национальном Приложении может быть выбрано значение  $n_{eq}$ .  
Рекомендуемое значение  $n_{eq} = 25$ .

ПРИМЕЧАНИЕ 2 Для определения значения  $\gamma_{M0}$  см. 1.1.2.

## 6.4 Потеря устойчивости

### 6.4.1 Общие положения

6.4.1.1 Если сегмент пластины плоской листовой конструкции находится под воздействием сжатия в его плоскости или сдвига, его устойчивость должна проверяться согласно правилам расчета, приведенным в 6.4.1.2 и 6.4.1.3.

6.4.1.2 Проверка прочности и устойчивости обрешеченных пластин при действии сжимающих нормальных напряжений поперечных сечений класса 4 производится с использованием характеристик эффективной<sup>Р</sup> площади поперечного сечения ( $A_{eff}$ ,  $I_{eff}$ ,  $W_{eff}$ ) для балок и колонн, в том числе и при крутильной форме потери устойчивости согласно СН РК EN 1993-1-1.

6.4.1.3 Эффективные<sup>Р</sup> площади поперечного сечения допускается определять на основе распределения деформаций по линейному закону при достижении упругих деформаций в середине плоскости сжатой пластины.

6.4.1.4 Устойчивость при изгибе, кручении, короблении должна проверяться согласно СН РК EN 1993-1-5, также см. 5.2.3.4.8 и 5.2.3.4.9.

6.4.1.5 О взаимодействии плоскостных и поперечных нагрузок см. Раздел 5.

### 6.4.2 Дополнительные правила для общего анализа

6.4.2.1 Если устойчивость при сочетании плоскостного и поперечного нагружений проверяется расчетом численными методами, то расчетное воздействие  $F_{Ed}$  должно удовлетворять условию:

$$F_{Ed} \leq F_{Rd}. \quad (6.8)$$

6.4.2.2 Устойчивость плоской листовой конструкции при продольном изгибе  $F_{Rd}$  определяется по формуле:

$$F_{Rd} = kF_{Rk}/\gamma_{M1}, \quad (6.9)$$

где  $F_{Rk}$  — нормативное значение критической силы;

$k$  — коэффициент калибровки, см. 6.4.2.6.

ПРИМЕЧАНИЕ Для определения значения  $\gamma_{M1}$  см. 1.1.2.

6.4.2.3 Нормативное значение критической силы  $F_{Rk}$  должно определяться по кривой зависимости деформаций от нагрузок, которая вычисляется для соответствующей точки конструкции с учетом соответствующего сочетания расчетных воздействий  $F_{Ed}$ . Расчет

также должен учитывать дефекты, как описано в 5.2.3.2.

6.4.2.4 Нормативное значение критической силы  $F_{Rk}$  определяется одним из следующих критериев:

- по максимальной нагрузке кривой зависимости деформация – нагрузка;
- по максимально допустимой деформации кривой зависимости деформация – нагрузка от нагрузок до достижения бифуркации или предельной нагрузки, если это применимо.

6.4.2.5 Надежность критической силы, определяемой расчетом численными методами, должна проверяться:

а) путем вычисления значения нормативной критической силы  $F_{Rk,known}$  другой пластины, значение критической силы которой известно, с теми же допущениями и отклонениями. Контрольные параметры устойчивости должны быть подобны (например, гибкость пластины, формы потери устойчивости, чувствительность к начальным несовершенствам, свойства материала);

б) или путем сравнения полученных значений с результатами испытаний  $F_{Rk,known}$ .

6.4.2.6 В зависимости от результатов проверки надежности коэффициент калибровки  $k$  определяется по формуле:

$$k = F_{Rk,known,check} / F_{Rk,check} \quad (6.10)$$

где  $F_{Rk,known,check}$  следует из предыдущих сведений;

$F_{Rk,check}$  результаты численных вычислений.

### 6.4.3 Дополнительные правила для расчета упрощенными расчетными методами

6.4.3.1 Если подкрепленный сегмент пластины подразделяется на субпанели и эквивалентные расчетные элементы жесткости, как описано в 5.2.3.4, устойчивость подкрепленного сегмента пластины может быть проверена расчетными методами, указанными в СН РК EN 1993-1-5. Устойчивость свободных краев ребер жесткости может быть проверена согласно 6.3.3 СН РК EN 1993-1-1 (см п. 5.2.3.4.2).

6.4.3.2 Устойчивость эквивалентного расчетного элемента жесткости, который определяется в 5.2.3.4, может быть проверена расчетными методами, указанными в СН РК EN 1993-1-1.

## 7 УСТАЛОСТЬ

7.1 Для плоских листовых конструкций требования по усталости принимаются в соответствующих частях СН РК EN 1993.

7.2 Малоцикловая усталость должна рассматриваться как предельное состояние для повторяющихся циклов нагрузки и разгрузки, которые вызывают текучесть при растяжении или сжатии или при том и другом действии, тем самым вызывая повторяющийся процесс пластической работы конструкции. Такая переменная текучесть может привести к местному трещинообразованию в результате уменьшения способности материала поглощать энергию,



что и является ограничением малоцикловой усталостной прочности. Напряжения, которые связаны с этим предельным состоянием, возникают при комбинации всех воздействий на конструкцию и условий совместности ее деформирования.

7.3 Оценка сопротивления усталости должна производиться с применением:

- метода работоспособности с повреждениями;
- метода безопасного ресурса.

7.4 Метод работоспособности с повреждениями должен гарантировать достоверность того, что конструкция будет удовлетворительно работать в течение ее проектной долговечности, при условии, что запланированные осмотр и режим обслуживания для обнаружения и исправления усталостных повреждений выполняются в течение срока проектной долговечности конструкции.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Метод работоспособности с повреждениями может применяться, когда в момент усталостного разрушения возможно перераспределение усилий между составляющими элемента конструкции.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 В Национальном Приложении могут содержаться предусмотренные программы контроля.

ПРИМЕЧАНИЕ 3 Конструкции, оцениваемые в данной части, считаются работоспособными с повреждениями, если материал конструкций выбран согласно СН РК EN 1993-1-10 и проводится их регулярное обслуживание.

7.5 Метод безопасного ресурса должен обеспечивать достоверный уровень того, что конструкция будет удовлетворительно работать за время ее проектной долговечности без необходимости регулярных обследований в процессе эксплуатации на предмет усталостного повреждения. Метод безопасного ресурса должен применяться в случаях, когда образование локальной трещины в одной детали быстро приводит к разрушению элемента или всей конструкции.

7.6 Для оценки усталости согласно настоящей части, требуемая надежность может быть достигнута корректировкой частного коэффициента безопасности для сопротивления усталости  $\gamma_{Mf}$ , учитывающего последствия разрушения и принятые требования проекта.

7.7 Сопротивление усталости определяется рассмотрением элемента конструкции в целом, с учетом его металлургических факторов и геометрических параметров сечения. В подверженных усталости элементах, представленных в настоящей части, также указывается вероятное место зарождения трещины.

7.8 Методы оценки сопротивления усталости, приведенные в настоящем пособии, определяются параметрами кривых сопротивления усталости для:

- стандартных элементов — соответствующими номинальными напряжениями;
- рекомендуемых сварных соединений — соответствующими локальными напряжениями.

7.9 Требуемая надежность может быть получена следующими способами:

- а) методом работоспособности с повреждениями:

— выбором элементов, материалов и уровней напряжения, так чтобы при образовании трещины в результате были низкая скорость распространения трещины и большая критическая длина трещины;

— назначением нескольких программ нагружения;

— установкой деталей, останавливающих трещины;

— установкой деталей, легко контролируемых в процессе регулярных осмотров;

б) методом безопасного ресурса:

— выбором элементов и уровней напряжения, обеспечивающим усталостную долговечность, достаточную, чтобы получить значения  $\beta$ , равные таковым для проверок предельного состояния в конце проектного времени эксплуатации.

ПРИМЕЧАНИЕ Национальное Приложение может принимать другие методы оценки определения предельных состояний, а также назначать численные значения для  $\gamma_{Mf}$ . Рекомендованные значения  $\gamma_{Mf}$  приведены в Таблице 7.1.

**Таблица 7.1 — Рекомендованные значения частных коэффициентов безопасности для сопротивления усталости**

Метод оценки	Последствия разрушения	
	Малые последствия	Большие последствия
Работоспособности при повреждениях	1,00	1,15
Безопасного ресурса	1,15	1,35

## 8 ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВТОРОЙ ГРУППЫ

### 8.1 Общие положения

8.1.1 Принципы определения предельных состояний второй группы, указанные в Разделе 7 СН РК EN 1993-1-1, также применяются к плоским листовым конструкциям.

8.1.2 Стальные конструкции следует проектировать и возводить с обеспечением требований предельных состояний по эксплуатационной пригодности.

8.1.3 Основные требования предельных состояний по эксплуатационной пригодности приводятся в 3.4 EN 1990.

8.1.4 Предельные состояния по эксплуатационной пригодности, соответствующие им нагрузки и расчетную модель следует устанавливать в каждом конкретном проекте.

8.1.5 Если выполняется пластический статический расчет, то при оценке предельного состояния по эксплуатационной пригодности необходимо учитывать перераспределение сил и моментов.

## **8.2 Предельные состояния по эксплуатационной пригодности для зданий**

### **8.2.1 Вертикальные прогибы**

8.2.1.1.В Согласно EN 1990, А.1.4 (Приложение А), предельные значения вертикальных прогибов, соответствующих EN 1990, Рисунок А.1.1 (Приложение А), следует устанавливать для каждого конкретного проекта и согласовывать с заказчиком.

ПРИМЕЧАНИЕ В Предельные значения вертикальных прогибов могут быть установлены в Национальном Приложении.

### **8.2.2 Горизонтальные перемещения**

8.2.2.1.В Согласно EN 1990, А.1.4 (Приложение А), предельные значения горизонтальных перемещений, соответствующие EN 1990, Рисунок А.1.2 (Приложение А), следует устанавливать для каждого конкретного проекта и согласовывать с заказчиком.

ПРИМЕЧАНИЕ В Предельные значения перемещений могут быть установлены в Национальном Приложении.

### **8.2.3 Динамические эффекты**

8.2.3.1.В Согласно EN 1990, А.1.4.4 (Приложение А), вибрации конструкций, эксплуатация которых связана с хождением людей, должна быть ограничена для исключения дискомфорта. Предельные значения показателей вибрации следует устанавливать для каждого конкретного проекта и согласовывать с заказчиком.

ПРИМЕЧАНИЕ В Предельные значения показателей вибрации перекрытий могут быть установлены в Национальном Приложении.

8.2.3.2 Для плоских листовых конструкций должны проверяться критерии предельных состояний, указанные в 8.3 и 8.4.

## **8.3 Прогибы из плоскости**

8.3.1 Предельное значение прогиба  $w$  должно определяться как условие, при котором не выполняются условия нормальной эксплуатации сегмента пластины.

ПРИМЕЧАНИЕ Для определения предельных значений прогиба  $w$  см. соответствующие нормативы.

8.3.2 Вертикальные и горизонтальные деформации должны быть определены в соответствии с требованиями Еврокодов EN 1992 - EN 1999 для соответствующих комбинаций воздействий согласно (6.14a) – (6.16b), принимая во внимание требования эксплуатационной пригодности, 8.3.4.Р. Особое внимание необходимо уделить различию между обратимыми и необратимыми предельными состояниями.

8.3.3 Схематично, вертикальные перемещения представлены на Рисунке. 8.1.



Рисунок 8.1 - Определения вертикальных прогибов

На Рисунке 8.1:

- $w_c$  - предварительный прогиб в ненагруженном элементе конструкции;
- $w_1$  - начальная часть прогиба от постоянной нагрузки при сочетаниях нагрузок, определяемых по Формулам (6.14a) – (6.14 b);
- $w_2$  - часть прогиба от длительного действия постоянной нагрузки;
- $w_3$  - дополнительная часть прогиба, от временных воздействий при сочетании воздействий, определяемых по Формулам (6.14a) – (6.14 b);
- $w_{tot}$  - общий прогиб - сумма  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$ ;
- $w_{max}$  - остаточный общий прогиб с учетом выгиба;

8.3.4.Р Предельные состояния, которые обеспечивают функции несущей конструкции или одной из ее частей при нормальных условиях эксплуатации или хорошее самочувствие пользователей, или внешний вид строения, следует классифицировать как предельные состояния эксплуатационной пригодности.

8.3.5 Сочетания воздействий, применяемые для подтверждения эксплуатационной пригодности, символически определены следующими зависимостями:

ПРИМЕЧАНИЕ В данных формулах все частные коэффициенты безопасности принимаются за 1,0, см. 8.3.2, 8.3.3 и EN 1991 – EN 1999.

а) Нормативное сочетание по (6.14a) EN 1990:

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; Q_{k,1}; \psi_{0,i}Q_{k,i}\}; j \geq 1; i > 1,$$

в котором сочетание воздействий в скобках { } может быть выражено следующим образом (6.14b) EN 1990:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}.$$

ПРИМЕЧАНИЕ Нормативное сочетание применяется, как правило, для необратимых

влияний на несущую конструкцию.

б) Частный случай применяемого сочетания (6.15a) EN 1990:

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; \psi_{1,i}Q_{k,1}; \psi_{2,i}Q_{k,i}\}; \quad j \geq 1; i > 1,$$

в котором сочетание воздействий в скобках { } может быть выражено следующим образом (6.15b) EN 1990:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i > 1} \psi_{1,i} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}.$$

ПРИМЕЧАНИЕ Частный случай применяемого сочетания применяется, как правило, для обратимых влияний на несущую конструкцию.

с) Практически постоянное сочетание (6.16a) EN 1990:

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; \psi_{2,i}Q_{k,i}\}; \quad j \geq 1; i > 1,$$

в котором сочетание воздействий в скобках { } может быть выражено следующим образом по (6.16b) EN 1990:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}.$$

ПРИМЕЧАНИЕ Практически постоянные сочетания, как правило, применяются для длительных влияний, например, для внешних параметров объекта.

#### ПРИМЕР 5 Продолжение расчета Примера 3 из Раздела 6

Деформированная схема пластины приведена на Рисунке 4 в Примере 3 Раздела 6. Для указанной схемы максимальный прогиб в центре пластины составляет  $w = 0.053$  мм (см. Таблица 1 в Примере 3 Раздела 6).

Понятие предельного значения прогиба в зависимости от пролета в Еврокод 3 регламентируется соответствующими местными техническими нормативными правовыми актами

ТКП EN 1993-1-1-2009 стр. 83

7.2.1п.1.В	Предельные значения вертикальных прогибов следует принимать по Национальному Приложению к СТБ EN 1990. Limits for vertical deflections should be taken from the National Annex to STB EN 1990
------------	--

СТБ EN 1990-2007 стр. 56

А.1.4.2 п.2	Предельные прогибы и перемещения несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений при расчете по второй группе предельных состояний в зависимости от технологических, конструктивных, физиологических и эстетико-психологических требований принимают по Разделу 10 СНиП 2.01.07-85.
-------------	---

Согласно СНиП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия» Таблица 19

$$[w] = l/120 = 1000/120 = 8.33 \text{ мм}$$

Где  $l$  - пролет покрытия (перекрытия).

$w = 0.053 < [w] = 8.33$  следовательно, условия нормальной эксплуатации сегмента пластины выполняются.

#### **8.4 Зыбкость**

8.4.1 Чрезмерные колебания должны определяться как предельное условие, при котором либо происходит разрушение плоской листовой конструкции из-за усталости, вызванной чрезмерными колебаниями пластины, либо вступает в силу предельное состояние по потере эксплуатационной пригодности.

ПРИМЕЧАНИЕ Для определения предельных значений гибкости для предотвращения чрезмерных колебаний см. соответствующие нормативы.

## Приложение А (справочное)

### Типы расчетов пластин

#### А.1 Общие положения

А.1.1 Внутренние напряжения подкрепленной и неподкрепленной пластины могут определяться следующими типами расчета:

- LA: линейный упругий;
- GNA: геометрически нелинейный;
- MNA: с учетом физической нелинейности;
- GMNA: с учетом геометрической и физической нелинейности;
- GNIA: геометрически нелинейный с учетом начальных несовершенств;
- GMNIA: геометрически и физически нелинейный с учетом начальных несовершенств.

#### А.2 Линейный упругий расчет пластины (LA)

А.2.1 Линейный упругий расчет моделирует поведение тонкой пластины на основе теории изгиба пластин с идеальной геометрией. Линеаризация является результатом допущения линейно-упругих деформаций материалов и теории малых линейных перемещений.

А.2.2 В линейном упругом расчете удовлетворяются условия равновесия и совместимости прогибов. Напряжения и деформации изменяются линейно с ростом поперечной нагрузки.

А.2.3 Примером линейного упругого расчета может служить следующее дифференциальное уравнение четвертого порядка с частными производными, приведенное для изотропной тонкой пластины, подвергаемой нагружению поперечной нагрузкой:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p(x, y)}{D}, \quad (\text{A.1})$$

где

$$D = \frac{Et^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}.$$

**ПРИМЕР 6 Упругий линейный расчет изотропной пластины шарнирно закрепленной по краям с использованием приведенного дифференциального уравнения для изгибаемых пластин**

Рассмотрим изгиб изотропной равномерно нагруженной прямоугольной пластины, шарнирно закрепленной по краям (см. Рисунок 1)

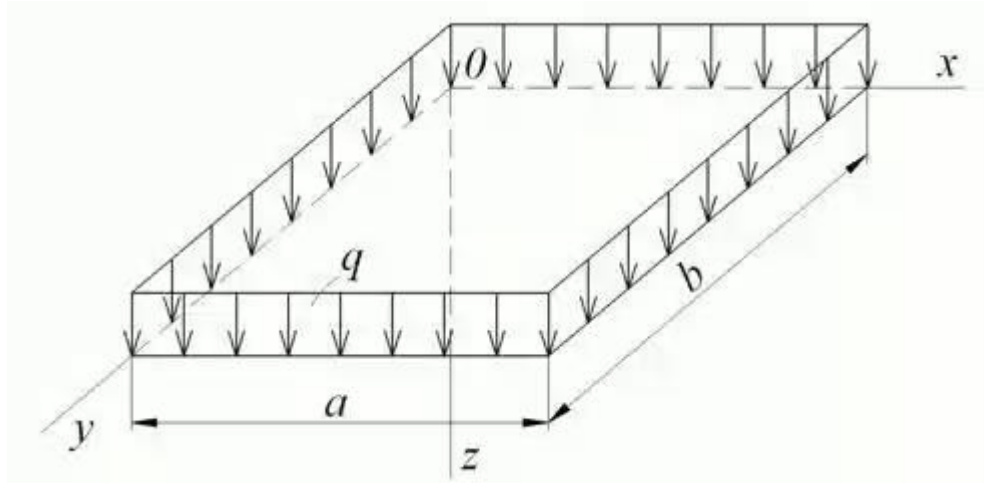


Рисунок 1

Дано:  $E = 2.06 \cdot 10^{11}$  Па,  $\nu = 0.3$ ,  $t = 0.016$  м,  $b = 1$  м,  $a = 1$  м,  $q_0 = 1$  кН/м

Цилиндрическую жесткость пластины определим как

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{2.06 \cdot 10^{11} \cdot 0.016^3}{12(1-\nu^2)} = 77268.86 \text{ Нм}$$

Для определения внутренних усилий и перемещений с помощью дифференциального уравнения Софи Жермен-Лагранжа воспользуемся решением Навье, для которого функцию прогибов  $w(x, y)$  отыскивается в виде двойного тригонометрического ряда

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$$

$$m = 1, 2, \dots, n = 1, 2, \dots$$

Задача заключается в определении коэффициентов  $A_{mn}$  ряда.

Проверим выполнение граничных условий. При шарнирном опирании имеем:

$$\text{при } x=0 \text{ и } x=a \quad w=0 \text{ и } \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0;$$

$$\text{при } y=0 \text{ и } y=b \quad w=0 \text{ и } \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0.$$

При  $x=0$   $\sin \frac{m\pi x}{a} = \sin 0 = 0$  и при  $x=a$   $\sin \frac{m\pi x}{a} = \sin m\pi = 0$ . Аналогично, при

$y=0$  и  $y=b$  получаем  $\sin \frac{n\pi y}{b} = 0$ . Таким образом, прогибы на гранях пластинки отсутствуют.

Аналогично выполняется проверка по вторым производным. Таким образом, функция удовлетворяет всем граничным условиям и может быть принята для решения задачи.



Для определения коэффициентов  $A_{mn}$  возьмем четвертые производные функции прогибов:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \left( \frac{m\pi}{a} \right)^4 \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}; \\ \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \left( \frac{n\pi}{b} \right)^4 \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}; \\ \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 \left( \frac{n\pi}{b} \right)^2 \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}\end{aligned}$$

и подставим их в уравнение Софи Жермен (А.1). После необходимых преобразований получаем:

$$D\pi^4 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} = q(x, y)$$

Представим нагрузку  $q(x, y)$  также в виде двойного тригонометрического ряда по синусам:

$$q(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}.$$

Коэффициенты этого ряда в прямоугольной области  $0 \leq x \leq a$ ,  $0 \leq y \leq b$  определяются по формуле:

$$C_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b q(x, y) \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy.$$

С учетом этого уравнение (А.1) принимает такой вид:

$$\begin{aligned}D\pi^4 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} = \\ = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}.\end{aligned}$$

Равенство двух рядов выполняется, если равны их соответствующие члены, т.е.:

$$D\pi^4 A_{mn} \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 = C_{mn}.$$

Отсюда находим:

$$A_{mn} = \frac{C_{mn}}{D\pi^4 \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2}$$

или, с учетом выражения для  $C_{mn}$ , имеем:

$$A_{mn} = \frac{4}{D\pi^4 ab \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2} \int_0^a \int_0^b q(x, y) \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy.$$

В нашем случае  $q(x, y) = q = \text{const}$ . Тогда

$$\int_0^a \int_0^b q(x, y) \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy = q_0 \int_0^a \sin \frac{m\pi x}{a} dx \int_0^b \sin \frac{n\pi y}{b} dy = 4q \frac{ab}{mn \cdot \pi^2}$$

и

$$A_{mn} = \frac{16q}{D\pi^6 mn \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2}.$$

Таким образом, функция прогибов принимает вид:

$$w(x, y) = \frac{16q}{D\pi^6} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}}{mn \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2}.$$

Где  $m = 1, 3, 5, \dots$ ;  $n = 1, 3, 5, \dots$

При подстановке функции прогибов в выражения внутренних усилий получаем изгибающие моменты:

$$M_x = \frac{16qa^2}{\pi^4} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m^2 + \nu n^2 \frac{a^2}{b^2}}{mn \left( m^2 + n^2 \frac{a^2}{b^2} \right)^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b};$$

$$M_y = \frac{16qa^2}{\pi^4} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\nu m^2 + n^2 \frac{a^2}{b^2}}{mn \left( m^2 + n^2 \frac{a^2}{b^2} \right)^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}.$$

Где  $m = 1, 3, 5, \dots$ ;  $n = 1, 3, 5, \dots$

Поперечные силы:

$$Q_x = \frac{16qa}{\pi^3} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \left( \frac{m\pi x}{a} \right) \sin \left( \frac{n\pi y}{b} \right)}{n \left( m^2 + n^2 \frac{a^2}{b^2} \right)};$$

$$Q_y = \frac{16qa}{\pi^3} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \left( \frac{m\pi x}{a} \right) \cos \left( \frac{n\pi y}{b} \right)}{m \left( n^2 + m^2 \frac{b^2}{a^2} \right)}$$

Где  $m = 1, 3, 5, \dots$ ;  $n = 1, 3, 5, \dots$

Максимальные значения поперечные силы получают посередине сторон контура пластинки.

Так,  $\max Q_x$  возникает в точках с координатами  $(0; b/2)$ , и  $(a; b/2)$ , а  $\max Q_y$  - в точках с координатами  $(a/2; 0)$  и  $(a/2; b)$ .

Покажем вычисления до  $m=99$ ,  $n=99$  первых членов ряда.

В нашем случае (в силу симметрии пластины, условий закрепления и приложенной нагрузки):

Максимальный прогиб в центре пластины:

$$w_{\max} = \frac{16q}{D\pi^4} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}}{mn \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)} \approx 2.126 \cdot 10^3 \left( \frac{1 \cdot 1}{2} + \frac{-1 \cdot 1}{30} + \frac{1 \cdot 1}{130} + \dots + \frac{-1 \cdot (-1)}{1.921 \cdot 10^8} \right) = 5.257 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

Максимальные изгибающие моменты в центре пластины:

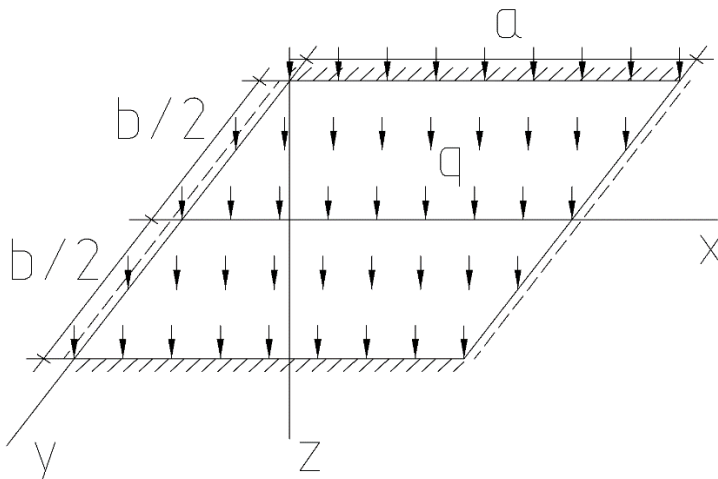
$$M_y = M_x = \frac{16qa^2}{\pi^4} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m^2 + n^2 \frac{a^2}{b^2}}{mn \left( m^2 + n^2 \frac{a^2}{b^2} \right)} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \approx 164.256 (0.65 \cdot 1 \cdot 1 + 0.31 \cdot (-1) \cdot 1 + 0.195 \cdot 1 \cdot 1 + 6.632 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot (-1)) = 47.886 \text{ Нм/м}$$

Максимальные поперечные силы посередине сторон контура пластины

$$Q_y = Q_x = \frac{16qa}{\pi^3} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \left( \frac{m\pi x}{a} \right) \sin \left( \frac{n\pi y}{b} \right)}{n \left( m^2 + n^2 \frac{a^2}{b^2} \right)} \approx 516.025 \cdot \left( \frac{1 \cdot 1}{2} + \frac{-1 \cdot 1}{10} + \frac{1 \cdot 1}{26} + \dots + \frac{1 \cdot (-1)}{1.941 \cdot 10^6} \right) = 335.62 \text{ Н/м}$$

**ПРИМЕР 7 Упругий линейный расчет изотропной пластины, шарнирно закрепленной по двум краям и жестко защемленной по двум другим, с использованием приведенного дифференциального уравнения для изгибаемых пластин**

Рассмотрим изгиб изотропной равномерно нагруженной прямоугольной пластины, шарнирно закрепленной по двум краям и жестко защемленной по двум другим, как показано на Рисунке 1.



## Рисунок 1

Дано:  $E = 2.06 \cdot 10^{11}$  Па,  $\nu = 0.3$ ,  $t = 0.016$  м,  $b = 1$  м,  $a = 1$  м,  $q_0 = 1$  кН/м

Цилиндрическую жесткость пластины определим как

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{2.06 \cdot 10^{11} \cdot 0.016^3}{12(1-\nu^2)} = 7726886 \text{ Нм}$$

Расположим координатные оси, как показано на Рисунке 1. Запишем граничные условия:

$$\text{при } x=0 \text{ и } x=a \quad w=0 \text{ и } \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0;$$

$$\text{при } y = -\frac{b}{2} \text{ и } y = \frac{b}{2} \quad w=0 \text{ и } \frac{\partial w}{\partial y} = 0.$$

Решение, удовлетворяющее граничным условиям будем искать в виде ряда:

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} f_m(y) \sin \frac{m\pi x}{a}$$

Где  $f_m(y)$  - неизвестные функции от  $y$ . Подставляя выражение для прогиба в уравнение Софи Жермен – Лагранжа, получим

$$\sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{\partial^4 f_m(y)}{\partial y^4} - 2 \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 \frac{\partial^2 f_m(y)}{\partial y^2} + \left( \frac{m\pi}{a} \right)^4 f_m(y) \right) \sin \frac{m\pi x}{a} = \frac{1}{D} q(x, y)$$

Разложим нагрузку  $q(x, y)$  в ряд по синусам

$$q(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} q_m(y) \sin \frac{m\pi x}{a}$$

$$\text{Где } q_m(y) = \frac{2}{a} \int_0^a q(x, y) \sin \frac{m\pi x}{a} dx$$

Подставляя выражение для распределенной нагрузки в уравнение, получим

$$\frac{\partial^4 f_m(y)}{\partial y^4} - 2 \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 \frac{\partial^2 f_m(y)}{\partial y^2} + \left( \frac{m\pi}{a} \right)^4 f_m(y) = \frac{1}{D} q_m(y)$$

Т.е. задача сводится к решению линейного неоднородного дифференциального уравнения.

Решение соответствующего однородного уравнения ищем в виде  $\overline{f}_m(y) = Ae^{\eta y}$ .

Характеристическое уравнение примет вид

$$\eta^4 - 2 \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 \eta^2 + \left( \frac{m\pi}{a} \right)^4 = 0$$

Отсюда корни  $\eta = \pm \frac{m\pi}{a}$ . Общее решение однородного уравнения:

$$\overline{f}_m(y) = a_m e^{\frac{m\pi}{a} y} + b_m y e^{\frac{m\pi}{a} y} + c_m e^{-\frac{m\pi}{a} y} + d_m y e^{-\frac{m\pi}{a} y},$$

Где  $a_m, b_m, c_m, d_m$  - постоянные интегрирования находим из граничных условий при

$$y = \pm \frac{b}{2}.$$

Общий интеграл полученного уравнения будет

$$\begin{aligned} f_m(y) &= \overline{f_m}(y) + F_m(y) = \\ &= a_m \operatorname{ch} \frac{m\pi}{a} y + b_m y \operatorname{ch} \frac{m\pi}{a} y + c_m \operatorname{sh} \frac{m\pi}{a} y + d_m y \operatorname{sh} \frac{m\pi}{a} y + F_m(y) \end{aligned}$$

Где  $F_m(y)$  - частное решение дифференциального уравнения.

В нашем случае  $q = \text{const}$

$$q_m(y) = \frac{2}{a} \int_0^a q \sin \frac{m\pi x}{a} dx = \frac{4q}{m\pi}, (m=1, 3, 5, \dots)$$

Подставляя полученное решение в дифференциальное уравнение после подстановки разложенной нагрузки, находим частное решение

$$F_m(y) = \frac{4qa^4}{D(\pi m)^5}.$$

Учитывая, что прогиб пластинки симметричен относительно оси  $Ox$ , в общем интеграле уравнения коэффициенты при нечетных функциях следует положить равными нулю  $b_m = c_m = 0$ . Отсюда

$$f_m(y) = a_m \operatorname{ch} \frac{m\pi}{a} y + d_m y \operatorname{sh} \frac{m\pi}{a} y + \frac{4qa^4}{D(\pi m)^5}, (m=1, 3, 5, \dots)$$

Т.к. две параллельные кромки пластины жестко заделаны, то на них выполняются условия

$$f_m\left(\pm \frac{b}{2}\right) = 0, \quad f'_m\left(\pm \frac{b}{2}\right) = 0$$

Далее получим систему алгебраических уравнений для определения постоянных

$$a_m \operatorname{ch} u_m + d_m \frac{b}{2} \operatorname{sh} u_m + F_m = 0,$$

$$a_m \left( \frac{m\pi}{a} \right) \operatorname{sh} u_m + d_m (\operatorname{sh} u_m + u_m \operatorname{ch} u_m) = 0,$$

Где  $u_m = \frac{m\pi b}{2a}$ , откуда

$$a_m = -F_m \left[ 1 + \frac{u_m \operatorname{sh}^2 u_m}{u_m + \frac{1}{2} \operatorname{sh} 2u_m} \right] \frac{1}{\operatorname{ch} u_m},$$

$$d_m = F_m \frac{\frac{m\pi}{a} \operatorname{sh} u_m}{u_m + \frac{1}{2} \operatorname{sh} 2u_m}.$$

Окончательное решение примет вид:

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \left( a_m \operatorname{ch} \frac{m\pi}{a} y + d_m y \operatorname{sh} \frac{m\pi}{a} y + \frac{4qa^4}{D(m\pi)^5} \right) \sin \frac{m\pi}{a} x, (m=1, 3, 5, \dots)$$

Внутренние усилия в пластине найдем как:

Изгибающие моменты:

$$M_x = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right),$$

$$M_y = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right),$$

Крутящий момент:

$$M_{xy} = -D(1-\mu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y},$$

Поперечные силы:

$$Q_x = -D \left( \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right),$$

$$Q_y = -D \left( \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} \right).$$

Через коэффициенты:

$$M_x = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)}{\pi^3 a^2 m^3} \cdot \left( 4a^4 q + (1-\mu)\pi^5 D m^5 \operatorname{ch}\left(\frac{\pi n y}{a}\right) a_m + \pi^5 D m^5 y \operatorname{sh}\left(\frac{\pi n y}{a}\right) d_m - \right. \\ \left. - 2\pi^4 D a \mu m^4 \operatorname{ch}\left(\frac{\pi n y}{a}\right) - \pi^5 D \mu m^5 y \operatorname{sh}\left(\frac{\pi n y}{a}\right) d_m \right)$$

$$M_y = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)}{\pi^3 a^2 m^3} \cdot \left( 4a^4 \mu q + (-1+\mu)\pi^5 D m^5 \operatorname{ch}\left(\frac{\pi n y}{a}\right) a_m + \pi^5 D \mu m^5 y \operatorname{sh}\left(\frac{\pi n y}{a}\right) d_m - \right. \\ \left. - 2\pi^4 D a m^4 \operatorname{ch}\left(\frac{\pi n y}{a}\right) - \pi^5 D m^5 y \operatorname{sh}\left(\frac{\pi n y}{a}\right) d_m \right)$$

$$M_{xy} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\pi D m \cos\left(\frac{\pi n x}{a}\right)}{a^2} \cdot (\mu-1) \cdot \left( a \operatorname{sh}\left(\frac{\pi n y}{a}\right) d_m + \pi n \operatorname{sh}\left(\frac{\pi n y}{a}\right) a_m + \pi n y \operatorname{ch}\left(\frac{\pi n y}{a}\right) d_m \right)$$

$$Q_x = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 \cos\left(\frac{\pi n x}{a}\right) \cdot \left( 2a^3 q - \pi^4 D m^4 \operatorname{ch}\left(\frac{\pi n y}{a}\right) d_m \right)}{\pi^2 a^2 m^2}$$

$$Q_y = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2\pi^2 D m^2 \operatorname{sh}\left(\frac{\pi n y}{a}\right) d_m \sin\left(\frac{\pi n x}{a}\right)}{a^2}$$

Максимальный прогиб возникает в центре пластины:

$$w_{\max} = 0.0000249 \text{ м}$$

Максимальные изгибающие моменты в середине пролетов жестких заделок и центре пластины соответственно:

$$M_{x1} = -0.0697 \text{ кНм/м}$$

$$M_{x2} = 0.0335 \text{ кНм/м}$$

$$M_{y1} = -0.0209 \text{ кНм/м}$$

$$M_{y2} = 0.0245 \text{ кНм/м}$$

Максимальная поперечная сила в середине пролета жесткой заделки:

$$Q_x = 0.4805 \text{ кН/м}$$

В угловых точках и середине пролетов шарнирно-опертых краев

$$Q_y = 0.224 \text{ кН/м}$$

### А.3 Геометрически нелинейный расчет (GNA)

А.3.1 Геометрически нелинейный расчет основывается на теории изгиба пластин с идеальной геометрией с применением закона линейно-упругого деформирования материалов и теории больших нелинейных прогибов.

А.3.2 В геометрически нелинейном расчете удовлетворяются условия равновесия и совместимости деформаций конструкции.

А.3.3 Теория больших прогибов учитывает взаимодействие между изгибными и мембранными воздействиями. Перемещения и напряжения изменяются нелинейно с ростом поперечной нагрузки.

А.3.4 Примером геометрически нелинейного расчета является следующая система дифференциальных уравнений четвертого порядка с частными производными, приведенная для изотропной тонкой пластины, подвергаемой нагружению поперечной нагрузкой  $p(x,y)$ :

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - \frac{t}{D} \cdot \left[ \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 2 \cdot \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) + \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] = \frac{p(x,y)}{D}, \quad (\text{А.2a})$$

$$\frac{\partial^4 f}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 f}{\partial y^4} = E \cdot \left[ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right], \quad (\text{А.2b})$$

где  $f$  — функция напряжений Эри;

$$D = \frac{Et^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}.$$

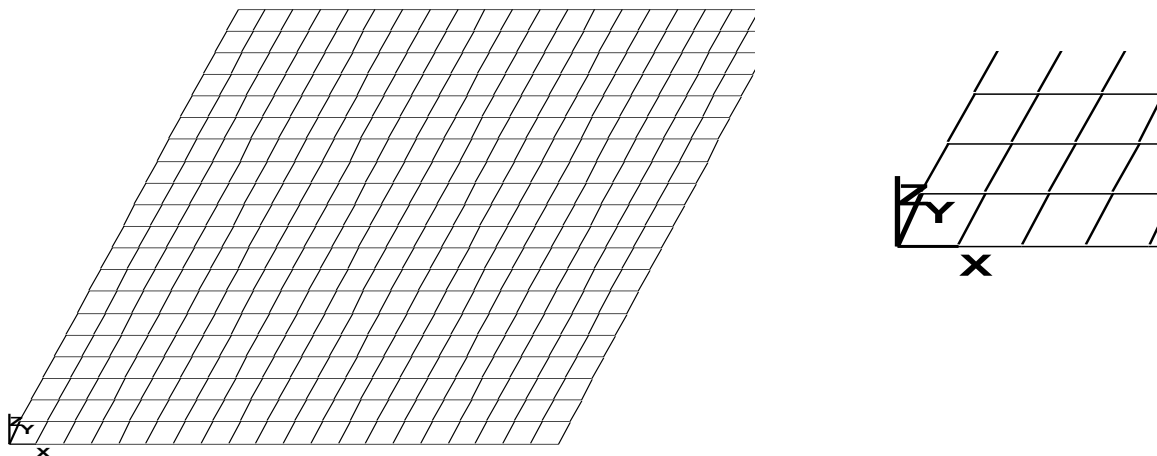
**ПРИМЕР 8 Нелинейный расчет численными методами: изгиб изотропной равномерно загруженной прямоугольной пластины, шарнирно закрепленной по краям**

Дано:  $E = 2.06 \cdot 10^{11}$  Па,  $\nu = 0.3$ ,  $t = 0.016$  м,  $b = 1$  м,  $a = 1$  м,  $q_0 = 1$  кН/м

Для выполнения данного расчета воспользуемся ПК SCAD (здесь, как и в Примере 3 Раздела 6, можно использовать практически любой аналогичный универсальный расчетный комплекс).

Для рассчитываемого конструктивного элемента генерируем на плоскости прямоугольную

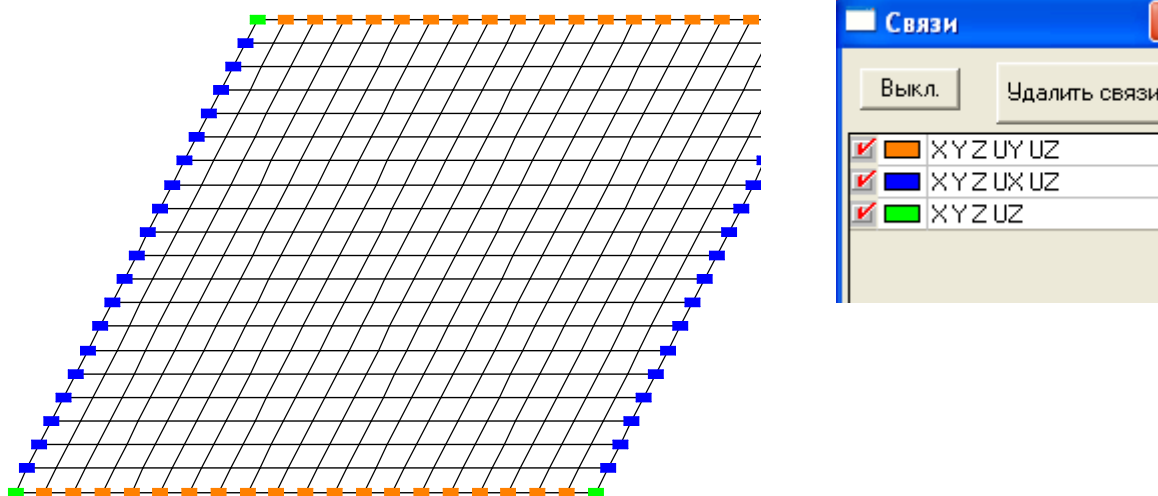
сетку из конечных элементов типа «оболочка» (в данном случае сетка 20x20 ячеек, см. Рисунок 1), для которых в качестве исходной информации задаем начальные данные расчета ( $E$ ,  $t$ ,  $\mu$ ):



**Рисунок 1** Расчетная схема пластины

Для отмеченного типа элементов можно «назначить» расчет с учетом геометрической нелинейности (назначаем его после задания расчетной схемы).

С использованием соответствующих опций программного комплекса вводим шарнирные закрепления по краям пластины (см. Рисунок 2):



**Рисунок 2.** Связи

Аналогично, используя соответствующие опции универсального расчетного комплекса вводим данные информации о прикладываемой нагрузке (см. Рисунок 3).



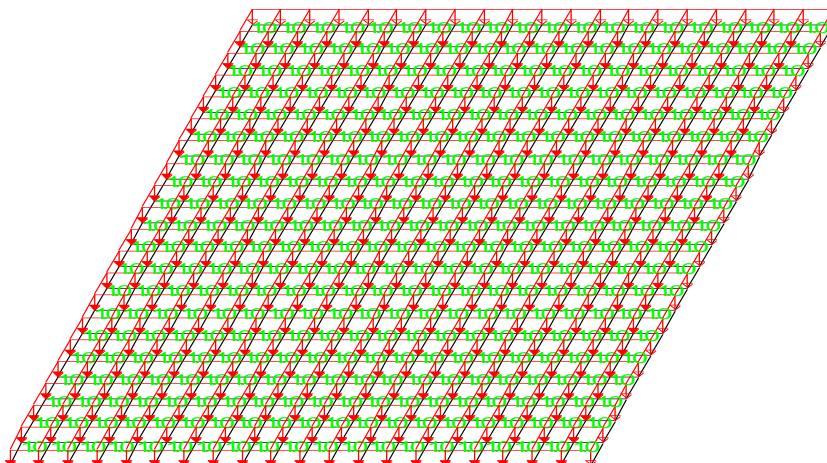


Рисунок 3 Приложение нагрузки

Далее, в специальных расчетных данных редактируем исходные данные по нелинейным нагрузкам. Разбиваем «Загружение 1» на 10 шагов (как правило, приемлемая степень разбиения для конструкций с умеренной нелинейностью). При равенстве шагов загрузки каждому шагу загрузки присваиваем коэффициент загрузки 0.1. Выбираем шагово-итерационный метод, позволяющий уравновесить с требуемой точностью во всех узлах расчетной схемы разбаланс между узловыми нагрузками и реакциями в узлах элемента в пределах заданного количества итераций – 10 (как правило, для таких несложных схем количество итераций равное 10 является вполне приемлемым).

После произведенных вычислений обязательно следует проанализировать протокол выполнения расчета. Необходимо проверить последние итерации каждого шага, чтобы полученная невязка не превышала заданной величины (например - 1%). Если получается большая невязка, следует снова отредактировать исходные данные по нелинейным нагрузкам увеличив количество итераций и повторить расчет. Процедура продолжается до достижения требуемой точности расчета.

В рассматриваемом примере оказывается достаточным одного расчета.

Таблица 1 Результаты расчета

W, мм	M, кНм/м	M <sub>xy</sub> , кНм/м	Q, кН/м
0.0527	0.04805	0.03264	0.31267

Здесь, в силу симметрии пластины, условий закрепления и приложенной нагрузки  $M = M_x = M_y$ ,  $Q = Q_x = Q_y$

Деформированная схема пластины приведена на Рисунке 4:

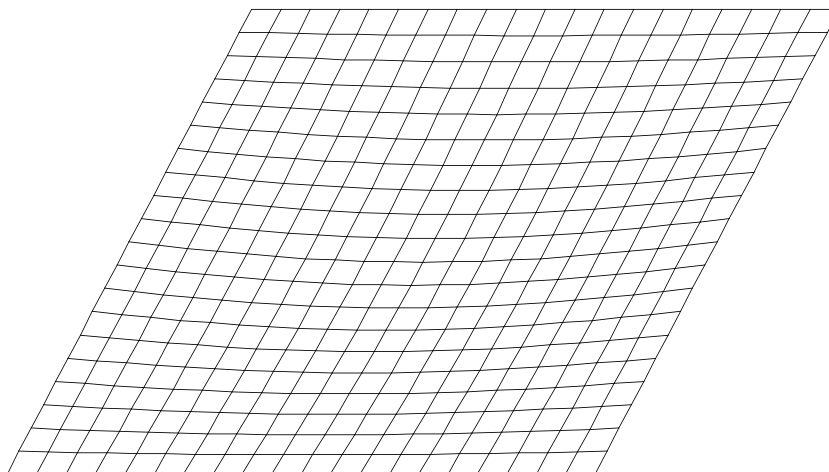


Рисунок 4. Деформированная схема пластины

Таблица 2 Сравнение точности линейного и геометрически нелинейного расчета при использовании численных методов.

w, мм	M, кНм/м	M <sub>xy</sub> , кНм/м	Q, кН/м
нелинейный			
0.0527	0.04805	0.03264	0.31267
линейный			
0.0527	0.0481	0.0326	0.3127
разница			
0.00%	0.10%	0.12%	0.01%

**А.4 Расчет с учетом физической нелинейности (MNA)**

А.4.1 Расчет с учетом физической нелинейности основан на теории изгиба пластин идеальной геометрии с допущением малых прогибов, как в Разделе А.2, принимая во внимание нелинейное поведение материала.

**А.5 Расчет с учетом геометрической и физической нелинейности (GMNA)**

А.5.1 Расчет с учетом геометрической и физической нелинейности основан на теории изгиба пластин идеальной геометрии с допущениями теории нелинейных больших прогибов и закона нелинейного упруго-пластического деформирования материала.

**А.6 Геометрически нелинейный расчет с учетом начальных несовершенств (GNIA)**

А.6.1 Геометрически нелинейный расчет с учетом начальных несовершенств эквивалентен геометрически нелинейному расчету, определенному в Разделе А.3. Для геометрической модели пластины прикладываются начальные несовершенства, например предварительная деформация, которая находится в соответствии с формой потери

устойчивости.

А.6.2 Геометрически нелинейный упругий расчет применяется в случаях доминирующего сжатия или напряжений сдвига в некоторых пластинчатых конструкциях под воздействием плоскостных сил. Он обеспечивает устойчивость пластины с начальными несовершенствами в упругой области.

**А.7 Геометрически и физически нелинейный расчет с учетом начальных несовершенств (GMNIA)**

А.7.1 Геометрически и физически нелинейный расчет с учетом начальных несовершенств эквивалентен расчету с учетом геометрической и физической нелинейности, описанному в Разделе А.5. Для геометрической модели пластины прикладываются начальные несовершенства, например предварительная деформация, которая находится в соответствии с формой потери устойчивости.

А.7.2 Геометрически и физически нелинейный расчет с учетом начальных несовершенств применяется в случаях доминирующего сжатия или напряжений сдвига в некоторых пластинчатых структурах под воздействием плоскостных сил. Он обеспечивает устойчивость пластины с начальными несовершенствами в упруго-пластической области.

## Приложение В (справочное)

### Напряженное состояние свободно опертых пластин по теории малых перемещений

#### В.1 Общие положения

В.1.1 В настоящем приложении приведены расчетные формулы для вычислений внутренних напряжений неподкрепленных прямоугольных пластин, основанных на теории малых прогибов. Следовательно, результаты воздействия мембранных сил не учитываются в расчетных формулах, приведенных в настоящем приложении.

В.1.2 Расчетные формулы предусмотрены для следующих видов нагрузки:

- равномерно распределенной нагрузки, см. Раздел В.3;
- распределенной нагрузки, приложенной на центральном участке пластины, см. Раздел В.4.

В.1.3 Прогиб  $w$  сегмента пластины и изгибные напряжения  $\sigma_{b,x}$  и  $\sigma_{b,y}$  в сегменте пластины могут вычисляться с коэффициентами, указанными в таблицах Разделов В.3 и В.4. Коэффициенты учитывают коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ .

#### В.2 Обозначения

В.2.1 Используемые обозначения:

- $q_{Ed}$  — расчетное значение распределенной нагрузки;
- $p_{Ed}$  — расчетное значение нагрузки на участке пластины;
- $a$  — меньшая сторона пластины;
- $b$  — большая сторона пластины;
- $t$  — толщина пластины;
- $E$  — модуль упругости;
- $k_w$  — коэффициент для определения прогиба пластины, соответствующий граничным условиям, указанным в нижеприведенных таблицах;
- $k_{\sigma bx}$  — коэффициент для определения изгибного напряжения  $\sigma_{b,x}$  пластины, соответствующий граничным условиям, указанным в нижеприведенных таблицах;
- $k_{\sigma by}$  — коэффициент для определения изгибного напряжения  $\sigma_{b,y}$  пластины, соответствующий граничным условиям, указанным в нижеприведенных таблицах.

#### В.3 Равномерно распределенная нагрузка

##### В.3.1 Прогиб из плоскости

В.3.1.1 Прогиб  $w$  равномерно нагруженного сегмента пластины можно рассчитать по формуле:

$$w = k_w \cdot \frac{q_{Ed} a^4}{Et^3}. \quad (\text{B.1})$$

ПРИМЕЧАНИЕ Формула (B.1) действительна, только когда  $w$  менее  $t$ .

### В.3.2 Внутренние напряжения

В.3.2.1 Изгибные напряжения  $\sigma_{b,x}$  и  $\sigma_{b,y}$  в сегменте пластины можно определить по следующим формулам:

$$\sigma_{b,x,Ed} = k_{\sigma bx} \cdot \frac{q_{Ed} a^2}{t^2}, \quad (\text{B.2})$$

$$\sigma_{b,y,Ed} = k_{\sigma by} \cdot \frac{q_{Ed} a^2}{t^2}. \quad (\text{B.3})$$

В.3.2.2 Для сегмента пластины эквивалентное напряжение можно рассчитать с помощью изгибных напряжений следующим образом:

ПРИМЕЧАНИЕ Точки, для которых напряжения определены в нижеприведенных таблицах, находятся или на осях симметрии, или на границах, так что, благодаря симметрии или граничным условиям, напряжения сдвига при изгибе  $\tau_b$  равны нулю.

### В.3.3 Коэффициенты для равномерно распределенных нагрузок

Таблица В.1 — Коэффициенты  $k$

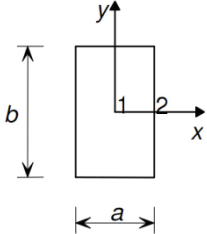
		Нагрузка: равномерно распределенная	
		Граничные условия: все ребра шарнирно закреплены	
$b/a$	$k_{wl}$	$k_{\sigma bx1}$	$k_{\sigma by1}$
1,0	0,04434	0,286	0,286
1,5	0,08438	0,486	0,299
2,0	0,11070	0,609	0,278
3,0	0,13420	0,712	0,244

Таблица В.2 — Коэффициенты  $k$ 

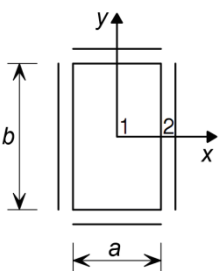
		Нагрузка: равномерно распределенная		
		Граничные условия: все ребра жестко закреплены		
$b/a$	$k_{wl}$	$k_{\sigma bx1}$	$k_{\sigma by1}$	$k_{\sigma bx2}$
1,0	0,01375	0,1360	0,1360	−0,308
1,5	0,02393	0,2180	0,1210	−0,454
2,0	0,02763	0,2450	0,0945	−0,498
3,0	0,02870	0,2480	0,0754	−0,505

Таблица В.3 — Коэффициенты  $k$ 

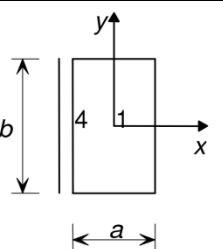
		Нагрузка: равномерно распределенная		
		Граничные условия: три ребра закреплены шарнирно и одно ребро — жестко		
$b/a$	$k_{wl}$	$k_{\sigma bx1}$	$k_{\sigma by1}$	$k_{\sigma bx4}$
1,5	0,04894	0,330	0,177	−0,639
2,0	0,05650	0,368	0,146	−0,705

Таблица В.4 — Коэффициенты  $k$ 

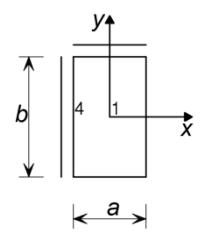
		Нагрузка: равномерно распределенная		
		Граничные условия: два ребра закреплены шарнирно и два ребра — жестко		
$b/a$	$k_{wl}$	$k_{\sigma bx1}$	$k_{\sigma by1}$	$k_{\sigma bx4}$
1,0	0,02449	0,185	0,185	−0,375
1,5	0,04411	0,302	0,180	−0,588
2,0	0,05421	0,355	0,152	−0,683

Таблица В.5 — Коэффициенты  $k$ 

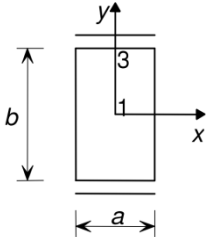
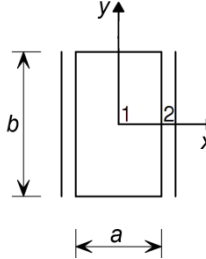
		Нагрузка: равномерно распределенная		
		Граничные условия: два противоположных коротких ребра закреплены жестко, два других — шарнирно		
$b/a$	$k_{w1}$	$k_{\sigma bx1}$	$k_{\sigma by1}$	$k_{\sigma by3}$
1,0	0,02089	0,145	0,197	−0,420
1,5	0,05803	0,348	0,274	−0,630
2,0	0,09222	0,519	0,284	−0,717

Таблица В.6 — Коэффициенты  $k$ 

		Нагрузка: равномерно распределенная		
		Граничные условия: два противоположных длинных ребра закреплены жестко, два других — шарнирно		
$b/a$	$k_{w1}$	$k_{\sigma bx1}$	$k_{\sigma by1}$	$k_{\sigma bx2}$
1,5	0,02706	0,240	0,106	−0,495
2,0	0,02852	0,250	0,0848	−0,507

## В.4 Нагрузка на центральном участке пластины

### В.4.1 Прогиб из плоскости

В.4.1.1 Прогиб  $w$  сегмента пластины с нагрузкой на центральном участке можно рассчитать по формуле:

$$w = k_w \cdot \frac{p_{Ed} a^4}{Et^3}. \quad (\text{В.5})$$

### В.4.2 Внутренние напряжения

В.4.2.1 Изгибные напряжения  $\sigma_{b,x}$  и  $\sigma_{b,y}$  в сегменте пластины можно определить по следующим формулам:

$$\sigma_{b,x,Ed} = k_{\sigma bx} \cdot \frac{p_{Ed}}{t^2}, \quad (\text{В.6})$$

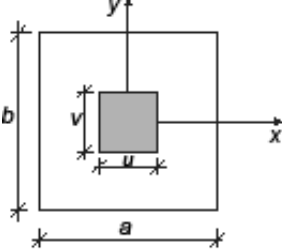
$$\sigma_{b,y,Ed} = k_{\sigma by} \cdot \frac{p_{Ed}}{t^2}. \quad (\text{В.7})$$

2) Для сегмента пластины эквивалентные напряжения от изгиба можно рассчитать следующим образом:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{b,x,Ed}^2 + \sigma_{b,y,Ed}^2 - \sigma_{b,x,Ed}\sigma_{b,y,Ed}} \quad (B.8)$$

### В.4.3 Коэффициенты для нагрузки на центральном участке пластины

Таблица В.7 — Коэффициенты  $k$

		Нагрузка: на центральном участке		
		Граничные условия: все ребра шарнирно закреплены		
		Параметры $\alpha = u/a$ $\beta = v/a$		
$b/a$	$\alpha \times \beta$	$k_{wl}$	$k_{\sigma bx l}$	$k_{\sigma by l}$
1	0,1×0,1	0,1254	1,72	1,72
	0,2×0,2	0,1210	1,32	1,32
	0,3×0,3	0,1126	1,04	1,04
	0,2×0,3	0,1167	1,20	1,12
	0,2×0,4	0,1117	1,10	0,978
1,5	0,1×0,1	0,1664	1,92	1,70
	0,2×0,2	0,1616	1,51	1,29
	0,3×0,3	0,1528	1,22	1,01
	0,2×0,3	0,1577	1,39	1,09
	0,2×0,4	0,1532	1,29	0,953
2,0	0,1×0,1	0,1795	1,97	1,67
	0,2×0,2	0,1746	1,56	1,26
	0,3×0,3	0,1657	1,28	0,985
	0,2×0,3	0,1708	1,45	1,07
	0,2×0,4	0,1665	1,35	0,929
3,0	0,1×0,1	0,1840	1,99	1,66
	0,2×0,2	0,1791	1,58	1,25
	0,3×0,3	0,1701	1,30	0,975
	0,2×0,3	0,1753	1,47	1,06
	0,2×0,4	0,1711	1,37	0,918



## Приложение С (справочное)

### Напряженное состояние свободно опертых пластин по теории больших перемещений

#### С.1 Общие положения

С.1.1 В настоящем приложении приведены расчетные формулы для внутренних напряжений гибких прямоугольных пластин, основанных на теории большой деформации.

С.1.2 Для пластин рассматриваются следующие состояния нагрузки:

— равномерно распределенная нагрузка по всей поверхности пластины, см. Раздел С.3;

— распределенная нагрузка на центральном участке пластины, см. Раздел С.4.

С.1.3 Изгибные и мембранные напряжения в пластине и деформации пластины можно рассчитать с помощью коэффициентов, указанных в таблицах Разделов С.3 и С.4. Коэффициенты получены с учетом коэффициента Пуассона  $\nu = 0,3$ .

#### С.2 Обозначения

С.2.1 Используемые обозначения:

$q_{Ed}$  — расчетное значение равномерно распределенной нагрузки по всей поверхности;

$p_{Ed}$  — расчетное значение равномерно распределенной нагрузки на участке пластины с размерами  $u$  и  $v$ ;

$a$  — меньшая сторона пластины;

$b$  — большая сторона пластины;

$t$  — толщина пластины;

$E$  — модуль упругости;

$FBC$  — граничные условия для изгибного состояния;

$MBC$  — граничные условия для мембранного состояния;

$k_w$  — коэффициент для определения прогиба пластины, соответствующий граничным условиям, указанным в нижеприведенных таблицах;

$k_{\sigma_{bx}}$  — коэффициент для определения изгибного напряжения  $\sigma_{b,x}$  пластины, соответствующий граничным условиям, указанным в нижеприведенных таблицах;

$k_{\sigma_{by}}$  — коэффициент для определения изгибного напряжения  $\sigma_{b,y}$  пластины, соответствующий граничным условиям, указанным в нижеприведенных таблицах;

$k_{\sigma_{mx}}$  — коэффициент для определения мембранного напряжения  $\sigma_{m,x}$  пластины, соответствующий граничным условиям, указанным в нижеприведенных таблицах;

$k_{\sigma_{my}}$  — коэффициент для определения мембранного напряжения  $\sigma_{m,y}$  пластины, соответствующий граничным условиям, указанным в нижеприведенных таблицах.

#### С.3 Равномерно распределенная нагрузка по всей поверхности пластины

### С.3.1 Прогиб из плоскости

С.3.1.1 Прогиб  $w$  сегмента пластины, который нагружен равномерно распределенной нагрузкой, можно рассчитать по формуле:

$$w = k_w \cdot \frac{q_{Ed} a^4}{Et^3}. \quad (C.1)$$

### С.3.2 Внутренние напряжения

С.3.2.1 Изгибные напряжения  $\sigma_{b,x}$  и  $\sigma_{b,y}$  в сегменте пластины можно определить по следующим формулам:

$$\sigma_{b,x,Ed} = k_{\sigma bx} \cdot \frac{q_{Ed} a^2}{t^2}, \quad (C.2)$$

$$\sigma_{b,y,Ed} = k_{\sigma by} \cdot \frac{q_{Ed} a^2}{t^2}. \quad (C.3)$$

С.3.2.2 Мембранные напряжения  $\sigma_{m,x}$  и  $\sigma_{m,y}$  в сегменте пластины можно определить по следующим формулам:

$$\sigma_{m,x,Ed} = k_{\sigma mx} \cdot \frac{q_{Ed} a^2}{t^2}, \quad (C.4)$$

$$\sigma_{m,y,Ed} = k_{\sigma my} \cdot \frac{q_{Ed} a^2}{t^2}. \quad (C.5)$$

С.3.2.3 На нагруженной поверхности пластины общие напряжения определяются изгибными и мембранными напряжениями, приведенными в С.3.2.1 и С.3.2.2, следующим образом:

$$\sigma_{x,Ed} = -\sigma_{b,x,Ed} + \sigma_{m,x,Ed}, \quad (C.6)$$

$$\sigma_{y,Ed} = -\sigma_{b,y,Ed} + \sigma_{m,y,Ed}. \quad (C.7)$$

С.3.2.4 На поверхности пластины без нагрузки общие напряжения определяются изгибными и мембранными напряжениями, приведенными в С.3.2.1 и С.3.2.2, следующим образом:

$$\sigma_{x,Ed} = \sigma_{b,x,Ed} + \sigma_{m,x,Ed}, \quad (C.8)$$

$$\sigma_{y,Ed} = \sigma_{b,y,Ed} + \sigma_{m,y,Ed}. \quad (C.9)$$

С.3.2.5 Для пластины эквивалентное напряжение  $\sigma_{eq,Ed}$  можно определить по напряжениям, приведенным в С.3.2.4, следующим образом:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{y,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \sigma_{y,Ed}}. \quad (C.10)$$

**ПРИМЕЧАНИЕ** Точки, для которых напряженное состояние определяется в нижеприведенных таблицах, расположены или на осях симметрии, или на границах, так что, благодаря симметрии или определенным состояниям границы, мембранные напряжения сдвига  $\tau_m$ , а также напряжения сдвига от изгиба  $\tau_b$  равны нулю. Алгебраическая сумма соответствующего изгибного и мембранного напряжений в точках, указанных в нижеприведенных таблицах, дает значения максимальных и минимальных фибровых напряжений в этих точках.

## С.3.3 Коэффициенты для равномерно распределенных нагрузок

Таблица С.1 — Коэффициенты  $k$ 

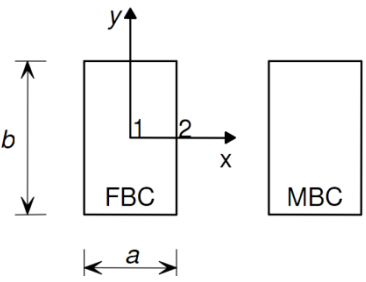
				Нагрузка: равномерно распределенная			
				Граничные условия: FBC: все ребра шарнирно закреплены MBC: нормальные напряжения и напряжения сдвига равны нулю			
				Параметры: $Q = \frac{q_{Ed} a^4}{Et^4}$			
b/a	Q	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$	$k_{\sigma_{mx2}}$
1,0	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
	120	0,0214	0,0961	0,0961	0,0411	0,0411	−0,1024
	200	0,0166	0,0658	0,0658	0,0372	0,0372	−0,1004
	300	0,0135	0,0480	0,0480	0,0335	0,0335	−0,0958
	400	0,0116	0,0383	0,0383	0,0306	0,0306	−0,0915
1,5	20	0,0685	0,3713	0,2156	0,0243	0,0694	−0,1244
	40	0,0546	0,2770	0,1546	0,0238	0,0822	−0,1492
	120	0,0332	0,1448	0,0807	0,0170	0,0789	−0,1468
	200	0,0257	0,1001	0,0583	0,0141	0,0715	−0,1363
	300	0,0207	0,0724	0,0440	0,0126	0,0646	−0,1271
	400	0,0176	0,0569	0,0359	0,0117	0,0595	−0,1205
2,0	20	0,0921	0,4909	0,2166	0,0085	0,0801	−0,1346
	40	0,0746	0,3837	0,1687	0,0079	0,0984	−0,1657
	120	0,0462	0,2138	0,0959	0,0073	0,0992	−0,1707
	200	0,0356	0,1516	0,0695	0,0067	0,0914	−0,1610
	300	0,0287	0,1121	0,0528	0,0061	0,0840	−0,1510
	400	0,0245	0,0883	0,0428	0,0061	0,0781	−0,1434

Таблица С.2 — Коэффициенты  $k$ 

	Нагрузка: равномерно распределенная
--	--

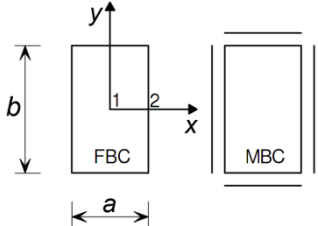
		Граничные условия: FBC: все ребра шарнирно закреплены MBC: все ребра остаются прямыми, нормальные средние напряжения и напряжения сдвига равны нулю						
		Параметры: $Q = \frac{q_{Ed} a^4}{Et^4}$						
b/a	Q	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$	$k_{\sigma_{mx2}}$	$k_{\sigma_{my2}}$
1	20	0,0369	0,2291	0,2291	0,0315	0,0315	0,0352	-0,0343
	40	0,0293	0,1727	0,1727	0,0383	0,0383	0,0455	-0,0429
	120	0,0170	0,0887	0,0887	0,0360	0,0360	0,0478	-0,0423
	200	0,0126	0,0621	0,0621	0,0317	0,0317	0,0443	-0,0380
	300	0,0099	0,0466	0,0466	0,0280	0,0280	0,0403	-0,0337
	400	0,0082	0,0383	0,0383	0,0255	0,0255	0,0372	-0,0309
1,5	20	0,0554	0,3023	0,1612	0,0617	0,0287	0,0705	-0,0296
	40	0,0400	0,2114	0,1002	0,0583	0,0284	0,0710	-0,0293
	120	0,0214	0,1079	0,0428	0,0418	0,0224	0,0559	-0,0224
	200	0,0157	0,0778	0,0296	0,0345	0,0191	0,0471	-0,0188
	300	0,0122	0,0603	0,0224	0,0296	0,0167	0,0408	-0,0161
	400	0,0103	0,0505	0,0188	0,0267	0,0152	0,0369	-0,0147
2	20	0,0621	0,3234	0,1109	0,0627	0,0142	0,0719	-0,0142
	40	0,0438	0,2229	0,0689	0,0530	0,0120	0,0639	-0,0120
	120	0,0234	0,1163	0,0336	0,0365	0,0086	0,0457	-0,0083
	200	0,0172	0,0847	0,0247	0,0305	0,0075	0,0384	-0,0067
	300	0,0135	0,0658	0,0195	0,0268	0,0067	0,0335	-0,0058
	400	0,0113	0,0548	0,0164	0,0244	0,0064	0,0305	-0,0050
3	20	0,0686	0,3510	0,1022	0,0477	0,0020	0,0506	-0,0007
	40	0,0490	0,2471	0,0725	0,0420	0,0020	0,0441	0,0000
	120	0,0267	0,1317	0,0390	0,0320	0,0027	0,0335	0,0010
	200	0,0196	0,0954	0,0283	0,0271	0,0044	0,0285	0,0027
	300	0,0153	0,0733	0,0217	0,0242	0,0059	0,0256	0,0044
	400	0,0127	0,0605	0,0178	0,0221	0,0066	0,0235	0,0051

Таблица С.3 — Коэффициенты  $k$ 

Нагрузка: равномерно распределенная	
--	--

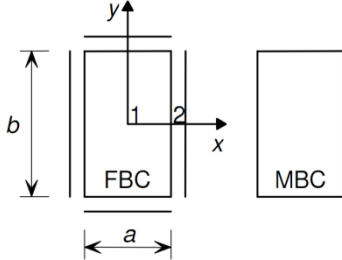
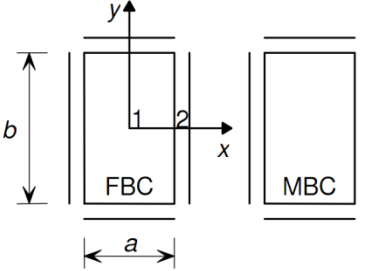
		<p>Граничные условия:  FBC: все ребра жестко закреплены  MBC: нормальные напряжения и напряжения сдвига равны нулю</p>						
		<p>Параметры:  <math>Q = \frac{q_{Ed} a^4}{Et^4}</math></p>						
$b/a$	$Q$	$k_{wl}$	$k_{\sigma bx1}$	$k_{\sigma by1}$	$k_{\sigma mx1}$	$k_{\sigma my1}$	$k_{\sigma mx2}$	$k_{\sigma my2}$
1	20	0,0136	0,1336	0,1336	0,0061	0,0061	-0,3062	-0,0073
	40	0,0131	0,1268	0,1268	0,0113	0,0113	-0,3006	-0,0137
	120	0,0108	0,0933	0,0933	0,0212	0,0212	-0,2720	-0,0286
	200	0,0092	0,0711	0,0711	0,0233	0,0233	-0,2486	-0,0347
	300	0,0078	0,0547	0,0547	0,0233	0,0233	-0,2273	-0,0383
	400	0,0069	0,0446	0,0446	0,0226	0,0226	-0,2113	-0,0399
1,5	20	0,0234	0,2117	0,1162	0,0061	0,0133	-0,4472	-0,0181
	40	0,0222	0,1964	0,1050	0,0098	0,0234	-0,4299	-0,0322
	120	0,0173	0,1406	0,0696	0,0124	0,0385	-0,3591	-0,0559
	200	0,0144	0,1103	0,0537	0,0116	0,0415	-0,3160	-0,0620
	300	0,0122	0,0879	0,0430	0,0105	0,0416	-0,2815	-0,0636
	400	0,0107	0,0737	0,0364	0,0098	0,0409	-0,2583	-0,0635
2	20	0,0273	0,2418	0,0932	0,0010	0,0108	-0,4935	-0,0150
	40	0,0265	0,2330	0,0897	0,0017	0,0198	-0,4816	-0,0277
	120	0,0223	0,1901	0,0740	0,0032	0,0392	-0,4223	-0,0551
	200	0,0192	0,1578	0,0621	0,0039	0,0456	-0,3780	-0,0647
	300	0,0165	0,1306	0,0518	0,0042	0,0483	-0,3396	-0,0690
	400	0,0147	0,1120	0,0446	0,0044	0,0487	-0,3132	-0,0702
3	20	0,0288	0,2492	0,0767	-0,0015	0,0027	-0,5065	-0,0033
	40	0,0290	0,2517	0,0795	-0,0022	0,0066	-0,5095	-0,0084
	120	0,0281	0,2440	0,0812	-0,0010	0,0247	-0,4984	-0,0331
	200	0,0260	0,2230	0,0750	0,0000	0,0368	-0,4702	-0,0497
	250	0,0247	0,2096	0,0707	0,0002	0,0415	-0,4520	-0,0564

Таблица С.4 — Коэффициенты  $k$

		Нагрузка: равномерно распределенная
--	--	--

					<p>Граничные условия:  FBC: все ребра жестко закреплены.  MBC: все ребра остаются прямыми, нормальные средние напряжения и напряжения сдвига равны нулю</p>				
					<p>Параметры:  <math>Q = \frac{q_{E0} a^4}{Et^4}</math></p>				
b/a	Q	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$	$k_{\sigma_{bx2}}$	$k_{\sigma_{mx2}}$	$k_{\sigma_{my2}}$
1,0	20	0,0136	0,1333	0,1333	0,0065	0,0065	-0,3058	0,0031	-0,0055
	40	0,0130	0,1258	0,1258	0,0118	0,0118	-0,3000	0,0059	-0,0103
	120	0,0105	0,0908	0,0908	0,0216	0,0216	-0,2704	0,0123	-0,0202
	200	0,0087	0,0688	0,0688	0,0234	0,0234	-0,2473	0,0151	-0,0233
	300	0,0073	0,0528	0,0528	0,0231	0,0231	-0,2267	0,0169	-0,0244
	400	0,0063	0,0430	0,0430	0,0223	0,0223	-0,2119	0,0176	-0,0246
1,5	20	0,0230	0,2064	0,1125	0,0137	0,0097	-0,4431	0,0118	-0,0082
	40	0,0210	0,1833	0,0957	0,0218	0,0155	-0,4195	0,0200	-0,0133
	120	0,0149	0,1175	0,0532	0,0275	0,0202	-0,3441	0,0295	-0,0185
	200	0,0118	0,0876	0,0369	0,0259	0,0195	-0,3028	0,0304	-0,0182
	300	0,0096	0,0678	0,0275	0,0238	0,0180	-0,2710	0,0300	-0,0173
	400	0,0083	0,0562	0,0221	0,0220	0,0168	-0,2492	0,0291	-0,0163
2,0	20	0,0262	0,2288	0,0853	0,0140	0,0060	-0,4811	0,0149	-0,0052
	40	0,0234	0,1994	0,0701	0,0206	0,0086	-0,4492	0,0234	-0,0077
	120	0,0162	0,1276	0,0404	0,0238	0,0094	-0,3611	0,0299	-0,0086
	200	0,0129	0,0963	0,0296	0,0223	0,0085	-0,3162	0,0289	-0,0079
	300	0,0105	0,0752	0,0230	0,0208	0,0077	-0,2824	0,0274	-0,0072
	400	0,0090	0,0627	0,0190	0,0196	0,0071	-0,2600	0,0259	-0,0066
3,0	20	0,0272	0,2331	0,0700	0,0102	0,0010	-0,4878	0,0111	-0,0008
	40	0,0247	0,2071	0,0615	0,0149	0,0011	-0,4575	0,0167	-0,0009
	120	0,0177	0,1396	0,0413	0,0186	0,0009	-0,3727	0,0202	-0,0005
	200	0,0143	0,1074	0,0319	0,0184	0,0009	-0,3272	0,0197	-0,0003
	300	0,0117	0,0848	0,0251	0,0176	0,0008	-0,2924	0,0192	-0,0002
	400	0,0101	0,0709	0,0210	0,0169	0,0008	-0,2687	0,0182	0,0000

#### С.4 Распределенная нагрузка на центральном участке пластины

##### С.4.1 Общие положения

С.4.1.1 Прогиб  $w$  и напряжения следует определять по формулам для пластины, нагруженной на центральном участке длиной  $u$  и шириной  $v$  распределенной по поверхности нагрузкой  $p_{Ed}$ :

$$w = k_w \cdot \frac{p_{Ed} a^4}{Et^3}. \quad (C.11)$$

#### С.4.2 Внутренние напряжения

С.4.2.1 Изгибные напряжения  $\sigma_{b,x}$  и  $\sigma_{b,y}$  в сегменте пластины можно определить по следующим формулам:

$$\sigma_{b,x,Ed} = k_{\sigma bx} \cdot \frac{p_{Ed} a^2}{t^2}, \quad (C.12)$$

$$\sigma_{b,y,Ed} = k_{\sigma by} \cdot \frac{p_{Ed} a^2}{t^2}. \quad (C.13)$$

С.4.2.2 Мембранные напряжения  $\sigma_{m,x}$  и  $\sigma_{m,y}$  в сегменте пластины можно определить следующим образом:

$$\sigma_{m,x,Ed} = k_{\sigma mx} \cdot \frac{p_{Ed} a^2}{t^2}, \quad (C.14)$$

$$\sigma_{m,y,Ed} = k_{\sigma my} \cdot \frac{p_{Ed} a^2}{t^2}. \quad (C.15)$$

С.4.2.3 На нагруженной поверхности пластины напряжения определяются по изгибным и мембранным напряжениям, приведенным в С.4.2.1 и С.4.2.2, следующим образом:

$$\sigma_{x,Ed} = -\sigma_{b,x,Ed} + \sigma_{m,x,Ed}, \quad (C.16)$$

$$\sigma_{y,Ed} = -\sigma_{b,y,Ed} + \sigma_{m,y,Ed}. \quad (C.17)$$

С.4.2.4 На поверхности пластины без нагрузки общие напряжения определяются по изгибным и мембранным напряжениям, приведенным в С.4.2.1 и С.4.2.2, следующим образом:

$$\sigma_{x,Ed} = \sigma_{b,x,Ed} + \sigma_{m,x,Ed}, \quad (C.18)$$

$$\sigma_{y,Ed} = \sigma_{b,y,Ed} + \sigma_{m,y,Ed}. \quad (C.19)$$

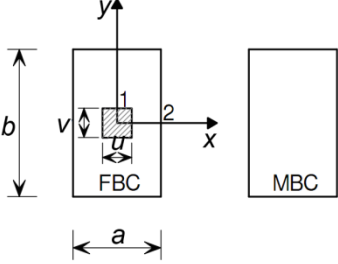
С.4.2.5 Для пластины эквивалентные напряжения  $\sigma_{eq,Ed}$  можно рассчитать по напряжениям, приведенным в (4), следующим образом:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{y,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \sigma_{y,Ed}}. \quad (C.20)$$

ПРИМЕЧАНИЕ Точки, для которых напряженное состояние определяется в нижеприведенных таблицах, расположены или на осях симметрии, или на границах, так что, благодаря симметрии или определенным состояниям границы, мембранные напряжения сдвига  $\tau_m$ , а также напряжения сдвига от изгиба  $\tau_b$  равны нулю. Алгебраическая сумма соответствующего изгибного и мембранного напряжений в точках, указанных в нижеприведенных таблицах, дает значения максимальных и минимальных фибровых напряжений в этих точках.

#### С.4.3 Коэффициенты для нагрузки на центральном участке пластины

Таблица С.5 — Коэффициенты  $k$

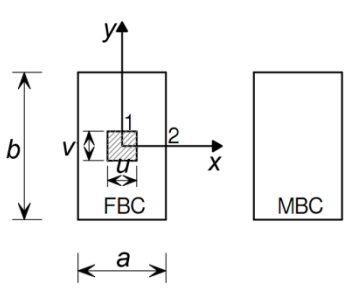
						
<p>Нагрузка: на центральном участке</p> <p>Граничные условия: FBC: все ребра закреплены шарнирно MBC: нормальные напряжения и напряжения сдвига равны нулю</p> <p>Параметры:  <math>\alpha = u/a; \beta = v/a</math>  <math display="block">p = \frac{\rho_{Ed} a^4}{Et^4}</math> <math>b/a = 1</math> </p>						
$\alpha \times \beta$	$p$	$k_{wl}$	$k_{\sigma_{bxl}}$	$k_{\sigma_{byl}}$	$k_{\sigma_{mxl}}$	$k_{\sigma_{myl}}$
0,1×0,1	10	0,1021	1,4586	1,4586	0,1548	0,1548
	20	0,0808	1,2143	1,2143	0,1926	0,1926
	60	0,0485	0,8273	0,8273	0,2047	0,2047
	100	0,0372	0,6742	0,6742	0,1978	0,1978
	150	0,0298	0,5693	0,5693	0,1892	0,1892
	200	0,0255	0,5005	0,5005	0,1823	0,1823
0,2×0,2	10	0,0998	1,0850	1,0850	0,1399	0,1399
	20	0,0795	0,8593	0,8593	0,1729	0,1729
	60	0,0478	0,5108	0,5108	0,1756	0,1756
	100	0,0364	0,3881	0,3881	0,1624	0,1624
	150	0,0293	0,3089	0,3089	0,1505	0,1505
	200	0,0249	0,2614	0,2614	0,1412	0,1412
0,3×0,3	10	0,0945	0,8507	0,8507	0,1144	0,1144
	20	0,0759	0,6614	0,6614	0,1425	0,1425
	60	0,0459	0,3702	0,3702	0,1425	0,1425
	100	0,0351	0,2704	0,2704	0,1300	0,1300
	150	0,0282	0,2101	0,2101	0,1186	0,1186
	200	0,0240	0,1747	0,1747	0,1102	0,1102
0,2×0,3	10	0,0971	0,9888	0,9128	0,1224	0,1288
	20	0,0776	0,7800	0,7101	0,1512	0,1602
	60	0,0468	0,4596	0,4021	0,1488	0,1624
	100	0,0358	0,3468	0,2957	0,1368	0,1512
	150	0,0287	0,2760	0,2307	0,1248	0,1389
	200	0,0245	0,2340	0,1926	0,1152	0,1310



**Таблица С.5 — Коэффициенты  $k$**   
(продолжение)

$\alpha \times \beta$	$p$	$k_{wl}$	$k_{\sigma_{bxl}}$	$k_{\sigma_{byl}}$	$k_{\sigma_{mxl}}$	$k_{\sigma_{myl}}$
0,2×0,4	10	0,0939	0,9119	0,7961	0,1078	0,1183
	20	0,0755	0,7216	0,6142	0,1320	0,1487
	60	0,0457	0,4235	0,3355	0,1287	0,1516
	100	0,0350	0,3201	0,2435	0,1166	0,1408
	150	0,0280	0,2541	0,1868	0,1045	0,1301
	200	0,0239	0,2156	0,1545	0,0968	0,1213

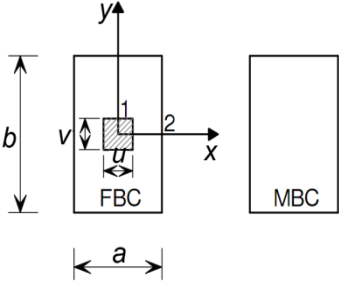
**Таблица С.6 — Коэффициенты  $k$**

		Нагрузка: на центральном участке				
		Граничные условия: FBC: все ребра закреплены шарнирно MBC: нормальные напряжения и напряжения сдвига равны нулю				
		Параметры: $\alpha = u/a; \beta = v/a$ $p = \frac{p_{Ed} a^4}{Et^4}$ $b/a = 1,5$				
$\alpha \times \beta$	$p$	$k_{wl}$	$k_{\sigma_{bxl}}$	$k_{\sigma_{byl}}$	$k_{\sigma_{mxl}}$	$k_{\sigma_{myl}}$
0,1×0,1	10	0,1303	1,5782	1,3855	0,1517	0,1921
	20	0,1018	1,3056	1,1373	0,1786	0,2295
	60	0,0612	0,8986	0,7701	0,1824	0,2380
	100	0,0469	0,7411	0,6273	0,1747	0,2295
	150	0,0378	0,6298	0,5287	0,1670	0,2193
	200	0,0323	0,5568	0,4641	0,1594	0,2125
0,2×0,2	10	0,1281	1,1974	1,0049	0,1344	0,1780
	20	0,1007	0,9453	0,7766	0,1555	0,2116
	60	0,0605	0,5783	0,4554	0,1465	0,2103
	100	0,0462	0,4485	0,3457	0,1329	0,1974
	150	0,0372	0,3624	0,2748	0,1208	0,1845
	200	0,0317	0,3111	0,2322	0,1133	0,1742

**Таблица С.6 — Коэффициенты  $k$**   
(продолжение)

$\alpha \times \beta$	$p$	$k_{wl}$	$k_{\sigma_{bxl}}$	$k_{\sigma_{byl}}$	$k_{\sigma_{mxl}}$	$k_{\sigma_{myl}}$
0,3 × 0,3	10	0,1229	0,9589	0,7737	0,1074	0,1525
	20	0,0972	0,7405	0,5828	0,1232	0,1818
	60	0,0585	0,4282	0,3161	0,1110	0,1788
	100	0,0449	0,3221	0,2353	0,0988	0,1667
	150	0,0361	0,2550	0,1828	0,0878	0,1535
	200	0,0309	0,2147	0,1525	0,0805	0,1444
0,2 × 0,3	10	0,1260	1,1037	0,8360	0,1154	0,1657
	20	0,0994	0,8688	0,6322	0,1321	0,1984
	60	0,0598	0,5296	0,3553	0,1168	0,1973
	100	0,0459	0,4114	0,2649	0,1043	0,1853
	150	0,0369	0,3336	0,2082	0,0931	0,1722
	200	0,0314	0,2877	0,1755	0,0848	0,1624
0,2 × 0,4	10	0,1235	1,0294	0,7271	0,0993	0,1563
	20	0,0977	0,8101	0,5432	0,1109	0,1877
	60	0,0590	0,4954	0,2983	0,0955	0,1877
	100	0,0453	0,3857	0,2220	0,0826	0,1754
	150	0,0365	0,3148	0,1744	0,0722	0,1630
	200	0,0311	0,2722	0,1468	0,0658	0,1544

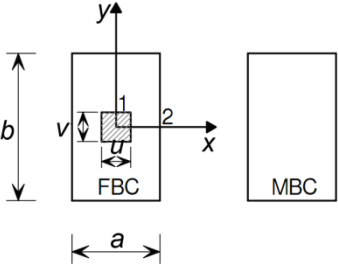
**Таблица С.7 — Коэффициенты  $k$**

		Нагрузка: на центральном участке				
		Граничные условия: FBC: все ребра закреплены шарнирно MBC: нормальные напряжения и напряжения сдвига равны нулю				
		Параметры: $\alpha = u/a; \beta = v/a$ $p = \frac{\rho_{Ed} a^4}{Et^4}$ $b/a = 2$				
$\alpha \times \beta$	$p$	$k_{wl}$	$k_{\sigma_{bxl}}$	$k_{\sigma_{byl}}$	$k_{\sigma_{mxl}}$	$k_{\sigma_{myl}}$
0,1 × 0,1	10	0,1438	1,6351	1,3560	0,1517	0,1904
	20	0,1154	1,3692	1,1106	0,1773	0,2288
	60	0,0725	0,9633	0,7498	0,1753	0,2438
	100	0,0564	0,7979	0,6112	0,1675	0,2355
	150	0,0456	0,6797	0,5127	0,1596	0,2271
	200	0,0390	0,6028	0,4492	0,1517	0,2188

**Таблица С.7 — Коэффициенты  $k$**   
(продолжение)

$\alpha \times \beta$	$p$	$k_{wl}$	$k_{\sigma_{bx}l}$	$k_{\sigma_{by}l}$	$k_{\sigma_{mx}l}$	$k_{\sigma_{my}l}$
0,2×0,2	10	0,1414	1,2542	0,9752	0,1326	0,1751
	20	0,1138	1,0078	0,7510	0,1513	0,2104
	60	0,0716	0,6427	0,4410	0,1373	0,2167
	100	0,0555	0,5054	0,3339	0,1232	0,2054
	150	0,0449	0,4134	0,2646	0,1108	0,1928
	200	0,0384	0,3572	0,2230	0,1030	0,1827
0,3×0,3	10	0,1362	1,0227	0,7506	0,1062	0,1517
	20	0,1104	0,8090	0,5615	0,1190	0,1822
	60	0,0698	0,4941	0,3093	0,1024	0,1862
	100	0,0542	0,3789	0,2275	0,0883	0,1753
	150	0,0421	0,3046	0,1783	0,0794	0,1645
	200	0,0374	0,2586	0,1487	0,0717	0,1546
0,2×0,3	10	0,1395	1,1702	0,8164	0,1146	0,1231
	20	0,1129	0,9396	0,6153	0,1262	0,1990
	60	0,0712	0,6003	0,3488	0,1088	0,2044
	100	0,0553	0,4742	0,2611	0,0943	0,1947
	150	0,0447	0,3901	0,2065	0,0841	0,1830
	200	0,0383	0,3379	0,1744	0,0754	0,1733
0,2×0,4	10	0,1375	1,0976	0,7051	0,0959	0,1551
	20	0,1117	0,8829	0,5267	0,1053	0,1886
	60	0,0706	0,5670	0,2945	0,0851	0,1942
	100	0,0549	0,4496	0,2220	0,0729	0,1849
	150	0,0445	0,3713	0,1765	0,0635	0,1737
	200	0,0381	0,3227	0,1496	0,0554	0,1644

Таблица С.8 — Коэффициенты  $k$ 

						
$\alpha \times \beta$	$p$	$k_{wl}$	$k_{\sigma_{bxl}}$	$k_{\sigma_{byl}}$	$k_{\sigma_{mxl}}$	$k_{\sigma_{myl}}$
0,1×0,1	10	0,1496	1,6636	1,3463	0,1552	0,1826
	20	0,1235	1,4109	1,1006	0,1811	0,2175
	60	0,0861	1,0428	0,7453	0,1811	0,2374
0,2×0,2	10	0,1470	1,2814	0,9650	0,1359	0,1688
	20	0,1218	1,0491	0,7400	0,1548	0,2000
	60	0,0849	0,7205	0,4363	0,1390	0,2088
0,3×0,3	10	0,1419	1,0504	0,7410	0,1092	0,1443
	20	0,1182	0,8489	0,5519	0,1222	0,1726
	60	0,0827	0,5681	0,3052	0,1014	0,1775
0,2×0,3	10	0,1455	1,1981	0,8056	0,1161	0,1579
	20	0,1210	0,9820	0,6053	0,1294	0,1876
	60	0,0847	0,6806	0,3487	0,1088	0,1982
0,2×0,4	10	0,1434	0,1126	0,6949	0,0986	0,1469
	20	0,1199	0,9261	0,5168	0,1069	0,1763
	60	0,0844	0,6480	0,2993	0,0849	0,1873

**Приложение D**  
(справочное)

**Инспекция (контроль качества) строительства (см. в5 en 0)**

D.1 В Табл. D.1 приведены три уровня инспекции (IL), которые могут проводиться в процессе строительства. Уровни инспекции могут быть связаны с соответствующими классами контроля качеством (см. 2.5). Дальнейшие указания содержатся в соответствующих стандартах на строительство, на которые есть ссылки в Еврокодах EN 1992 - EN 1996 и EN 1999.

**Таблица D.1 - Инспекционные уровни (IL)**

<b>Инспекционные уровни</b>	<b>Характеристики</b>	<b>Требования</b>
IL3- относится к RC3	Усиленная инспекция	Инспекция третьей стороной
IL3- относится к RC3	Нормальная инспекция	Инспекция в соответствии с правилами организации, осуществляющей строительство
IL1- относится к RC1	Нормальная инспекция	Самоосвидетельствование

**ПРИМЕЧАНИЕ** Выбор уровней инспекции зависит от проверяемых объектов и компетентности проверяющих инспекций. Таким образом, для различных строительных материалов применяются различные правила проверки, которые должны быть указаны в соответствующих стандартах на строительство.

---

УДК

МКС КПВЭД\*

**Ключевые слова:** расчет и конструирования стальных конструкций, плоские листовые конструкции, предельные состояния, оценка, испытания

---

*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 03-01-7.1-2011**  
**БОЛАТ КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЖОБАЛАУ**  
**1-10 бөлімі. Көлденең жүктемелердің әсері кезіндегі жазықтабақ**  
**конструкцияларының беріктігі**

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 03-01-7.1-2011**  
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**  
**Часть 1-10. Прочность плоских листовых конструкций при действии**  
**поперечных нагрузок**

Ответственные за выпуск: АО «КазНИИСА»

050046, г. Алматы, ул. Солодовникова, 21  
Тел./факс: +7 (727) 392-76-16 – приемная