

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Строительные конструкции»

В. В. Надольский  
В. В. Рогач

# ЗАТВОРЫ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Пособие для студентов специальности  
1-70 04 01 «Водохозяйственное строительство»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию  
в области строительства и архитектуры*

Минск  
БНТУ  
2019

УДК 627.833(075.8)

ББК 38.77я7

Н17

Рецензенты:

кафедра «Строительные конструкции» БрГТУ;

канд. техн. наук, доцент *И. В. Башкевич*

**Надольский, В. В.**

Н17 Затворы гидротехнических сооружений : пособие для студентов специальности 1-70 04 01 «Водохозяйственное строительство» / В. В. Надольский, В. В. Рогач. – Минск: БНТУ, 2019. – 72 с.  
ISBN 978-985-550-965-4.

В пособии рассмотрены основные вопросы проектирования плоских двухригельных гидротехнических затворов. Дано описание конструкции плоского затвора, приведены рекомендации по компоновке плоских гидротехнических затворов и основные положения по расчету и конструированию с примерами расчета элементов плоских двухригельных гидротехнических затворов: обшивки, стрингера и ригеля.

Предназначено для студентов специальности 1-70 04 01 «Водохозяйственное строительство» (специализации 1-70 04 01 01 «Гидротехническое строительство» и 1-70 04 01 02 «Водные пути и порты»).

УДК 627.833(075.8)

ББК 38.77я7

ISBN 978-985-550-965-4

© Надольский В. В.,  
Рогач В. В., 2019

© Белорусский национальный  
технический университет, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>1. Описание пролетного строения затвора .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Компоновка пролетного строения затвора .....</b>	<b>5</b>
2.1. Определение генеральных размеров затвора.....	5
2.2. Размещение ригелей.....	5
2.3. Размещение диафрагм.....	7
<b>3. Выбор шага стрингеров и расчет толщины обшивки .....</b>	<b>9</b>
<b>4. Расчет стрингеров .....</b>	<b>18</b>
<b>5. Расчет ригелей .....</b>	<b>31</b>
5.1. Общие сведения.....	31
5.2. Компоновка симметричного двухтаврового сечения ригеля .....	33
5.3. Изменения сечения ригеля по длине пролета.....	48
5.4. Соединение пояса ригеля со стенкой .....	52
5.5. Опорная часть ригеля.....	57
5.6. Узлы опирания стрингеров.....	62
5.7. Местная устойчивость элементов сечения ригелей.....	65
<b>Список рекомендуемой литературы .....</b>	<b>66</b>
<i>Приложение 1. Сортамент .....</i>	<i>67</i>
<i>Приложение 2. Укрупненный алгоритм расчета металлоконструкций .....</i>	<i>70</i>
<i>Приложение 3. Алгоритм подбора прокатного сечения стрингера.....</i>	<i>71</i>

## 1. ОПИСАНИЕ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ ЗАТВОРА

Плоский затвор представляет собой балочную клетку усложненного типа с несущей водоудерживающей обшивкой.

Конструкция плоского затвора приведена на рис. 1.1. Затвор состоит из ригелей (главных балок), перекрывающих всю ширину отверстия, диафрагм (второстепенных балок), опирающихся на ригели. Опирание ригелей выполняется на крайние диафрагмы – опорно-концевые стойки (ОКС), которые снабжены опорно-ходовыми устройствами для возможности поднятия затвора. Для уменьшения изгибающих моментов в обшивке параллельно ригелям располагают стрингеры, опирающиеся на диафрагмы.

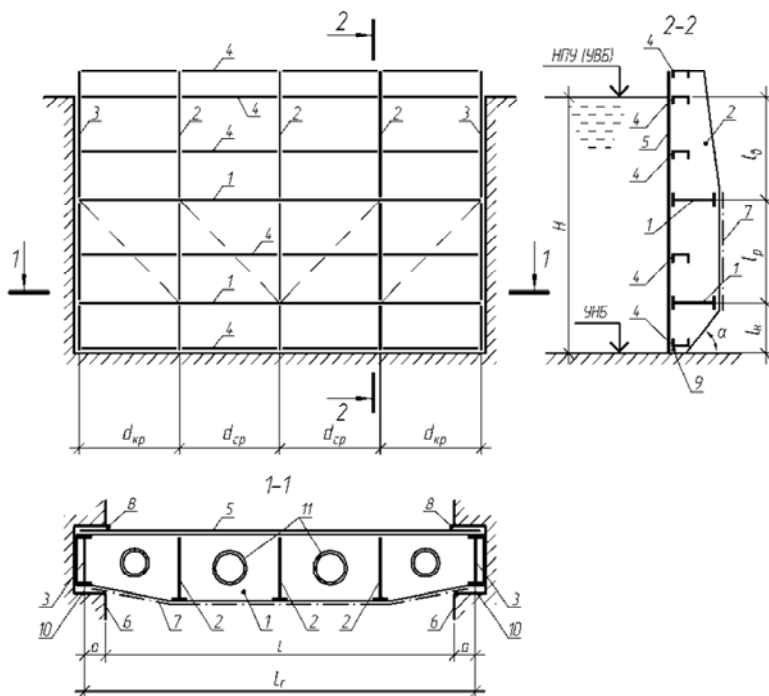


Рис. 1.1. Конструктивная схема плоского затвора:

- 1 – ригель, 2 – диафрагма, 3 – ОКС, 4 – стрингер, 5 – обшивка,  
 6 – быки, 7 – ПСФ, 8 – боковое уплотнение, 9 – донное уплотнение,  
 10 – опорно-ходовое устройство, 11 – отверстие в нижнем ригеле

Для восприятия нагрузки, возникающей при подъеме затвора, устраивается продольная связевая ферма (ПСФ), поясами которой являются ригели, стойками – диафрагмы, а решеткой – раскосные элементы, выполненные из уголков или швеллеров. При подъеме затвора ПСФ воспринимает около 40 % веса затвора, остальной вес воспринимается обшивкой. Обшивка, диафрагмы, ригели и ПСФ образуют пространственный блок, увеличивающий жесткость затвора (в том числе при изгибно-крутильных деформациях).

Горизонтальное давление воды воспринимается элементами затвора и передается на железобетонные стены (быки). Траектория передачи нагрузки показана на рис. 1.2.

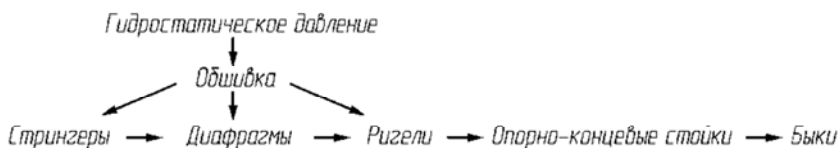


Рис. 1.2. Траектория передачи нагрузки

## 2. КОМПОНОВКА ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ ЗАТВОРА

### 2.1. Определение генеральных размеров затвора

Генеральные размеры затвора определяются заданными шириной отверстия  $L$  (рис. 1.1) и величиной нормального подпорного уровня  $H$  (рис. 2.1). Расчетный пролет ригеля назначается с учетом зазора «а» для размещения опорно-ходовых устройств. Расстояние «а» назначается в пределах  $(0,03-0,05)L$  и не менее 250 мм. Превышение отметки верха затвора над отметкой нормального подпорного уровня (НПУ), учитывающее ветровой нагон, принимается в пределах  $\delta = 100-300$  мм.

### 2.2. Размещение ригелей

Размещение ригелей обычно выполняется из условия их равнонагруженности. В случае двухригельного затвора это означает, что ригели должны располагаться равноудаленно от равнодействующей гидростатического давления  $T$  (рис. 2.1).



### 2.3. Размещение диафрагм

Диафрагмы являются опорами обшивки и стрингеров. Таким образом, толщина обшивки и профиль стрингера зависят от шага диафрагм. Исходя из этого шаг диафрагм назначается в пределах  $(0,75-1,5) l_p$  и принимают кратным 100 или 50 мм. Количество диафрагм принимается нечетным для образования четного количества панелей продольно-связевой фермы и симметричного расположения стержней решетки.

#### *Пример 1. Компоновка пролетного строения затвора*

Исходные данные: ширина перекрываемого отверстия  $L = 17$  м, расчетный напор  $H = 8$  м. Размещение ригелей выполним из условия их равнонагруженности.

Расстояние от нижнего ригеля до отметки УНБ

$$l_n = (0,11-0,18)H = 880-1140 \text{ мм.}$$

Принимаем  $l_n = 900$  мм.

Расстояние от отметки НПУ до места приложения равнодействующей гидростатического давления

$$h_T = 2/3 \cdot H = 5333 \text{ мм.}$$

Расстояние между ригелями

$$l_p = 2 \cdot (H - h_T - l_n) = 2 \cdot (8000 - 5333 - 900) = 3534 \text{ мм.}$$

Принимаем  $l_p = 3500$  мм.

Расстояние от верхнего ригеля до отметки НПУ не превышает как правило,  $0,45 H$ . Проверим это условие:

$$l_B = H - h_p - l_n = 8000 - 3500 - 900 = 3600 \text{ мм;}$$

$$l_{B, \max} = 0,45H = 0,45 \cdot 8000 = 3600 \text{ мм.}$$

Условие выполняется.

Назначаем расстояние  $a$ , необходимое для размещения опорно-ходовых устройств:

$$a = (0,03 - 0,05)L = 510 - 850 \text{ мм.}$$

Назначаем расстояние  $a = 600 \text{ мм} > 250 \text{ мм}$ .

Расчетный пролет ригеля

$$L_r = L + 2a = 17000 + 2 \cdot 600 = 18200 \text{ мм.}$$

Назначаем шаг диафрагм в пределах

$$d = (0,75 - 1,5)l_p = (0,75 - 1,5) \cdot 3500 = 2625 - 5250 \text{ мм.}$$

Принимаем количество диафрагм с учетом опорно-концевых стоек  $n_d = 7$  (нечетное). Определим шаг диафрагм

$$d = \frac{L_r}{n_d - 1} = \frac{18200}{7 - 1} = 3033 \text{ мм.}$$

Принимаем шаг средних диафрагм  $d_{\text{ср}} = 3100 \text{ мм}$  так, чтобы  $d_{\text{ср}} \geq d_{\text{кр}}$ .

Шаг крайних диафрагм

$$d_{\text{кр}} = 0,5 \left[ L_r - d_{\text{ср}} \cdot (n_d - 3) \right] = \\ 0,5 \left[ 18\,200 - 3100 \cdot (7 - 3) \right] = 2900 \text{ мм.}$$



### 3. ВЫБОР ШАГА СТРИНГЕРОВ И РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ ОБШИВКИ

Обшивку располагают, как правило, с напорной стороны затвора. Она непосредственно воспринимает гидростатическое давление воды и вместе с донным и боковым уплотнением обеспечивает герметичность затвора. Опорами для обшивки служат стрингеры, диафрагмы и ригели. Толщина обшивки обычно принимается постоянной по высоте затвора.

Размещение стрингеров тесно связано с расчетом обшивки. Чем чаще стоят стрингеры, тем меньшая требуется толщина обшивки, но увеличивается общая масса стрингеров. Обычно толщина обшивки находится в пределах 8–16 мм. Значения толщины обшивки принимаются по сортаменту листовой стали. Выборка из сортамента приведена в прил. 1.

Под действием давления воды обшивка испытывает изгиб. В зависимости от соотношения сторон рассматриваемого участка (отсека) обшивки расчетный изгибающий момент и прогиб в расчетной полосе обшивки единичной ширины вычисляют по двум возможным схемам:

а) по балочной схеме при  $B/b > 2$  ( $B$  – большая сторона пластинки,  $b$  – меньшая);

б) по схеме пластинки, жестко закрепленной по четырем сторонам, при  $B/b \leq 2$ .

*При расчете по балочной схеме* в целях упрощения нахождения расчетных усилий полосу обшивки единичной ширины рассматривают как однопролетную балку с жесткими закреплениями на опорах (рис. 3.1). Пролет балки равен меньшей стороне пластинки. Значение нагрузки на такую балку принимают равной максимальному значению гидростатического давления, действующего в пределах рассматриваемого отсека.

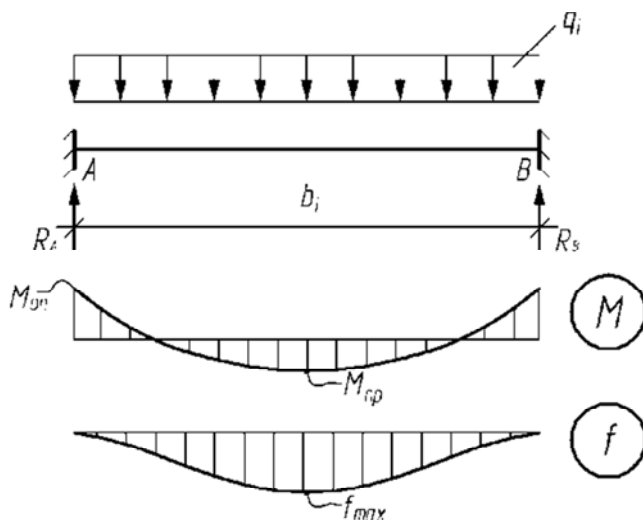


Рис. 3.1. Упрощенная расчетная схема обшивки по типу балки

Для такой балки при работе в упругой стадии максимальный момент и прогиб определяются по формулам

$$M_{\max} = M_{\text{оп}} = \frac{q_i \cdot b_i^2}{12};$$

$$f = \frac{q_{n,i} \cdot b_i^4}{385D},$$

где  $q_{n,i}$  – нормативное значение нагрузки;

$$q_{n,i} = p_i \cdot l, \text{ кН/м},$$

где  $p_i$  – гидростатическое давление на нижнем уровне рассматриваемого участка обшивки;

$l$  – ширина грузовой площади при рассмотрении полосы обшивки шириной 1 м;

$q_i$  – расчетное значение нагрузки:

$$q_i = q_{n,i} \cdot \gamma_f,$$

$\gamma_f$  – коэффициент надежности по нагрузке для гидростатического давления, принимаемый по СНиП [3];

$$D = \frac{1 \cdot t_{об}^3}{12} \cdot \frac{E}{1 - \nu^2} - \text{цилиндрическая жесткость обшивки};$$

$t_{об}$  – толщина обшивки;

$E$  – модуль упругости стали, принимаемый по СНиП [4];

$\nu$  – коэффициент Пуассона для стали, принимаемый по СНиП [4].

**При расчете обшивки по схеме пластинки**, опертой и жестко закрепленной по четырем сторонам, значение нагрузки принимается равной максимальному давлению в пределах отсека, при этом максимальный момент и прогиб в центре пластинки при расчете в упругой стадии определяются по формулам

$$M_{\max} = M_{оп} = k_{оп} \cdot q_i \cdot b_i^2;$$

$$f = \frac{k_f \cdot q_{n,i} \cdot b_i^4}{D},$$

где  $k_{оп}$  и  $k_f$  – коэффициенты, определяемые по табл. 3.1.

Таблица 3.1

**Коэффициенты для определения максимального момента и прогиба при расчете обшивки по схеме пластинки**

$B/b$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	>2
$k_{оп}$	0,0510	0,0576	0,0628	0,0670	0,0708	0,0740	0,0766	0,0787	0,0800	0,0812	0,0820	0,0833
$k_f$	0,00130	0,00153	0,00173	0,00189	0,00203	0,00216	0,00226	0,00234	0,00240	0,00245	0,00250	0,00260

*Примечание.* Значения коэффициентов  $k_{оп}$  и  $k_f$  при промежуточных значениях отношения  $B/b$  допускается определять линейной интерполяцией.

Толщину обшивки определяют, исходя из условия прочности при изгибе (формула (28) СНиП II-23-81\* «Стальные конструкции» [4])

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq R_y \frac{\gamma_c}{\gamma_n},$$

где  $W$  – момент сопротивления расчетного сечения обшивки;

$R_y$  – расчетное сопротивление стали, установленное по пределу текучести, принимаемое по СНиП [1];

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы настила, принимаемый по СНиП [1];

$\gamma_n$  – коэффициент надежности по ответственности для гидротехнического сооружения принимается по ТКП [2].

При расчете в упругой стадии работы настила момент сопротивления расчетного сечения (полосы единичной ширины) определяется по формуле

$$W = \frac{1 \cdot t_{об}^2}{6}.$$

Тогда требуемая толщина обшивки определяется по формуле

$$t_{об} \geq \sqrt{\frac{6M \cdot \gamma_n}{R_y \cdot \gamma_c}}.$$

Если требуемая толщина обшивки в отсеке превышает 16 мм или требуемая толщина обшивки в каждом из отсеков значительно отличается друг от друга, целесообразна постановка дополнительных стрингеров. Также следует учитывать, что затраты металла на обшивку составляют порядка 30 % от общей массы затвора, в то время как общая масса стрингеров, как правило, не превышает 8–10 %. Однако уменьшение толщины обшивки путем постановки дополнительных стрингеров увеличивает трудоемкость изготовления конструкции в целом. Поэтому окончательное решение принимается на основе технико-экономического сравнения нескольких возможных вариантов с разным количеством стрингеров.

При постановке дополнительных стрингеров или корректировке их положения по вертикали следует стремиться к достижению примерно одинаковой толщины обшивки по всей высоте затвора.

## Пример 2. Определение толщины обшивки и расстановка стрингеров

Поперечный разрез затвора представлен на рис. 3.2. Шаг средних диафрагм – 3100 мм. Климатический район строительства – П<sub>8</sub>. Класс ответственности затвора – П.

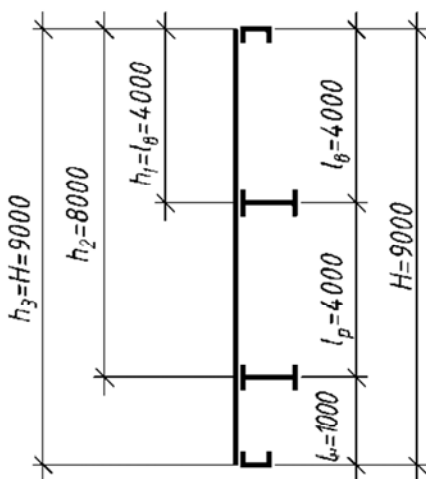


Рис. 3.2. Поперечный разрез затвора

По таблице 50 [4] для климатического района П<sub>8</sub> и конструкций второй группы принимаем сталь для изготовления обшивки затвора С245. По таблице 51 [4] для листового проката из стали С245 толщиной от 2 до 20 мм принимаем  $R_y = 240$  МПа.

Согласно ТКП 45-3.04-169-2009 «Гидротехнические сооружения» [5] для сооружения П класса при расчете по первой группе предельных состояний коэффициент надежности по ответственности принимается равным 1,2; при расчете по второй группе предельных состояний – 1,0.

Определим требуемую толщину обшивки в каждом из отсеков без постановки дополнительных стрингеров (рис. 3.3, этап 1).

1. *Определение толщины обшивки в 1-м отсеке*

$B/b = l_b/d_{cp} = 4000/3100 = 1,29 < 2$  – обшивка работает по схеме пластины.

## Гидростатическое давление и расчетная нагрузка

$$p_1 = \gamma \cdot h_1 = 10 \cdot 4 = 40 \text{ кН/м}^2;$$

$$q_1 = p_1 \cdot \gamma_f \cdot 1 = 40 \cdot 1,0 \cdot 1 = 40 \text{ кН/м},$$

где  $\gamma$  – удельный вес воды;

$\gamma_f$  – коэффициент надежности для давления воды (табл. К.1 СНИП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия» [3]).

Расчетный изгибающий момент

$$M_1 = k_{\text{оп}} \cdot q_1 \cdot b^2 = 0,0666 \cdot 40 \cdot 3,1^2 = 25,60 \text{ кНм}.$$

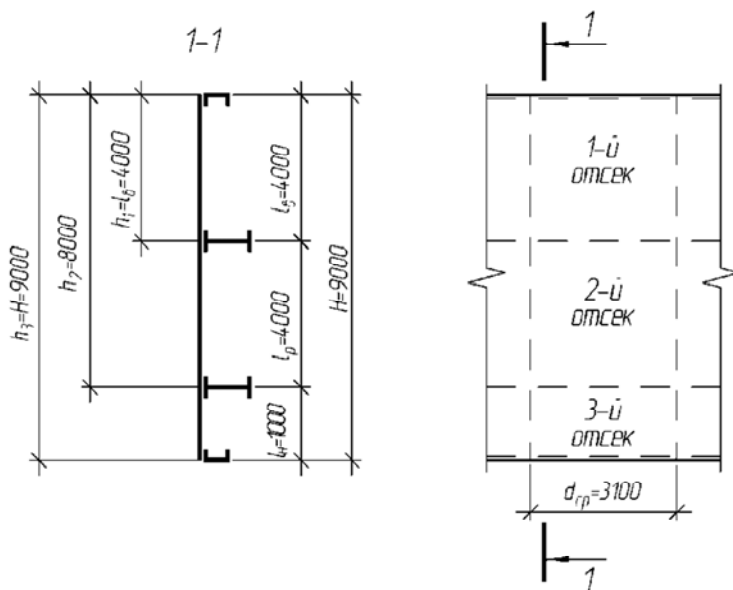


Рис. 3.3. Расчет обшивки без постановки дополнительных стрингеров

Требуемая толщина обшивки

$$t_{\text{об, cal}} = \sqrt{\frac{6M_1 \cdot \gamma_n}{R_y \cdot \gamma_c}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 25,60 \cdot 1,2}{240 \cdot 10^6 \cdot 1}} \cdot 10^3 = 27,7 \text{ мм}.$$

2. *Определение толщины обшивки во 2-м отсеке.*

$B/b = l_p/d_{cp} = 4000/3100 = 1,29 < 2$  – обшивка работает по схеме пластинки.

Гидростатическое давление и расчетная нагрузка

$$p_2 = \gamma \cdot h_2 = 10 \cdot 8 = 80 \text{ кН/м}^2;$$

$$q_2 = p_2 \cdot \gamma_f \cdot 1 = 80 \cdot 1,0 \cdot 1 = 80 \text{ кН/м.}$$

Расчетный изгибающий момент:

$$M_2 = k_{оп} \cdot q_2 \cdot b^2 = 0,0666 \cdot 80 \cdot 3,1^2 = 51,20 \text{ кНм.}$$

Требуемая толщина обшивки

$$t_{об, cal} = \sqrt{\frac{6M_2 \cdot \gamma_n}{R_y \cdot \gamma_c}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 51,20 \cdot 1,2}{240 \cdot 10^6 \cdot 1}} \cdot 10^3 = 39,2 \text{ мм.}$$

3. *Определение толщины обшивки в 3-м отсеке.*

$B/b = d_{cp}/l_H = 3100/1000 = 3,1 > 2$  – обшивка работает по схеме балки.

Гидростатическое давление и расчетная нагрузка

$$p_3 = \gamma \cdot h_3 = 10 \cdot 9 = 90 \text{ кН/м}^2;$$

$$q_3 = p_3 \cdot \gamma_f \cdot 1 = 90 \cdot 1,0 \cdot 1 = 90 \text{ кН/м.}$$

Расчетный изгибающий момент

$$M_3 = \frac{q_3 \cdot b^2}{12} = \frac{90 \cdot 1^2}{12} = 7,50 \text{ кНм.}$$

Требуемая толщина обшивки

$$t_{об, cal} = \sqrt{\frac{6M_3 \cdot \gamma_n}{R_y \cdot \gamma_c}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 7,50 \cdot 1,2}{240 \cdot 10^6 \cdot 1}} \cdot 10^3 = 15,0 \text{ мм.}$$

Результаты расчета. В 1-м и 2-м отсеках требуемая толщина обшивки превышает максимально допустимую, в 3-м отсеке требуемая толщина обшивки совпадает с максимально допустимой.

Зададимся окончательной толщиной обшивки  $t_{об} = 11$  мм. В конце итерационного процесса определили: чтобы окончательная толщина обшивки была 11 мм, в первом отсеке требуется поставить 2 дополнительных стрингера, во втором – 4, а в третьем – 1. Окончательное расположение стрингеров изображено на рис. 3.4.

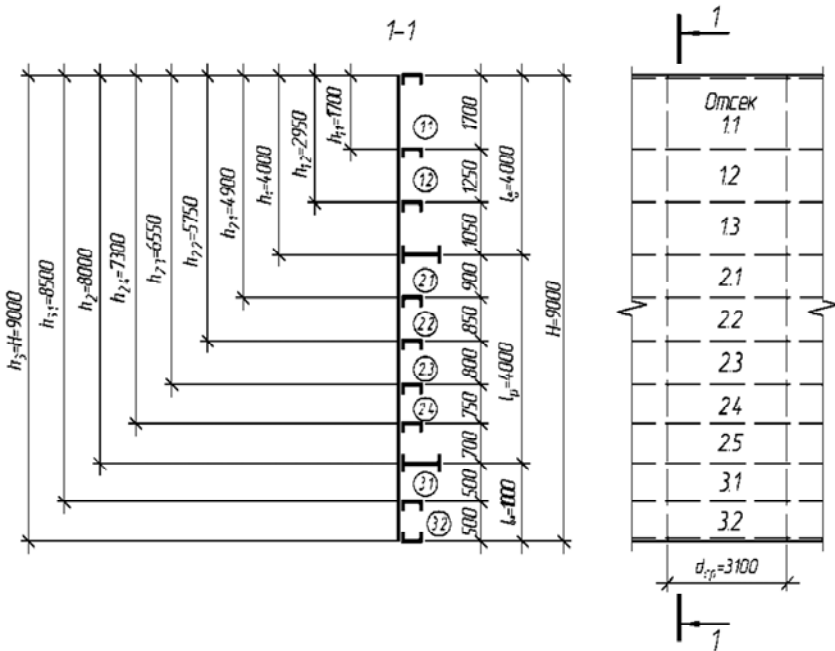


Рис. 3.4. Расчет обшивки с постановкой дополнительных стрингеров

Проверка жесткости производится для каждого отсека по формуле

$$f = \frac{q_{n,1} \cdot b_i^4}{358D} < f_u = \frac{b}{n_0} \cdot \frac{1}{\gamma_n},$$

где  $f_u$  – предельно допустимая по условиям эксплуатации величина прогиба [1, табл. 8.2];



$n_0$  – коэффициент, определяемый в зависимости от типа конструкции и ее пролета.

$$D = \frac{1 \cdot t_{об}^3}{12} \cdot \frac{E}{1 - \nu^2},$$

где  $E$  – модуль упругости стали [4, табл. 63];

$\nu$  – коэффициент Пуассона для стали [4, табл. 63].

Расчет обшивки сведен в табл. 3.2.

Таблица 3.2

### Расчет обшивки с постановкой дополнительных стрингеров

№ отсека	$B$ , м	$b$ , м	$B/b$	$k_{оп}$	$k_f$	$h_{is}$ , м	$q_{is}$ , кН/м	$M_{is}$ , кН·м	$t_{об,cal}$ , мм	$t_{об}$ , мм	$D$	$f_s$ , мм	$f_u$ , мм
1.1	3,1	1,7	1,82	0,0803	0,0024	1,7	17	3,94	10,9	11	25,1	13,6	11,3
1.2	3,1	1,25	2,48	–	–	2,95	29,5	3,84	10,7			8,0	8,3
1.3	3,1	1,05	2,95	–	–	4,0	40	3,68	10,5			5,4	7,0
2.1	3,1	0,9	3,44	–	–	4,9	49	3,31	9,9			3,6	6,0
2.2	3,1	0,85	3,65	–	–	5,75	57,5	3,46	10,2			3,3	5,7
2.3	3,1	0,8	3,88	–	–	6,55	65,5	3,49	10,2			3,0	5,3
2.4	3,1	0,75	4,13	–	–	7,3	73	3,42	10,1			2,6	5,0
2.5	3,1	0,7	4,43	–	–	8,0	80	3,27	9,9			2,1	4,7
3.1	3,1	0,5	6,20	–	–	8,5	85	1,77	7,3			0,6	3,3
3.2	3,1	0,5	6,20	–	–	9,0	90	1,88	7,5			0,6	3,3

В отсеке 1.1 значение прогиба обшивки превышает нормативное значение. Требуется перекомпоновать стрингеры в первом отсеке.

#### 4. РАСЧЕТ СТРИНГЕРОВ

Стрингеры опираются на диафрагмы и опорно-концевые стойки и служат опорами для обшивки. Сечение верхнего стрингера и принимается обычно из швеллера (рекомендуется не менее 16). Нижнюю обвязку выполняют из швеллера или неравнополочного уголка. Сечение промежуточных стрингеров принимается из швеллера или при большой нагрузке из двутавра. Во избежание скопления влаги швеллеры устанавливают полками вниз, а в стенке двутавров делают дренажные отверстия.

Стрингеры рассчитываются по схеме многопролетной неразрезной балки, загруженной во всех пролетах равномерно распределенной нагрузкой. Шаг опор равен шагу диафрагм.

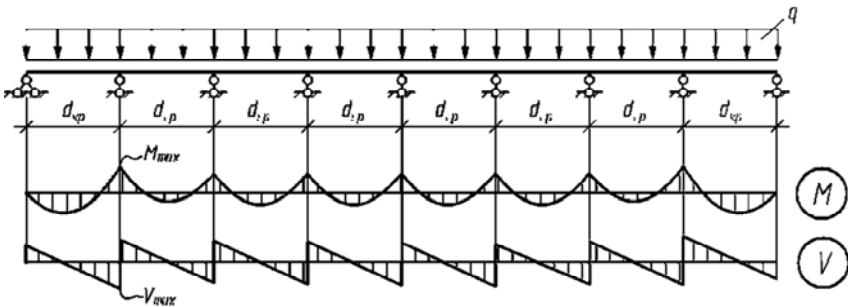


Рис. 4.1. Расчетная схема стрингера

Для упрощения при определении расчетных усилий расчетная схема стрингера (рис. 4.1) может быть заменена упрощенной расчетной схемой в виде пятипролетной неразрезной балки с равными пролетами (рис. 4.2). Этот переход равноправен (расчетные усилия, получаемые при рассмотрении фактической расчетной схемы и упрощенной отличаются незначительно):

- 1) если количество пролетов неразрезного стрингера 5 и более;
- 2) пролеты отличаются друг от друга не более, чем на 20 %.

Погонная нагрузка на каждый стрингер собирается с грузовой площади (рис. 4.3). Ширина грузовой площади для  $i$ -го стрингера определяется по формуле

$$b_i = 0,5 \cdot (l_i + l_{i+1}),$$

где  $l_i$  – расстояние от рассматриваемого стрингера до смежного опорного элемента (стрингера или ригеля), расположенного выше;  
 $l_{i+1}$  – то же, расположенного ниже.

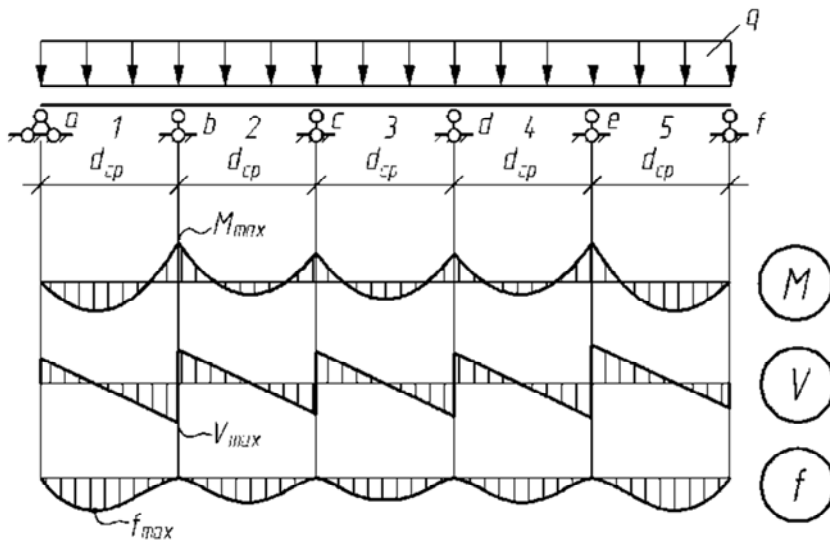


Рис. 4.2. Упрощенная расчетная схема

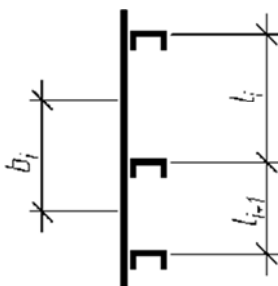


Рис. 4.3. Ширина грузовой площади  $i$ -го стрингера

Нормативное значение нагрузки на  $i$ -й стрингер определяется по формуле

$$q_{n,i} = p_i \cdot b_i,$$

где  $p_i$  – гидростатическое давление на уровне рассматриваемого стрингера.

Расчетное значение нагрузки на  $i$ -й стрингер определяется по формуле

$$q_i = q_{n,i} \cdot \gamma_f,$$

где  $\gamma_f$  – коэффициент надежности по нагрузке для гидростатического давления, принимаемый по СНиП [3].

Характерные значения на эпюрах моментов и поперечных сил для **пятипролетной неразрезной балки** (рис. 4.2), загруженной равномерно распределенной нагрузкой во всех пролетах, приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

#### Значения усилий в характерных сечениях балки

Изгибающий момент	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_b$	$M_c$
Значение	$0,078q d_{cp}^2$	$0,033q d_{cp}^2$	$0,046q d_{cp}^2$	$0,105q d_{cp}^2$	$0,079q d_{cp}^2$
Поперечная сила	$V_{1a}$	$V_{1b}$	$V_{2b}$	$V_{2c}$	$V_{3c}$
Значение	$0,395q d_{cp}$	$0,605q d_{cp}$	$0,526q d_{cp}$	$0,474q d_{cp}$	$0,500q d_{cp}$

Во всех остальных случаях, не оговоренных выше, усилия в неразрезной балке могут быть определены при помощи программных комплексов, вручную (методами строительной механики) или с помощью справочников проектировщиков.

При расчете стрингера **по первой группе предельных состояний** требуется проверить нормальные напряжения в сечении, где действует максимальный изгибающий момент; касательные напряжения – в сечении, где действует максимальная поперечная сила; приведенные напряжения – в сечении с наиболее невыгодным сочетанием изгибающего момента и поперечной силы, а также проверить общую устойчивость.

При расчете конструкций по первой группе предельных состояний усилия определяются от действия расчетных значений нагрузок.

Напряжения определяются в соответствующих волокнах сечения согласно рис. 4.4. Расчет на прочность производится в предположении упругой или упруго-пластической работы металла.

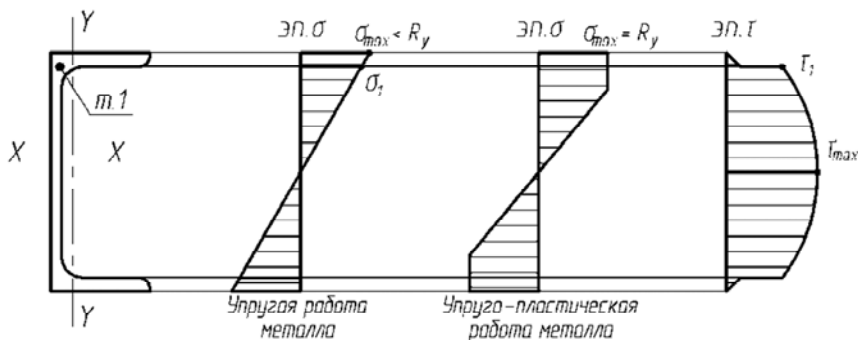


Рис. 4.4. Эпюры нормальных и касательных напряжений в сечении стрингера

Согласно нормам проектирования СНИП [4] также требуется проверить местную устойчивость элементов поперечного сечения стрингера (полки и стенки). Для прокатных профилей местная устойчивость гарантируется параметрами сечения, установленными сортаментом.

При расчете стрингера **по второй группе предельных состояний** требуется проверить жесткость, которая характеризуется прогибом. Максимальный прогиб определяется от нормативного значения нагрузки.

Некоторую экономию в расходе металла можно получить, если включить в состав расчетного сечения стрингера прилегающую часть обшивки по обе стороны от сварного шва. Ширина обшивки ( $c_1$  и  $c_2$  на рис. 4.5) в таком случае принимается минимальной из следующих значений:

- 1)  $0,075d_{cp}$  – условие отсутствия редуции нормальных напряжений в отдаленных волокнах обшивки;
- 2)  $0,65t_{об} \cdot \sqrt{E/R_y}$  – условие обеспечения устойчивости свеса обшивки;

3) половина примыкающего шага стрингеров.

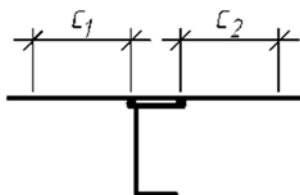


Рис. 4.5. Ширина обшивки, включаемая в расчетное сечение стрингера

Расчет стрингера начинается с выбора класса стали и определения требуемого момента сопротивления расчетного сечения. По требуемому моменту сопротивления по сортаменту подбирается профиль в виде швеллера или двутавра (прил. 1). Если в расчетное сечение стрингера включается часть обшивки, то момент сопротивления выбранного профиля может быть меньше требуемого. Обычно бывает достаточным принять по сортаменту профиль на один номер меньше (в некоторых случаях – на два).

После определения геометрических характеристик расчетного сечения стрингера выполняют указанные выше проверки прочности и жесткости и при необходимости корректируют сечение в большую или меньшую сторону в зависимости от значения напряжения.

Алгоритм подбора прокатного сечения стрингера приведен в прил. 2.

### ***Пример 3. Расчет стрингеров***

Исходные данные приняты по рис. 4.6. Шаг средних диафрагм – 3100 мм. Толщина обшивки  $t_{об} = 12$  мм. Количество пролетов стрингера – 8. Климатический район строительства – П<sub>8</sub>. Класс ответственности затвора – II. Расчетное сопротивление обшивки:  $R_y = 240$  МПа.

Согласно ТКП 45-3.04-169-2009 «Гидротехнические сооружения» [5] для сооружения II класса при расчете по первой группе предельных состояний коэффициент надежности по ответственности  $\gamma_n$  принимается равным 1,2, при расчете по второй группе предельных состояний – 1,0.

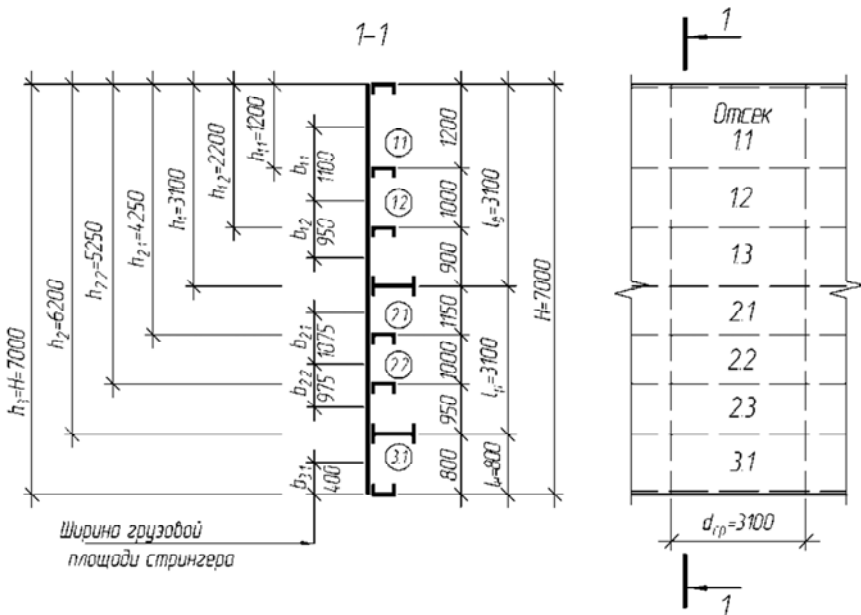


Рис. 4.6. Исходные данные к примеру 3

При количестве пролетов стрингера 5 и более в качестве расчетной схемы принимаем пятипролетную балку (рис. 4.7).

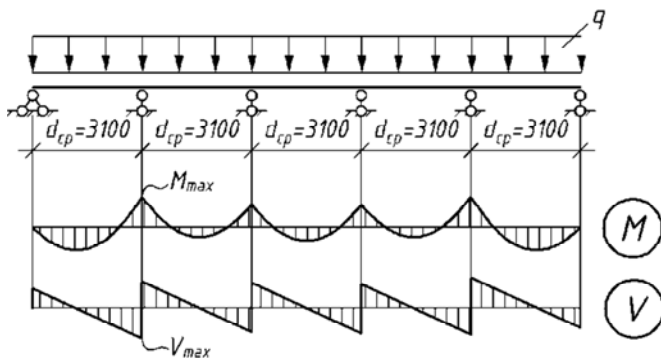


Рис. 4.7. Расчетная схема стрингера

Определим ширину грузовой площади для каждого стрингера

$$b_{1,1} = 0,5 \cdot (l_{1,1} + l_{1,2}) = 0,5 \cdot (1200 + 1000) = 1100 \text{ мм};$$

$$b_{1,2} = 0,5 \cdot (l_{1,2} + l_{1,3}) = 0,5 \cdot (1000 + 900) = 950 \text{ мм};$$

$$b_{2,1} = 0,5 \cdot (l_{2,1} + l_{2,2}) = 0,5 \cdot (1150 + 1000) = 1075 \text{ мм};$$

$$b_{2,2} = 0,5 \cdot (l_{2,2} + l_{2,3}) = 0,5 \cdot (1000 + 950) = 975 \text{ мм};$$

$$b_{3,1} = 0,5 \cdot l_{\text{н}} = 0,5 \cdot 800 = 400 \text{ мм}.$$

Определим нормативную нагрузку на каждый стрингер

$$q_{n,1,1} = \gamma \cdot h_{1,1} \cdot b_{1,1} = 10 \cdot 1,2 \cdot 1,1 = 13,2 \text{ кН/м};$$

$$q_{n,1,2} = \gamma \cdot h_{1,2} \cdot b_{1,2} = 10 \cdot 2,2 \cdot 0,95 = 20,9 \text{ кН/м};$$

$$q_{n,2,1} = \gamma \cdot h_{2,1} \cdot b_{2,1} = 10 \cdot 4,45 \cdot 1,075 = 45,69 \text{ кН/м};$$

$$q_{n,2,2} = \gamma \cdot h_{2,2} \cdot b_{2,2} = 10 \cdot 5,25 \cdot 0,975 = 51,19 \text{ кН/м};$$

$$q_{n,3,1} = \gamma \cdot h_{3,1} \cdot b_{3,1} = 10 \cdot 7,0 \cdot 0,4 = 28,0 \text{ кН/м}.$$

Определим расчетную нагрузку на стрингер:

$$q = \max(q_{n,i}) \cdot \gamma_f = 51,19 \cdot 1,0 = 51,19 \text{ кН/м}.$$

Определим расчетные усилия

$$M_{\text{max}} = 0,105 \cdot 51,19 \cdot 3,1^2 = 51,65 \text{ кНм};$$

$$V_{\text{max}} = 0,605 \cdot 51,19 \cdot 3,1 = 96,01 \text{ кН}.$$

По табл. 50 [4] для климатического района П<sub>8</sub> и конструкций первой группы принимаем сталь для изготовления стрингеров С255. По табл. 51 [4] для фасонного проката из стали С255 толщиной от 4 до 10 мм принимаем  $R_y = 250$  МПа.

Согласно 5.12 [4] расчет на прочность элементов, изгибаемых в одной из главных плоскостей, следует выполнять по формуле



$$\sigma = \frac{M}{W} \leq R_y \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n},$$

где  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы, принимаемый в соответствии с таблицей 6\* [4] равным 1,0;

$R_y$  – меньшее из расчетных сопротивлений настила и стрингера.

Требуемый момент сопротивления

$$W_{cal} = \frac{M \cdot \gamma_n}{R_y \cdot \gamma_c} = \frac{51,65 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2}{240 \cdot 1,0} \cdot 10^6 = 258,25 \text{ см}^3.$$

Из сортамента выбираем прокатной швеллер с моментом сопротивления меньшим, но близким к требуемому. Принимаем швеллер № 24П со следующими характеристиками

$$W = 243 \text{ см}^3; \quad I_x = 2910 \text{ см}^4; \quad A = 30,6 \text{ см}^2; \\ h = 240 \text{ мм}; \quad b_f = 90 \text{ мм}; \quad t_f = 10 \text{ мм}; \quad t_w = 5,6 \text{ мм}.$$

Ширина части обшивки влево и вправо от стенки профиля соответственно

$$c_1 = \min \left( \begin{array}{l} 0,075d_{cp} = 0,075 \cdot 3100 = 233 \text{ мм}; \\ 0,65t_{об} \cdot \sqrt{E/R_y} = 0,65 \cdot 12 \cdot \sqrt{206000/240} = 229 \text{ мм}; \\ 0,5l_{2,2} = 0,5 \cdot 1000 = 500 \text{ мм}. \end{array} \right) = 229 \text{ мм};$$

$$c_2 = \min \left( \begin{array}{l} 0,075d_{cp} = 233 \text{ мм}; \\ 0,65t_{об} \cdot E/R_y = 229 \text{ мм}; \\ 0,5l_{2,3} = 0,5 \cdot 950 = 475 \text{ мм}. \end{array} \right) = 229 \text{ мм}.$$

Ширина обшивки  $b$ , принимаемая в расчет,

$$b = c_1 + c_2 = 229 + 229 = 458 \text{ мм}.$$

Определим положение центра тяжести рассматриваемого сечения относительно оси, проходящей через центр тяжести швеллера (ось  $X_0$ ).

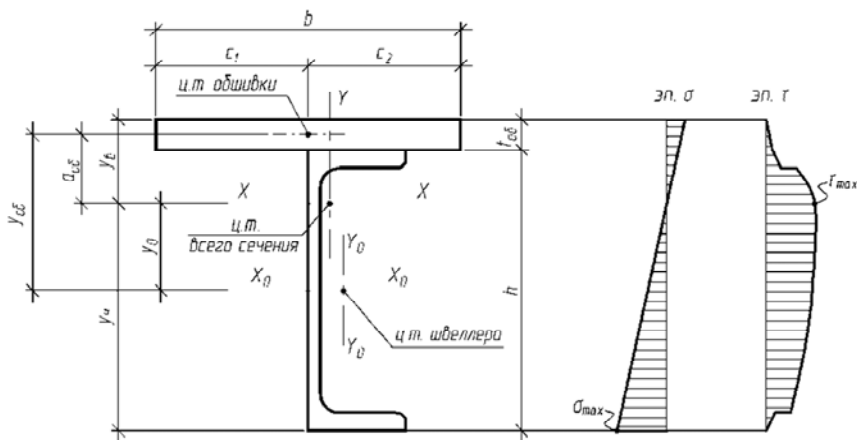


Рис. 4.8. Расчетное сечение стрингера, эпюры напряжений

Площадь сечения обшивки, вошедшей в расчетное сечение стрингера

$$A_{об} = t_{об} \cdot b = 1,2 \cdot 45,8 = 54,96 \text{ см}^2.$$

Расстояние от центра тяжести швеллера до центра тяжести обшивки (см. рис. 4.8)

$$y_{об} = 0,5h + 0,5t_{об} = 0,5 \cdot 240 + 0,5 \cdot 12 = 126 \text{ мм.}$$

Статический момент всего сечения относительно центра тяжести швеллера

$$S_x = A_{об} \cdot y_{об} = 54,96 \cdot 12,6 = 692,5 \text{ см}^3.$$

Расстояние от центра тяжести швеллера до центра тяжести всего сечения (см. рис. 4.8)

$$y_0 = \frac{S_x}{A_{об} + A_{шв}} = \frac{692,5 \cdot 10^3}{(54,96 + 30,6) \cdot 10^2} = 80,9 \text{ мм.}$$

Расстояние от центра тяжести всего сечения до центра тяжести обшивки (см. рис. 4.8)

$$a_{об} = y_{об} - y_0 = 126 - 80,9 = 45,1 \text{ мм.}$$

Момент инерции всего сечения

$$I = I_{\text{шв}} + A_{\text{шв}} \cdot y_0^2 + \frac{b \cdot t_{\text{об}}^3}{12} + A_{\text{об}} \cdot a_{\text{об}}^2 =$$

$$= 2910 + 30,6 \cdot 8,09^2 + \frac{45,8 \cdot 1,2^3}{12} + 54,96 \cdot 4,51^2 = 6037 \text{ см}^4.$$

Расстояние от центра тяжести всего сечения до наиболее удаленных волокон сечения

$$y_{\text{н}} = y_0 + 0,5 \cdot h = 80,9 + 0,5 \cdot 240 = 200,9 \text{ мм.}$$

Момент сопротивления относительно нижних волокон сечения

$$W_{\text{н}} = \frac{I}{y_{\text{н}}} = \frac{6037}{200,9} = 300,5 \text{ см}^3.$$

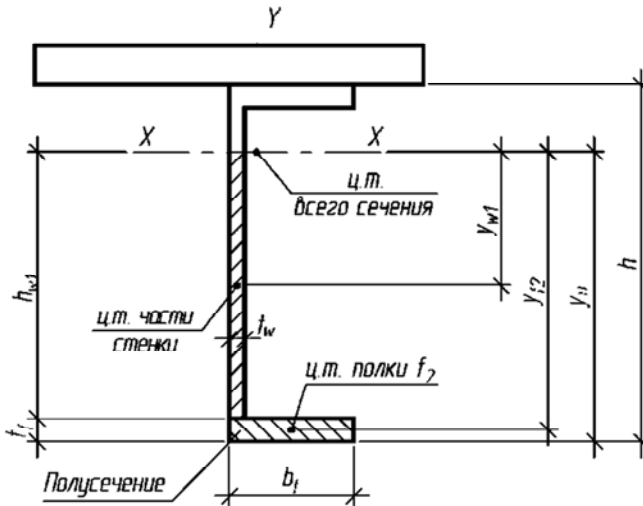


Рис. 4.9. Расчетная схема к определению статического момента полусечения

Расстояние от центра тяжести сечения до центра тяжести нижней полки швеллера (см. рис. 4.9)

$$y_{f2} = y_{\text{н}} - 0,5t_f = 200,9 - 0,5 \cdot 10 = 195,9 \text{ мм.}$$

Расстояние от центра тяжести всего сечения до центра тяжести участка стенки швеллера рассматриваемой части сечения (см. рис. 4.9)

$$y_{w1} = 0,5 \cdot (y_n - t_f) = 0,5 \cdot (200,9 - 10) = 95,5 \text{ мм.}$$

Статический момент полусечения (см. рис. 4.9)

$$\begin{aligned} S^o &= A_f \cdot y_{f2} + A_{w1} \cdot y_{w1} = b_f \cdot t_f \cdot y_{f2} + (y_n - t_f) \cdot t_w \cdot y_{w1} = \\ &= 9,0 \cdot 1,0 \cdot 19,59 + (20,09 - 1,0) \cdot 0,56 \cdot 9,55 = 278,4 \text{ см}^3. \end{aligned}$$

Выполним проверку прочности согласно 5.12 [1]

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} = \frac{51,65 \cdot 10^{-3}}{300,5 \cdot 10^{-6}} = 171,9 \text{ МПа}$$

$$< R_y \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 240 \cdot \frac{1,0}{1,2} = 200,0 \text{ МПа;}$$

$$\tau_{\max} = \frac{V \cdot S^o}{I \cdot t_w} = \frac{96,01 \cdot 10^{-3} \cdot 278,4 \cdot 10^{-6}}{2910 \cdot 10^{-8} \cdot 5,6 \cdot 10^{-3}} = 79,1 \text{ МПа} <$$

$$< R_s \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 0,58 \cdot 250 \cdot \frac{1,0}{1,2} = 120,8 \text{ МПа.}$$

Прочность сечения на действие нормальных и касательных напряжений обеспечена.

Недонапряжение по нормальным напряжениям

$$\frac{R_y \cdot \gamma_c / \gamma_n - \sigma}{R_y \cdot \gamma_c / \gamma_n} \cdot 100 \% = \frac{200,0 - 171,9}{200,0} \cdot 100 \% = 14 \% < \Delta_{\text{lim}} = 15 \%,$$

где  $\Delta_{\text{lim}} = 15 \%$  – рекомендуемое предельное значение недонапряжения, при котором не требуется проверка предыдущего профиля (швеллера) в сортаменте.

Согласно 5.14\* [4] для стенок балок, рассчитываемых по формуле (28) [4] должно выполняться условие

$$\sigma_{ef} = \sqrt{\sigma_i^2 + 3\tau_i^2} \leq 1,15 R_y \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n},$$

где  $R_y$  – расчетное сопротивление стали элемента (полки или стенки), в точке которого определяются напряжения;

$\sigma_i$  и  $\tau_i$  – нормальные и касательные напряжения в точке  $i$ .

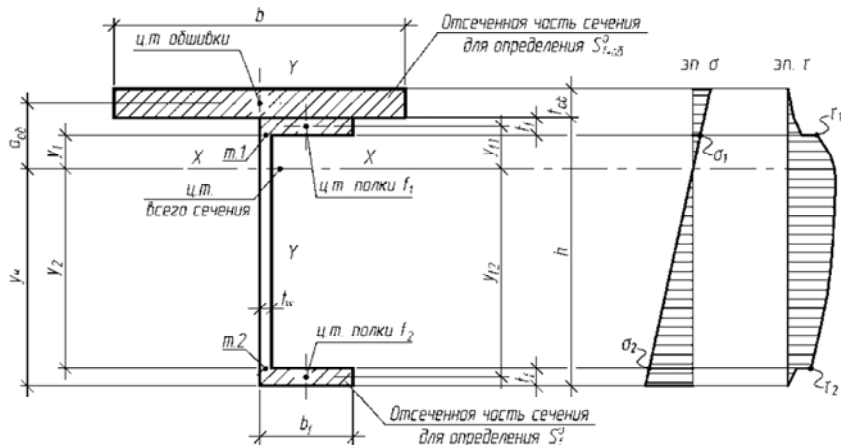


Рис. 4.10. Распределение напряжений в поперечном сечении стрингера

Выполним проверку прочности по приведенным напряжениям в точке 1 и точке 2 как в местах с наиболее неблагоприятным сочетанием  $\sigma$  и  $\tau$  (рис. 4.10).

Определим ординаты точек 1 и 2

$$y_1 = h - y_H - t_f = 240 - 200,9 - 10 = 29,1 \text{ мм};$$

$$y_2 = y_H - t_f = 200,9 - 10 = 190,9 \text{ мм}.$$

Расстояние от центра тяжести сечения до центра тяжести верхней полки швеллера

$$y_{f1} = h - y_H - 0,5t_f = 240 - 200,9 - 0,5 \cdot 10 = 34,1 \text{ мм}.$$

Проверка приведенных напряжений в 1-й точке

$$\sigma_1 = \frac{M}{I} \cdot y_1 = \frac{51,65 \cdot 10^{-3}}{6037 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,0291 = 24,9 \text{ МПа};$$

$$\tau_1 = \frac{V \cdot S_{f+об}^o}{I \cdot t_w} = \frac{96,01 \cdot 10^{-3} \cdot 278,56 \cdot 10^{-6}}{2910 \cdot 10^{-8} \cdot 5,6 \cdot 10^{-3}} = 79,1 \text{ МПа},$$

где  $S_{f+об}^o = b_f \cdot t_f \cdot y_{f1} + A_{об} \cdot a_{об}$ ;

$$S_{f+об}^o = 9,0 \cdot 1,0 \cdot 3,41 + 54,96 \cdot 4,51 = 278,56 \text{ см}^3.$$

$$\sigma_{ef} = \sqrt{24,9^2 + 3 \cdot 79,1^2} = 139,3 \text{ МПа} < 1,15 \cdot 250 \cdot \frac{1,0}{1,2} = 239,6 \text{ МПа}.$$

Проверка приведенных напряжений во 2-й точке

$$\sigma_2 = \frac{M}{I} \cdot y_2 = \frac{51,65 \cdot 10^{-3}}{6037 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,01909 = 163,3 \text{ МПа};$$

$$\tau_2 = \frac{V \cdot S_f^o}{I \cdot t_w} = \frac{96,01 \cdot 10^{-3} \cdot 176,31 \cdot 10^{-6}}{2910 \cdot 10^{-8} \cdot 5,6 \cdot 10^{-3}} = 50,1 \text{ МПа},$$

где  $S_f^o = b_f \cdot t_f \cdot y_{f2} = 9,0 \cdot 1,0 \cdot 19,59 = 176,31 \text{ см}^3$ .

$$\sigma_{ef} = \sqrt{163,3^2 + 3 \cdot 50,1^2} = 184,9 \text{ МПа} < 1,15 \cdot 250 \cdot \frac{1,0}{1,2} = 239,6 \text{ МПа}.$$

Прочность сечения на действие приведенных напряжений обеспечена.

Проверку общей устойчивости стрингера в соответствии с 5.16\* а) [4] производить не требуется, так как нагрузка передается на сжатый пояс стрингера через сплошной жесткий настил, непрерывно опирающийся на него и надежно с ним связанный.

Выполним проверку жесткости стрингера согласно 13.1\* [4]:

$$f = \frac{q_n \cdot d_{cp}^4}{185E \cdot I} = \frac{51,19 \cdot 10^{-3} \cdot 3,1^4}{185 \cdot 206 \cdot 10^3 \cdot 6037 \cdot 10^{-8}} \cdot 10^3 = 2 \text{ мм} < f_u = \frac{d_{cp}}{250} \cdot \frac{1}{\gamma_n} = \frac{3100}{250} \cdot \frac{1}{1,0} = 12 \text{ мм}.$$

Жесткость балки обеспечена.

## 5. РАСЧЕТ РИГЕЛЕЙ

### 5.1. Общие сведения

Расчетная схема ригеля – шарнирная балка, опорами которой служат опорно-концевые стойки (рис. 5.1). Нагруженная длина ригеля, равная пролету перекрываемого отверстия, мало отличается от пролета ригеля, поэтому без больших погрешностей можно принять, что нагрузка действует на всем пролете ригеля.

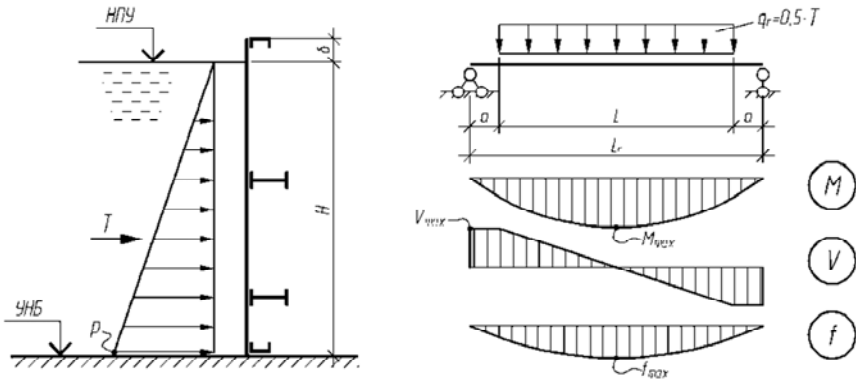


Рис. 5.1. Расчетная схема ригеля

При симметричном расположении ригелей относительно равнодействующей гидростатического давления  $T$  в двухригельном затворе каждый ригель воспринимает одинаковую нагрузку, равную  $0,5 \cdot T$ . Равнодействующая гидростатического давления численно равна площади прямоугольного треугольника с катетами  $H$  и  $p$

$$T = 0,5H \cdot p, \text{ кН/м,}$$

где  $p$  – гидростатическое давление на уровне нижнего бьефа.

Обычно ригель представляет собой сварную балку двутаврового сечения. Сквозную конструкцию применяют при больших пролетах – более 20 м, однако такие ригели весьма трудоемки в изготовлении, более подвержены коррозии и требуют повышенных эксплуатационных издержек. Обычно в опорных частях в целях уменьшения

размеров паза в быках высоту ригеля уменьшают (рис. 1.1). Высота сечения ригеля на опоре принимается равной

$$h_{\text{оп}} = \beta \cdot h = (0,5 - 0,7) \cdot h.$$

Подобрав сечение ригеля в виде составной балки, проверяют угол  $\alpha$  (рис. 1.1) между плоскостью водослива и нижней кромкой ригеля затвора. Если он меньше  $30^\circ$ , то при поднятии затвора вытекающая из-под него вода захлестывает нижний ригель и создает под ним вакуум, увеличивающий подъемное усилие. Особенно неблагоприятно неустановившееся протекание воды с прилипанием и отрывом струи от ригеля. В этом случае возникает значительная и резко меняющаяся динамическая нагрузка, создающая вибрацию затвора.

Для устранения вакуума в стенке сплошного нижнего ригеля по линии нейтральной оси необходимо устраивать отверстия для прохода воздуха в зоне возможного вакуума. Суммарная площадь этих отверстий должна быть не менее 0,2 всей площади стенки ригеля. Потеря части рабочего сечения компенсируется обрамлением вокруг отверстия. Толщина кольца принимается не менее полутора толщин стенки ригеля, а ширина кольца – не более 12 толщин стенки.

При расчете ригеля *по первой группе предельных состояний* требуется проверить нормальные напряжения в сечении, где действует максимальный изгибающий момент; касательные напряжения – в сечении, где действует максимальная поперечная сила, а также проверить общую устойчивость.

При проектировании ригеля с измененным сечением требуется проверить нормальные, касательные и приведенные напряжения в измененном сечении в волокнах, где действует наиболее невыгодное сочетание нормальных и касательных напряжений – в волокнах на уровне точки *1* (рис. 5.2).

При расчете конструкций по первой группе предельных состояний усилия определяются от расчетных значений нагрузок.

Напряжения определяются в соответствующих волокнах сечения согласно рис. 5.2. Расчет на прочность можно производить в предположении упругой или упруго-пластической работы металла. При проектировании ригеля с измененным сечением обычно ограничиваются упругой работой металла, что упрощает расчет.



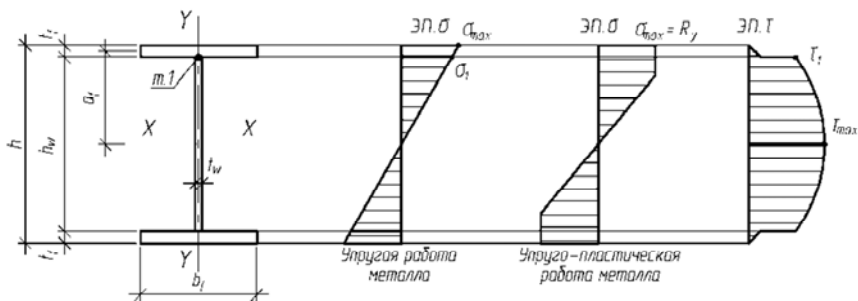


Рис. 5.2. Эпюры нормальных и касательных напряжений в сечении ригеля

При расчете ригеля *по второй группе предельных состояний* требуется проверить жесткость, которая характеризуется прогибом. Максимальный прогиб определяется от нормативного значения нагрузки.

Согласно нормам проектирования СНиП [4] также требуется проверить местную устойчивость элементов поперечного сечения ригеля (полки и стенки).

## 5.2. Компоновка симметричного двутаврового сечения ригеля

Подбор или компоновку сечения ригеля начинают с определения его высоты, от которой зависят все остальные параметры сечения. Высоту составной балки определяют из двух условий:

- 1) минимального расхода материала (оптимальная высота  $h_{opt}$ );
- 2) обеспечения нормативной жесткости балки (минимальная высота  $h_{min}$ ).

Оптимальную высоту балки определяют исходя из наименьшего расхода стали.

Момент сопротивления двутаврового сечения относительно оси X

$$W_x = \frac{2}{h} \cdot I_x = \frac{2}{h} \cdot \left( 2 \cdot \left[ \frac{b_f \cdot t_f^3}{12} + A_f \cdot \left( \frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right)^2 \right] + \frac{t_w \cdot h_w^3}{12} \right).$$

Произведем некоторые упрощения и преобразования:

- 1) пренебрегаем собственным моментом инерции пояса ввиду его малости по сравнению с остальными слагаемыми в формуле;
- 2) заменим  $A_f$  на  $0,5 \cdot (A - t_w \cdot h_w)$ ;
- 3) ввиду того, что  $h_w \approx h$ , заменим везде  $h_w$  на  $h$ ;
- 4) ввиду того, что  $t_f$  невелико по сравнению с  $h$ , пренебрегаем значением  $t_f$ .

В результате получим выражение следующего вида

$$W_x = \frac{A \cdot h}{2} - \frac{2t_w \cdot h^2}{3}.$$

Выразим площадь сечения из полученного выражения

$$A = \frac{2W_x}{h} + \frac{2t_w \cdot h}{3}.$$

Возьмем первую производную от функции площади по высоте, приравняем ее к нулю и найдем ее экстремум

$$\frac{dA}{dh} = -\frac{2W_x}{h^2} + \frac{2t_w}{3};$$

$$-\frac{2W_x}{h^2} + \frac{2t_w}{3} = 0;$$

$$h_{opt} = \sqrt{\frac{3W}{t_w}}.$$

Экстремум функции и есть точка локального минимума.

Для балки с постоянным по всей длине поперечным сечением минимальную высоту, при которой упругий прогиб ее будет не более нормативного, определяется по формуле

$$h_{\min} = \frac{5}{24} \cdot \frac{R_y \cdot L_r \cdot \gamma_c}{E \cdot \gamma_n^{(1)} / \gamma_n^{(2)}} \cdot \left[ \frac{l}{f} \right] \cdot \frac{q_{n,r}}{q_r},$$

где  $\gamma_n^{(1)}$  и  $\gamma_n^{(2)}$  – коэффициенты надежности по назначению при расчете по первой и по второй группе предельных состояний соответственно;

$R_y$  – расчетное сопротивление пояса ригеля.

Толщину стенки балки определяют из двух условий:

- 1) прочность опорного сечения на срез;
- 2) местная устойчивость стенки ригеля в среднем отсеке и близлежащих к нему.

Минимальная толщина стенки ригеля, полученная из условия среза на опоре

$$t_{w, \min} = \frac{S^o \cdot V \cdot \gamma_n}{I \cdot R_s \cdot \gamma_c} = k \cdot \frac{V \cdot \gamma_n}{h_{w, \text{on}} \cdot R_s \cdot \gamma_c}, \quad (5.1)$$

где  $h_{w, \text{on}}$  – высота сечения стенки ригеля на опоре;

$k$  – коэффициент который учитывает способ передачи опорного усилия и зависит от конструкции узла.

При опирании балки на опору через внешнее опорное ребро, приваренное к торцу балки, считается, что на срез работает только стенка двутаврового сечения, а пояса не успевают включиться в работу. Коэффициент  $k$  в этом случае принимается равным 1,5.

При опирании балки на опору через внутреннее опорное ребро коэффициент  $k$  принимается равным 1,2.

Минимальная толщина стенки ригеля из условия обеспечения ее местной устойчивости без дополнительной постановки продольных ребер жесткости определяется по формуле

$$t_{w, \min} = \frac{h_w}{\lambda_w} \cdot \sqrt{R_y/E}, \quad (5.2)$$

$R_y$  – расчетное сопротивление стенки ригеля;

$\bar{\lambda}_w$  – предельное значение условной гибкости стенки ригеля при условии, что постановка продольных ребер жесткости не требуется.

Для сварных балок, на сжатый пояс которых непрерывно опирается жесткий настил, значение  $\bar{\lambda}_w$  принимается равным  $\sqrt{35,5} \approx 6$ . В остальных случаях значение  $\bar{\lambda}_w$  определяется согласно 7.4\* СНиП [4].

Толщину стенки ригеля принимают не менее минимального значения, учитывая, тот факт, что при одинаковой несущей способности двух балок наименьшая площадь поперечного сечения будет у той, у которой меньшая толщина стенки.

Зависимость толщины стенки балки от высоты стенки изображена на рис. 5.3. В заштрихованной области находятся все значения толщины и высоты стенки, которые удовлетворяют условиям (5.1) и (5.2).

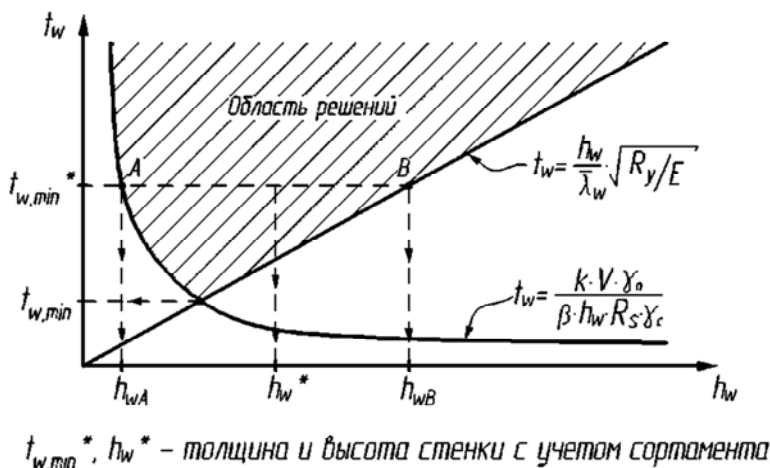


Рис. 5.3. Графики зависимости толщины стенки от высоты

Минимально допустимая толщина стенки балки находится в точке пересечения двух графиков. Определим минимально допустимую толщину стенки балки

$$k \cdot \frac{V \cdot \gamma_n}{\beta \cdot t_w \cdot R_s \cdot \gamma_c} = t_w \cdot \bar{\lambda}_w \cdot \sqrt{E/R_y};$$

$$t_w = \sqrt{\frac{k \cdot V \cdot \gamma_n}{\beta \cdot \bar{\lambda}_w \cdot R_s \cdot \gamma_c} \cdot \sqrt{R_y/E}},$$

где  $\beta = h_{w, on}/h_w$ .

Обычно при проектировании ригеля с изменяемой по длине пролета высотой стенки коэффициент  $\beta$  принимается равным (0,5–0,7).

Высота стенки  $h_w$  принимается из диапазона  $[h_{wA}; h_{wB}]$  такой, чтобы высота балки была не менее минимальной из условия жесткости:

$$h = h_w + 2t_f \geq h_{\min}. \quad (5.3)$$

При этом нужно знать значение  $t_f$ , которое можно принять равным 12–30 мм. Далее это значение уточняется на стадии компоновки пояса балки, но высота балки должна оставаться не менее  $h_{\min}$ .

Значение высоты стенки балки обычно принимается по сортаменту листовой стали, и если в диапазон  $[h_{wA}; h_{wB}]$  входят несколько таких значений, удовлетворяющих условию (5.3), то принимается то значение, при котором высота балки наиболее близка к  $h_{opt}$ .

Если оптимальная высота балки  $h_{opt}$  не входит в диапазон  $[h_{wA}; h_{wB}]$ , то высота стенки  $h_w$  принимается из рассматриваемого диапазона наиболее близкой к оптимальной, при этом должно выполняться условие (5.3).

Если в диапазоне  $[h_{wA}; h_{wB}]$  нет ни одного значения высоты стенки балки, которое бы удовлетворяло требованиям сортамента и условию (5.3), то требуется увеличить толщину стенки балки, тем самым расширив диапазон  $[h_{wA}; h_{wB}]$ .

Определив габариты стенки двутаврового сечения ригеля, переходят к компоновке пояса. Требуемая площадь пояса определяется из условия прочности по нормальным напряжениям.

Требуемый момент сопротивления и требуемый момент инерции можно определить из условия прочности по нормальным напряжениям

$$W_{cal} = \frac{M \cdot \gamma_n}{R_y \cdot \gamma_c};$$

$$I_{cal} = W_{cal} \cdot \frac{h}{2}.$$

Требуемый момент инерции, поясов

$$I_{f, cal} = I_{cal} - I_w,$$

где  $I_w = \frac{t_w \cdot h_w^3}{12}$  – момент инерции стенки двутаврового сечения.

Момент инерции поясов симметричного двутаврового сечения

$$I_f = 2 \cdot \left( \frac{b_f \cdot t_f^3}{12} + A_f \cdot a_f^2 \right).$$

Пренебрежем первым слагаемым ввиду его малости по сравнению со вторым и выразим требуемую площадь одного пояса

$$A_{f, cal} = \frac{I_{f, cal}}{2a_f^2}.$$

Компоновку сечения пояса производим в соответствии со следующими требованиями:

- 1)  $b_f \cdot t_f \geq A_{f, cal}$ ;
- 2) условие свариваемости стенки и полки в том, что соотношение толщин свариваемых элементов должно быть не более 3;
- 3) ширина пояса должна быть не менее минимального и не более максимально значения;
- 4) габариты пояса назначают по сортаменту полосовой стали.

Минимальная ширина пояса балки определяется из условия обеспечения общей устойчивости (на всех стадиях работы конструкции), обеспечения достаточной жесткости балки из плоскости стенки (при нахождении конструкции в проектном положении), условия опирания вышележащих конструкций, а также при наличии накладок по поясам – из условия расположения болтов в два ряда.

Максимальная ширина пояса балки определяется из условий обеспечения местной устойчивости свеса полки и равномерного распределения нормальных напряжений по ширине пояса. Таким образом, ширину пояса принимают  $b_f = (1/3 - 1/5) \cdot h$ , но не менее 180 мм. При  $b_f/h > 1/3$  будет существенно проявляться неравномерность распределения напряжений по ширине пояса, при  $b_f/h < 1/5$  мала боковая жесткость балки. При этом должно выполняться условие обеспечения местной устойчивости свеса полки

$$b_{ef} \leq 0,5t_f \cdot \sqrt{E/R_y}.$$

После того как найдены все габариты сечения, делают поверочные расчеты по первой и по второй группам предельных состояний, а также проверяют местную устойчивость стенки и полки. При этом экономичность подобранного сечения кроме площади поперечного сечения оценивается значением недонапряжения. Согласно 1.9 [4] в составных сечениях, установленных расчетом, недонапряжение не должно превышать 5 %. Добиться нормируемого значения недонапряжения по нормальным и касательным напряжениям одновременно достаточно сложно. Поэтому обычно эту величину проверяют по тем напряжениям, по которым подбиралось сечение.

Недонапряжение по нормальным напряжениям определяется по формуле

$$\frac{R_y \cdot \gamma_c / \gamma_n - \sigma}{R_y \cdot \gamma_c / \gamma_n} \cdot 100 \%$$

При проектировании ригеля с постоянным по длине пролета сечением максимальный прогиб определяется по формуле

$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{r,n} \cdot L_r^4}{E \cdot I} \leq f_u = \frac{L_r}{n_0} \cdot \frac{1}{\gamma_n},$$

где  $q_{r,n}$  – нормативная нагрузка на ригель;

$L_r$  – расчетный пролет ригеля;

$EI$  – изгибная жесткость ригеля;

$n_0$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от пролета и вида конструкции, рекомендуемое значение для ригеля составляет 500.

При проектировании ригеля с переменным по длине пролета сечением максимальный прогиб может быть уточнен:

$$f = \frac{1}{54} \cdot \frac{q_{r,n} \cdot L_r^4}{384} \cdot \left( \frac{13}{E \cdot I_{on}} + \frac{257}{E \cdot I} \right) \leq f_u = \frac{L_r}{n_0} \cdot \frac{1}{\gamma_n},$$

где  $I_{on}$  – момент инерции измененного сечения.

### Пример 4. Компоновка составного сечения ригеля

Исходные данные приняты по рис. 5.4. Климатический район строительства – П<sub>8</sub>. Класс ответственности затвора – II. Согласно ТКП 45-3.04-169-2009 «Гидротехнические сооружения» [5] для сооружения II класса при расчете по первой группе предельных состояний коэффициент надежности по ответственности  $\gamma_n$  принимается равным 1,2, при расчете по второй группе предельных состояний – 1,0.

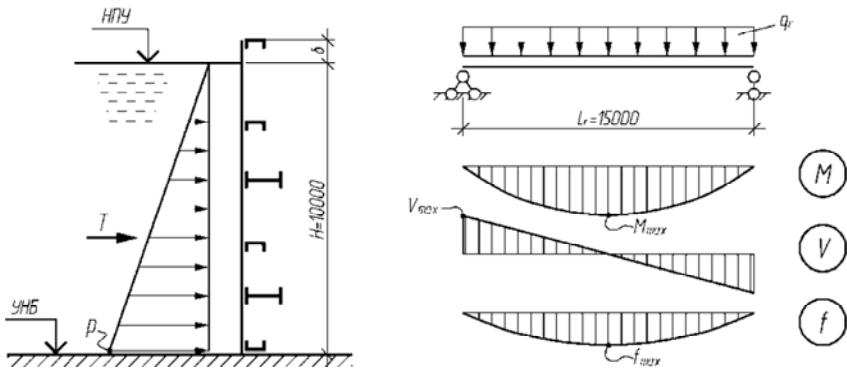


Рис. 5.4. Исходные данные к примеру 4

Требуемая конфигурация ригеля изображена на рис. 5.5.

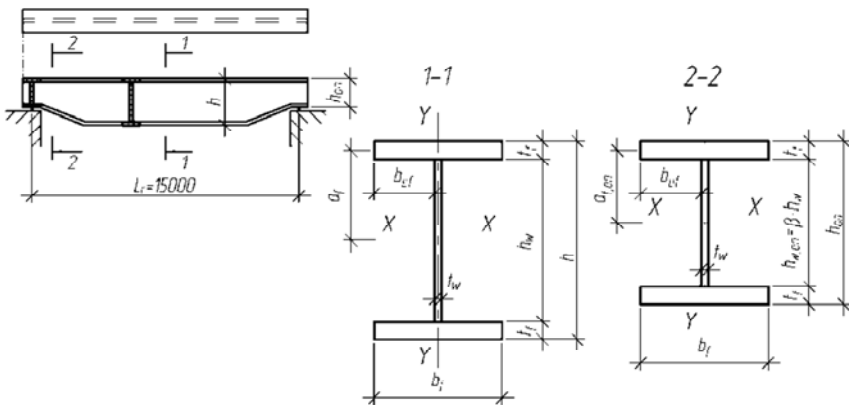


Рис. 5.5. Конфигурация рассчитываемого ригеля



Гидростатическое давление воды на уровне отметки УНБ

$$p = \gamma \cdot H = 10 \cdot 10 = 100 \text{ кН/м}^2,$$

где  $\gamma$  – удельный вес воды;

$H$  – расчетный напор.

Равнодействующая гидростатического давления, действующего на затвор

$$T = 0,5p \cdot H = 0,5 \cdot 100 \cdot 10 = 500 \text{ кН/м.}$$

Нормативная и расчетная нагрузка на ригель

$$q_{n,r} = \frac{T}{2} = \frac{500}{2} = 250 \text{ кН/м};$$

$$q_r = q_{n,r} \cdot \gamma_f = 250 \cdot 1,0 = 250 \text{ кН/м.}$$

Расчетные значения усилий

$$M = \frac{q_r \cdot L_r^2}{8} = \frac{250 \cdot 15^2}{8} = 7031,25 \text{ кНм};$$

$$V = \frac{q_r \cdot L_r}{2} = \frac{250 \cdot 15}{2} = 1875,0 \text{ кН.}$$

По таблице 50 [4] для климатического района П<sub>8</sub> и конструкций первой группы принимаем сталь для изготовления ригеля С255. По таблице 51 [4] для листового проката из стали С255 толщиной от 4 до 20 мм принимаем  $R_y = 240$  МПа, при толщине проката более 20 мм –  $R_y = 230$  МПа.

Ригель имеет переменное сечение стенки по длине. Согласно 5.19\* [4] расчет ведем в упругой стадии работы материала.

Согласно 5.12 [4] расчет на прочность элементов, изгибаемых в одной из главных плоскостей, следует выполнять по формуле

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq R_y \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n},$$

где  $\gamma_c$  – коэффициент, принимаемый в соответствии с таблицей 6\* [4] равным 1,0;

$R_y$  – расчетное сопротивление пояса составной балки.

Предполагаем, что толщина пояса ригеля не более 20 мм, тогда его расчетное сопротивление составит 240 МПа, тогда из условия прочности по нормальным напряжениям требуемый момент сопротивления равен

$$W_{cal} = \frac{M \cdot \gamma_n}{R_y \cdot \gamma_c} = \frac{7031,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2}{240 \cdot 1,0} \cdot 10^6 = 35\,157 \text{ см}^3.$$

Предварительно задаемся соотношением высоты балки в пролете и на опоре  $\beta = 0,7$ .

Минимальная толщина стенки балки, при которой выполняется условие прочности на срез в опорном сечении и не требуется постановка продольных ребер жесткости, укрепляющий стенку из расчета местной устойчивости стенки

$$\begin{aligned} t_{w, \min} &= \sqrt{\frac{k \cdot V \cdot \gamma_n}{\beta \cdot \lambda_w \cdot R_s \cdot \gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \\ &= \sqrt{\frac{1,5 \cdot 1875 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2}{0,7 \cdot 6 \cdot 139,2 \cdot 1,0}} \cdot \sqrt{\frac{240}{206 \cdot 10^3}} \cdot 10^3 = 14,1 \text{ мм}, \end{aligned}$$

где  $k$  – коэффициент, принимаемый равным 1,5 при условии, что на срез работает только стенка двутаврового сечения;

$R_s$  – расчетное сопротивление проката на срез:

$$R_s = 0,58R_y = 0,58 \cdot 240 = 139,2 \text{ МПа},$$

здесь  $R_y$  – расчетное сопротивление стенки составной балки.

Принимаем по сортаменту  $t_w = 16$  мм.

Определим диапазон, в котором может быть принята высота стенки балки

$$h_{wA} = k \cdot \frac{V \cdot \gamma_n}{\beta \cdot t_w \cdot R_s \cdot \gamma_c} = 1,5 \cdot \frac{1875 \cdot 10^3 \cdot 1,2}{0,7 \cdot 16 \cdot 139,2 \cdot 1,0} = 2165 \text{ мм};$$

$$h_{wB} = t_w \cdot \bar{\lambda}_w \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y}} = 16 \cdot 6 \cdot \sqrt{\frac{206 \cdot 10^3}{240}} = 2812 \text{ мм.}$$

Оптимальная высота балки

$$h_{opt} = \sqrt{\frac{3W}{t_w}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 35\,157 \cdot 10^3}{16}} = 2567 \text{ мм.}$$

Минимальная высота сечения балки в пролете из условия жесткости без учета того, что балка имеет измененное сечение

$$\begin{aligned} h_{\min} &= \frac{5}{24} \cdot \frac{R_y \cdot L_r \cdot \gamma_c}{E \cdot \gamma_n^{(1)} / \gamma_n^{(2)}} \cdot \left[ \frac{l}{f} \right] \cdot \frac{q_{n,r}}{q_r} = \\ &= \frac{5}{24} \cdot \frac{240 \cdot 15 \cdot 1,0}{206 \cdot 10^3 \cdot 1,2/1,0} \cdot 500 \cdot \frac{250}{250} = 1,517 \text{ м,} \end{aligned}$$

где  $R_y$  – расчетное сопротивление пояса составной балки;

$\gamma_n^{(1)}$  и  $\gamma_n^{(2)}$  – коэффициенты надежности по назначению при расчете по 1-й и по 2-й группе предельных состояний соответственно.

Высоту стенки балки принимаем из диапазона  $[h_{wA}; h_{wB}]$  такой, чтобы высота балки была не менее минимальной из условия жесткости и наиболее близкой к оптимальной.

Принимаем  $h_w = 2500$  мм. Толщину пояса предварительно принимаем равной 20 мм (далее при компоновке пояса это значение уточняется). Высота балки составляет

$$h = h_w + 2 \cdot t_f = 2500 + 2 \cdot 20 = 2540 \text{ мм} > h_{\min} = 1517 \text{ мм.}$$

Требуемый момент инерции сечения

$$I_{cal} = W_{cal} \cdot \frac{h}{2} = 35\,157 \cdot \frac{254}{2} = 4\,464\,939 \text{ см}^4.$$

Момент инерции стенки

$$I_w = \frac{t_w \cdot h_w^3}{12} = \frac{1,6 \cdot 250^3}{12} = 2\,083\,334 \text{ см}^4.$$

Требуемый момент инерции, приходящийся на пояса

$$I_{f, \text{cal}} = I_{\text{cal}} - I_w = 4\,464\,939 - 2\,083\,334 = 2\,381\,605 \text{ см}^4.$$

Расстояние от центра тяжести стенки до центра тяжести полки

$$a_f = h_w/2 + t_f/2 = (2500 + 20)/2 = 1260 \text{ мм}.$$

Требуемая площадь поперечного сечения одного пояса

$$A_{f, \text{cal}} = \frac{I_{f, \text{cal}}}{2a_f^2} = \frac{2\,381\,605}{2 \cdot 126^2} = 75,1 \text{ см}^2.$$

Компонуем сечение пояса в соответствии со следующими требованиями:

1) из условия свариваемости элементов  $t_f/t_w \leq 3$ ;

2)  $b_{f, \text{min}} \leq b_f \leq b_{f, \text{max}}$ .

Здесь  $b_{f, \text{min}}$  определяется из условия обеспечения достаточной жесткости балки из плоскости стенки

$$b_{f, \text{min}} = 1/5 h;$$

$b_{f, \text{max}}$  определяется из условия обеспечения местной устойчивости пояса и условия, при котором напряжения по ширине пояса распределяются достаточно равномерно

$$b_{f, \text{max}} = \min(1/3 h; 2b_{ef, \text{max}} + t_w),$$

где  $b_{ef, \text{max}} = 0,5t_f \cdot \sqrt{E/R_y}$  – условие обеспечения местной устойчивости пояса [4, (7.24)];

$$3) b_f \cdot t_f \geq A_{f, cal};$$

4) назначаем  $b_f$  и  $t_f$  по сортаменту листовой стали.

По сортаменту листовой стали назначаем  $t_f = 20$  мм.

Требуемая ширина пояса

$$b_f \cdot t_f \geq A_{f, cal}$$

$$b_{f, cal} = \frac{A_{f, cal}}{t_f} = \frac{75,1 \cdot 10^2}{20} = 376 \text{ мм.}$$

Из условия обеспечения достаточной жесткости балки из плоскости

$$b_{f, \min} = 1/5 h = 1/5 \cdot 2540 = 508 \text{ мм.}$$

Большое превышение минимальной ширины полки балки, принимаемой конструктивно, над требуемой приведет к большому недонапряжению сечения по нормальным напряжениям – следовательно, к большому перерасходу материала. В таком случае требуется перекомпоновать сечение стенки.

Принимаем высоту стенки балки из диапазона  $[h_{wA}; h_{wB}]$  такой, чтобы высота балки была не менее минимальной из условия жесткости.

Принимаем  $h_w = 2200$  мм. При этом высота балки

$$h = h_w + 2t_f = 2200 + 2 \cdot 20 = 2240 \text{ мм} > h_{\min} = 1517 \text{ мм.}$$

Заново определим требуемую площадь пояса

$$I_{cal} = W_{cal} \cdot \frac{h}{2} = 35157 \cdot \frac{224}{2} = 3\,937\,584 \text{ см}^4;$$

$$I_w = \frac{t_w \cdot h_w^3}{12} = \frac{1,6 \cdot 220^3}{12} = 1\,419\,734 \text{ см}^4;$$

$$I_{f, cal} = I_{cal} - I_w = 3\,937\,584 - 1\,419\,734 = 2\,517\,850 \text{ см}^4;$$

$$a_f = h_w/2 + t_f/2 = (2200 + 20)/2 = 1110 \text{ мм};$$

$$A_{f, cal} = \frac{I_{f, cal}}{2a_f^2} = \frac{2\,517\,850}{2 \cdot 1111^2} = 102,2 \text{ см}^2.$$

Требуемая ширина пояса

$$b_{f, cal} = \frac{A_{f, cal}}{t_f} = \frac{102,2 \cdot 10^2}{20} = 511 \text{ мм}.$$

По сортаменту принимаем  $b_f = 520 \text{ мм}$ .

Проверяем все остальные условия:

$$1) t_f/t_w = 20/16 = 1,25 < 3;$$

$$2) b_{f, min} = 2240/5 = 448 \text{ мм} < b_f = 520 \text{ мм} < b_{f, max} = \begin{cases} 2240/3 = 747 \text{ мм}; \\ 600 \text{ мм}. \end{cases}$$

$$b_{f, max} = 2b_{ef, max} + t_w = 2 \cdot 292 + 16 = 600 \text{ мм};$$

$$b_{ef, max} = 0,5t_f \cdot \sqrt{E/R_y} = 0,5 \cdot 20 \cdot \sqrt{206 \cdot 10^3/240} = 292 \text{ мм};$$

$$3) b_f \cdot t_f = 52 \cdot 2,0 = 104 \text{ см}^2 > A_{f, cal} = 102,2 \text{ см}^2.$$

Все условия выполняются.

Окончательно принимаем

$$h_w = 2200 \text{ мм}; t_w = 16 \text{ мм}; b_f = 520 \text{ мм}; t_f = 20 \text{ мм}.$$

Высота стенки балки на опоре принимается не менее требуемой из условия среза

$$h_{w, on, cal} = k \cdot \frac{V \cdot \gamma_n}{t_w \cdot R_s \cdot \gamma_c} = 1,5 \cdot \frac{1875 \cdot 10^3 \cdot 1,2}{16 \cdot 139,2 \cdot 1,0} = 1516 \text{ мм}.$$

Принимаем по сортаменту и с учетом следующего требования:

$$h_{w, on} = 1600 \text{ мм} > 0,5h_w = 0,5 \cdot 2200 = 1100 \text{ мм}.$$

Высота ригеля на опоре

$$h_{on} = h_{w, on} + 2t_f = 1600 + 2 \cdot 20 = 1640 \text{ мм.}$$

Определим геометрические характеристики подобранных сечений ригеля в пролете и на опоре

$$a_{f, on} = h_{w, on} / 2 + t_f / 2 = (1600 + 20) / 2 = 810 \text{ мм};$$

$$I = \frac{t_w \cdot h_w^3}{12} + 2 \cdot \left( \frac{b_f \cdot t_f^3}{12} + b_f \cdot t_f \cdot a_f^2 \right) =$$
$$= \frac{1,6 \cdot 220^3}{12} + 2 \cdot \left( \frac{52 \cdot 2,0^3}{12} + 52 \cdot 2,0 \cdot 111^2 \right) = 3\,982\,571 \text{ см}^4;$$

$$I_{on} = \frac{t_w \cdot h_{w, on}^3}{12} + 2 \cdot \left( \frac{b_f \cdot t_f^3}{12} + b_f \cdot t_f \cdot a_{f, on}^2 \right) =$$
$$= \frac{1,6 \cdot 160^3}{12} + 2 \cdot \left( \frac{52 \cdot 2,0^3}{12} + 52 \cdot 2,0 \cdot 81^2 \right) = 1\,910\,891 \text{ см}^4;$$

$$W = \frac{I}{0,5h} = \frac{3\,982\,571}{0,5 \cdot 224} = 35\,559 \text{ см}^3.$$

Выполним проверку прочности согласно 5.12 [4]

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{7031,25 \cdot 10^{-3}}{35\,559 \cdot 10^{-6}} = 197,7 \text{ МПа} \leq R_y \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 240 \cdot \frac{1,0}{1,2} = 200 \text{ МПа};$$

$$\tau = \frac{1,5V}{h_{w, on} \cdot t_w} = \frac{1,5 \cdot 1875 \cdot 10^3}{1600 \cdot 16} = 109,9 \text{ МПа} \leq R_s \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 139,2 \cdot \frac{1,0}{1,2} = 116 \text{ МПа.}$$

Прочность сечения на действие нормальных и касательных напряжений обеспечена.

Согласно 1.9 [4] в составных сечениях, установленных расчетом, недонапряжение не должно превышать 5%. Недонапряжение составляет

$$\frac{R_y \cdot \gamma_c / \gamma_n - \sigma}{R_y \cdot \gamma_c / \gamma_n} \cdot 100 \% = \frac{200 - 197,7}{200} \cdot 100 \% = 1,2 \% < 5 \%$$

Проверку общей устойчивости ригеля в соответствии с 5.16\* а) [4] производить не требуется, так как нагрузка передается на сжатый пояс ригеля через сплошной жесткий настил, непрерывно опирающийся на него и надежно с ним связанный.

Выполним проверку жесткости согласно 13.1\* [4] ригеля как балки с переменным по длине сечением стенки

$$f = \frac{1}{54} \cdot \frac{q_{r,n} \cdot L_r^4}{384} \cdot \left( \frac{13}{E \cdot I_{on}} + \frac{257}{E \cdot I} \right) \leq f_u = \frac{L_r}{n_0} \cdot \frac{1}{\gamma_n};$$

$$\frac{1}{54} \cdot \frac{250 \cdot 10^{-3} \cdot 15^4}{384 \cdot 206 \cdot 10^6} \cdot \left( \frac{13}{1910891 \cdot 10^{-8}} + \frac{257}{3982571 \cdot 10^{-8}} \right) \cdot 10^3 =$$

$$= 21 \text{ мм} < \frac{15000}{500} \cdot \frac{1}{1,0} = 30 \text{ мм}.$$

Жесткость балки обеспечена.

### 5.3. Изменения сечения ригеля по длине пролета

Для экономии материала и облегчения веса сечение длинных составных балок целесообразно менять в соответствии с изменением величины изгибающих моментов.

Самой экономичной по расходу металла является балка, моменты сопротивления сечения которой повторяют очертание эпюры изгибающих моментов. При этом должно выполняться условие прочности по касательным напряжениям в каждом сечении балки.

Изменение сечения выполняют за счет уменьшения высоты балки до 30 м; обычно выполняют одно изменение сечения (по одну сторону от оси симметрии по длине).

При проектировании плоских гидротехнических затворов для уменьшения паза в быках предусматривается изменение сечения ригеля за счет изменения высоты стенки. Высоту ригеля на опоре назначают от 0,5 до 0,7 от высоты ригеля в пролете. Измененное сечение располагают в первой панели продольно-связевой фермы.



В связи с изменением расчетного сечения ригеля требуется произвести дополнительные проверки прочности. В середине измененного участка необходимо проверить максимальные нормальные напряжения согласно 5.12 [4] и приведенные напряжения в месте стыка пояса и стенки согласно 5.14\* [4]. Условие прочности по касательным напряжениям обычно учитывается на стадии компоновки сечения.

Усилия на расстоянии  $x$  от опоры в однопролетной шарнирно опертой балке без консолей при действии равномерно распределенной нагрузки определяются по формулам

$$M_x = \frac{q \cdot x}{2} \cdot (l - x);$$

$$V_x = q \cdot \left( \frac{l}{2} - x \right).$$

### **Пример 5. Проверка прочности ригеля в месте изменения сечения**

Исходные данные приняты по рис. 5.8. Расчетное сопротивление полки ригеля  $R_y = 240$  МПа, стенки –  $R_y = 240$  МПа. Коэффициент надежности по ответственности при расчете по первой группе предельных состояний  $\gamma_n = 1,2$ . Расчетная нагрузка на ригель  $q_r = 250$  кН/м.

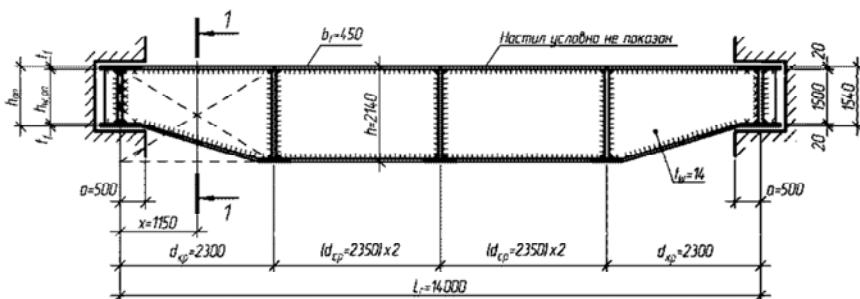


Рис. 5.6. Исходные данные к примеру 5

Проверку прочности по  $\sigma$  и  $\sigma_{ef}$  производим в середине измененного участка.

Расстояние до середины измененного участка

$$x = 0,5d_{\text{кр}} = 0,5 \cdot 2300 = 1150 \text{ мм.}$$

Расчетные значения усилий в рассматриваемом сечении

$$M_x = \frac{q_r \cdot x}{2} \cdot (L_r - x) = \frac{250 - 1,15}{2} \cdot (14 - 1,15) = 1847,19 \text{ кНм;}$$

$$V_x = q_r \cdot \left( \frac{L_r}{2} - x \right) = 250 \cdot \left( \frac{14}{2} - 1,15 \right) = 1462,50 \text{ кН.}$$

Высота стенки и всего сечения в середине измененного участка

$$h_{w,x} = \frac{h_w + h_{w,on}}{2} = \frac{2100 + 1500}{2} = 1800 \text{ мм;}$$

$$h_x = h_{w,x} + 2t_f = 1800 + 2 \cdot 20 = 1840 \text{ мм.}$$

Расстояние от центра тяжести стенки до центра тяжести полки на расстоянии  $x$  от опоры

$$a_{f,x} = h_{w,x}/2 + t_f/2 = (1800 + 20)/2 = 910 \text{ мм.}$$

Момент инерции, момент сопротивления сечения и статический момент пояса на расстоянии  $x$  от опоры

$$I_x = \frac{t_w \cdot h_{w,x}^3}{12} + 2 \cdot \left( \frac{b_f \cdot t_f^3}{12} + b_f \cdot t_f \cdot a_{f,x}^2 \right) =$$
$$= \frac{1,4 \cdot 180^3}{12} + 2 \cdot \left( \frac{45 \cdot 2,0^3}{12} + 45 \cdot 2,0 \cdot 91^2 \right) = 2\,171\,040 \text{ см}^4;$$

$$W_x = \frac{I_x}{0,5h_x} = \frac{2\,171\,040}{0,5 \cdot 184} = 23\,598 \text{ см}^3;$$

$$S_{f,x}^o = b_f \cdot t_f \cdot a_{f,x} = 45 \cdot 2,0 \cdot 91 = 8190 \text{ см}^3.$$

Проверка прочности по нормальным напряжениям согласно 5.12 [4]

$$\sigma = \frac{M_x}{W_x} = \frac{1847,19 \cdot 10^{-3}}{8190 \cdot 10^{-6}} = 78,28 \text{ МПа} < R_y \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 240 \cdot \frac{1,0}{1,2} = 220 \text{ МПа.}$$

Прочность по нормальным напряжениям обеспечена.

Согласно 5.14\* [4] для стенок балок, рассчитываемых по формуле (28) [1], должно выполняться условие

$$\sigma_{ef} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau_1^2} \leq 1,15R_y \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n},$$

где  $\sigma_1$  и  $\tau_1$  – нормальные и касательные напряжения в рассматриваемой точке.

Выполним проверку прочности по приведенным напряжениям в точке 1 как в месте с наиболее неблагоприятным сочетанием  $\sigma$  и  $\tau$  (см. рис. 5.9).

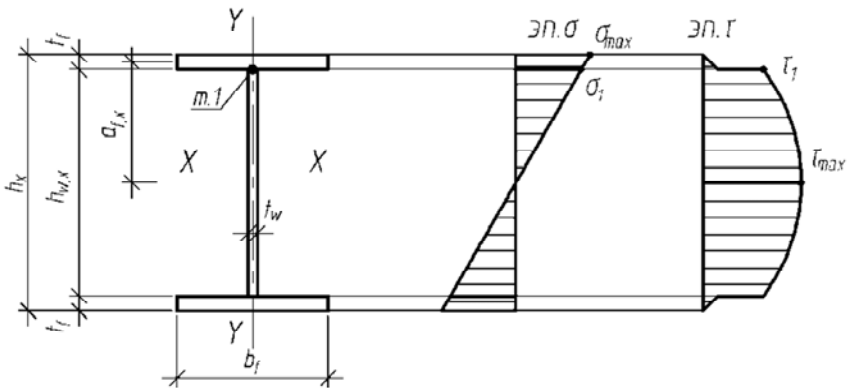


Рис. 5.7. Распределение напряжений в поперечном сечении ригеля

Нормальные, касательные и приведенные напряжения в рассматриваемой точке сечения

$$\sigma_1 = \sigma \cdot \frac{0,5h_{w,x}}{0,5h_x} = 78,28 \cdot \frac{0,5 \cdot 1800}{0,5 \cdot 1840} = 76,57 \text{ МПа};$$

$$\tau_1 = \frac{V_x \cdot S_f^0}{I_x \cdot t_w} = \frac{1462,50 \cdot 10^{-3} \cdot 8190 \cdot 10^{-6}}{2\,171\,040 \cdot 10^{-8} \cdot 14 \cdot 10^{-3}} = 39,41 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{ef} = \sqrt{76,57^2 + 3 \cdot 39,41^2} = 102,58 \text{ МПа} < 1,15 \cdot 240 \cdot \frac{1,0}{1,2} = 230 \text{ МПа}.$$

Прочность ригеля по приведенным напряжениям обеспечена.

#### 5.4. Соединение пояса ригеля со стенкой

В балках составного сечений соединение поясов со стенкой обычно выполняют двусторонними, реже – односторонними угловыми швами (см. рис. 5.10).

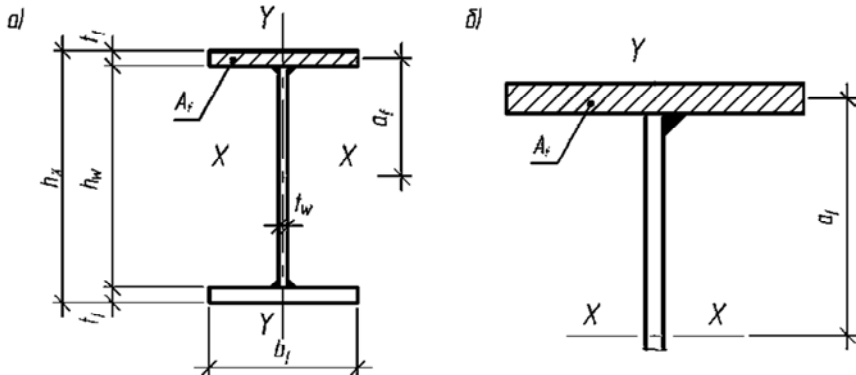


Рис. 5.8. Узлы соединения полки со стенкой балки составного сечения:  
*a* – с двусторонними угловыми швами; *б* – с односторонними угловыми швами

Поясные соединения обеспечивают совместную работу поясов и стенки балки и препятствуют их взаимному сдвигу. Сдвигающее усилие на единицу длины, вызываемое поперечной силой  $V$ , определяют по формуле

$$T = \frac{V \cdot S_f^0}{I},$$

где  $V$  – максимальное значение поперечной силы;

$S_f^0 = A_f \cdot a_f$  – статический момент брутто пояса балки относительно нейтральной оси в месте действия максимальной поперечной силы;

$I$  – момент инерции сечения балки брутто в месте действия максимальной поперечной силы.

Поясные швы выполняют непрерывными и с одинаковым катетом по всей длине балки. Применение односторонних угловых швов (рис. 5.10, б) допускается при следующих условиях:

- 1) статическая нагрузка расположена симметрично относительно вертикальной оси поперечного сечения балки;
- 2) местная устойчивость стенки обеспечена;
- 3) общая устойчивость балки обеспечена;
- 4) отсутствуют местные напряжения в балке ( $\sigma_{loc} = 0$ );
- 5) материал балки работает в упругой стадии.

Выбор материалов для сварки (типы электродов или сварочной проволоки, флюсов или защитных газов) производят по таблице 55\* [4] в зависимости от группы конструкций, климатического района строительства и марки свариваемой стали.

При расчете сварных соединений выделяют два расчетных сечения (см. рис. 5.11):

- 1) сечение по металлу шва (индекс  $f$ );
- 2) сечение по металлу границы сплавления (индекс  $z$ ).

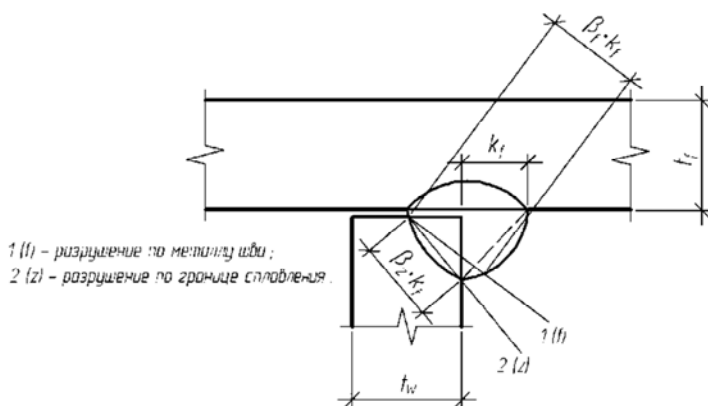


Рис. 5.9. Расчетные сечения сварного шва

Условие прочности поясных сварных швов при  $\sigma_{loc} = 0$  (например, при опирании балок настила на главную балку в месте установки поперечных ребер жесткости в соответствии с 11.16 и табл. 37\* [4]) записывается в следующем виде:

$$\frac{T}{n \cdot \beta_{f(z)} \cdot k_f} \leq \frac{R_{wf(z)} \cdot \gamma_{wf(z)} \cdot \gamma_c}{\gamma_n},$$

где  $n$  – количество угловых поясных швов ( $n=1$  – при односторонних швах;  $n=2$  – при двусторонних швах);

$\beta_f, \beta_z$  – коэффициенты формы шва, принимаемые при сварке элементов из стали: с пределом текучести до 530 МПа – по таблице 34\* [4]; с пределом текучести свыше 530 МПа независимо от вида сварки, положения шва и диаметра сварочной проволоки  $\beta_f = 0,7$  и  $\beta_z = 1,0$ ;

$k_f$  – катет сварного шва;

$R_{wf}$  – расчетное сопротивление сварного соединения срезу по металлу шва, принимаемое по таблице 56 [4] в зависимости от типа электрода или марки сварочной проволоки;

$R_{wz}$  – расчетное сопротивление сварного соединения срезу по металлу границы сплавления, определяемое согласно табл. 3 [4] по формуле

$$R_{wz} = 0,45R_{un},$$

здесь  $R_{un}$  – нормативное временное сопротивление стали свариваемых элементов разрыву, принимаемое по табл. 51\* [4];

$\gamma_{wf}, \gamma_{wz}$  – коэффициенты условий работы шва, равные 1,0 во всех случаях, кроме конструкций, возводимых в климатических районах I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, II<sub>2</sub> и II<sub>3</sub>, для которых  $\gamma_{wf} = 0,85$  для металла шва с нормативным сопротивлением  $R_{wun} = 410$  МПа и  $\gamma_{wz} = 0,85$  – для всех сталей.

Согласно 12.8 [4] размеры поясных угловых швов следует принимать с учетом следующих условий:

1) катеты угловых швов  $k_f$  должны быть не более  $1,2t$ , где  $t$  – наименьшая толщина соединяемых элементов;

2) катеты угловых швов  $k_f$  следует принимать по расчету, но не менее указанных в таблице 38\* [4].

При определении требуемого катета сварного шва целесообразно определить расчетное сечение сварного шва, сравнив значения  $\beta_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf}$  и  $\beta_z \cdot R_{wz} \cdot \gamma_{wz}$ , и по наименьшему произвести расчет.

Например, если  $\beta_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} > \beta_z \cdot R_{wz} \cdot \gamma_{wz}$ , расчет стоит производить по металлу границы сплавления. Требуемый катет сварного шва в таком случае будет определяться по формуле

$$k_{f, cal} = \frac{T \cdot \gamma_n}{n \cdot \beta_z \cdot R_{wz} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c}.$$

### **Пример 6. Расчет соединения пояса ригеля со стенкой**

Исходные данные приняты по рис. 5.12. Сталь ригеля – С255. Коэффициент надежности по ответственности при расчете по первой группе предельных состояний  $\gamma_n = 1,2$ . Климатический район строительства – П<sub>8</sub>. Максимальная поперечная сила  $V = 1800$  кН. Момент инерции поперечного сечения ригеля в расчетном сечении (на опоре)  $I_{on} = 1\,484\,320$  см<sup>4</sup>.

Статический момент брутто пояса ригеля относительно нейтральной оси

$$S_{f, on}^o = A_f \cdot a_{f, on} = 60 \cdot 2,0 \cdot 71 = 8520 \text{ см}^3.$$

Сдвигающее пояс усилие на единицу длины, вызываемое поперечной силой  $V$ ,

$$T = \frac{V \cdot S_{f, on}^o}{I_{on}} = \frac{1800 \cdot 8520 \cdot 10^{-6}}{1\,484\,320 \cdot 10^{-8}} = 1033,2 \text{ кН/м}.$$

Принимаем соединение поясов со стенкой двусторонними угловыми швами. Производство сварочных работ автоматическое под слоем флюса, положение шва – в лодочку. Для первой группы конструкций, климатического района П<sub>8</sub> и стали С255 по таблице 55\* [4]

принимает флюс АН-348-А и сварочную проволоку Св-08А диаметром 4 мм.

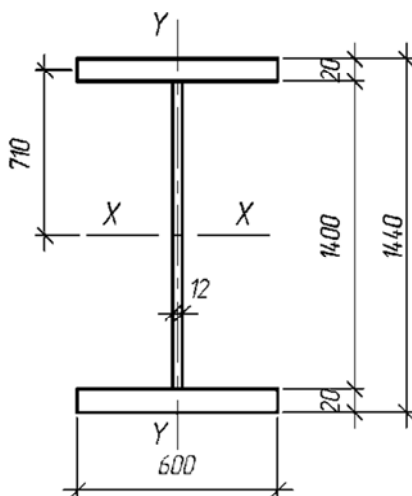


Рис. 5.10. Опорное сечение

Коэффициенты формы шва  $\beta_f$  и  $\beta_z$  принимаем при сварке электродами из стали с пределом текучести до 530 МПа по таблице 34\* [4]. Для автоматической сварки при диаметре электрода  $d = 3 - 5$  мм, положения шва в лодочку и катете шва  $k_f = 3 - 16$  мм:  $\beta_f = 1,1$  и  $\beta_z = 1,15$ .

Коэффициенты условий работы шва  $\gamma_{wf}$  и  $\gamma_{wz}$  при строительстве в климатическом районе П<sub>3</sub> принимаются равными 1,0.

Расчетное сопротивление сварного соединения срезу по металлу шва принимается по таблице 56\* [4] для выбранной сварочной проволоки равным 180 МПа.

Расчетное сопротивление сварного соединения срезу по металлу границы сплавления

$$R_{wz} = 0,45 R_{un} = 0,45 \cdot 370 = 166,5 \text{ МПа,}$$

где  $R_{un}$  – принято по таблице 51\* [4].



Определим расчетное сечение сварного шва

$$\beta_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} = 1,1 \cdot 180 \cdot 1,0 = 198 \text{ МПа} >$$

$$> \beta_z \cdot R_{wz} \cdot \gamma_{wz} = 1,15 \cdot 166,5 \cdot 1,0 = 191,5 \text{ МПа.}$$

Расчет ведем по металлу границы сплавления.

Требуемый катет поясного шва

$$k_{f, \text{cal}} = \frac{T \cdot \gamma_n}{2\beta_z \cdot R_{wz} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c} = \frac{1033,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2}{2 \cdot 1,15 \cdot 166,5 \cdot 1,0 \cdot 1,0} \cdot 10^3 = 3,3 \text{ мм.}$$

Согласно 12.8, а [4] определяем максимальный катет сварного шва

$$k_{f, \text{max}} = 1,2t_{\text{min}} = 1,2t_w = 1,2 \cdot 12 = 14,4 \text{ мм.}$$

Согласно 12.8, б [4] определяем минимальный катет сварного шва по таблице 38\* [4]. При толщине более толстого из свариваемых элементов  $t_f = 20$  мм принимаем катет сварного шва равным

$$k_{f, \text{min}} = 6 \text{ мм.}$$

Окончательно назначаем катет сварного шва

$$k_f = k_{f, \text{min}} = 6 \text{ мм} > k_{f, \text{cal}} = 3,3 \text{ мм.}$$

### 5.5. Опорная часть ригеля

Расчет на устойчивость опорной части ригеля производить не требуется, так как она раскреплена из плоскости опорно-концевой стойкой.

Расчет сварных швов (Ш<sub>1</sub> см. на рис. 5.15), через которые передается опорная реакция ригеля на опорно-концевую стойку выполняется согласно 11.2\* СНиП [4] с выполнением требований 12.8 СНиП [4].

Требуемый катет сварного шва определяется из системы уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{V}{2 \cdot \beta_{f(z)} \cdot k_f \cdot l_w} \leq \frac{R_{wf(z)} \cdot \gamma_{wf(z)} \cdot \gamma_c}{\gamma_n}; \\ l_{w, \text{max}} = 85\beta_f \cdot k_f. \end{array} \right.$$

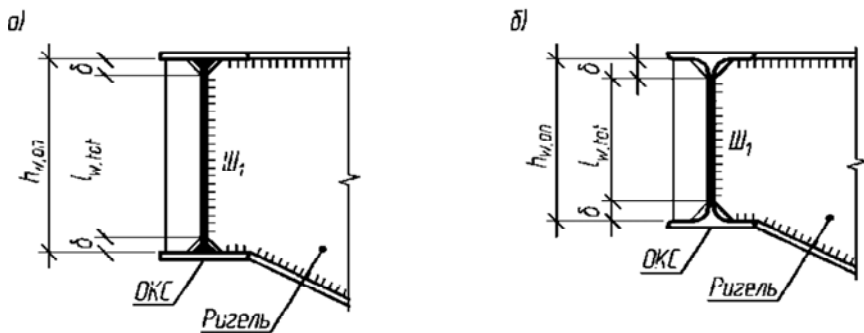


Рис. 5.11. Сопряжение ригеля и опорно-концевой стойки:  
 а – опорно-концевая стойка имеет составное сечение;  
 б – опорно-концевая стойка имеет прокатное сечение

Подставим максимально допустимую расчетную длину флангового сварного шва в первое уравнение и выразим требуемый катет сварного шва

$$k_{f, cal} = \sqrt{\frac{V \cdot \gamma_n}{2 \cdot 85 \beta_f \cdot \beta_{f(z)} \cdot R_{wf(z)} \cdot \gamma_{wf(z)} \cdot \gamma_c}}$$

Принятая в расчет длина сварного шва  $l_{w, max}$  не должна превышать расчетную длину сварного шва  $l_w$ , которая принимается меньше полной длины на 10 мм,

$$l_w = 85 \beta_f \cdot k_{f, cal} \leq l_{w, max} = l_{w, tot} - 10 \text{ мм},$$

где  $l_{w, tot}$  – полная длина сварного шва:

$$l_{w, tot} = h_{w, on} - 2\delta,$$

здесь  $h_{w, on}$  – высота стенки ригеля в опорном сечении;

$\delta$  – величина подрезки стенки ригеля на опоре.

Катет сварного шва следует принимать по расчету, но не менее указанных в табл. 38 СНиП [4] и не более максимально допустимого, определенного согласно 12.7 СНиП [4].

### Пример 7. Расчет опорной части ригеля

Исходные данные приняты по рис. 5.16. Сталь ригеля и опорно-концевой стойки С255. Коэффициент надежности по ответственности при расчете по первой группе предельных состояний  $\gamma_n = 1,2$ . Климатический район строительства – П<sub>8</sub>. Опорная реакция ригеля  $V = 1800$  кН.

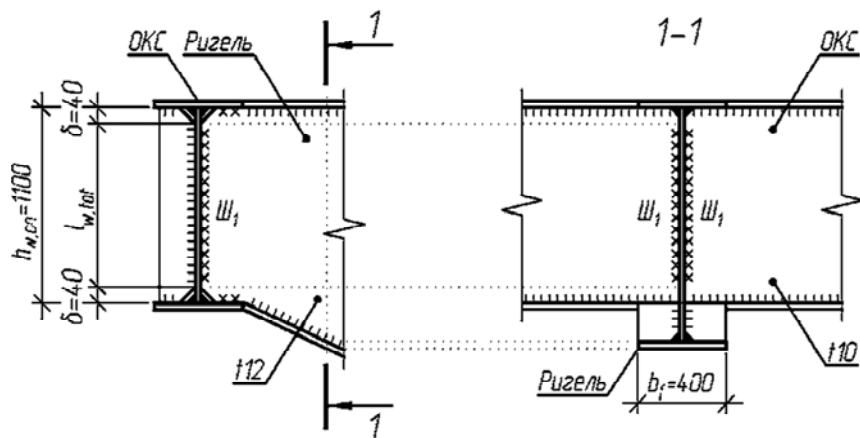


Рис. 5.12. Опорная часть ригеля

Согласно 7.12 [1] требуемая площадь торцевой поверхности опорного ребра определяется из условия смятия

$$\sigma = \frac{V}{A_{on}} \leq R_p \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n},$$

где  $R_p$  – расчетное сопротивление на смятие торцевой поверхности опорного ребра, выполненного из листового проката толщиной 4–10 мм С255. Принимается по таблице 52\* [1] в зависимости от нормативного значения временного сопротивления стали  $R_{un}$ .

Определим требуемую площадь опирания

$$A_{on, cal} = \frac{V \cdot \gamma_n}{R_p \cdot \gamma_c} = \frac{1000 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2}{346 \cdot 1,0} \cdot 10^4 = 34,68 \text{ см}^2,$$

Компонуем сечение опорного ребра в соответствии с требованиями:

1)  $A_{on} = b_{on} \cdot t_{on} \geq A_{on, cal}$ ;

2) из условия свариваемости элементов:  $t_{max}/t_{min} \leq 3$ .

Для упрощения в запас прочности примем ширину опорной части равной ширине пояса ригеля:  $b_{on} = b_f = 400$  мм.

Проверяем все остальные условия:

1)  $A_{on} = b_{on} \cdot t_w, OKC = 40 \cdot 1,0 = 40 \text{ см}^2 > A_{on, cal} = 34,68 \text{ см}^2$ ; ;

2)  $t_w/t_w, OKC = 12/10 = 1,2 < 3$ .

Все условия выполняются.

Принимаем соединение стенки ригеля со стенкой опорно-концевой стойки двусторонними угловыми швами. Сварка ручная, положение шва – произвольное. Для 1-й группы конструкций, климатического района П<sub>8</sub> и стали С255 по таблице 55\* [4] принимаем тип электрода Э42А.

Опорная реакция ригеля передается на стенку диафрагмы через два угловых шва.

Согласно 11.2\* [4] расчет сварных соединений с угловыми швами при действии поперечной силы следует рассчитывать на срез (условный) по двум сечениям (металлу шва и границы сплавления)

$$\frac{V}{\beta_{f(z)} \cdot k_f \cdot l_w} \leq R_{wf(z)} \cdot \gamma_{wf(z)} \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n},$$

где  $l_w$  – расчетная длина шва, принимаемая меньше его полной длины на 10 мм; согласно 12.8, с [4] принимается не более  $l_{w, max}$ ;

$$l_{w, max} = 85\beta_f \cdot k_f.$$

Коэффициенты формы шва  $\beta_f$  и  $\beta_z$  принимаем при сварке электродами из стали с пределом текучести до 530 МПа по таблице 34\* [4]. Для ручной сверки  $\beta_f = 0,7$  и  $\beta_z = 1,0$ .

Коэффициенты условий работы шва  $\gamma_{wf}$  и  $\gamma_{wz}$  при строительстве в климатическом районе П<sub>8</sub> принимаются равными 1,0.

Расчетное сопротивление сварного соединения срезу по металлу шва принимается по табл. 56\* [4] для выбранного типа электрода равным 180 МПа.

Расчетное сопротивление сварного соединения срезу по металлу границы сплавления

$$R_{wz} = 0,45 R_{un} = 0,45 \cdot 370 = 166,5 \text{ МПа,}$$

где  $R_{un}$  – принято по табл. 51\* [1].

Определим расчетное сечение сварного шва

$$\begin{aligned} \beta_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} &= 0,7 \cdot 180 \cdot 1,0 = 126 \text{ МПа} < \\ < \beta_z \cdot R_{wz} \cdot \gamma_{wz} &= 1,0 \cdot 166,5 \cdot 1,0 = 166,5 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Расчет ведем по металлу шва.

Требуемый катет сварного шва

$$k_{f, cal} = \sqrt{\frac{V \cdot \gamma_n}{2 \cdot 85 \beta_f^2 \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c}} = \sqrt{\frac{1000 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2}{2 \cdot 85 \cdot 0,7^2 \cdot 180 \cdot 1 \cdot 1}} \cdot 10^3 = 8,95 \text{ мм.}$$

Сравним принятую в расчет длину сварного шва с максимально допустимой из условия расположения шва вдоль стенки ригеля

$$\begin{aligned} l_w &= 85 \beta_f \cdot k_{f, cal} = 85 \cdot 0,7 \cdot 8,95 = 532 \text{ мм} < \\ < l_{w, max} &= h_{w, on} - 2\delta - 10 \text{ мм} = 1100 - 2 \cdot 40 - 10 = 1010 \text{ мм,} \end{aligned}$$

Согласно 12.8, а [1] определяем максимальный катет сварного шва

$$k_{f, max} = 1,2 t_{min} = 1,2 \cdot 10 = 12 \text{ мм.}$$

Согласно 12.8, б [1] определяем минимальный катет сварного шва по табл. 38\* [1]. При толщине более толстого из свариваемых элементов  $t_w = 12$  мм принимаем катет сварного шва равным  $k_{f, min} = 6$  мм.

Окончательно назначаем катет сварного шва

$$k_f = 9 \text{ мм} > k_{f, cal} = 8,95 \text{ мм.}$$

## 5.6. Узлы опирания стрингеров

На рис. 5.13 приведены узлы опирания стрингеров, на которых передача опорных реакций предусматривается через сварные опорные столики привариваемые к стенкам диафрагм.

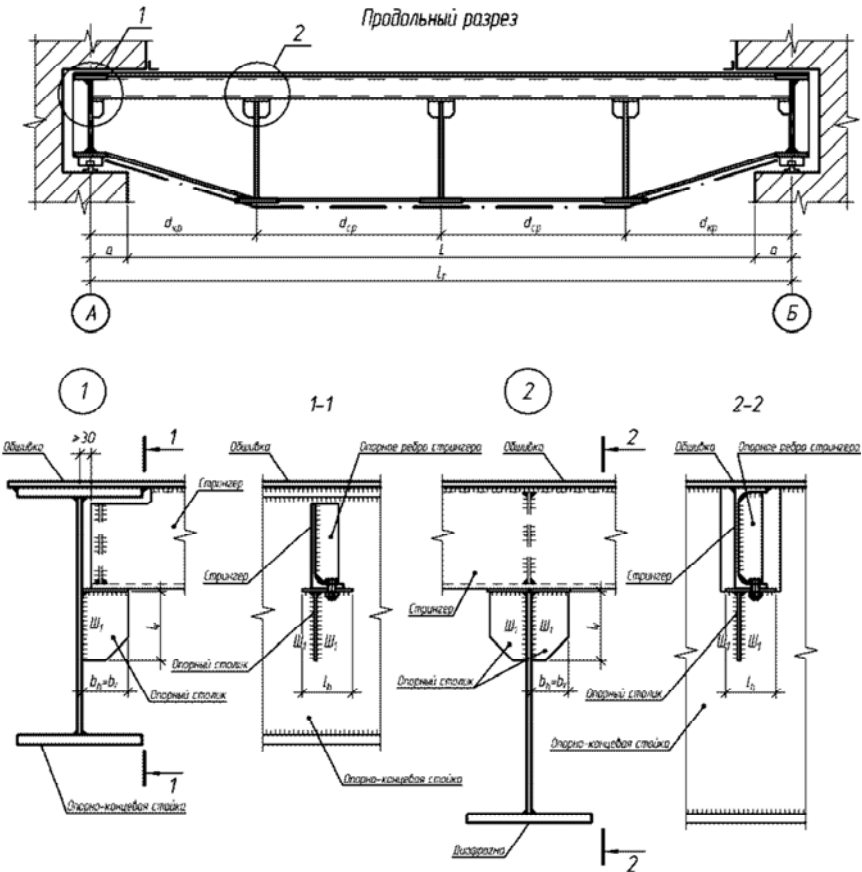


Рис. 5.13. Узлы опирания стрингера на опорно-концевую стойку и диафрагму

### **Пример 9. Расчет узлов опирания стрингера на опорно-концевую стойку и диафрагму**

Принимаем, что стрингеры опираются на диафрагмы и ОКС через опорные столики, сваренные из 2-х листов.

Расчет ведем для максимально нагруженного стрингера. В запас прочности расчет сварных швов будем вести на максимальные усилия ( $V$  и  $M$ ), которые при равномерно распределенной нагрузке и равных пролетах неразрезной балки имеют место на 2-й опоре.

Толщину 1-го листа принимаем конструктивно  $t_1 = 12$  мм. Длина 1-го листа

$$l_1 = b_{\text{дв}} + 2 \cdot 20 = 90 + 2 \cdot 20 = 130 \text{ мм},$$

где  $b_{\text{дв}}$  – ширина полки стрингера.

Ширина 1-го листа  $b_1$  определяется из условия размещения сварного Ш<sub>1</sub>.

Принимаем сварочные материалы и способы производства сварочных работ такими же, как в расчете соединения стенки ригеля со стенкой диафрагмы.

Расчет ведем по металлу шва.

Согласно 12.8,  $a$  [4] определяем максимальный катет сварного шва

$$k_{f, \max} = 1,2t_{\min} = 1,2 \cdot 12 = 14,4 \text{ мм}.$$

Согласно 12.8,  $b$  [5] принимаем  $k_{f, \min} = 5$  мм.

Принимаем катет сварного  $k_f = 5$  мм.

Требуемая ширина 1-го листа

$$b_{1, \text{cal}} = \frac{1,2V \cdot \gamma_n}{2 \cdot \beta_f \cdot k_f \cdot R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c} + 10 \text{ мм} = \frac{1,2 \cdot 91,88 \cdot 10^3 \cdot 1,2}{2 \cdot 0,7 \cdot 5 \cdot 180 \cdot 1,0 \cdot 1,0} + 10 = 98 \text{ мм}.$$

Принимаем ширину 1-го листа равной 100 мм.

Ширину 2-го листа принимаем  $b_2 = b_1 = 100$  мм.

Длину 2-го листа  $l_2$  определяем из условия размещения сварного Ш<sub>2</sub>. На шов одновременно действуют  $V$  и  $M$ , где  $M = V \cdot e$ .

Согласно 11.5 [5] при расчете сварных соединений с угловыми швами на одновременное действие поперечной силы и момента должны быть выполнены условия

$$\tau_{f(z)} \leq R_{wf(z)} \cdot \gamma_{wf(z)} \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n} - \text{по металлу шва (границы сплавления),}$$

где  $\tau_f$  и  $\tau_z$  – напряжения в расчетном сечении соответственно по металлу шва и по металлу границы сплавления, равные геометрическим суммам напряжений, вызываемых поперечной силой и моментом.

$$\tau_{f(z)} = \sqrt{\tau_M^2 + \tau_V^2} = \sqrt{\left(\frac{M}{W_w}\right)^2 + \left(\frac{V}{A_w}\right)^2}.$$

Эксцентриситет приложения опорного давления стрингера по отношению к сварному шву

$$e = 100 - 0,5 \cdot (100 + 0,5 \cdot 12 - 30) = 62 \text{ мм.}$$

Расчетный изгибающий момент

$$M = V \cdot e = 91,88 \cdot 0,062 = 5,70 \text{ кНм.}$$

Принимаем длину 2-го листа  $l_2 = 190$  мм. Тогда расчетная длина сварного шва

$$l_w = l_2 - 10 \text{ мм} = 190 - 10 = 180 \text{ мм.}$$

Согласно 12.8, а [4] определяем максимальный катет сварного шва

$$k_{f, \max} = 1,2 t_{\min} = 1,2 \cdot 12 = 14,4 \text{ мм.}$$

Согласно 12.8, б [5] принимаем  $k_{f, \min} = 5$  мм.

Проверим прочность сварного шва Ш<sub>2</sub> при  $k_f = k_{f, \min} = 5$  мм.

$$W_w = \frac{2\beta_f \cdot k_f \cdot l_w^2}{6} = \frac{2 \cdot 0,7 \cdot 0,5 \cdot 18^2}{6} = 37,8 \text{ см}^3;$$



$$A_w = 2\beta_f \cdot k_f \cdot l_w = 2 \cdot 0,7 \cdot 0,5 \cdot 18^2 = 12,6 \text{ см}^2.$$

Проверка прочности сварного шва Ш<sub>2</sub>:

$$\tau_f = \sqrt{\left(\frac{5,70 \cdot 10^{-3}}{37,8 \cdot 10^{-6}}\right)^2 + \left(\frac{91,88 \cdot 10^{-3}}{12,6 \cdot 10^{-4}}\right)^2} = 167,42 \text{ МПа} <$$

$$< 215 \cdot 1,0 \cdot \frac{1,0}{1,2} = 179,17 \text{ МПа}.$$

Прочность сварного шва Ш<sub>2</sub> обеспечена.

### 5.7. Местная устойчивость элементов сечения ригелей

При потере местной устойчивости элементов сечения ригеля (сжатого пояса, сжатой зоны стенки) расчетное сечение ригеля уменьшается. Это может привести к преждевременной потере несущей способности ригеля. Поэтому после его расчета на прочность и общую устойчивость, при выполнении которой было учтено полное сечение ригеля, следует убедиться в том, что местная устойчивость частей сечения (сжатых полок и стенки) обеспечена. В противном случае необходимо пересчитать сечение на устойчивость и прочность с учетом его ослабления.

Местная устойчивость сжатого пояса ригеля обеспечена при компоновке его сечения.

Проверку местной устойчивости стенки сечения ригеля выполняют как для изгибаемых элементов согласно указаниям [4].

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Металлические конструкции : учебник для строительных вузов: в 3 т. / под ред. В. В. Горева. – М. : Выш. шк., 1997. – Т.1: Элементы стальных конструкций. – 527 с.
2. Металлические конструкции в гидротехнике : учебное пособие / Н. Н. Кошин [и др.] – М. : Изд-во АСВ, 2000. – 192 с.
3. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85\*.
4. Стальные конструкции: СНиП II-23-81\*. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1991. – 94 с.
5. Гидротехнические сооружения: ТКП 45-3.04-169-2009.

**СОСТАМЕНТ**

*Таблица III*

**Сталь широкополосная универсальная  
по ГОСТ 82-70 (выборка из ГОСТ)**

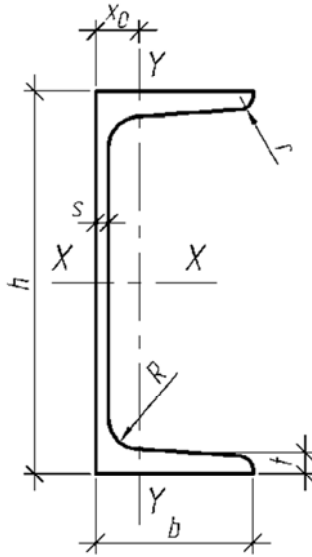
Толщина листов, мм	Ширина листов, мм
6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 36, 40, 45, 50, 55, 60	160, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 240, 250, 260, 280, 300, 320, 340, 350, 360, 380, 400, 420, 440, 450, 460, 480, 500, 520, 530, 550, 560, 580, 600, 630, 650, 670, 700, 710, 750, 800, 850, 900, 950, 1000, 1050

*Таблица II2*

**Прокат листовой горячекатаный  
по ГОСТ 19903-74 (выборка из ГОСТ)**

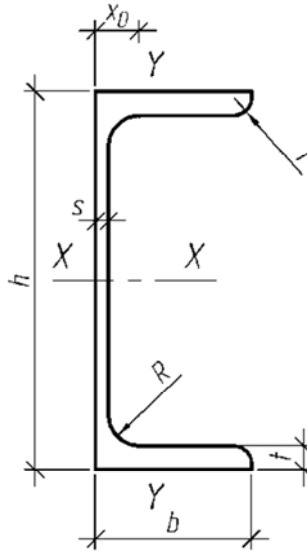
Толщина листов, мм	Ширина листов, мм
6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 36, 40, 45, 50, 55, 60	510, 1100, 1250, 1400, 1420, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2100, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700, 2800, 2900, 3000, 3200, 3400, 3600, 3800

**Швеллеры стальные горячекатаные с уклоном внутренних  
граней полков по ГОСТ 8240-97 (выборка из ГОСТ)**



Номер швеллера серии У	$h$ , мм	$b$ , мм	$s$ , мм	$t$ , мм	$R$ , мм	$r$ , мм	Площадь поперечного сечения, $\text{см}^2$	Масса 1 м, кг	$I_{x_0}$ , $\text{см}^4$	$W_{x_0}$ , $\text{см}^3$	$x_0$ , см
12У	120	52	4,8	7,8	7,5	3,0	13,3	10,4	304	50,6	1,54
14У	140	58	4,9	8,1	8,0	3,0	15,6	12,3	491	70,2	1,67
16У	160	64	5,0	8,4	8,5	3,5	18,1	14,2	747	93,4	1,80
16аУ	160	68	5,0	9,0	8,5	3,5	19,5	15,3	823	103	2,00
18У	180	70	5,1	8,7	9,0	3,5	20,7	16,3	1090	121	1,94
18аУ	180	74	5,1	9,3	9,0	3,5	22,2	17,4	1190	132	2,13
20У	200	76	5,2	9,0	9,5	4,0	23,4	18,4	1520	152	2,07
22У	220	82	5,4	9,5	10,0	4,0	26,7	21,0	2110	192	2,21
24У	240	90	5,6	10,0	10,5	4,0	30,6	24,0	2900	242	2,42
27У	270	95	6,0	10,5	11,0	4,5	35,2	27,7	4160	308	2,47
30У	300	100	6,5	11,0	12,0	5,0	40,5	31,8	5810	387	2,52
33У	330	105	7,0	11,7	13,0	5,0	46,5	36,5	7980	484	2,59
36У	360	110	7,5	12,6	14,0	6,0	53,4	41,9	10820	601	2,68
40У	400	115	8,0	13,5	15,0	6,0	61,5	48,3	15220	761	2,75

**Швеллеры стальные горячекатаные с параллельными  
гранями полков по ГОСТ 8240-97 (выборка из ГОСТ)**



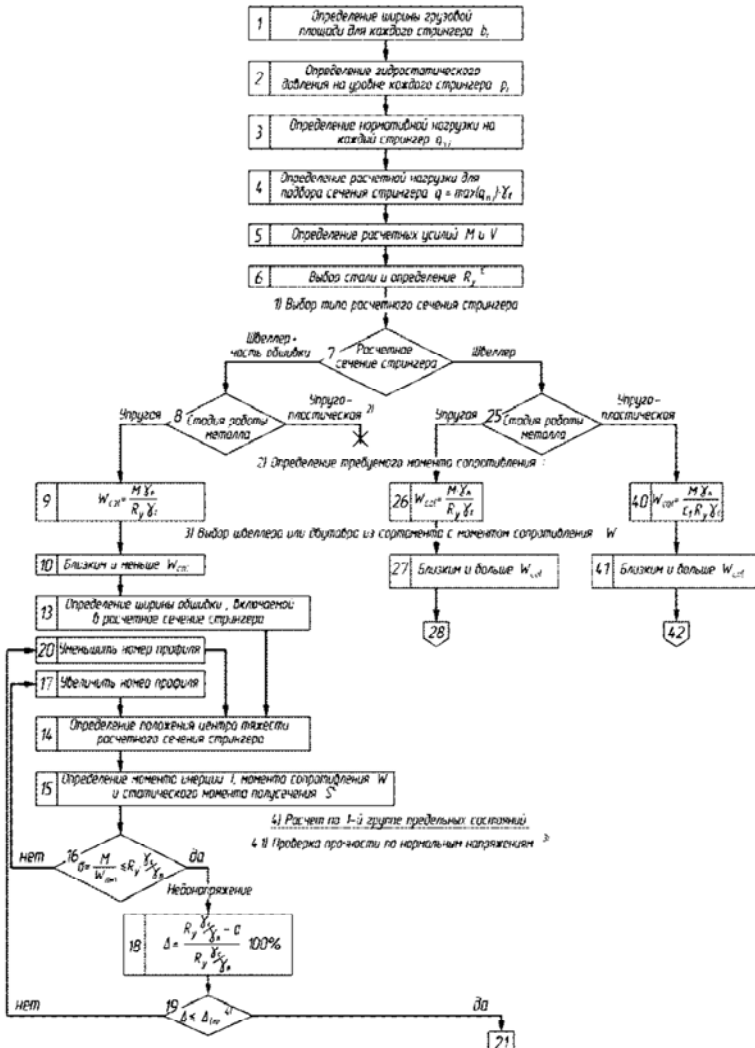
Номер швеллера серии П	$h$ , мм	$b$ , мм	$s$ , мм	$t$ , мм	$R$ , мм	$r$ , мм	Площадь поперечного сечения, см <sup>2</sup>	Масса 1 м, кг	$I_{x_0}$ , см <sup>4</sup>	$W_{x_0}$ , см <sup>3</sup>	$x_0$ , см
12П	120	52	4,8	7,8	7,5	4,5	13,3	10,4	305	50,8	1,66
14П	140	58	4,9	8,1	8,0	4,5	15,6	12,3	493	70,4	1,82
16П	160	64	5,0	8,4	8,5	5,0	18,1	14,2	750	93,8	1,97
16аП	160	68	5,0	9,0	8,5	5,0	19,5	15,3	827	103	2,19
18П	180	70	5,1	8,7	9,0	5,0	20,7	16,3	1090	121	2,14
18аП	180	74	5,1	9,3	9,0	5,0	22,2	17,4	1200	133	2,36
20П	200	76	5,2	9,0	9,5	5,5	23,4	18,4	1530	153	2,30
22П	220	82	5,4	9,5	10,0	6,0	26,7	21,0	2110	193	2,47
24П	240	90	5,6	10,1	10,5	6,0	30,6	24,0	2910	243	2,72
27П	270	95	6,0	10,5	11,0	6,5	35,2	27,7	4180	310	2,78
30П	300	100	6,5	11,0	12,0	7,0	40,5	31,8	5830	389	2,83
33П	330	105	7,0	11,7	13,0	7,5	46,5	36,5	8010	486	2,90
36П	360	110	7,5	12,6	14,0	8,5	53,4	41,9	10850	603	2,99
40П	400	115	8,0	13,5	15,0	9,0	61,5	48,3	15260	763	3,05

**Укрупненный алгоритм расчета металлоконструкций**



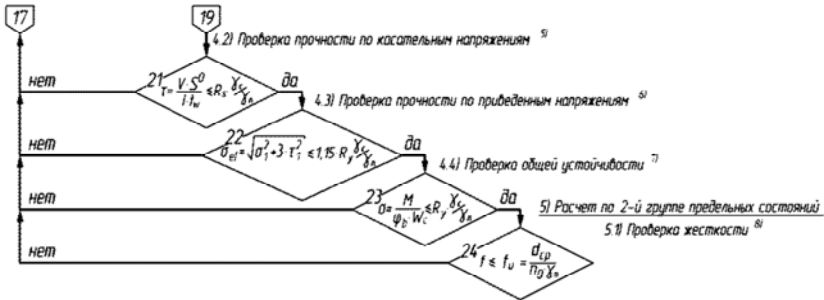
Рис. П2.1. Укрупненный алгоритм расчета

Алгоритм подбора прокатного сечения стрингера



1. Выбор стали производится по таблице 50\* а определение расчетного сопротивления - по таблице 51\* СНиП 8-23-81\*  
 2. Данные расчетных случаев не оговорен в СНиП 8-23-81\*  
 3. Проверка прочности по нормальным напряжениям производится согласно 5.12 СНиП 8-23-81\*.  
 4. Для ишвеллеров рекомендуемое значение  $\Delta_{lim}$  составляет 75%

Рис. ПЗ.1. Алгоритм расчета стрингера (начало)



5 Проверка прочности по касательным напряжениям производится согласно 5.12 СНиП II-23-81\*

6 Проверка прочности по приведенным напряжениям производится согласно 5.14\* СНиП II-23-81\*

7 Проверка общей устойчивости балок производится согласно 5.15 СНиП II-23-81\*. При выполнении требований 5.16\* СНиП II-23-81\* устойчивость балок не требуется проверять

8 Проверка жесткости балок производится согласно 13.1\* СНиП II-23-81\*. Рекомендуемое значение  $P_0$  составляет 250.

Рис. ПЗ.1. Алгоритм расчета стрингера (окончание)



Учебное издание

**НАДОЛЬСКИЙ** Виталий Валерьевич  
**РОГАЧ** Василий Викторович

## **ЗАТВОРЫ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

Пособие для студентов специальности  
1-70 04 01 «Водохозяйственное строительство»

Редактор *Т. В. Мейкишане, Е. С. Кочерго*  
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 11.10.2019. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 4,19. Уч.-изд. л. 3,27. Тираж 150. Заказ 1092.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.