

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Тольяттинский государственный университет
Центр архитектурных, конструктивных решений и организации
строительства

И.К. Родионов

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ
ВАРИАНТОВ КОМПОНОВКИ ЯЧЕЕК
БАЛОЧНЫХ КЛЕТОК**

Методические указания

Тольятти, 2019 г.

УДК 624.014.2:65.011.46
Р605

Р605. И.К. Родионов. Техничко-экономическое сравнение вариантов компоновки ячеек балочных клеток: Методические указания. Тольятти: ТГУ, 2019. 26 с.

Методические указания содержат методику определения рациональности компоновки ячеек балочных клеток. Предназначены для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство», профиля (направленности) «Промышленное и гражданское строительство» при изучении дисциплины «Металлические конструкции» и выполнении курсовой работы «Рабочая площадка промышленного здания».

Ил. 9. Табл. 1. Библиогр.: 5 назв.

Научные редакторы: доц., к.т.н. В.И. Шполтаков,
доц., к.п.н. Е.М. Третьякова

Рассмотрены на заседании кафедры «Городское строительство и хозяйство» 25 сентября 2013 г. и рекомендованы к использованию в учебном процессе.

Внесены изменения в декабре 2019 г.

© И.К.Родионов, 2019

© Тольяттинский государственный университет, 2019

Введение

Проектирование рабочей площадки при заданной сетке колонн начинается с выбора наиболее выгодной компоновки ячейки балочной клетки. Выбор производится с помощью технико-экономического сравнения нескольких возможных вариантов компоновочных решений. Для сравнения могут быть использованы следующие показатели:

- расход стали на 1 м^2 ячейки;
- стоимость стали, расходуемой на 1 м^2 ячейки (определяется в случае применения сталей разных марок);
- количество типоразмеров балок на ячейку;
- количество отправочных марок балок на ячейку.

Первые два показателя характеризуют экономичность сравниваемых вариантов с позиции расхода стали и определяются по результатам расчета их элементов (настила и балок). Два других характеризуют трудоемкость изготовления элементов ячеек и их монтажа.

При заданной нагрузке и известной сетке колонн изменения в компоновке ячейки приводят лишь к незначительным изменениям массы главных балок. Поэтому технико-экономические показатели при сравнении вариантов определяют без учета главных балок: учитывают только настил и балки заполнения ячейки (балки настила и вспомогательные).

В курсовой работе достаточно провести технико-экономическое сравнение двух вариантов компоновки ячейки балочной клетки: нормального и усложненного типов [1, 2]. В случае мало отличающихся между собой показателей расхода и стоимости рекомендуется принимать вариант с менее трудоемкими в изготовлении и монтаже конструкциями.

1. Компонировка ячейки балочной клетки

При компоновке ячейки балочной клетки определяется взаимное расположение балок и их шаг. Большие пролёты перекрывают главными балками (ГБ), меньшие – балками настила (БН) и вспомогательными (ВБ).

Шаг балок настила определяется в общем случае несущей способностью и жесткостью настила. Обычно при настиле в виде стального плоского листа шаг балок составляет $a = 0,6–1,6$ м [2, рис. 1–4]; при настиле из сборных железобетонных плит – $a = 2,0–3,5$ м.

Шаг вспомогательных балок обычно назначают в пределах $l_2 = 2,0–5,0$ м [2, рис. 3, 4].

Шаги балок настила в балочных клетках нормального типа и вспомогательных балок в балочных клетках усложненного типа должны быть кратны пролету главных балок. Шаг балок настила в усложненном типе балочной клетки кратен пролету вспомогательных балок.

Для уменьшения трудоемкости изготовления балочных клеток в качестве балок настила и вспомогательных балок наиболее целесообразно применять прокатные двутавры; главные балки, учитывая их пролёт, чаще всего составного сечения.

При проектировании главной балки в курсовой работе должен быть решен вопрос о наличии и месторасположении монтажного стыка (стыка укрупнительной сборки).

Монтажные стыки представляют собой сопряжения отдельных частей конструкций, отправок марок, назначенных по условиям транспортировки и возможностям грузоподъемного оборудования завода изготовителя и монтажной организации.

По условиям транспортировки вопрос разбивки конструкции на отправочные марки решается сравнением ее габаритов и веса с габаритами и весом, предельно допустимыми для принятого в качестве средств доставки транспорта.

Основную массу металлоконструкций перевозят с заводов на строительные площадки по железной дороге. Предельно допустимые длины и вес перевозимых железнодорожным транспортом конструкций регламентируются «Техническими условиями погрузки и крепления грузов» [5]. В частности, в соответствии с ними длина отдельного отправочного элемента не должна превышать 14200 мм и 13774 мм при перевозке на одной четырехосной платформе грузоподъемностью 62 т соответственно с металлическими и деревянными бортами.

Провозные габариты железнодорожного транспорта: предельная высота конструкции – 3900 мм, предельная ширина – 3250 мм, толщина подкладок – 150 мм.

При выборе типа платформ необходимо стремиться к тому, чтобы коэффициент использования железнодорожного транспорта, равный отношению веса перевозимого груза к грузоподъемности платформы, был по возможности ближе к единице.

Месторасположение монтажных стыков главных балок должно предусматривать членение их на отдельные, желательно одинаковые, отправочные элементы [2, рис. 5–8]. В разрезных балках стыки располагают обычно в середине пролета [2, рис. 1–4]; возможно также их симметричное относительно середины расположение.

Компоновку ячейки балочной клетки необходимо производить с учетом месторасположения монтажного стыка главной балки: балки настила в нормальном типе балочной клетки или вспомогательные балки в усложненном типе не должны попадать на сечение главной балки, где расположен ее монтажный стык.

Отсюда, в пределах ячеек, оси крайних балок настила (в балочной клетке нормального типа) или вспомогательных балок (в усложненном типе) могут совмещаться с разбивочными осями [2, рис. 1, 3], а могут быть смещены с осей на половину шага [2, рис. 2, 4].

В частности, если при делении величины пролета главной балки на шаги балок получается нечетное число, крайние балки в ячейке следует совмещать с осями. В случае четного числа необходимо смещать балки с осей на полшага.

Эти особенности существенно влияют на конструкцию сопряжения балок с колоннами.

2. Расчет элементов ячеек балочных клеток

Расчет производится в последовательности, соответствующей последовательности передачи нагрузки:

- в ячейках балочных клеток нормального типа сначала рассчитывается настил, а затем балки настила;
- в ячейках балочных клеток усложненного типа первоначально рассчитывается настил, затем балки настила и далее вспомогательные балки.

В результате расчета производится подбор толщин настила, сечений балок, удовлетворяющих требованиям эксплуатации. Затем определяются технико-экономические показатели, позволяющие про-

известить выбор рационального варианта компоновки ячейки: расход стали на 1 м^2 ячейки, количество типоразмеров и количество отправочных марок балок, заполняющих ячейку.

2.1. Расчет плоского стального настила

Простейшей конструкцией плоского стального настила является стальной лист толщиной $t = 6\text{--}14\text{ мм}$, приваренный к балкам (рис.1, а).

Приварка защемляет настил, создавая опорные моменты и снижая моменты в пролете; в запас прочности, жесткости защемление можно не учитывать и принимать при расчёте балочную однопролётную схему с шарнирно-неподвижными опорами (рис.1, б), считая, что в опорных сечениях в предельном состоянии могут образовываться шарниры пластичности.

При нагрузках, не превышающих 50 кН/м^2 , и предельном относительном прогибе не более $1/150$ прочность шарнирно-закрепленного стального настила всегда будет обеспечена и его надо рассчитывать только по жесткости.

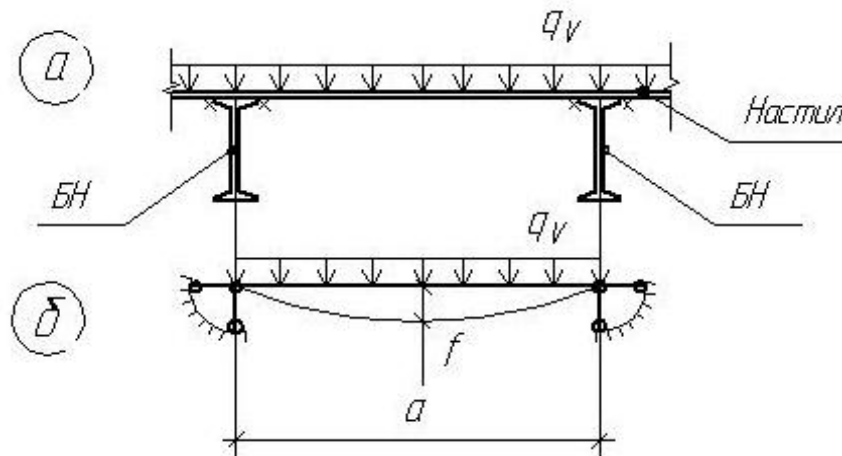


Рис. 1. Плоский стальной настил:
а) конструктивная схема;
б) расчетная схема.

Целью расчета является определение минимальной толщины настила при заданных величинах нормативной нагрузки q_v^n и пролета a . Толщина настила может быть определена аналитически с помощью уравнения Телояна [1] или по графикам Лейтеса (рис. 2).

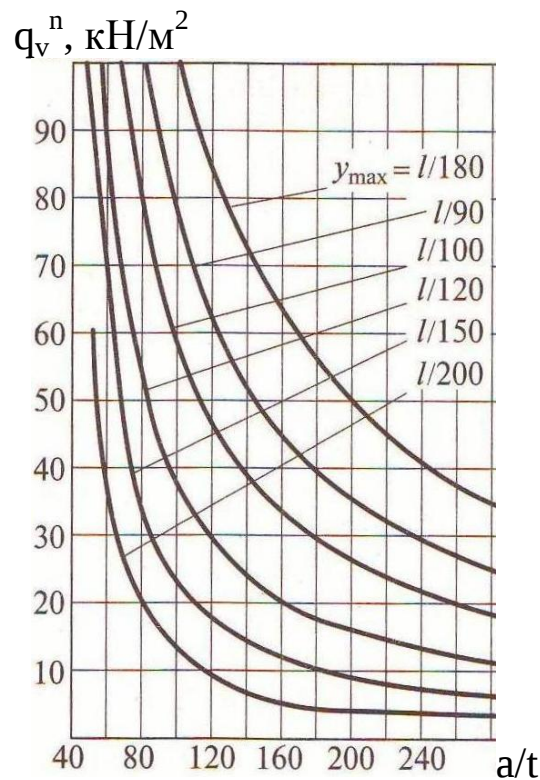


Рис. 2. Графики Лейтеса

Порядок расчета настила с помощью графиков: для заданной нагрузки q_v^n и предельного относительного прогиба $[f/a]$ определяется соответствующее отношение пролёта настила к его толщине ($a/t = n$), откуда определяется толщина настила ($t = a/n$); полученная величина округляется до стандартной в соответствии с ГОСТ 19903–74* (сокращенный сортамент представлен в [1, табл. П16.11]).

Для сравнения вариантов необходим показатель расхода стали на 1 м² настила. Он определяется умножением объемной плотности стали $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ на толщину настила t (м).

2.2. Расчет балок

Расчет балок производится следующим образом:

- определяются конструктивные и, соответствующие им, расчетные схемы;
- определяются нормативные и расчетные нагрузки;
- определяются максимальные расчетные значения усилий: изгибающих $M_{\max}$ и перерезывающих $Q_{\max}$;
- определяются требуемые значения моментов сопротивлений, как для разрезных балок 2-го класса [4, п. 4.2.7], из условия работы на изгиб по нормальным напряжениям (1-я группа предельных состояний – [4, п. 8.2.3]);

– подбираются по ГОСТ 8239–89 [1, табл. П16.3] двутавры с фактическими значениями моментов сопротивлений, бóльшими или равными требуемых значений ($W_x^f \geq W_x^{mp}$); в случае отсутствия требуемых двутавров в ГОСТ 8239–89 следует обратиться в ГОСТ 26020–83 [1, табл. П16.4] и по нему подбирать балочный профиль (тип Б);

– выявляется необходимость проведения проверки общей устойчивости балок – [4, п. 8.4.6];

– производится проверка подобранных двутавров на пригодность к нормальной эксплуатации, то есть по жесткости (2-я группа предельных состояний – [3, Д.1].

Проверка касательных напряжений в прокатных балках при отсутствии ослаблений опорных сечений обычно не требуется, вследствие относительно большой толщины стенок балок.

Для сравнения вариантов компоновок необходим показатель расхода стали на балки, отнесенный к 1 м^2 площади ячейки (кг/м^2). Этот показатель может быть определен делением линейной плотности (массы 1-го погонного метра) балки (кг/м) на ширину ее грузовой полосы (м).

3. Пример технико-экономического сравнения вариантов компоновки ячейки балочной клетки

Требуется запроектировать ячейку балочной клетки со следующими исходными данными:

1. Размеры ячейки в плане $16 \times 7 \text{ м}$.
2. Временная равномерно распределенная по настилу нормативная нагрузка $q_v^n = 24 \text{ кН/м}^2$.
3. Материал настила и балок – сталь класса С245.
4. Настил – плоский стальной лист (ГОСТ 19903–74*).
5. Балки настила и вспомогательные балки – прокатные двутавры.
6. Главные балки – составного сечения.
7. Средство перевозки конструкций на монтажную площадку – автотранспорт.
8. Монтажные стыки главных балок в середине пролета.

Обычно выбор рационального решения достигается технико-экономическим сравнением нескольких возможных вариантов ком-

поновки ячейки. В данном примере рассмотрим два варианта: нормального и усложненного типов.

Порядок конструирования и расчета каждого варианта:

- компоновка ячейки;
- расчет элементов ячейки;
- определение технико-экономических показателей.

3.1. Вариант 1: ячейка балочной клетки нормального типа

3.1.1. Компоновка ячейки

Главные балки располагаем в продольном направлении, перекрывая, таким образом, бóльший пролет $L = 16 \text{ м}$ (рис. 3). По условиям транспортабельности делим каждую балку на две равные отправочные марки – ГБ1, определяя, таким образом, положение монтажного стыка в середине пролета.

Принимаем шаг балок настила $a = 0,8 \text{ м}$, кратный пролету главной балки. Частное от деления $L/a = 20$ – четное число.

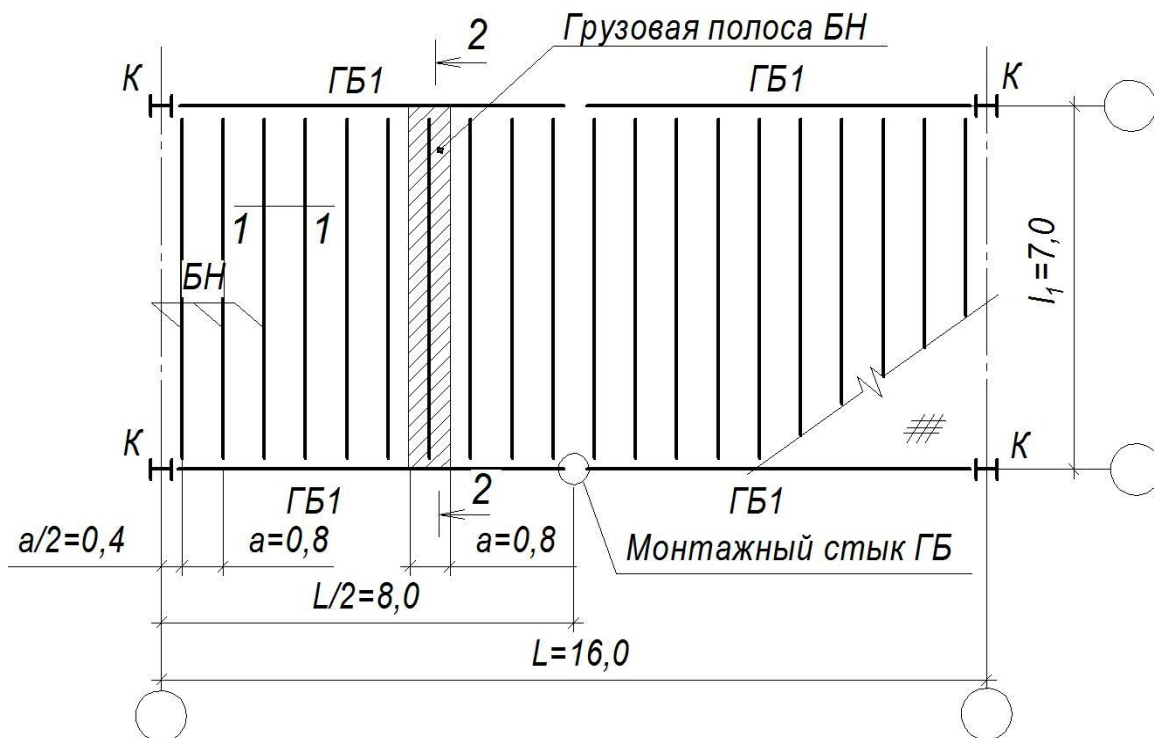


Рис. 3. Ячейка балочной клетки нормального типа

Отсюда, для того, чтобы балка настила не попала на монтажные стыки главных балок, принимаем вариант компоновки со смещением крайних балок настила в ячейке с поперечных разбивочных осей на

полшага (рис. 3). В случае нечетного числа от деления L/a крайние балки следовало бы совместить с поперечными осями ячейки.

3.1.2. Расчет настила

Конструктивная и расчетная схемы настила представлены на рис. 4. Пролет настила равен шагу балок $a = 0,8$ м.

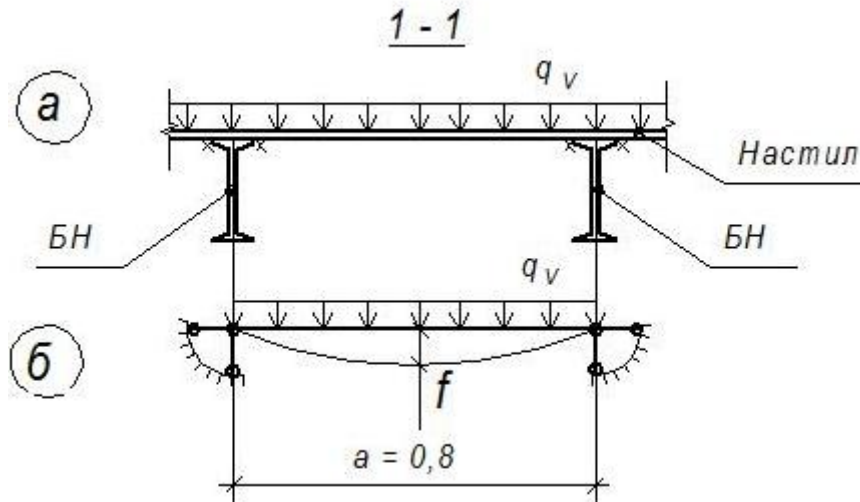


Рис. 4. К расчету настила:
а) конструктивная схема;
б) расчетная схема.

Величина временной нормативной нагрузки, действующей на настил ($q_v^n = 24 \text{ кН/м}^2$), находится в пределах 50 кН/м^2 . Прочность настила при данной нагрузке будет обеспечена [1], поэтому расчет производим только по жесткости.

Критерием жесткости для изгибаемых элементов является величина предельно допустимого относительного прогиба. Для стального настила $[f/a] = 1/120$: $a = 0,8 \text{ м} < 1,0 \text{ м}$ [3, табл. Д.1].

Расчет настила производим с помощью графиков Лейтеса (рис. 2). Для заданной нагрузки $q_v^n = 24 \text{ кН/м}^2$ и предельно допустимого относительного прогиба $[f/a] = 1/120$ определяем требуемое отношение пролета настила к его толщине $a/t = 140$; тогда минимальная толщина настила определяется, как:

$$t = a/140 = 80 \text{ см}/140 = 0,572 \text{ см}.$$

По ГОСТ 19903–74* принимаем толщину настила $t = 6 \text{ мм}$.

Настил передает на балки настила временную нагрузку и нагрузку от собственной массы. Нормативная величина нагрузки от

массы настила, распределенной на 1 м² площади g_H^n , может быть определена умножением объемной плотности стали на толщину листа:

$$g_H^n = \rho \cdot t = 78,5 \text{ кН} / \text{м}^3 \cdot 0,006 \text{ м} = 0,471 \text{ кН} / \text{м}^2.$$

3.1.3. Расчет балок настила

Конструктивная схема сопряжения балки настила с главными балками представлена на рис. 5, а. В запас прочности и жёсткости в качестве расчетной схемы принимаем однопролетную балку с шарнирными опорами (рис. 5, б).

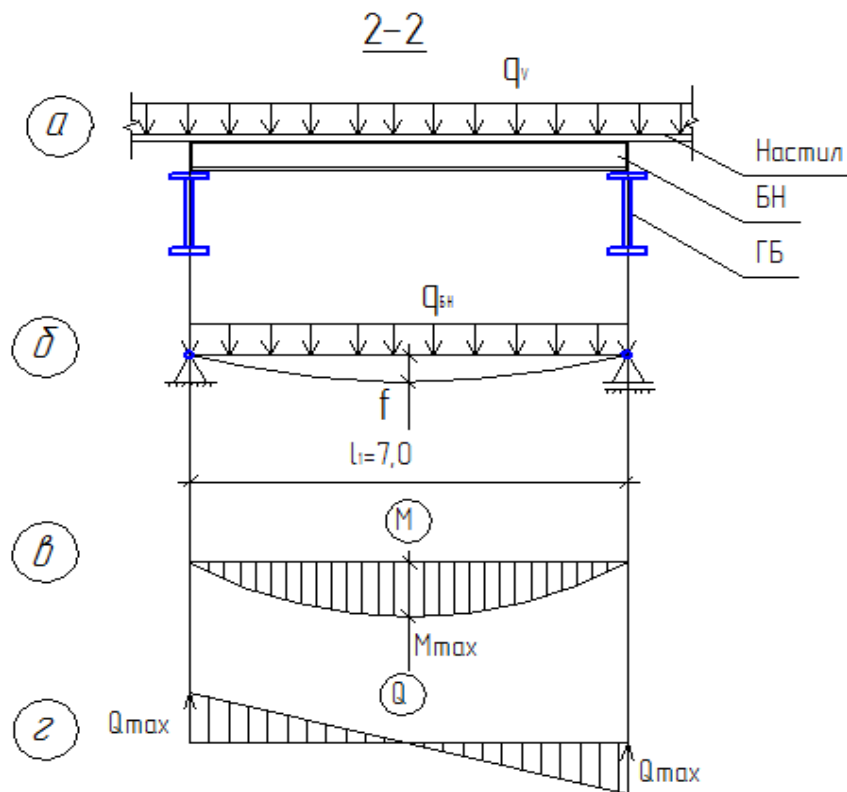


Рис. 5. К расчету балки настила
 а) конструктивная схема;
 б) расчетная схема;
 в) эпюра изгибающих моментов;
 г) эпюра перерезывающих усилий.

Каждая балка настила воспринимает нагрузку, действующую в пределах ее грузовой площади. Расчетная балка (рис. 3) воспринимает временную нагрузку и постоянную нагрузку от настила, действующую в пределах грузовой полосы шириной a .

Таким образом, нормативная нагрузка, действующая на балку настила, может быть определена как:

$$q_{\text{бн}}^n = (q_v^n + g_n^n) a = (24 \text{ кН} / \text{м}^2 + 0,471 \text{ кН} / \text{м}^2) \cdot 0,8 = \\ = 19,579 \text{ кН} / \text{м} = 0,196 \text{ кН} / \text{см}.$$

Расчетная нагрузка определяется с учетом коэффициентов надежности: по переменной нагрузке γ_v и постоянной нагрузки γ_g :

$$q_{\text{бн}} = (q_v^n \gamma_v + g_n^n \gamma_g) a.$$

Коэффициенты надежности по нагрузке приведены в [3, табл. 7.1]. Для стального листа $\gamma_g = 1,05$. Временная нагрузка в примере не конкретизирована, поэтому условно принимаем коэффициент ее надежности $\gamma_v = 1,2$.

Определяем величину расчетной погонной нагрузки, действующей на балку настила:

$$q_{\text{бн}} = (24 \text{ кН} / \text{м}^2 \cdot 1,2 + 0,471 \text{ кН} / \text{м}^2 \cdot 1,05) \cdot 0,8 = 23,44 \text{ кН} / \text{м}.$$

Величина максимального изгибающего момента, действующего в середине пролета рассматриваемой балки (рис. 5, в), определяется как:

$$M_{\text{max}} = \frac{q_{\text{бн}} \cdot l_1^2}{8} = \frac{23,44 \text{ кН} / \text{м} \cdot 7^2 \text{ м}^2}{8} = 143,57 \text{ кНм}.$$

Максимальное перерезывающее усилие действует на опорах:

$$Q_{\text{max}} = \frac{q_{\text{бн}} \cdot l_1}{2} = \frac{23,44 \text{ кН} / \text{м} \cdot 7 \text{ м}}{2} = 82,04 \text{ кН}.$$

Подбор сечения производим, как для балок 2-го класса, с учетом возможности развития пластических деформаций [4, п. 8.2.3]:

$$W_x^{\text{mp}} = \frac{M_{\text{max}}}{c_x \beta R_y \gamma_c},$$

где:

R_y – расчетное сопротивление стального проката на сжатие, растяжение и изгиб [4, табл. В.5]; в данном случае $R_y = 24 \text{ кН} / \text{см}^2$, как для фасонного проката при толщине от 4 до 20 мм (включ.);

β – коэффициент, принимаемый в зависимости от величины касательных напряжений; примем в первом приближении $\beta = 1$ для случая $\tau \leq 0,5 R_s$ с последующей проверкой после подбора сечения.

c_x – коэффициент учёта развития пластических деформаций, определяемый по [4, табл. Е.1] в зависимости от схемы сечения; в курсовой работе для двутавровых балок можно для упрощения с достаточной точностью принять $c_x=1,1$;

γ_c – коэффициент условий работы [4, табл. 1]; в рассматриваемом примере $\gamma_c = 1,0$.

С учетом конкретных значений R_y , c_x , γ_c определяем требуемый момент сопротивления:

$$W_x^{mp} = \frac{143,57 \cdot 100 \text{ кНсм}}{1,1 \cdot 24 \text{ кН / см}^2 \cdot 1} = 543,8 \text{ см}^3.$$

По ГОСТ 8239–89 принимаем двутавр $I33$, имеющий момент сопротивления $W_x = 597 \text{ см}^3 > 543,8 \text{ см}^3$, момент инерции $I_x = 9840 \text{ см}^4$, статический момент $S_x = 339 \text{ см}^3$, толщину стенки $s = 7 \text{ мм}$ и линейную плотность $g_{бн}^n = 42,2 \text{ кг / м}$.

Проверим корректность выбора коэффициента β . Для этого определим касательные напряжения:

$$\tau = \frac{Q_{max} \cdot S_x}{I_x \cdot s} = \frac{82,04 \text{ кН} \cdot 339 \text{ см}^3}{9840 \text{ см}^4 \cdot 0,7 \text{ см}} = 4,06 \text{ кН / см}^2,$$

что соответствует условию $\tau < 0,5 R_s$:

$$0,5 R_s = 0,5 \cdot 0,58 \cdot R_y = 0,5 \cdot 0,58 \cdot 24 = 6,96 \text{ кН / см}^2.$$

Таким образом, коэффициент $\beta = 1$ принят правильно.

Прочность принятой балки по нормальным напряжениям обеспечена, так как $W_x^\phi > W_x$.

Обеспечена и общая устойчивость балки: нагрузка на нее передается через стальной жесткий лист настила, непрерывно опирающийся на сжатый пояс балки и надежно к нему приваренный ([4, п. 8.4.4, б] с учётом особенностей, указанных в [4, п. 8.4.6]).

Проверяем жесткость балки. Для этого определяем относительный прогиб f / l_1 и сравниваем его с предельно допустимым значением. Предельно допустимое значение $[f / l_1]$ определяем по [3, табл. Д.1] в соответствии с п. 2, а.

Пролёт балки $l_1 = 7 \text{ м}$. В табл. Д.1 приводятся предельно допустимые относительные прогибы для пролёта 6 м – 1/200 и для пролёта 24 м – 1/250 (принято при высоте до низа главных балок более 6 м). Для пролёта 7 м определяем интерполяцией $[f / l_1] = 1/202$.

Производим проверку:

$$\frac{f}{l_1} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{\text{бн}}^n \cdot l_1^3}{EI_{\chi}^{\phi}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{0,196 \text{ кН} / \text{см} \cdot 700 \text{ см}^3}{2,1 \cdot 10^4 \text{ кН} / \text{см}^2 \cdot 9840 \text{ см}^4} = \frac{1}{236},$$

что меньше $\left[\frac{f}{l_1} \right] = \frac{1}{202}.$

Таким образом, можно сделать вывод, что балка отвечает предъявляемым к ней эксплуатационным требованиям.

3.1.4. Определение ТЭП

1. Расход стали на 1 м² ячейки.

В рассматриваемом случае расход стали определяем, как суммарную величину расхода на настил и на балки настила.

Расход настила на 1 м² ячейки определяем умножением объемной плотности стали ρ на толщину листа t :

$$\rho \cdot t = 7850 \text{ кг} / \text{м}^3 \cdot 0,006 \text{ м} = 47,1 \text{ кг} / \text{м}^2.$$

Расход стали на балки настила, отнесенный к 1 м² ячейки, определяем делением линейной плотности балок на ширину их грузовой полосы:

$$q_{\text{бн}}^n / a = 42,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}} / 0,8 \text{ м} = 52,75 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$$

Суммарный расход стали на квадратный метр ячейки определяем, как:

$$g_1^n = 47,1 + 52,75 = 99,85 \text{ кг} / \text{м}^2.$$

2. Количество отправочных марок балок в ячейке составляет 20 штук (20 шт. БН).

3. Количество типоразмеров балок в ячейке – 1 шт, то есть, балка I 33 конструктивной длиной 5980 мм (пролет в осях 6000 мм, по 10 мм привязка с двух сторон).

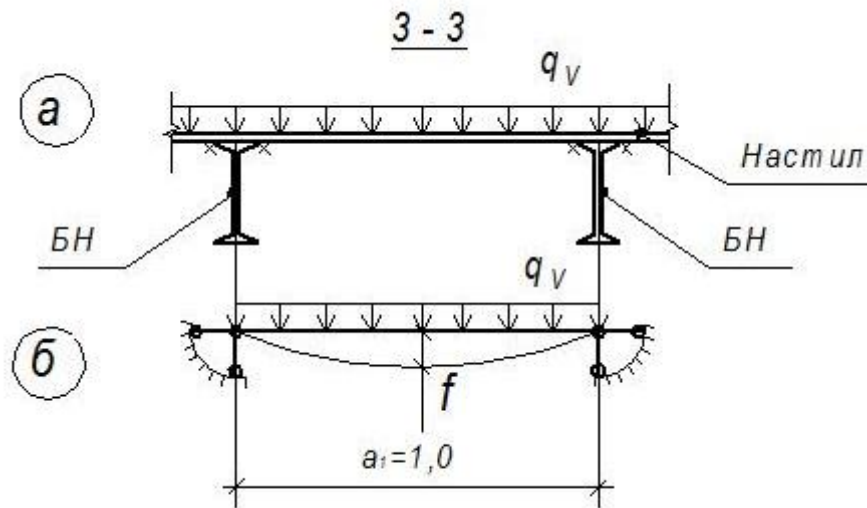


Рис. 7. К расчету настила:
 а) конструктивная схема;
 б) расчетная схема.

По графикам (рис. 2) для $q_v^n = 24 \text{ кН/м}^2$ и $[f/a] = 1/120$ определяем требуемую величину отношения пролета настила к толщине $a_1/t = 140$. С учетом $a_1 = 1,0 \text{ м}$ толщина настила $t = 100/140 = 0,71 \text{ см}$. По ГОСТ 19903–74* принимаем настил толщиной $t = 8 \text{ мм}$.

Нормативная величина нагрузки от массы настила будет равна:

$$g_H^n = \rho \cdot t = 78,5 \text{ кН/м}^3 \cdot 0,008 \text{ м} = 0,628 \text{ кН/м}^2$$

3.2.3. Расчет балок настила

Примем этажное сопряжение балок настила и вспомогательных (рис. 8, а). Расчетную схему вспомогательной балки в запас прочности и жесткости можно принять в виде однопролетной шарнирно опертой балки пролетом l_2 (рис. 8, б).

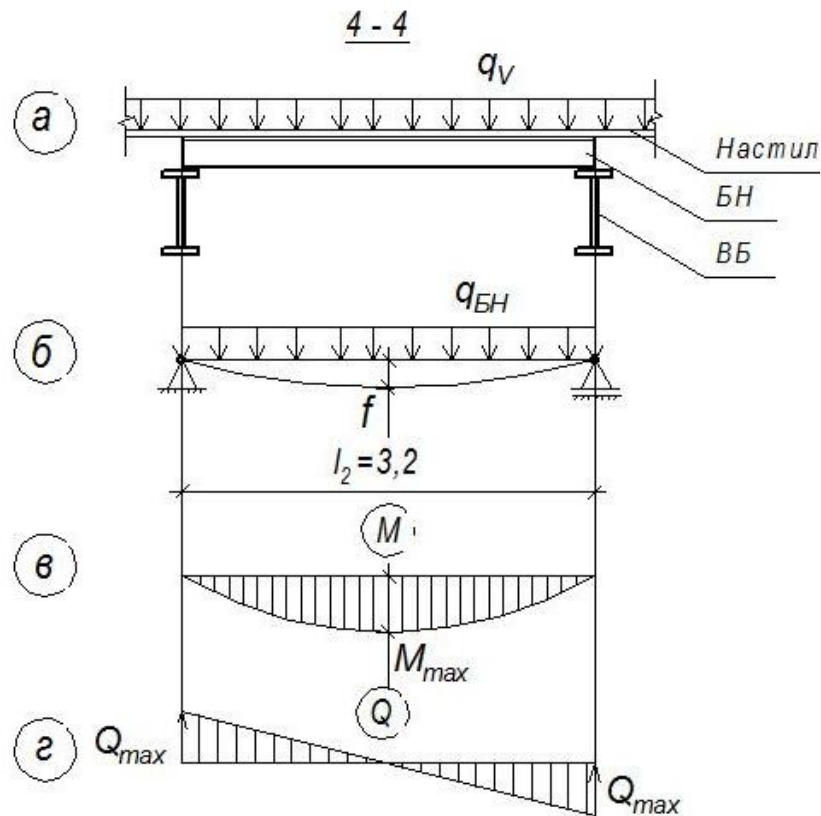


Рис. 8. К расчету балки настила:

- а) конструктивная схема;
- б) расчетная схема;
- в) эпюра изгибающих моментов;
- г) эпюра перерезывающих усилий.

Определяем нормативную $q_{\text{бн}}^n$ и расчетную $q_{\text{бн}}$ величину нагрузки, действующей на балку настила:

$$q_{\text{бн}}^n = (q_v^n + g_n^n) a_1 = (24 \text{ кН} / \text{м}^2 + 0,628 \text{ кН} / \text{м}^2) 1,0 \text{ м} = 24,628 \text{ кН} / \text{м} = 0,246 \text{ кН} / \text{см};$$

$$q_{\text{бн}} = (q_v^n \gamma_v + g_n^n \gamma_g) a_1 = (24 \text{ кН} / \text{м}^2 \cdot 1,2 + 0,628 \text{ кН} / \text{м}^2 \cdot 1,05) \cdot 1,0 \text{ м} = 29,46 \text{ кН} / \text{м}.$$

Вычисляем максимальные значение изгибающего момента и перерезывающего усилия:

$$M_{\text{max}} = \frac{q_{\text{бн}} \cdot l_2^2}{8} = \frac{29,46 \text{ кН} / \text{м} \cdot 3,2^2 \text{ м}^2}{8} = 37,71 \text{ кНм}.$$

$$Q_{max} = \frac{q_{\text{бн}} \cdot l_2}{2} = \frac{29,46 \text{ кН} / \text{м} \cdot 3,2 \text{ м}}{2} = 47,14 \text{ кН}.$$

Подбор сечения производим как для балок 2-го класса, с учетом возможности развития пластических деформаций [4, п. 8.2.3]:

$$W_x^{mp} = \frac{M_{max}}{c_x \beta R_y \gamma_c}.$$

Величины $c_x = 1,1$; $\beta = 1,0$; $R_y = 24 \text{ кН} / \text{см}^2$ принимаем аналогично вышеприведённому расчёту.

Отсюда:

$$W_x^{mp} = \frac{37,71 \cdot 100 \text{ кНсм}}{1,1 \cdot 1 \cdot 24 \text{ кН} / \text{см}^2 \cdot 1} = 142,84 \text{ см}^3.$$

По сортаменту (ГОСТ 8239-89) принимаем I18, имеющий $I_x = 1290 \text{ см}^4$, $W_x = 143 \text{ см}^3$, $S_x = 81,4 \text{ см}^3$, $s = 5,1 \text{ мм}$, линейную плотность $g_{\text{бн}}^n = 18,4 \text{ кг/м} = 0,184 \text{ кН/м}$.

Проверим корректность выбора коэффициента β . Для этого определяем касательные напряжения:

$$\tau = \frac{Q_{max} \cdot S_x}{I_x \cdot s} = \frac{47,14 \text{ кН} \cdot 81,4 \text{ см}^3}{1290 \text{ см}^4 \cdot 0,51 \text{ см}} = 5,83 \text{ кН} / \text{см}^2,$$

что соответствует условию $\tau < 0,5 R_s$:

$$0,5 R_s = 0,5 \cdot 0,58 R_y = 0,5 \cdot 0,58 \cdot 24 = 6,96 \text{ кН/см}^2.$$

Таким образом, коэффициент $\beta = 1$ принят правильно.

Так как $W_x^{\phi} > W_x^{mp}$, проверка прочности балки по нормальным напряжениям не требуется.

Не требуется и проверка общей устойчивости балки [4, п. 8.4.6].

Выполняем проверку жесткости балки настила. Предельно допустимое значение $[f / l_2]$ определяем по [3, табл. Д.1] в соответствии с п. 2, а.

Пролёт балки $l_2 = 3,2 \text{ м}$. В табл. Д.1 приводятся предельно допустимые относительные прогибы для пролёта 3 м – 1/150 и для пролёта 6 м – 1/200. Для пролёта 3,2 м определяем интерполяцией $[f / l_2] = 1/152$.

$$\frac{f}{l_2} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{\text{бн}}^n \cdot l_2^3}{EJ_x} = \frac{5}{384} \cdot \frac{0,246 \text{ кН} / \text{см} \cdot 320^3 \text{ см}^3}{2,1 \cdot 10^4 \text{ кН} / \text{см}^2 \cdot 1290 \text{ см}^4} = \frac{1}{258},$$

что меньше $[f/l_2] = 1/152$.

Таким образом, окончательно принимаем в качестве балки настила *I18* по ГОСТ 8239–89, как удовлетворяющий предъявляемым к нему эксплуатационным требованиям.

3.2.4. Расчет вспомогательных балок

В рассматриваемой балочной системе вспомогательные балки несут временную нагрузку и постоянные нагрузки от массы настила и балок настила. Опорами вспомогательных балок являются главные балки (рис. 9, а).

За расчетную схему вспомогательной балки принимаем однопролетную шарнирно опертую балку пролетом l_1 . Нагрузка к вспомогательной балке прикладывается в виде сосредоточенной в местах опирания балок настила (рис. 9, б).

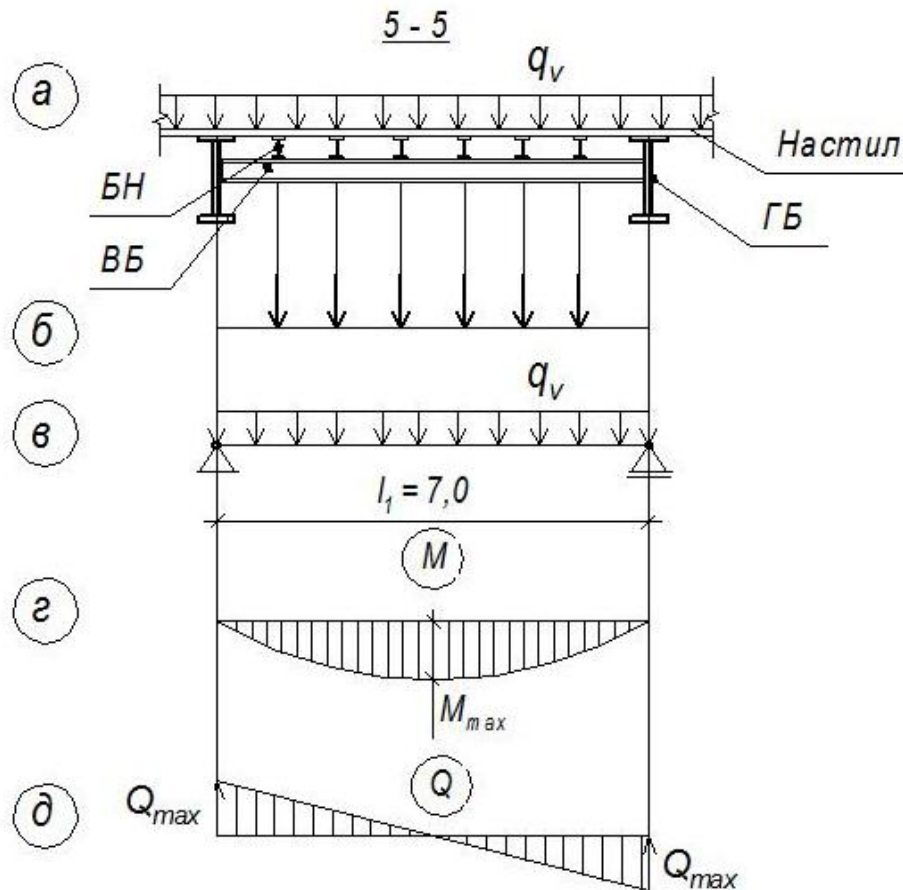


Рис. 9. К расчету вспомогательной балки:

- а) конструктивная схема;
- б) схема передачи нагрузки;
- в) расчетная схема;
- г) эпюра изгибающих моментов;
- д) эпюра перерезывающих усилий.

При количестве сосредоточенных сил, большем или равным пяти, в целях упрощения расчета с достаточной точностью может быть принята схема с загрузением балки равномерно распределенной нагрузкой. В данном примере именно такой случай: количество балок настила, приходящихся на вспомогательную балку, равно шести, поэтому расчет вспомогательной балки будем вести с учетом действия равномерно распределенной нагрузки.

Определяем нормативную величину этой нагрузки:

$$q_{\text{вб}}^n = (q_V^n + g_H^n + \frac{g_{\text{бн}}^n}{a_1}) l_2 = (24 \text{ кН} / \text{м}^2 + 0,628 \text{ кН} / \text{м}^2 + \frac{0,184 \text{ кН} / \text{м}}{1,0 \text{ м}}) \cdot 3,2 \text{ м} = 79,4 \text{ кН} / \text{м} = 0,794 \text{ кН} / \text{см}.$$

Вычисляем расчетную нагрузку, действующую на вспомогательную балку:

$$q_{\text{вб}} = \left[q_V^n \cdot \gamma_V + (g_H^n + \frac{g_{\text{бн}}^n}{a_1}) \cdot \gamma_g \right] \cdot l_2 = \\ = \left[24 \text{ кН} / \text{м}^2 \cdot 1,2 + (0,628 \text{ кН} / \text{м}^2 + \frac{0,184 \text{ кН} / \text{м}}{1,0 \text{ м}}) \cdot 1,05 \right] \cdot 3,2 \text{ м} = \\ 94,89 \text{ кН} / \text{м}.$$

Определяем максимальные значения изгибающего момента и перерезывающего усилия (рис. 9, в):

$$M_{\text{max}} = \frac{q_{\text{вб}} \cdot l_1^2}{8} = \frac{94,89 \text{ кН} / \text{м} \cdot 7^2 \text{ м}^2}{8} = 581,2 \text{ кНм};$$

$$Q_{\text{max}} = \frac{q_{\text{вб}} \cdot l_1}{2} = \frac{94,89 \text{ кН} / \text{м} \cdot 7 \text{ м}}{2} = 332,12 \text{ кН}.$$

Требуемое значение момента сопротивления сечения вспомогательной балки определяем, как для балок 2-го класса, с учетом ее работы в упруго-пластической стадии [4, п. 8.2.3] по формуле:

$$W_x^{\text{тп}} = \frac{M_{\text{max}}}{c_x \beta R_y \gamma_c}.$$

Величины $c_x = 1,1; \beta = 1,0; R_y = 24 \text{ кН} / \text{см}^2$ принимаем аналогично вышеприведённым расчётам.

Отсюда:

$$W_x^{mp} = \frac{M_{max}}{c_1 \cdot R_y \cdot \gamma_c} = \frac{581,2 \cdot 100}{1,1 \cdot 1 \cdot 24 \text{ кН} / \text{см}^2 \cdot 1,0} = 2202,52 \text{ см}^3.$$

По сортаменту прокатной стали (ГОСТ 8239–89) принимаем I60, имеющий $I_x = 76806 \text{ см}^4$, $W_x = 2560 \text{ см}^3$, $S_x = 1491 \text{ см}^3$, $s = 12 \text{ мм}$, и линейную плотность 108 кг/м .

Проверяем корректность выбора коэффициента β . Для этого определяем касательные напряжения:

$$\tau = \frac{Q_{max} \cdot S_x}{I_x \cdot s} = \frac{332,12 \text{ кН} \cdot 1491 \text{ см}^3}{76806 \text{ см}^4 \cdot 1,2 \text{ см}} = 5,37 \text{ кН} / \text{см}^2,$$

что соответствует условию $\tau < 0,5 R_s$:

$$0,5 R_s = 0,5 \cdot 0,58 R_y = 0,5 \cdot 0,58 \cdot 24 = 6,96 \text{ кН/см}^2.$$

Таким образом, коэффициент $\beta = 1$ принят правильно.

Прочность двутавра по нормальным напряжениям не проверяем: она обеспечена, так как $W_x > W_x^{mp}$.

В отличие от балки настила сжатый пояс вспомогательной балки не имеет сплошного закрепления от поперечных смещений. Он закреплен лишь в отдельных точках самими балками настила, образующими совместно с настилом жесткий диск. Поэтому вспомогательную балку необходимо проверить на предмет обеспеченности её общей устойчивости.

В соответствии с [4, п. 8.4.6] устойчивость балок 2-го класса следует считать обеспеченной при выполнении требований [4, п. 8.4.4, б] $\bar{\lambda}_{ub} \leq \bar{\lambda}_b$ (условная гибкость сжатого пояса не должна превышать её предельных значений) при условии умножения значений $\bar{\lambda}_{ub}$, определяемых по формулам таблицы 11 [4, п. 8.4.4, б], на коэффициент δ

$$\delta = 1 - 0,6(c_{1x} - 1) / (c_x - 1),$$

где c_{1x} - коэффициент, определяемый по большему значению из формул: $c_{1x} = M_x / W_x R_y \gamma_c$ или $c_{1x} = \beta c_x$ и изменяющийся в пределах $1 < c_{1x} \leq c_x$.

Здесь: M_x – изгибающий момент в сечении;

c_x – коэффициент, принимаемый согласно таблице Е.1 [4] в зависимости от схемы сечения и отношения A_f / A_w , (A_f и A_w – площади сечения пояса и стенки); в курсовой работе с достаточной точностью можно принимать $c_x = 1,1$.

Коэффициент β принимаем равным $\beta = 1$, учитывая $\tau_x \leq 0,5R_s$ (см. выше).

В нашем случае:

$$c_{1x} = M_x / W_x R_y \gamma_c = 58120 \text{ кНсм} / 2560 \text{ см}^3 \cdot 24 \text{ кН} / \text{см}^2 \cdot 1 = 0,95;$$

$$c_{1x} = \beta c_x = 1 \cdot 1,1 = 1,1.$$

Принимаем $c_{1x} = 1,1$, как бóльшую из двух величин. Определяем коэффициент δ :

$$\delta = 1 - 0,6(1,1 - 1) / (1,1 - 1) = 9,4.$$

Если нагрузка приложена к верхнему поясу, то предельное отношение $\bar{\lambda}_{ub}$ для упругой работы определяем по формуле:

$$\bar{\lambda}_{ub} = 0,35 + 0,032 \frac{b}{t} + \left(0,76 - 0,02 \frac{b}{t} \right) \cdot \frac{b}{h},$$

где: b и t – соответственно ширина и толщина сжатого пояса балки; h – расстояние между осями поясных листов.

Условная гибкость сжатого пояса прокатной или сварной балки $\bar{\lambda}_b = (l_{ef} / b) \sqrt{R_y / \sigma}$.

За расчетную длину балки l_{ef} следует принимать расстояние между точками закрепления сжатого пояса от поперечных смещений. В данном примере расчетная длина равна шагу балок настила, то есть $l_{ef} = a = 1,0 \text{ м}$.

В соответствии с ГОСТ 8239 – 89 I 60 имеет $b = 19 \text{ см}$, $t = 1,78 \text{ см}$. Таким образом, $h = 60 - 1,78 = 58,22 \text{ см}$.

Производим проверку устойчивости вспомогательной балки.

Условная гибкость сжатого пояса прокатной или сварной балки $\bar{\lambda}_b = (l_{ef} / b) \sqrt{R_y / \sigma}$.

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W_x} = \frac{581,2 \cdot 100}{2560} = 22,7 \text{ кН} / \text{см}^2.$$

$$\bar{\lambda}_b = (100 / 19) \sqrt{24 / 22,7} = 5,41$$

Вычисляем предельную условную гибкость, как для балок 1-го класса (упругая работа):

$$\bar{\lambda}_{ub} = 0,35 + 0,032 \frac{19}{1,78} + \left(0,76 - 0,02 \frac{19}{1,78} \right) \cdot \frac{19}{58,22} = 0,87.$$

С учётом упруго-пластической работы предельная условная гибкость будет равна $\bar{\lambda}_{ub} \cdot \delta = 0,87 \cdot 9,4 = 8,178$.

Условная гибкость сжатого пояса меньше предельной условной гибкости: $5,41 < 8,178$. Таким образом, общая устойчивость вспомогательной балки обеспечена.

Проверяем жесткость балки:

$$\frac{f}{l_2} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{\text{бл}}^n \cdot l_1^3}{EJ_x} = \frac{5}{384} \cdot \frac{0,794 \text{ кН / см} \cdot 700^3 \text{ см}^3}{2,1 \cdot 10^4 \text{ кН / см}^2 \cdot 76806 \text{ см}^4} = \frac{1}{455},$$

что меньше предельно допускаемой величины относительного прогиба для вспомогательной балки $[f / l_1] = 1 / 202$, то есть, жесткость балки тоже обеспечена.

Таким образом, принятый для вспомогательной балки двутавр отвечает предъявляемым к нему требованиям прочности, общей устойчивости и жесткости, то есть, удовлетворяет требованиям и 1-й, и 2-й групп предельных состояний.

3.2.5. Определение ТЭП

Расход стали в кг на 1 м^2 настила:

$$\rho \cdot t = 7850 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,008 \text{ м} = 62,8 \text{ кг/м}^2.$$

Расход стали в кг на балки настила, отнесенный к 1 м^2 ячейки:

$$\frac{g_{\text{бл}}^n}{a_1} = \frac{18,4 \text{ кг / м}}{1,0 \text{ м}} = 18,4 \text{ кг / м}^2.$$

Расход стали в кг на вспомогательные балки, отнесенный к 1 м^2 ячейки:

$$\frac{g_{\text{бл}}^n}{l_2} = \frac{108 \text{ кг / м}}{3,2 \text{ м}} = 33,75 \text{ кг / м}^2.$$

Расход стали на 1 м^2 балочной ячейки усложненного типа:

$$g_2^n = 62,8 + 18,4 + 33,75 = 114,95 \text{ кг / м}^2.$$

Количество отправочных марок балок в ячейке составляет 36 штук, т.е. 30 штук БН и 6 штук ВБ.

Количество типоразмеров балок в ячейке – 2 шт., то есть 1 шт. БН и 1 шт. ВБ.

3.3. Сравнение вариантов

Для удобства сравнения технико-экономические показатели обоих вариантов сведены в таблицу.

Таблица сравнения вариантов

Таблица 1

№ п.п.	ТЭП	Размерность	Вариант 1	Вариант 2
1	Расход стали на 1 м ² ячейки	кг/м ²	99,85	114,95
2	Количество отправочных марок балок в ячейке	шт.	20	36
3	Количество типоразмеров балок в ячейке	шт.	1	2

Как видно из таблицы, первый вариант экономичней во всех отношениях: и по затратам металла, и по трудоемкости.

Проводить сравнение по стоимости стали, затраченной на 1 м² ячеек, в данном случае нецелесообразно, так как в обоих вариантах принят один и тот же класс стали.

Библиографический список

1. Металлические конструкции: учебник для студ. высш. учеб. заведений / [Ю.И. Кудишин, Е.И. Беленя, В.С. Игнатьева и др.] ; под ред. Ю.И. Кудишина. 10 изд., стер. – Издательский центр «Академия», 2007. – 688 с.
2. Родионов, И.К. Конструктивные решения элементов и узлов рабочих площадок промышленных зданий : электронное учебно-методическое пособие / И.К. Родионов ; под ред. В.М. Дидковского. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. – 1 оптический диск.
3. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*./ М.: ГУП ЦПП, 2016. – 79 с.
4. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. / М.: ГУП ЦПП, 2017. – 171 с.
5. Технические условия погрузки и крепления грузов. – М. Транспорт, 1990.

Оглавление

Введение	3
1. Компоновка ячейки балочной клетки	4
2. Расчет элементов ячеек балочных клеток	5
2.1. Расчет плоского стального настила	6
2.2. Расчет балок.....	7
3. Пример технико-экономического сравнения вариантов компоновки ячейки балочной клетки	8
3.1. Вариант 1: ячейка балочной клетки нормального типа	9
3.1.1. Компоновка ячейки.....	9
3.1.2. Расчет настила	10
3.1.3. Расчет балок настила	11
3.1.4. Определение ТЭП.....	14
3.2. Вариант 2: ячейка балочной клетки усложненного типа	15
3.2.1. Компоновка ячейки.....	15
3.2.3. Расчет балок настила	16
3.2.4. Расчет вспомогательных балок	19
3.2.5. Определение ТЭП.....	23
3.3. Сравнение вариантов	24
Библиографический список.....	25