

ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ
THEORY OF ELASTICITYDOI 10.22363/1815-5235-2021-17-2-175-187
УДК 624.014.2

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Области рациональной работы стальных прокатных балок,
закрепленных от потери устойчивости

А.В. Голиков*, Д.В. Веремеев

Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, д. 1
*alexandr_golikov@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 27 января 2021 г.
Доработана: 24 марта 2021 г.
Принята к публикации: 5 апреля 2021 г.

Аннотация. *Актуальность.* Балочные клетки наиболее распространенный тип перекрытий рабочих площадок зданий и сооружений. По результатам критического анализа существующих методов расчета и компоновки размеров балочных клеток установлено отсутствие четких рекомендаций по рациональной области выбора размеров балочных клеток в зависимости от поверхностной нагрузки. *Цель исследования* – представить области рациональной работы стальных прокатных балок, закрепленных от потери устойчивости, исходя из требований расчета по методу предельных состояний. *Методы.* Поставленные в работе задачи, направленные на достижения цели исследования, решены аналитическими методами, опираясь на основные закономерности строительной механики и существующие знания о действительной работе стальных прокатных балок под нагрузкой. Для построения основных зависимостей, представленных на номограммах, применены методы математической статистики. *Результаты.* Определены области рациональной работы стальных прокатных балок, закрепленных от потери устойчивости. Область рациональной работы балок представлена в виде номограмм, позволяющих на стадии проектирования применить ячейку балочной клетки максимальных размеров. В качестве критерия рационализации выбран критерий одновременного удовлетворения принятого сечения балки требованиям двух групп предельных состояний с минимальными запасами. Предложен уточненный алгоритм компоновки балочных клеток и уточненная методика расчета сечения прокатных балок, позволяющие компоновать размеры балочной клетки с минимальным расходом стали. Обосновано увеличение габаритных размеров ячеек рабочих площадок.

Для цитирования

Голиков А.В., Веремеев Д.В. Области рациональной работы стальных прокатных балок, закрепленных от потери устойчивости // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 2. С. 175–187. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-2-175-187>

Ключевые слова: стальные прокатные балки, методика расчета, рационализация, сортамент прокатных профилей, предельное состояние, несущая способность, жесткость

Голиков Александр Владимирович, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Институт архитектуры и строительства, кандидат технических наук; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6588-6031>, eLIBRARY SPIN-код: 1369-7819.

Веремеев Дмитрий Валерьевич, студент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Институт архитектуры и строительства; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8121-0338>, eLIBRARY SPIN-код: 9903-4909.

© Голиков А.В., Веремеев Д.В., 2021

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Areas of rational operation of steel rolling beams secured against curvatures

Aleksandr V. Golikov*, Dmitry V. Veremeev

Volgograd State Technical University, 1 Akademicheskaya St, Volgograd, 400074, Russian Federation

*alexandr_golikov@mail.ru

Article history

Received: January 27, 2021

Revised: March 24, 2021

Accepted: April 5, 2021

Abstract. *Relevance.* Beam cages are the most common type of floor covering for working areas of buildings and structures. Based on the results of a critical analysis of the existing methods for calculating and arranging the dimensions of beam cells, it was established that there are no clear recommendations on the rational range of selection of the sizes of beam cells depending on the surface load. *The purpose of the study* is to present the areas of rational operation of steel rolling beams, secured against buckling, based on the requirements of the calculation by the method of limit states. *Methods.* The tasks set in the work, aimed at achieving the research goal, are solved by analytical methods, relying on the basic laws of structural mechanics and existing knowledge about the actual operation of steel rolling beams under load. Methods of mathematical statistics were used to construct the main dependencies presented on the nomograms. *Results.* Areas of rational operation of steel rolling beams, secured against curvatures, are determined. The area of rational operation of beams is presented in the form of nomograms, which allow at the design stage to use a beam cell of maximum dimensions. As a criterion for rationalization, the criterion of the simultaneous satisfaction of the accepted section of the beam with the requirements of two groups of limiting states with minimum reserves was chosen. A refined algorithm for the layout of the beam cages and a refined method for calculating the cross-section of rolled beams are proposed, which make it possible to arrange the dimensions of the beam cage with a minimum steel consumption. The increase in the overall dimensions of the cells of the working platforms is substantiated.

Keywords: steel rolled beams, calculation methodology, rationalization, range of rolled profiles, limit state design, bearing capacity, stiffness

For citation

Golikov A.V., Veremeev D.V. Areas of rational operation of steel rolling beams secured against curvatures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(2):175–187. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-2-175-187>

Введение

Балка – самый простой и наиболее распространенный конструктивный элемент зданий и сооружений.

А.В. Перельмутером подчеркнута, что двутавровое сечение стало символом строительной отрасли [1]. Оптимизация двутавровых балок различной конфигурации и распространенных типов продолжается в работах современных ученых.

В статье О.С. Горячевского [2] выполнена оптимизация геометрических параметров развитых двутавров с перфорированной стенкой с целью повышения их несущей способности. Оптимизации составных балок посвящена работа [3].

Отдельными учеными исследуется работа балок при различных нетиповых схемах устройства перекрытий. В работе Н.Н. Демидова [4] исследована работа системы перекрестных стальных балок, расположенных в двух ортогональных направлениях.

Обоснование необходимости применения широкополочных двутавров в строительстве для устройства перекрытий с малой строительной высотой выполнено разработчиками ГОСТ Р 57837–2017 «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия» в статье [5].

Обоснование экономической эффективности применения прокатных профилей в стальных малоэтажных зданиях выполнено А.Р. Тусниным [6].

Aleksandr V. Golikov, Associate Professor of the Department of Building Structures, Foundations and Reliability of Structures, Institute of Architecture and Construction, Candidate of Technical Sciences; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6588-6031>, eLIBRARY SPIN-code: 1369-7819.

Dmitry V. Veremeev, student of the Department of Building Structures, Foundations and Reliability of Structures, Institute of Architecture and Construction; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8121-0338>, eLIBRARY SPIN-code: 1369-7819.

Альтернативной является работа Т.Х. Гебре [7], в которой предложены номограммы применимости различных прокатных профилей. Отметим, что, согласно представленным в ней данным, невозможно установить область рационального применения балок.

Применимость балок, выполненных по зарубежным стандартам, приведена в соответствующих руководствах по расчету и проектированию [8–15].

Исследованию работы стальных балок различных конструктивных решений посвящено значительное число трудов корифеев в области стального строительства.

Анализируя работу балок под нагрузкой, отдельно следует выделить работы Н.С. Стрелецкого [16], который внес огромный вклад в развитие расчета по предельным состояниям, определив дальнейшее развитие отрасли стального строительства. Однако основное внимание при подборе балки в его книгах уделяется проверке по прочности и только в дальнейших расчетах производится проверка по жесткости. Подобную методику расчета можно увидеть в работах преобладающего числа авторов в области отечественного стального строительства.

Если говорить об устоявшейся практике отечественной школы стального строительства, основные критерии оценки экономичности прокатных профилей приведены в первом томе справочника проектировщика, разработанного коллективом авторов ЦНИИпроектстальконструкция имени Н.П. Мельникова под редакцией В.В. Кузнецова [17].

Проведен анализ научно-технической литературы и актуальных на момент написания данной публикации нормативных документов различных стран мира, в которых используется или частично внедрен в методики расчет по предельным состояниям; области рационального применения стальных балок в удобном для применения инженером виде представлены в первой части Руководства по подбору сечений элементов строительных стальных конструкций [18]. Следует отметить, что сортамент ГОСТ 26020 «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок» (стандарт не действует на территории Российской Федерации) выведен из применения, таблицы выбора сечений для актуальных сортаментов в справочной литературе не представлены. На текущий момент, по нашему мнению, более удобным способом выбора сечения профилей является организованный не по нормативным и расчетным усилиям, а по нормативному и расчетному значению обобщенной нагрузки.

Подобный подход в методике расчета можно увидеть и у авторов из США. Например, в книгах А. Уильямса [9] и У.Т. Сеги [8]. Указанные монографии являются пособиями для американских инженеров. В них также описывается подбор сечения в первую очередь по первому предельному состоянию и только в последующем рекомендуется выполнять проверку по требованиям второго предельного состояния.

Данный подход наблюдается и в европейских документах и работах отдельных авторов, например Н. Субраманиана [10] и Р. Киндманна, М. Крауса [11].

Применение того или иного типа балок определяется условиями эксплуатации и характером действующих нагрузок.

Конструкция существующих в практике строительства балок, как правило, оптимизирована либо по критерию обеспечения несущей способности стенки, либо по критерию обеспечения несущей способности полок.

В задании на проектирование стальныхэтажерок исходными данными являются габаритные размеры типовой ячейки балочной клетки, которые устанавливаются технологом или архитектором (рис. 1), условия (среда) эксплуатации и поверхностная нагрузка от размещаемого оборудования или складированных материалов.

Балки настила и второстепенные балки в подавляющем большинстве случаев применяются прокатными, с сечением швеллерного (по ГОСТ 8240–97 «Швеллеры стальные горячекатаные») или двутаврового (по ГОСТ Р 57837–2017 «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия») типа.

Следует отметить, что общие рекомендации по компоновке балочных клеток изначально изложены в учебнике «Стальные конструкции» под общей редакцией Н.С. Стрелецкого в п. 2 «Основные размеры балочной клетки», в пп. «Расстояние между балками». В нем также указывалось, что «мы подбираем рациональное сечение продольной балки высотой, не меньшей минимальной высоты по жесткости, и определяем то расстояние между балками, при котором это сечение будет полностью использовано».

К сожалению, приведенная в многочисленных рекомендациях, методических указаниях по проектированию балочных конструкций для студентов и инженеров составленная методика расчета прокатных балок практически не реализовала общие рекомендации классиков в области стального строительства.

Существующая методика расчета сечения прокатных балок, отраженная в работах таких ученых в области стального строительства, как Е.И. Беленя, К.К. Муханов, включает в себя следующие этапы:

- анализ исходных данных, назначение материалов конструкций и соединений;
- расчет шага балок настила в зависимости от примененного типа и материала настила;
- подбор сечения балки исходя из обеспечения требований первой группы предельных состояний;
- проверка принятого сечения по требованиям первой группы предельных состояний (I ГПС);
- проверка соответствия принятого сечения требованиям второй группы предельных состояний (II ГПС).

Недостатками устоявшегося подхода являются:

1) наличие в практике расчетов существенной разницы между запасами несущей способности и запасами жесткости балок;

2) уход от регулирования сечения и пролета балки в зависимости от погонной нагрузки (в частности, при назначении шага второстепенных балок в усложненном типе балочных клеток); отсутствие четкой информации об области рациональных параметров работы балок с наиболее распространенными типами сечений.

Работы по совершенствованию методов расчета и конструктивной формы стальных балок непрерывно продолжаются в исследованиях современных ученых [19–30].

Вопросам оценки сходимости результатов численных и аналитических расчетов балок посвящены труды А.С. Крылова [31] и коллектива зарубежных авторов [32].

Работа стальных изгибаемых стержневых элементов под действием статических нагрузок рассмотрена в [33–40].

Цель данной работы состоит в представлении области рациональной работы стальных прокатных балок, закрепленных от потери устойчивости, исходя из требований расчета по методу предельных состояний.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

– предложен уточненный алгоритм компоновки балочной клетки и уточненная методика расчета сечения прокатных балок;

– создан аналитический расчетный блок, позволяющий выполнять расчет значительных массивов данных сортаментов стального проката;

– определены области рациональной работы прокатных балок наиболее распространенных типов сечений по определяющим критериям рационализации;

– даны рекомендации по внедрению в практику строительства.

Объектом исследования являются стальные прокатные балки с сечением из швеллера и двутавра, закрепленные от потери устойчивости.

Предметом исследования являются изменение напряженно-деформированного состояния стальных балок прокатного сечения, закрепленных от потери устойчивости, а также область их рациональной работы.

Материалы и методы

Поставленные в работе задачи, направленные на достижения цели исследования, решены аналитическими методами, опираясь на основные закономерности строительной механики и существующие знания о действительной работе стальных прокатных балок под нагрузкой. Для построения основных зависимостей, представленных на номограммах, применены методы математической статистики.

Использование устоявшегося подхода в расчете балок настила и второстепенных балок, выполненных с применением прокатных профилей, приводит к нерациональному расходованию стали и занижению рациональных габаритных размеров, способных перекрывать стальными балочными клетками.

Предлагаемая усовершенствованная методика расчета представлена на рис. 2. В соответствии с предложенным алгоритмом, окончательным принимается большее из сечений, подобранное по требованиям расчетных критериев первого и второго предельных состояний.

Исходной информацией для разработки областей применимости актуальных прокатных профилей в качестве балок рабочих площадок являются номограммы выбора сечений.

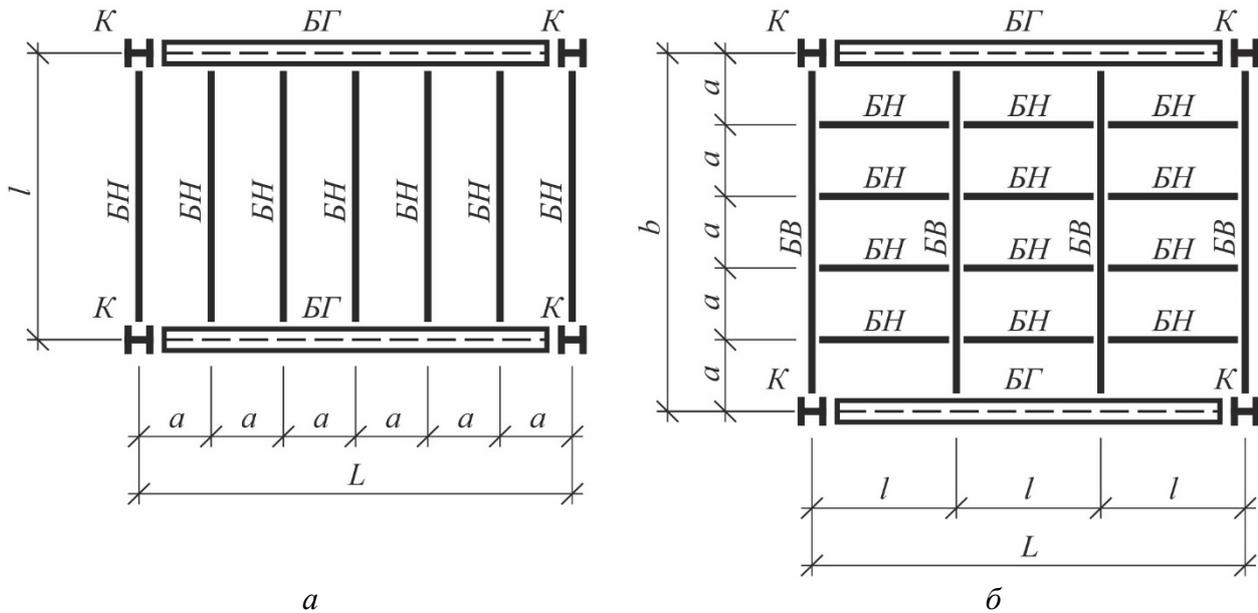


Рис. 1. Типовые ячейки балочных клеток нормального типа (а) и усложненного типа (б):
 БН – балки настила; БВ – второстепенные балки; БГ – главные балки; К – колонны;
 а – шаг балок настила; l – пролет балок настила; b – пролет второстепенных балок; L – пролет главных балок
Figure 1. Typical cells of bar cells of normal type (a) and complicated type (b):
 БН – floor beams; БВ – secondary beams; БГ – main beams; К – columns;
 а – the pitch of the flooring beams; l – span of deck beams; b – span of secondary beams; L – span of main beams

Результаты: оценка области рациональной работы прокатных балок

Опираясь на предложенный алгоритм разработан расчетный блок и выполнена серия аналитических расчетов, результатом которых стали области рациональной работы балок, выполненных сечением по актуальным на момент написания статьи сортаментам – швеллер по ГОСТ 8240–97 «Швеллеры стальные горячекатаные» и двутавры нормальные и широкополочные по ГОСТ Р 57837–2017 «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия». Графики выбора сечений балок представлены на рис. 3–5.

На рис. 3 представлены сведения о распределении области выбора сечения балок сечением из прокатных швеллеров по ГОСТ 8240–97. Рациональной областью работы балок является область, находящаяся между двумя линиями.

На примере 1 показан порядок выбора рациональных размеров балки.

Пример 1. На основании представленных исходных данных и по результатам выбора шага балок установлено, что нормативное значение нагрузки на балку составляет $q_n = 12,5$ кН/м, а расчетное – $q = 15,0$ кН/м.

По данным номограммы рис. 3:

- по критерию требований первой ГПС рекомендовано сечение из швеллера № 33П, рекомендуемый пролет балки составляет 7,5 м;
- по критерию требований второй ГПС рекомендовано сечение из швеллера № 30П, рекомендуемый пролет балки составляет 6,8 м;
- пролет балки – принимаем среднее значение, равное 7,15 м, сечение – принимаем наибольшее из рекомендуемых – швеллер № 33П.

Примечательно, что для исходной погонной нагрузки пролеты балки, не выбранные, а назначенные значениями, выходящими за пределы рациональной области работы балок данного типа сечений, дают сечения с существенным запасом по одному из критериев выбора.

Подобные номограммы разработаны для нормальных (рис. 4) и широкополочных (рис. 5) двутавров, выполненных по ГОСТ Р 57837–2017.

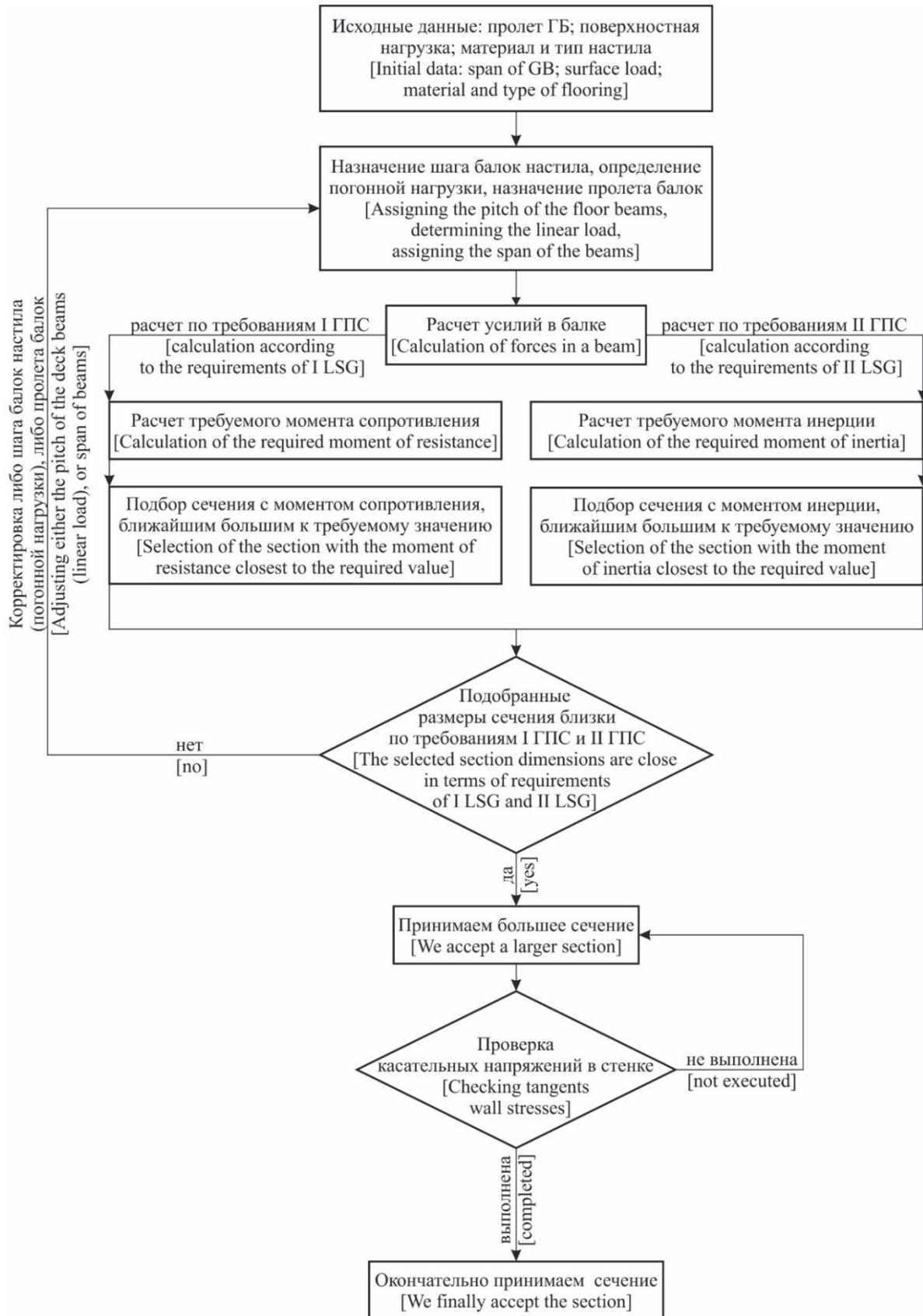


Рис. 2. Усовершенствованная методика расчета прокатных балок:
ГБ – главная балка; *ГПС* – группа предельных состояний
Figure 2. Improved calculation method for rolled beams:
GB – main beams; *LSG* – limit state group

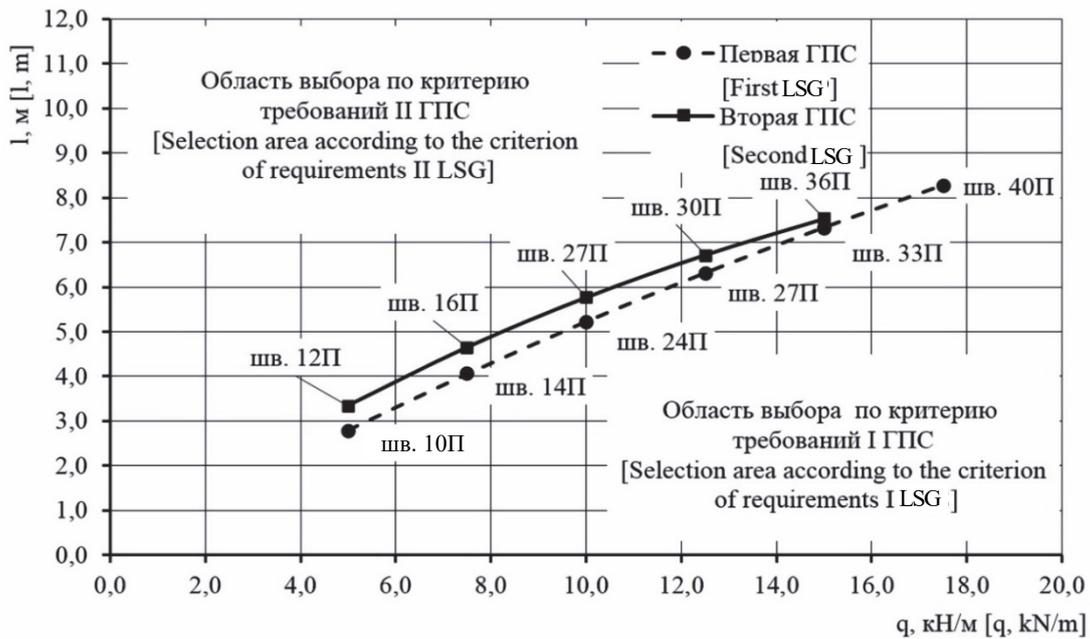


Рис. 3. Области работы и выбора балок с сечениями из швеллера по ГОСТ 8240–97
Figure 3. Areas of work and selection of beams with sections from a channel according to GOST 8240–97 (LSG – limit state group)

Предлагаемый подход в выборе габаритных размеров ячеек балочных клеток применим в практике строительства, так как значительное число балочных клеток применяется с постоянным шагом балок настила и эксплуатируется при равномерно распределенных поверхностных нагрузках.

Погонная нагрузка, приведенная в номограммах, учитывает вес настила и равномерно распределенную поверхностную технологическую нагрузку на рабочую площадку.

Применение рациональных сечений балок достигается подбором близких требуемых сечений по требованиям обеих групп предельных состояний посредством регулирования входных данных при проектировании – варьированием шириной балочной клетки и шагом балок настила.

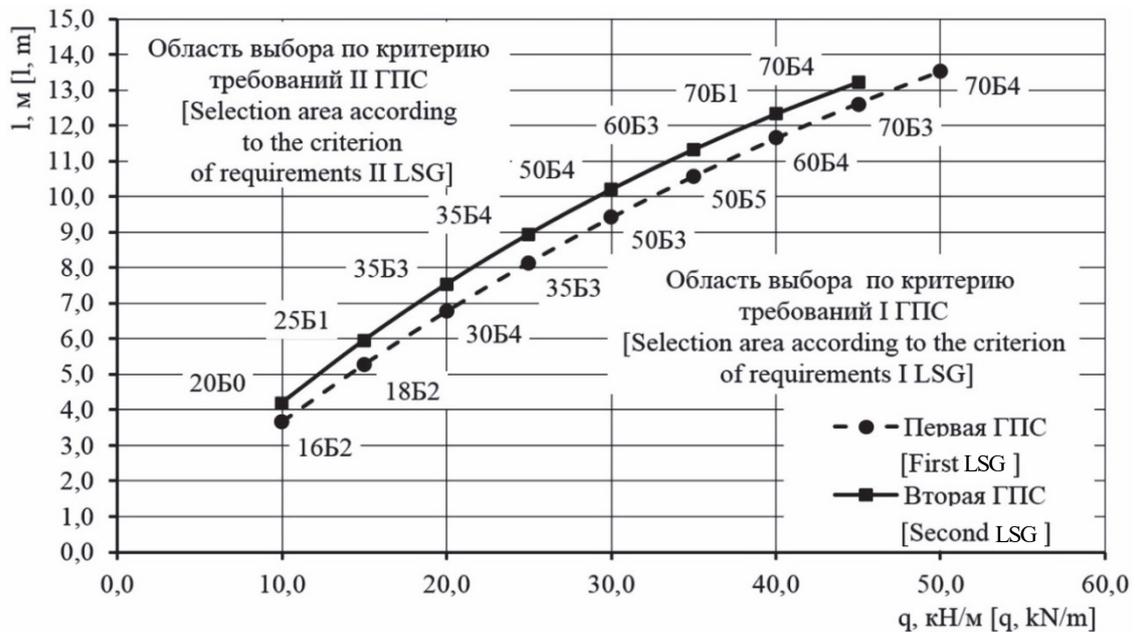


Рис. 4. Область работы и выбора балок с сечениями из нормального двутавра по ГОСТ Р 57837–2017
Figure 4. Scope of work and selection of beams with sections from a normal I-beam in accordance with GOST R 57837–2017 (LSG – limit state group)

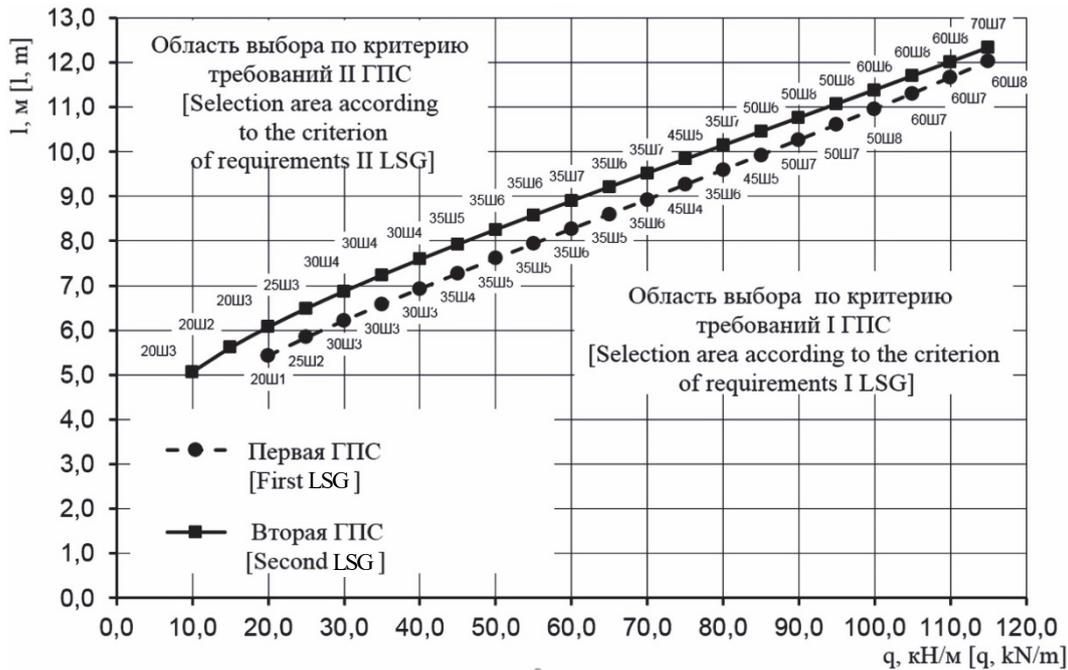


Рис. 5. Область работы и выбора балок с сечениями из широкополочного двутавра по ГОСТ Р 57837–2017
Figure 5. Scope of work and selection of beams with cross-sections from a wide-flange I-beam in accordance with GOST R 57837–2017 (LSG – limit state group)

Критерием рационализации является сечение балки, одновременно удовлетворяющее требованиям двух предельных состояний с минимальным запасом определяющего параметра (напряжение и прогиб).

Рациональной считается балка, пролет, грузовая ширина (как правило, шаг балок) и сечение которой приняты в зависимости от значения поверхностной равномерно распределенной нагрузки (так называемой полезной, или технологической) по критерию одновременного удовлетворения расчетных критериев предельных состояний с минимальным запасом по каждому критерию.

Графически рациональная область работы балок заключена в промежутке между верхним и нижним графиком на рис. 3–5. Для попадания в рациональную область можно варьировать исходными параметрами – длиной балки и погонной нагрузкой (зависит от шага балок). Если на стадии проектирования пролет балки или погонная нагрузка назначаются отличными от рекомендуемой области, балка будет эксплуатироваться с существенным запасом по одному из критериев предельных состояний (либо по несущей способности, либо по жесткости).

Сечения балок, назначенные с использованием предложенного подхода, являются рациональными по критерию удовлетворения требований несущей способности и, как следствие, наиболее экономичными по критерию минимального расхода стали.

Обсуждение: рекомендации по внедрению в практику строительства

Соблюдение условий одновременной реализации требований предельных состояний в качестве определяющего критерия при назначении длины балки позволяет увеличить длину применяемых балок и тем самым увеличить ширину ячеек рабочих площадок.

Предлагаемый подход к компоновке типовых ячеек балочных клеток может быть применен как технологами при назначении габаритных размеров рабочих площадок, так и конструктором при назначении конструктивных решений балочной клетки.

Представленные в статье номограммы рациональной области функционирования стальных прокатных балок, работающих по однопролетной схеме, могут быть рекомендованы в качестве приложения по выбору сечений к сортаментам стального проката: швеллеров стальных горячекатаных по ГОСТ 8240–97 и двутавров стальных горячекатаных с параллельными гранями полок по ГОСТ Р 57837–2017.

Ниже предложены номограммы для выбора сечений балок по актуальным на момент написания статьи сортаментам.

Представленные номограммы применимы для балок, выполненных из малоуглеродистых сталей. Номограммами выбора сечения прокатных балок следует пользоваться попарно:

- при выборе сечения балок с применением швеллеров стальных горячекатаные по ГОСТ 8240–97 – рис. 6 и 7;
- при выборе балок с применением сечения из нормального двутавра по ГОСТ Р 57837–2017 – рис. 8 и 9;
- при выборе балок с применением сечения из широкополочного двутавра по ГОСТ Р 57837–2017 – рис. 10 и 11.

На примере 2 показан алгоритм выбора прокатной балки по данным рис. 6–11.

Пример 2. На основании представленных исходных данных и по результатам выбора шага балок установлено, что нормативное значение нагрузки на балку составляет $q_n = 30,0$ кН/м, а расчетное – $q = 36,0$ кН/м. Определим по номограммам, какое рекомендуется применить сечение при пролете балки $l = 12,0$ м.

Анализ представленных ниже номограмм позволяет установить, что наиболее применимым по значению действующей нагрузки будет сечение, выполненное по ГОСТ Р 57837–2017.

Номограммы выбора сечения балок с применением швеллеров стальных горячекатаных по ГОСТ 8240–97

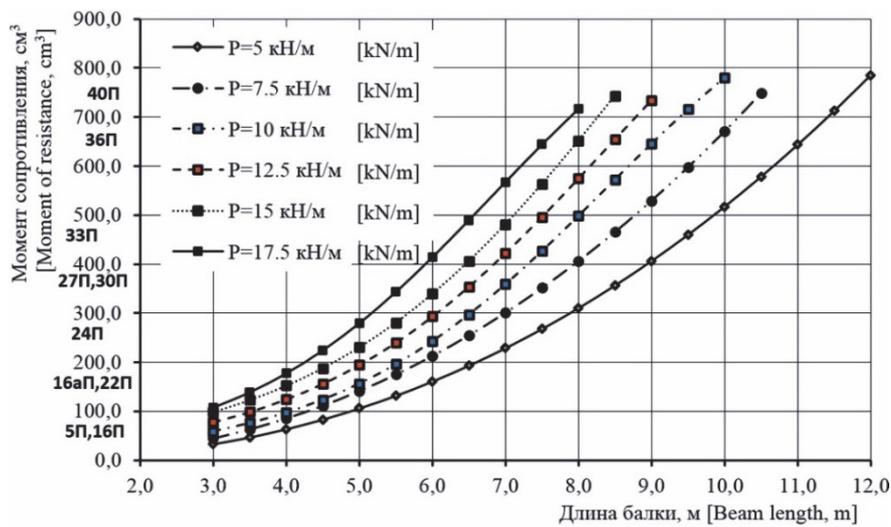


Рис. 6. Номограмма выбора сечения балок из швеллера по ГОСТ 8240–97 по критерию требуемого момента сопротивления
Figure 6. Nomogram for selecting the cross-section of beams from a channel in accordance with GOST 8240–97 according to the criterion of the required moment of resistance

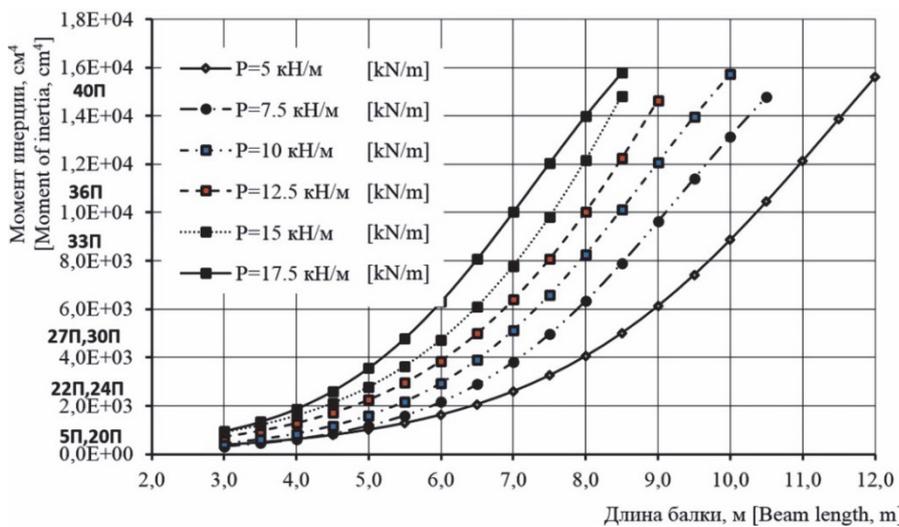


Рис. 7. Номограмма выбора сечения балок из швеллера по ГОСТ 8240–97 по критерию требуемого момента инерции
Figure 7. Nomogram for selecting the cross-section of beams from a channel according to GOST 8240–97 according to the criterion of the required moment of inertia

Номограммы выбора сечения балок с применением нормального двутавра по ГОСТ Р 57837–2017

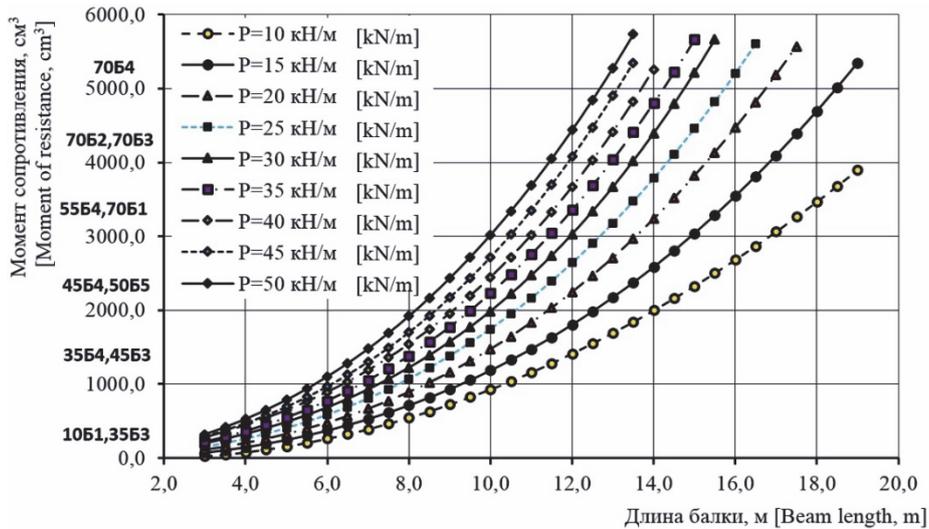


Рис. 8. Номограмма выбора балок сечением из нормального двутавра по ГОСТ Р 57837–2017 по критерию требуемого момента сопротивления

Figure 8. Nomogram for the selection of beams with a section from a normal I-beam in accordance with GOST R 57837–2017 according to the criterion of the required moment of resistance

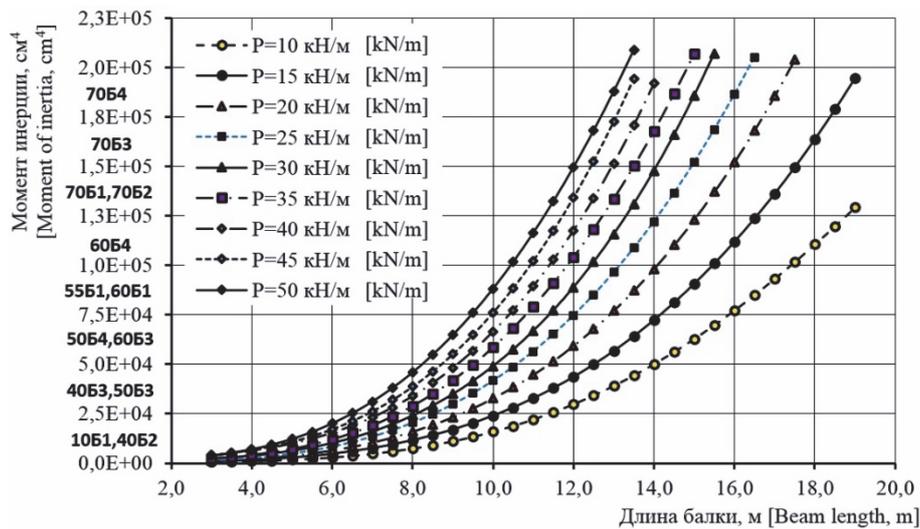


Рис. 9. Номограмма выбора балок сечением из нормального двутавра по ГОСТ Р 57837–2017 по критерию требуемого момента инерции

Figure 9. Nomogram for the selection of beams with a section from a normal I-beam in accordance with GOST R 57837–2017 according to the criterion of the required moment of inertia

Определим требуемое сечение из нормального двутавра:

– по данным номограммы рис. 8 по критерию требований первой ГПС рекомендовано сечение из нормального двутавра 70 Б1;

– по данным номограммы рис. 9 по критерию требований второй ГПС рекомендовано сечение из нормального двутавра 60 Б1.

Принимаем сечение из нормального двутавра 70 Б1 с погонным весом 129,3 кг/м.

Определим требуемое сечение из широкополочного двутавра:

– по данным номограммы рис. 10 по критерию требований первой ГПС рекомендовано сечение из нормального двутавра 40 Ш6;

– по данным номограммы рис. 11 по критерию требований второй ГПС рекомендовано сечение из нормального двутавра 40 Ш5.

Принимаем сечение из широкополочного двутавра 40 Ш6 с погонным весом 238,1 кг/м.

Окончательно принимаем сечение из нормального двутавра 70 Б1.

Номограммы выбора сечения балок с применением широкополочного двутавра по ГОСТ Р 57837-2017

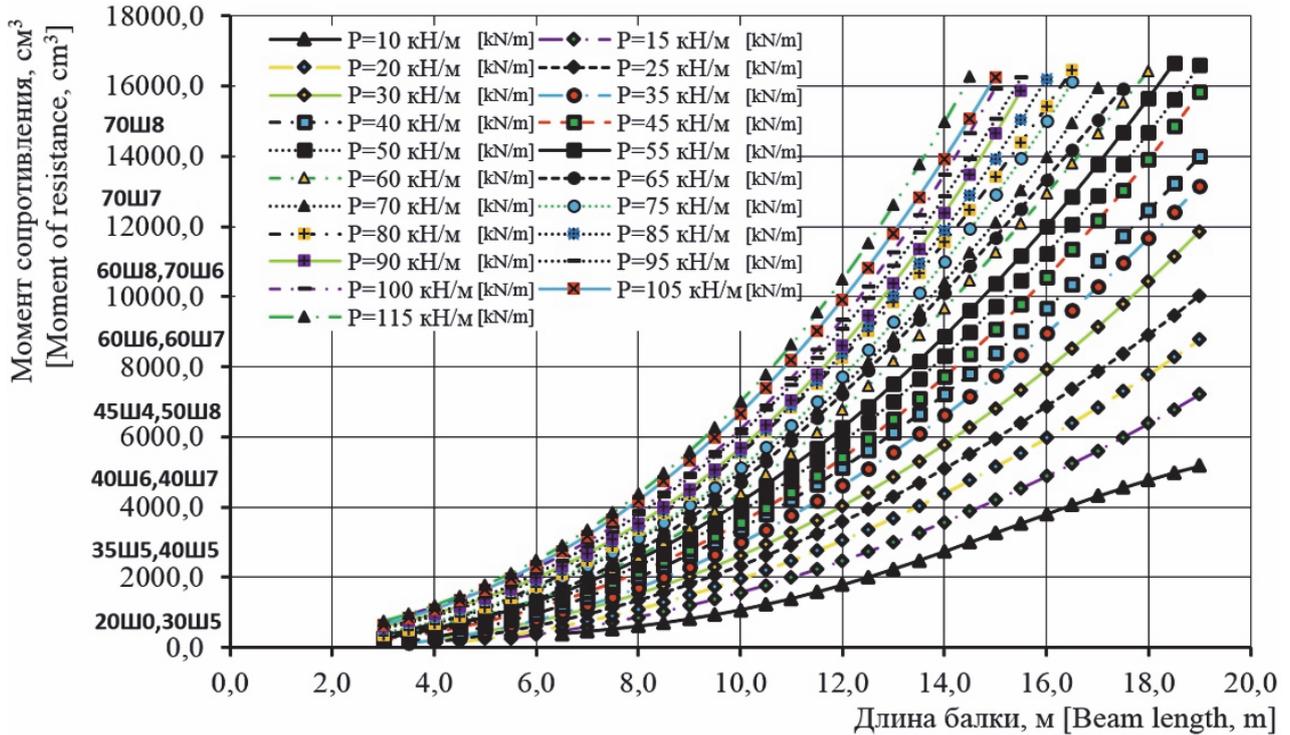


Рис. 10. Номограмма выбора балок сечением из широкополочного двутавра по ГОСТ Р 57837–2017 по критерию требуемого момента сопротивления

Figure 10. Nomogram for the selection of beams with a cross-section from a wide-flange I-beam in accordance with GOST R 57837–2017 according to the criterion of the required moment of resistance

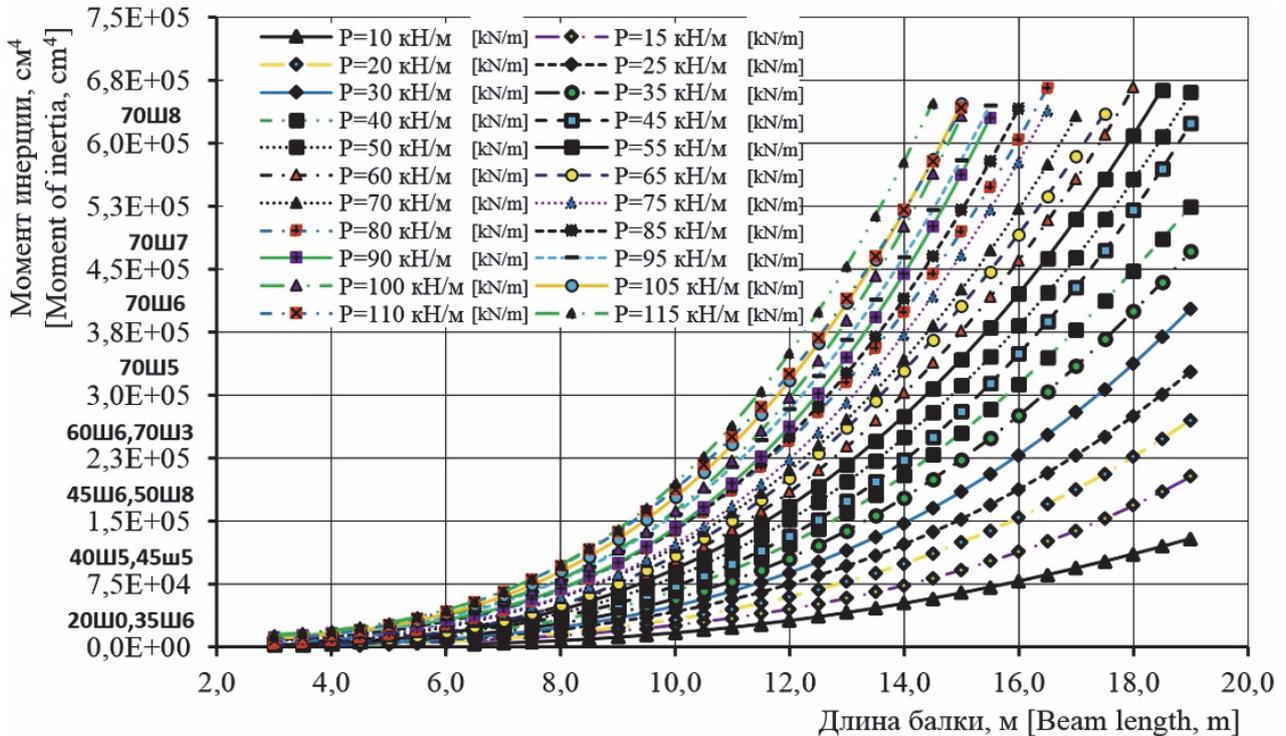


Рис. 11. Номограмма выбора сечения балок сечением из широкополочного двутавра по ГОСТ Р 57837–2017 по критерию требуемого момента инерции

Figure 11. Nomogram for the selection of the cross-section of beams with a cross-section of a wide-flange I-beam in accordance with GOST R 57837–2017 according to the criterion of the required moment of inertia

Заключение

По результатам серии расчетов определены области рациональной работы стальных прокатных балок, закрепленных от потери устойчивости, для актуальных на момент написания статьи сортаментов (ГОСТ 8240–97 и ГОСТ Р 57837–2017), исходя из требований расчета по методу предельных состояний.

Предложены уточненный алгоритм компоновки балочных клеток и уточненная методика расчета сечения прокатных балок, позволяющие компоновать размеры балочной клетки с минимальным расходом стали, и обосновано увеличение габаритных размеров ячеек рабочих площадок.

Уточненный алгоритм компоновки балочных клеток заключается в том, что для применения рационального сечения прокатных балок настила следует варьировать шагом балок (без необходимости изменения исходных размеров типовой ячейки балочной клетки) или корректировать длину балок (при этом необходимо изменить один из исходных размеров типовой ячейки балочной клетки, например, для нормального варианта – это шаг главных балок).

Полученные данные могут быть рекомендованы в качестве приложений по выбору сечений к актуальным на момент публикации статьи сортаментам стального проката.

Список литературы / References

1. Perelmuter A.V. The constructive form number one. *Metal constructions*. 2012;18(1):27–39. (In Russ.)
Перельмутер А.В. Конструктивная форма номер один // Металлические конструкции. 2012. Т. 18. № 1. С. 27–39.
2. Gorjachevskij O.S. Optimization of simply supported castellated I-beams loaded by a uniformly distributed load. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019;15(4):58–65. <http://dx.doi.org/10.22337/2587-9618-2019-15-4-58-65>
3. Ali Laftah Abbas, Abbas Haraj Mohammed, Raad Dheyab Khalaf, Khattab Saleem Abdul-Razzaq. Finite Element Analysis and Optimization of Steel Girders with External Prestressing. *Civil Engineering Journal*. 2018;4(7):1490–1500. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-0309189>
4. Demidov N.N. Application of pre-stressed cross-beams of two directions made of steel rolled double tees. *Industrial and Civil Engineering*. 2016;(12):81–84. (In Russ.)
Демидов Н.Н. Применение предварительно напряженных перекрестных балок двух направлений из стальных прокатных двутавров // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 12. С. 81–84.
5. Vedyakov I.I., Konin D.V., Yeremeyev P.G. Development of new standard (GOST R) for wide flange I-profile. *Construction Materials, the Equipment, Technologies of XXI Century*. 2017;3–4(218–219):40–43. (In Russ.)
Ведяков И.И., Конин Д.В., Еремеев П.Г. Разработка нового стандарта (ГОСТ Р) для выпуска двутавров с широкими полками // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2017. № 3–4 (218–219). С. 40–43.
6. Tusnin A.R. Steel framework of a low-rise building. *Industrial and Civil Engineering*. 2017;(11):18–22. (In Russ.)
Туснин А.Р. Стальной каркас малоэтажного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 11. С. 18–22.
7. Gebre T.H. The development of chart based method for steel beam designs using the Russian sections. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 2018;14(6):495–501. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-6-495-501>
8. Williams A. *Steel structures design ASD/LRFD*. The McGraw-Hill Companies; 2011. p. 201–204.
9. Segui W.T. *Steel design*. 5th edition. Cengage Learning; 2013. p. 227–228.
10. Subramanian N. *Design of steel structures theory and practice*. Oxford University Press; 2010. p. 117–119.
11. Kindmann R., Kraus M. *Steel structures design using FEM*. Wilhelm Ernst & Sohn; 2011. <https://doi.org/10.1002/9783433600771.fmatter>
12. *Steel construction manual*. 14th edition. American Institute of Steel Construction; 2011.
13. Moore D.B., Brown D.G., Pope R.J. *Handbook of structural steelwork*. BCSA Publication No. 55/13. 2013. p. 440.
14. *Building research, worked examples for the design of steel structures BRE SCI based on BSI & Eurocode 3*. 1.1. 1994.
15. Bernuzzi C., Cordova B. *Structural steel design to Eurocode 3 and AISC specifications*. 2016. p. 218.
16. Streleckij N.S., Geniev A.N., Belenja E.I., Baldin V.A., Lessig E.N. *Metallicheskie konstrukcii [Metal structures]*. Moscow: Strojizdat Publ.; 1961. p. 121–127. (In Russ.)
Стрелецкий Н.С., Гениев А.Н., Беленя Е.И., Балдин В.А., Лессиг Е.Н. Металлические конструкции / под ред. Н.С. Стрелецкого. М.: Стройиздат, 1961. С. 121–127.
17. Kuznecov V.V. (ed.) *Metal structures. Part 1. General part*. Moscow: ASV Publ., 1998. (In Russ.)
Металлические конструкции: в 3 т. Т. 1. Общая часть / под общ. ред. В.В. Кузнецова; ЦНИИпроектстальконструкция имени Н.П. Мельникова. М.: АСВ, 1998. 576 с. (Справочник проектировщика).
18. *Manual on the selection of sections of elements of building steel structures (part 2)*. Moscow: ЦНИИпроектстальконструкция имени Н.П. Мельникова Publ.; 1987. (In Russ.)
Руководство по подбору сечений элементов строительных стальных конструкций: в 3 ч. М.: ЦНИИпроектстальконструкция имени Н.П. Мельникова, 1987. Ч. 2. 74 с.
19. Gebre T.H., Negash N.A. The development of strength curve for compressive members using three different codes: 9 AISC, Eurocode and Russian steel construction. *Engineering Systems – 2018: International Scientific and Applied Conference*. Moscow; 2018. p. 59–67.

20. Galishnikova V.V., Pahl P.J Analysis of frame buckling without sidesway classification. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2018;14(4):299–312. <http://dx.doi.org/1815-5235-2018-14-4-299-312>
21. Winkler R., Kindmann R., Knobloch M. Lateral torsional buckling behavior of steel beams – on the influence of the structural system. *Structures*. 2017;(11):178–188. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2017.05.007>
22. Utkin V.S., Solovyev S.A The evaluation of ultimate load on existing steel beams by deflection criterion. *Building and Reconstruction*. 2016;6(68):85–89. (In Russ.)
Уткин В.С., Соловьев С.А. Определение предельной нагрузки на металлическую балку по критерию перемещений (прогиба) на стадии эксплуатации // Строительство и реконструкция. 2016. № 6 (68). С. 85–89.
23. Utkin V.S., Solovyev S.A. Reliability analysis of existing steel beams with reduction (degradation) of the rigidity of the support. *Building and Reconstruction*. 2017;5(73):58–66. (In Russ.)
Уткин В.С., Соловьев С.А. Расчет надежности металлических балок с учетом снижения (деградации) жесткости опорных закреплений на стадии эксплуатации // Строительство и реконструкция. 2017. № 5 (73). С. 58–66.
24. Marutyán A.S. I-shaped bent closed profiles with tubular shelves and calculation of the optimal layout of their composite sections. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(5):334–350. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-5-334-350>
Марутян А.С. Двутавровые гнутозамкнутые профили с трубчатыми полками и расчет оптимальной компоновки их составных сечений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 5. С. 334–350. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-5-334-350>
25. Marutyán A.S. Comparative calculation of optimal parameters of channel bent and bent closed profiles. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019;15(6):415–432. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-6-415-432>
Марутян А.С. Сравнительный расчет оптимальных параметров швеллерных гнутых и гнутозамкнутых профилей // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 6. С. 415–432. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-6-415-432>
26. Bryantsev A.A., Absimetov V.E., Lalin V.V. The effect of perforations on the deformability of welded beam with corrugated webs. *Magazine of Civil Engineering*. 2019;87(3):18–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.18720/MCE.87.2>
27. Demidov N.N. Design of steel beams cross three directions with Sprengel. *Magazine of Civil Engineering*. 2017;4:46–53. <https://doi.org/10.18720/MCE.72.6>
28. Hanus F., Vassart O., Caillet N., Franssen J.-M. High temperature full-scale tests performed on S500M steel grade beams. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017;133:448–458. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.03.001>
29. Liu X., Wang Y., Ban H., Liu M., Veljkovic M., Bijlaard F.S.K. Flexural strength and rotation capacity of welded I-section steel beams with longitudinally profiled flanges. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020;173:106255. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106255>
30. Wang Y., Liu X., Ban H., Liu M., Shi Y., Wang Y. Deformation behavior at SLS of welded I-section steel beams with longitudinally profiled flanges. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018;146:122–134. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.03.033>
31. Krylov A.S. Experimental assessment numerical simulation of steel beams with different boundary conditions. *Building and Reconstruction*. 2019;1(81):48–55. (In Russ.)
Крылов А.С. Экспериментальная оценка точности расчетов стальных балок при различных граничных условиях // Строительство и реконструкция. 2019. № 1 (81). С. 48–55. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-81-1-48-55>
32. Yan X.-L., Li G.-Q., Wang Y.B., Jiang J. Experimental and numerical investigation on flexural-torsional buckling of Q460 steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020;174:106276. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106276>
33. Bonopera M., Kuo-Chun Chang, Chun-Chung Chen, Tzu-Kang Lin, Tullini N. Bending tests for the structural safety assessment of space truss members. *International Journal of Space Structures*. 2018;33(3–4):138–149. <https://doi.org/10.1177/0266351118804123>
34. Haji M., Azarhomayun F., Ghiami Azad A.R. Numerical investigation of truss-shaped braces in eccentrically braced steel frames. *Magazine of Civil Engineering*. 2021;102(2):10208. <https://doi.org/10.34910/MCE.102.8>
35. Kiss L.P. Stability of fixed-fixed shallow arches under arbitrary radial and vertical forces. *Magazine of Civil Engineering*. 2020;95(3):31–41. <https://doi.org/10.34910/MCE.102.8>
36. Zongxing Zhang, Shanhua Xu, Hao Wang, Biao Nie, Chao Su. Flexural buckling behavior of corroded hot-rolled H-section steel beams. *Engineering Structures*. 2021;229:111614. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111614>
37. Feng R., Liu J., Chen Z., Roy K., Chen B., Lim J.B.P. Numerical investigation and design rules for flexural capacities of H-section high-strength steel beams with and without web openings. *Engineering Structures*. 2020;225:111278. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111278>
38. Nabati A., Ghanbari-Ghazijahani T., Valipour H.R. Innovative flitch sandwich beams with steel core under four-point bending. *Engineering Structures*. 2020;233:111724. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111724>
39. Jia-LinMa, Tak-Ming Chan, Ben Young. Cold-formed high strength steel tubular beam-columns. *Engineering Structures*. 2020;232:111618. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111618>
40. Moon-Young Kim, Nemekhbayar Nanzad, Umar Hayat. Effects of un-bonded deviators on the out-of-plane buckling of steel H-beams pre-stressed by a straight tendon cable. *Engineering Structures*. 2020;214:110566. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110566>