

Научная статья

УДК 624.21.01

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-436-451>

EDN: TGHGZX



МЕТОДИКА РАСЧЕТА СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ МОСТА С РАЗДЕЛЕНИЕМ МАТЕРИАЛА ПО НЕЙТРАЛЬНОЙ ОСИ

А.С. Белокопытов^{1,2} ✉, В.А. Уткин¹, С.А. Матвеев¹¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия²ООО ПРОЕКТНО-ИНЖИНИРИНГОВАЯ КОМПАНИЯ «МОСТОВИК»,
г. Омск, Россия✉ ответственный автор
a.sbel@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В сталежелезобетонных пролетных строениях прочность железобетона используется не полностью из-за двухстадийного включения в работу поперечного сечения и нерационального распределения материалов сечения. Чтобы повысить эффективность работы используемых материалов, предлагается объединять стальную и железобетонную часть по нейтральной оси поперечного сечения. При такой конструкции поперечного сечения сталь будет находиться всегда в растянутой зоне, а бетон в сжатой. Реализовать такую конструкцию возможно при сооружении пролетного строения в одну стадию из сталежелезобетонных блоков заводского изготовления.

Материалы и методы. Реализовать методику расчета с разделением материала по нейтральной оси возможно при организации монтажа пролетного строения в одну стадию, приняв, что сечение пролетного строения работает в упругой стадии, и выполняя законы строительной механики. Чтобы охватить особенности расчета разрезных и неразрезных пролетных строений, принята консольно-балочная статическая схема.

Результаты. Представленные результаты аналитического расчета позволяют оценить расход материалов при изготовлении пролетного строения. Расход стали исследуемого пролетного строения – 6,12 т/п.м., расход железобетона – 6,54 м³/п.м.

Монтаж пролетного строения. Описан монтаж пролетного строения с учетом особенностей конструкции.

Выводы. Определена оптимальная статическая схема пролетного строения. Разработана методика расчета сталежелезобетонного пролетного строения с разделением материала по нейтральной оси. Выполнен аналитический расчет по подбору геометрических параметров поперечных сечений пролетного строения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мост, сталежелезобетон, пролетное строение, нейтральная ось, методика расчета пролетного строения моста, плита проезжей части

Статья поступила в редакцию 26.03.2024; одобрена после рецензирования 17.05.2024; принята к публикации 04.06.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Белокопытов А.С., Уткин В.А., Матвеев С.А. Методика расчета сталежелезобетонного пролетного строения моста с разделением материала по нейтральной оси // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 3. С. 436-451. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-436-451>

© Белокопытов А.С., Уткин В.А., Матвеев С.А., 2024

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-436-451>
EDN: TGHGZX

CALCULATION METHOD FOR A STEEL-REINFORCED CONCRETE BRIDGE SPAN STRUCTURE WITH MATERIAL SEPARATION ALONG THE NEUTRAL AXIS

Artem S. Belokopytov^{1,2} ✉, Vladimir A. Utkin¹, Sergei A. Matveev¹

¹Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

²OOO MOSTOVIK Design and Engineering Company,
Omsk, Russia

✉ corresponding author
a.sbel@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. In steel-reinforced concrete spans, the strength of reinforced concrete is not fully used due to the two-stage inclusion of the cross section in the work and the irrational distribution of materials in the section. To increase the efficiency of the materials used, it is proposed to combine the steel and reinforced concrete parts along the neutral axis of the cross section. With such a cross-section design, the steel will always be in the tension zone, and the concrete in the compression zone. It is possible to implement such a design by constructing a span in one stage from prefabricated steel-reinforced concrete blocks.

Materials and methods. It is possible to implement the calculation method with the separation of the material along the neutral axis when organizing the installation of the span structure in one stage, assuming that the section of the span structure operates in the elastic stage and following the laws of structural mechanics. To cover the features of the calculation of split and continuous span structures, a cantilever-beam static scheme was adopted.

Results. The presented results of analytical calculations make it possible to estimate the consumption of materials in the manufacture of the span. The steel consumption of the span under study is 6.12 t/m, the reinforced concrete consumption is 6.54 m³/m.

Installation of the span. The installation of the span is described, considering the design features.

Conclusions. The optimal static layout of the span structure has been determined. A method for calculating a steel-reinforced concrete span with material separation along the neutral axis has been developed. An analytical calculation was performed to select the geometric parameters of the cross sections of the span.

KEYWORDS: bridge, steel-reinforced concrete, superstructure, neutral axis, method for calculating the bridge superstructure, roadway slab

The article was submitted 26.03.2024; approved after reviewing 17.05.2024; accepted for publication 04.06.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Belokopytov A.S., Utkin V.A., Matveev S.A. Calculation method for a steel-reinforced concrete bridge span structure with material separation along the neutral axis. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (3): 436-451. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-436-451>

© Belokopytov A.S., Utkin V.A., Matveev S.A., 2024



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Сталежелезобетонные пролетные строения начали использовать в отечественном мостостроении с конца сороковых годов прошлого столетия преимущественно в автодорожных мостах.

Основная идея применения сталежелезобетонных конструкций – это выгодное использование работы бетона на сжатие, которое способствует экономии стали в главных балках пролетного строения. Такие пролетные строения мостов и путепроводов эффективно применять для перекрытия пролетов до 120 м.

Мосты со сталежелезобетонными пролетными строениями строят со сборной и монолитной плитой проезжей части. В отечественной практике строительства мостов до конца прошлого века активно использовались сборные плиты. Однако в настоящее время чаще применяется монолитная плита проезжей части. За рубежом сталежелезобетонные мосты строят преимущественно с монолитными плитами. Последние отечественные и зарубежные^{1,2,3} научные исследования сталежелезобетонных мостов приведены в [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] и в [9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 20] соответственно.

Сборные железобетонные плиты, изготовленные на заводе, ускоряют и упрощают строительство. Однако конструкция объединения металла и железобетона не может обеспечить надежную и долгосрочную эксплуатацию пролетного строения. В связи с этим пролетные строения со сборными железобетонными плитами на сегодняшний день практически не применяются.

Преимущество монолитных плит по сравнению со сборными заключается в более надежном объединении их с металлическими балками для совместного восприятия усилий. Тем не менее для устройства монолитной железобетонной плиты требуется сооружение опалубки, арматурного каркаса с объединяющими элементами, укладка и уплотнение бетонной смеси, выдержка бетона до полного набора прочности в строительных условиях.

Из-за этого сроки и стоимость строительства мостов значительно возрастают.

В 1986 г. Сибирский автодорожный институт (СибАДИ) закончил обширную многолетнюю работу по обследованию и испытанию сталежелезобетонных мостов, построенных в период с 1957 по 1983 г. (руководитель работы – проф. К.Х. Толмачев, ответственный исполнитель – В.И. Пузиков, заказчик – Главдортех Минавтодора РСФСР). Обследовано 184 пролетных строения с целью определения их состояния и возможности перестройки мостов с габаритов Г-7 и Г-8 на Г-10 и Г-11,5 с целью оценки их состояния и возможности реконструкции для адаптации к современным требованиям.

Выводы по результатам обследований были однозначны: при таком состоянии сталежелезобетонных пролетных строений со сборными плитами реконструкция мостов с расширением проезжей части невозможна без принятия радикальных мер.

Основные выявленные дефекты:

1. Несовершенство конструкции объединения. Жесткие дискретные упоры создавали недопустимые напряжения в бетоне омоноличивания, вследствие чего он разрушался с одновременным отслаиванием плиты от верхнего пояса главных балок и образованием между ними зазоров до 20 мм по всей длине пролетного строения.

2. Некачественное выполнение работ при омоноличивании плит с балками и между собой в поперечных и продольных стыках, вследствие чего происходит выключение железобетонной плиты из совместной работы со стальной балкой.

3. Отсутствие надлежащей эксплуатации мостового сооружения. Выбоины в асфальтобетонном покрытии создавали сверхнормативные динамические нагрузки при пропуске по мосту большегрузных транспортных средств. Из-за нарушения гидроизоляции или плохого ее исполнения бетон плиты выщелачивается, в плите появляются трещины, из-за чего происходила коррозия арматуры. Физический износ наступал через 15 лет, хотя расчетный срок их службы намечался 60 лет.

¹ Iles D.C. Design Guide of Ladder Deck Bridges, SCI P339, The Steel Construction Institute, Ascot, United Kingdom, 2006.

² Hechler O., Berthelley J., Lorenc W., Seidl G., and Viefhues E., Continuous Shear Connectors in Bridge Construction // The 2008 Composite Construction in Steel and Concrete Conference VI, July 2008, Tabernash, CO, American Society of Civil Engineers. 13 pp.

³ Steel – Concrete Bridges – Sustainable Design Guide / Daniel de MATTEIS (Setra), working group leader, 2010.

В связи со сложившейся ситуацией Н.Н. Бычковский в своих трудах⁴ поднимает перед отечественным мостостроением два вопроса: как быть со старыми сталежелезобетонными мостами, имеющими малые габариты проезжей части и находящимися в аварийном состоянии, и стоит ли дальше строить мосты со сталежелезобетонными пролетными строениями.

По первому вопросу, в практике реконструкции сталежелезобетонных мостов, пришли к решению замены железобетонной плиты на стальную ортотропную плиту проезжей части и тем самым продлить срок эксплуатации сооружения.

Второй вопрос необходимо рассматривать с точки зрения целесообразности строительства сталежелезобетонных пролетных строений со сборными и монолитными плитами и создания новых конструктивных форм сталежелезобетонных конструкций. Для этого требуется углубиться в характер работы конструкции.

Монтаж сталежелезобетонных пролетных строений без регулирования усилий происходит в две стадии. На первой стадии стальная главная балка воспринимает нагрузки от собственного веса, веса железобетонной плиты проезжей части и монтажных приспособлений. На второй стадии после набора прочности же-

лезобетонной плиты проезжей части в работу включается сталежелезобетонное сечение на восприятие нагрузок от веса мостового полотна и расчетных временных нагрузок.

Таким образом, прочность железобетонной плиты проезжей части в сталежелезобетонных пролетных строениях используется не полностью. А в неразрезных пролетных строениях в зонах растяжения плиты проезжей части железобетон не учитывается в совместной работе. Данный вопрос не раз рассматривался на научно-практических конференциях^{5,6,7,8}.

В публикации [21] предлагается расчёт прочностных характеристик разрезных пролетных строений с учетом объединения стальной и железобетонной части по нейтральной оси сечений пролетного строения. Данное решение основано на патенте⁹ и позволяет рациональнее использовать прочностные свойства материалов в составе сечения.

Изобретение¹⁰ представляет собой неразрезное пролетное строение. Особенностью приведенной конструкции является распределение материала по длине пролетного строения в соответствии с их прочностными свойствами. Железобетон располагается в сжатых зонах сечений, а сталь в растянутых. Таким образом, мы получаем пролетное строение с железобетонной плитой проезжей части и стальным нижним поясом в сечениях с поло-

⁴ Проблемы проектирования, строительства, эксплуатации, реконструкции транспортных сооружений и пути их решения: [в 3 ч.] / Н.Н. Бычковский; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Саратовский гос. технический ун-т. Саратов: Саратовский гос. технический ун-т, 2008. 28 см.

⁵ Белокопытов А.С., Уткин В.А., Матвеев С.А. Разработка и совершенствование сталежелезобетонного пролетного строения с разделением материала по нейтральной оси // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, Омск, 2–25 ноября 2022 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. С. 323–327. EDN VHUOSM.

⁶ Belokopytov A.S. The Substantiation of Steel-Reinforced Concrete Composite Bridge Superstructure Design / A.S. Belokopytov, V.A. Utkin, S.A. Matveev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019", Vladivostok, Russky Island, 01–04 октября 2019 года. Vol. 753, 3, Chapter 2. – Vladivostok, Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 032007. DOI 10.1088/1757-899X/753/3/032007. EDN UGNTVJ.

⁷ Уткин В.А., Матвеев С.А., Белокопытов А.С. Расчет разрезного сталежелезобетонного пролетного строения с учетом регулирования положения нейтральной оси // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Омск, 29–30 ноября 2018 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2019. С. 269–273. EDN YVRXPN.

⁸ Уткин В.А., Матвеев С.А., Белокопытов А.С. Исследование сталежелезобетонных пролетных строений. Пути конструктивного и технологического совершенствования // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сборник научных трудов национальной научно-практической конференции, Омск, 19–20 апреля 2018 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). 2018. С. 390–393. EDN XSYHUT.

⁹ Патент № 1823891 АЗ СССР, кл. E01D 7/02, 1988. Сталежелезобетонное пролетное строение: № 4917283/33 / Уткин В.А.; заявл. 07.03.1991; опубл. 23.06.1993.

¹⁰ Патент № 2040629 С1 Российская Федерация, МПК E01D 12/00, E01D 101/26, E01D 101/30. Сталежелезобетонное пролетное строение: № 5035073/33/ В. А. Уткин; заявл. 31.03.1992; опубл. 25.07.1995. EDN GVZHTH.

жительным изгибающим моментом и стальной ортотропной плитой и железобетонным нижним поясом в сечениях с отрицательным изгибающим моментом. Предложенное пролетное строение собирается на строительной площадке из готовых сталежелезобетонных блоков, изготовленных «в отпечаток» в заводских условиях. Монтаж производится в одну стадию.

Чтобы рационально использовать материалы в сечении, необходимо запроектировать такое пролетное строение моста, в котором стальная и железобетонная часть поперечного сечения сопрягаются по нейтральной оси. Пролетное строение состоит из сталежелезобетонных блоков заводского изготовления, которые сооружаются «в навес», что обеспечивает одновременное включение в работу всех материалов сечения.

Цель данной работы – разработать методику расчета сталежелезобетонного пролетного строения с разделением материала по нейтральной оси, состоящего из сборных сталежелезобетонных блоков заводского изготовления. Монтаж пролетного строения производится в одну стадию.

При проектировании пролетных строений, объединение материалов по нейтральной оси сечения позволяет рационально использовать свойства стали и железобетона для повышения эффективности конструкции. Материал в сечении работает в соответствующем для него напряженном состоянии. Железобетон работает на сжатие. Сталь работает на растяжение.

Разделение материалов по нейтральной оси сечения и монтаж в одну стадию позволяют достичь следующих преимуществ:

- Экономия материалов: каждый материал используется в том напряженном состоянии, в котором он наиболее эффективен, что позволяет сэкономить материалы и уменьшить общую массу пролетного строения.

- Увеличение надежности: распределение напряжений между материалами позволяет увеличить прочность и надежность конструкции, так как каждый материал выполняет свою специфическую функцию.

- Эффективная работа материалов в сечении: одностадийный монтаж пролетного строения обеспечивает одновременное включение в работу стали и железобетона в сечении на восприятие всех возникающих усилий.

В статье поставлены следующие задачи:

1. Определить оптимальную статическую схему для расчета сталежелезобетонного пролетного строения моста.

2. Разработать методику расчета сталежелезобетонного пролетного строения с разделением материала по нейтральной оси.

3. Выполнить аналитический расчет по подбору геометрических параметров поперечных сечений пролетного строения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Положения расчета

Применения балочных сталежелезобетонных пролетных строений мостов экономически выгодно при длине перекрываемого пролета до 120 м. С такими пролетами применяют неразрезные, консольно-балочные и рамно-подвесные статические схемы пролетных строений.

Неразрезные пролетные строения относятся к категории статически неопределимых конструкций, что делает их особенно восприимчивыми к таким факторам, как неравномерная осадка опор к температурным воздействиям. Неразрезные статические схемы пролетных строений (рисунок 1, а) также обладают вытянутой зоной нулевых моментов.

Консольно-балочные и рамно-подвесные пролетные строения мостов являются статически определимыми. Они менее чувствительны к неравномерной осадке опор, что делает их более надежными в условиях эксплуатации. Особенности конструкции консольно-балочных и рамно-подвесных статических схем позволяют организовать монтаж укрупненными блоками пролетного строения. Рамно-подвесные системы (рисунок 1, б) являются частным случаем консольно-балочных пролетных строений. Они не имеют переходных зон на эпюре моментов, но недостатком данной конструкции является включение опор в работу пролетного строения.

Для учета особенностей неразрезных и разрезных систем больших пролетов мостов рассматривается консольно-балочная статическая схема (рисунок 1, в). Длина консолей в такой системе принимается согласно расположению зоны нулевых моментов в аналогичной неразрезной системе.

Конструкция пролетного строения моста предусматривает сопряжение стальной и железобетонной части по линии, проходящей через центры тяжести сталежелезобетонных сечений. Центр тяжести сечения, или нейтральная ось сечения, меняет свое положение по длине пролетного строения в зависимости от действующего изгибающего момента $M(x)$, образуя линию нейтральной оси.

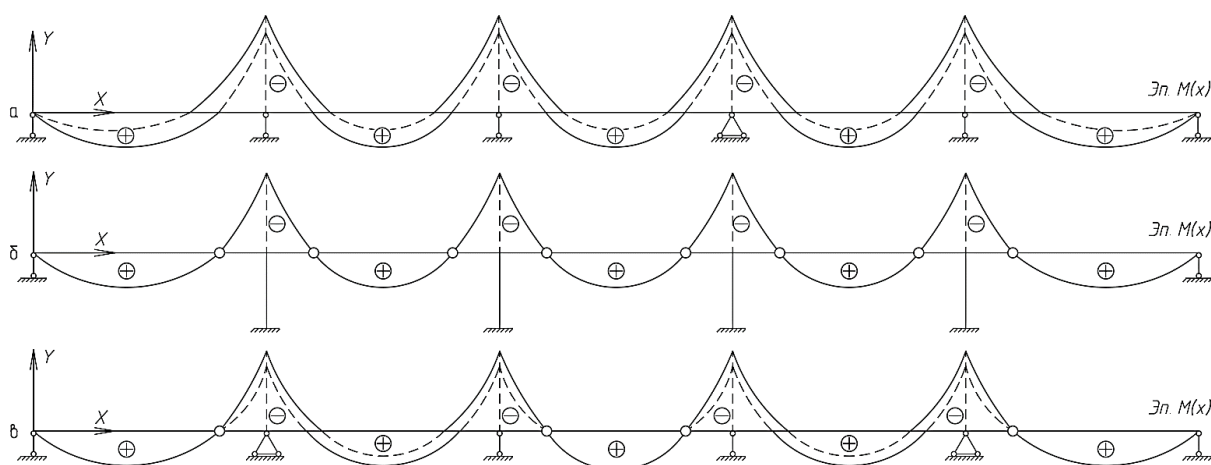


Рисунок 1 – Статические схемы пролетных строений:
 а – неразрезное пролетное строение;
 б – рамно-подвешенное пролетное строение;
 в – консольно-балочное пролетное строение
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Static diagrams of spans:
 а – continuous span structure;
 б – frame-suspended span structure;
 в – cantilever-beam span structure.
 Source: completed by authors.

Проектирование пролетного строения моста заключается в определении рациональных с точки зрения экономии материалов геометрических параметров поперечных сечений, таких как высота сечения и площадь элементов поперечного сечения.

Методика подбора геометрических параметров имеет следующие положения:

1. Сечения пролетного строения работают в упругой стадии и согласно гипотезе плоских сечений закон распределения напряжений прямолинейный. Таким образом, имеется возможность контролировать напряженное состояние конструкции в ее сечениях. Максимальное напряжение стальной части соответствует расчетному сопротивлению растяжения стали – R_{us} . Максимальное напряжение железобетонной части соответствует расчетному сопротивлению сжатия железобетона – R_{ub} .

2. Условие равновесия сечения при сумме усилий по $\Sigma X=0$ и при отсутствии продольных сил

$$\int_{F_b} \sigma_b dF = \int_{F_s} \sigma_s dF, \quad (1)$$

где σ_b – условие прочности бетонной части;
 σ_s – условие прочности стальной части;

Формула (1) может быть представлена как равенство нулю статических моментов инерции относительно нейтральной оси сечения

$$S_b = n_b S_s, \quad (2)$$

где S_b – статический момент инерции железобетонной части; S_s – статический момент инерции стальной части; $n_b = \frac{E_s}{E_b}$ – коэффициент приведения стали к бетону; E_s и E_b – модуль упругости стали и железобетона соответственно.

3. Условие прочности стального сечения

$$\sigma_s = M(x) \frac{y_s}{I_{st}}, \quad (3)$$

где $M(x)$ – изгибающий момент в сечении; y_s – высота стальной части; I_{st} – момент инерции сталежелезобетонного сечения; σ_s – напряжение в крайней фибре стальной части, равное расчетному сопротивлению стали на растяжение.

Геометрические параметры определяются путем решения системы уравнений (4), составленной из формул (2) и (3):

$$\begin{cases} S_b = n_b S_s \\ \frac{y_s}{I_{st}} = \frac{M(x)}{R_{us}} \end{cases} \quad (4)$$

Методика расчета приводится для зон положительного и отрицательного изгибающего момента.

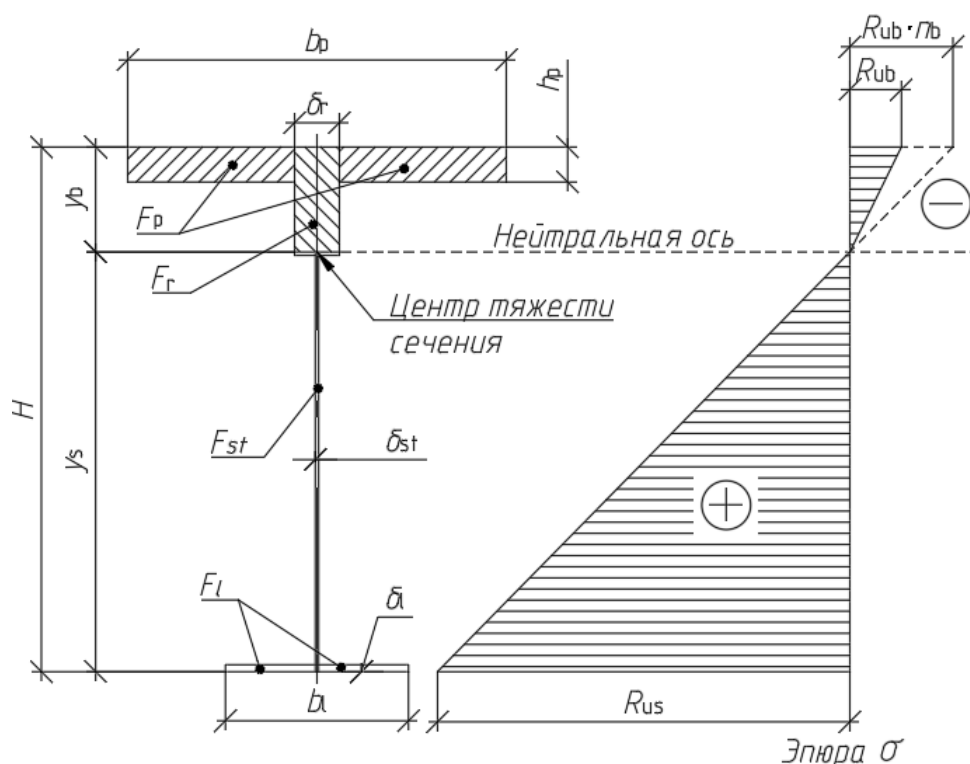


Рисунок 2 – Расчетная схема поперечного сечения в зоне положительного изгибающего момента
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Design diagram of the cross section in the zone of positive bending moment.
Source: completed by authors.

Методика расчета сечений в зоне положительного изгибающего момента

При действии положительного изгибающего момента в сжатой зоне поперечного сечения устраивается железобетонная плита проезжей части с переменной высотой ребра. В растянутой зоне поперечного сечения располагается двутавровая стальная главная балка с переменной высотой стенки. Сопряжение стальной и железобетонной части происходит по верхнему поясу стальной главной балки. Расчетная схема поперечного сечения приведена на рисунке 2.

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: F_p – площадь ж.б. плиты проезжей части; h_p – высота ж.б. плиты проезжей части; b_p – ширина ж.б. плиты проезжей части; F_r – площадь ж.б. ребра плиты проезжей части; δ_r – ширина ж.б. ребра плиты проезжей

части; F_{st} – площадь стальной стенки главной балки; δ_{st} – толщина стальной стенки главной балки; F_l – площадь стального нижнего пояса главной балки; δ_l – толщина стального пояса главной балки; b_1 – ширина стального нижнего пояса; y_b – высота железобетонной части сечения; y_s – высота стальной части сечения.

Из расчетной схемы очевидно, что соотношение высоты всего сечения H к стальной и железобетонной части может быть представлено следующим образом:

$$y_b = k \cdot H, \quad y_s = k_1 \cdot H, \quad (5)$$

$$\text{где } k = \frac{R_{ub} \cdot n_b}{R_{us} + R_{ub} \cdot n_b}, \quad k_1 = 1 - k = \frac{R_{us}}{R_{us} + R_{ub} \cdot n_b}.$$

После преобразования системы уравнения (4) получим

$$\begin{cases} \left[H(F_p k^2 + n_b F_l k_1^2) + \frac{H^2(\delta_r k^3 + n_b \delta_{st} k_1^3)}{3} + (k F_p h_p + k_1 F_l \delta_l) \right] \frac{1}{k_1 n_b} - \frac{M(x)}{R_{us}} = 0 \\ F_p \left(y_b - \frac{h_p}{2} \right) + F_r \frac{y_b}{2} - n_b F_{st} \frac{y_s}{2} - n_b F_l \left(y_s - \frac{\delta_l}{2} \right) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

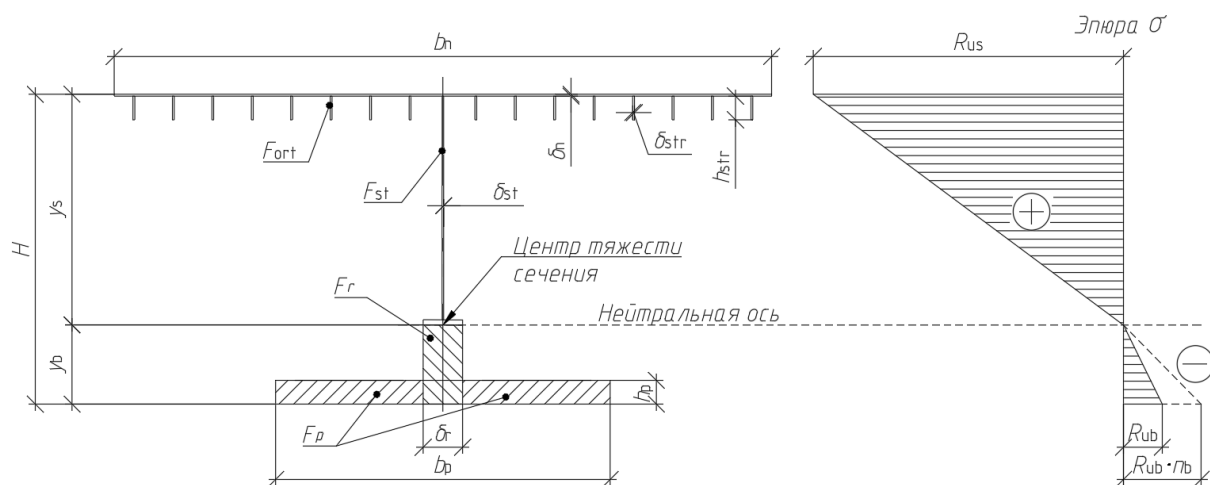


Рисунок 3 – Расчетная схема поперечного сечения в зоне отрицательного изгибающего момента
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Design diagram of the cross section in the zone of negative bending moment.
Source: completed by authors.

В зоне контакта стальной и железобетонной части располагается сопрягающий стальной лист. Сопрягающий лист стальной части находится близко к центру тяжести поперечного сечения, учет его в работе сечения дает поправку в результатах менее 1%, что дает возможность пренебречь им в расчете геометрических параметров сечения.

Решение системы уравнений (6) ведет к нахождению двух величин F_1 и H для сечения с максимальным изгибающим моментом. Высота пролетного строения в зоне положительных изгибающих моментов принимается постоянной, а положение нейтральной оси в каждом последующем сечении контролируется изменением нижнего пояса.

Методика расчета сечений в зоне отрицательного изгибающего момента

В зоне действия отрицательного изгибающего момента проезд осуществляется по стальной ортотропной плите проезжей части. Нижний пояс поперечного сечения железобетонный. Расчетная схема приведена на рисунке 3.

Подбор геометрических параметров ведется аналогичным способом, как и для сечений в зоне положительных изгибающих моментов. Так как стальная ортотропная плита имеет постоянные геометрические характеристики, то

в расчете определяющими параметрами будут площадь железобетонного нижнего пояса и высота всего поперечного сечения.

В ходе определения геометрических параметров для каждого i -го сечения подбирается соотношение стальной и железобетонной части в зависимости от изменения изгибающего момента. Таким образом, полная высота сечения H будет максимальная в зоне опирания пролетного строения и уменьшится по мере приближения к зоне изменения знака изгибающего момента до размеров сечения, полученного при расчете в зоне положительных изгибающих моментов.

На рисунке 3 приняты следующие обозначения: F_p – площадь ж.б. плиты нижнего пояса; h_p – высота ж.б. плиты нижнего пояса; b_p – ширина ж.б. плиты нижнего пояса; F_r – площадь ж.б. ребра нижнего пояса; δ_r – ширина ж.б. ребра нижнего пояса; F_{st} – площадь стальной стенки главной балки; δ_{st} – толщина стальной стенки главной балки; F_{ort} – площадь стальной ортотропной плиты проезжей части; b_n – ширина стального настила; δ_n – толщина стального настила; h_{str} – высота стального продольного ребра ортотропной плиты; δ_{st} – толщина стального продольного ребра ортотропной плиты; y_b – высота железобетонной части сечения; y_s – высота стальной части сечения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты аналитического расчета

К расчету принято консольно-балочное пролетное строение с длиной центрального пролета 109 м (рисунок 4). Консоли пролетного строения приняты равными 22 м согласно расположению зоны нулевых моментов в аналогичной неразрезной системе. Габарит проезда по расчетному пролетному строению Г-20, полная ширина пролетного строения 25,9 м. Поперечные сечения приведены на рисунке 5.

Ближайшим аналогом выбранной конструкции является Ленинградский мост через р. Иртыш в г. Омске, 1957 г. постройки, проект капитального ремонта выполнен в 2022 г.¹¹. Мост имеет сталежелезобетонные консоль-

но-балочное пролетное строение с центральным пролетом 109 м и консолью 11,5 м. Расход стали главных балок – 10,04 т/п.м., расход железобетона – 5,68 м³/п.м.

Класс расчетной временной нагрузки А14 и Н14, нагрузка от пешеходов на тротуарах принимается совместно с нагрузкой А14 и равна 3 кПа.

Одно из преимуществ данной конструкции и методики расчета – экономия материалов за счет их рационального распределения в сталежелезобетонном сечении. Поэтому геометрические и прочностные параметры элементов поперечного сечения принимаются минимальными в соответствии с требованиями нормативных документов¹² и конструктивной необходимости (таблица).

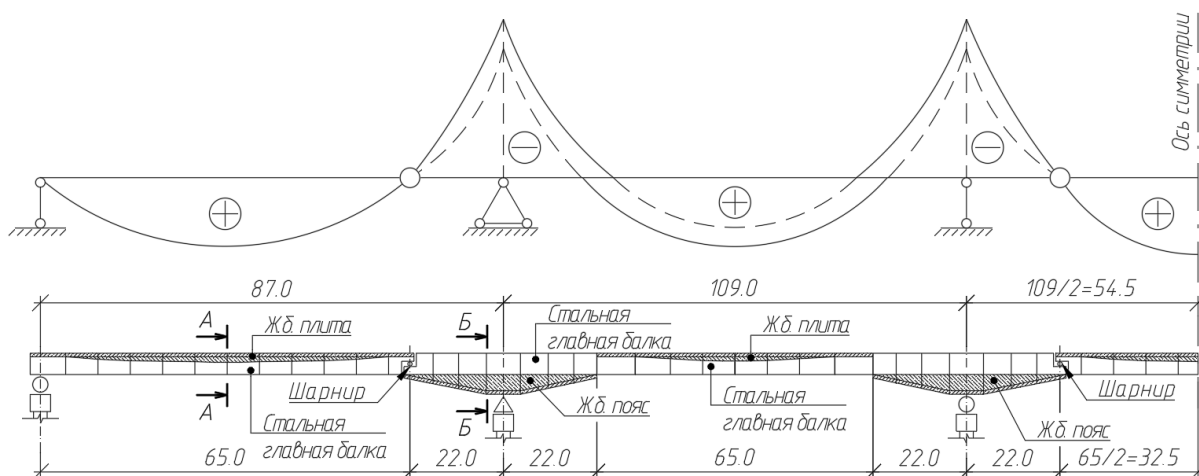


Рисунок 4 – Расчетная схема консольно-балочного пролетного строения
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Design diagram of a cantilever-beam span.
Source: completed by authors.

¹¹ Белокопытов А.С., Уткин В.А., Матвеев С.А., Чучалина В.П. Ремонт мостов города Омска. Ленинградский мост // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, Омск, 23–24 ноября 2023 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. С. 411–416.

¹² СП 35.1330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84. М.: 2011. 287 с.

Таблица

Расчетные параметры элементов поперечного сечения

Источник: составлено авторами.

Table

Cross section element parameters

Source: completed by authors.

Параметр	Сечение	
	Зона положительных моментов (А-А)	Зона отрицательных моментов (Б-Б)
h_p – высота ж.б. плиты, мм	180	300
b_p – ширина ж.б. плиты, мм	3000	2310
δ_r – ширина ж.б. ребра, мм	300	300
δ_{st} – толщина стальной стенки балки, мм	12	12
h_{str} – высота стального продольного ребра ортотропной плиты, мм	180	-
δ_{st} – толщина стального продольного ребра ортотропной плиты, мм	14	-
δ_n – толщина стального настила, мм	14	-
b_n – ширина стального настила, мм	-	3000
b_n – расчетное сопротивление растяжению стали, МПа	295	295
R_{ub} – расчетное сопротивление сжатия железобетона, МПа	16,7	16,7
E_s – модуль упругости стали, МПа	206000	206000
E_b – модуль упругости железобетона, МПа	34500	34500

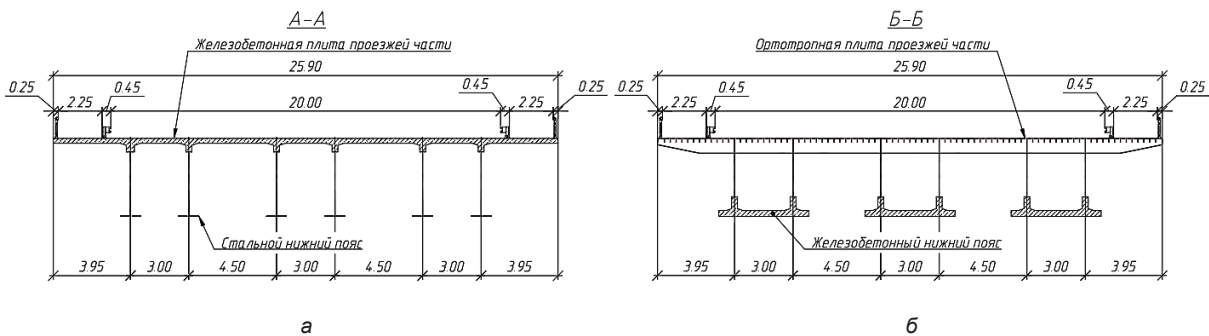


Рисунок 5 – Поперечное сечение проектируемого пролетного строения:
а – в зоне положительного изгибающего момента;
б – в зоне отрицательного изгибающего момента
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Cross section of the designed span:
а – in the zone of positive bending moment;
б – in the zone of negative bending moment.
Source: completed by authors.

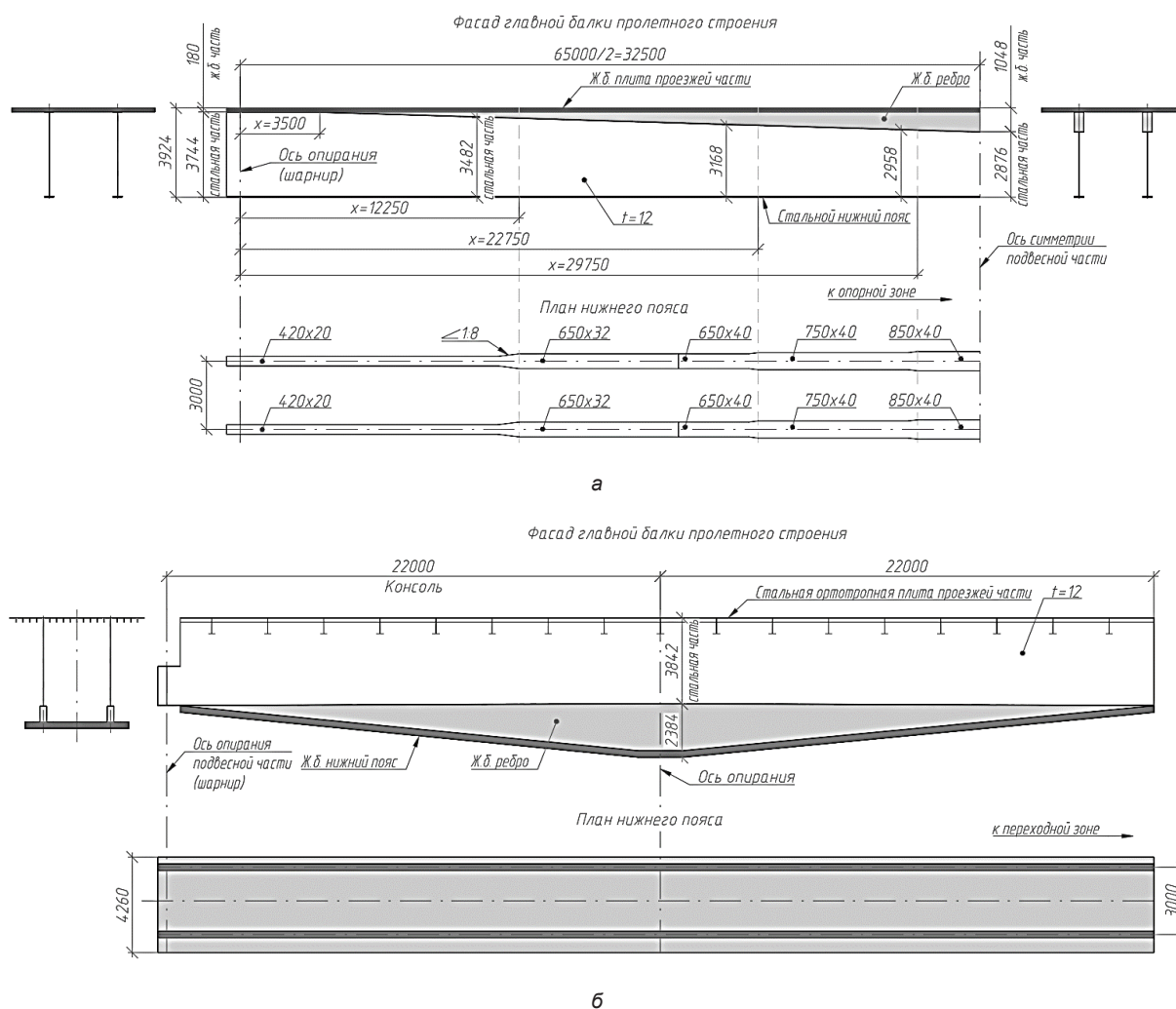


Рисунок 6 – Геометрические параметры пролетного строения по результатам расчета (размеры указаны в миллиметрах):
 а – геометрические параметры сечений зоны положительных изгибающих моментов;
 б – геометрические параметры сечений зоны отрицательных изгибающих моментов
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Geometric parameters of the span according to calculation results (dimensions are in millimeters):
 а – geometric parameters of sections of the zone of positive bending moments;
 б – geometric parameters of sections of the zone of negative bending moments.
 Source: completed by authors.

Методика расчета позволяет, изменяя геометрические параметры каждого i -го сечения, контролировать его напряженное состояние. Результаты расчета геометрических параметров поперечных сечений главных балок пролетного строения представлены на рисунке 6.

Согласно результатам расчета получаем:

1. В зоне положительных изгибающих моментов устраивается железобетонная плита

та проезжей части и стальной нижний пояс. Полная высота сечения составляет 3,924 м. Высота ребра железобетонной плиты при максимальном моменте составляет 1,048 м и уменьшается до 0,180 м к опорной зоне. Высота стальной стенки главной балки при максимальном моменте 2,876 м и увеличивается до 3,744 м к опорной зоне. Нижний пояс главной балки меняется от 0,850x0,040 м до 0,420x0,020 м к зоне опирания.

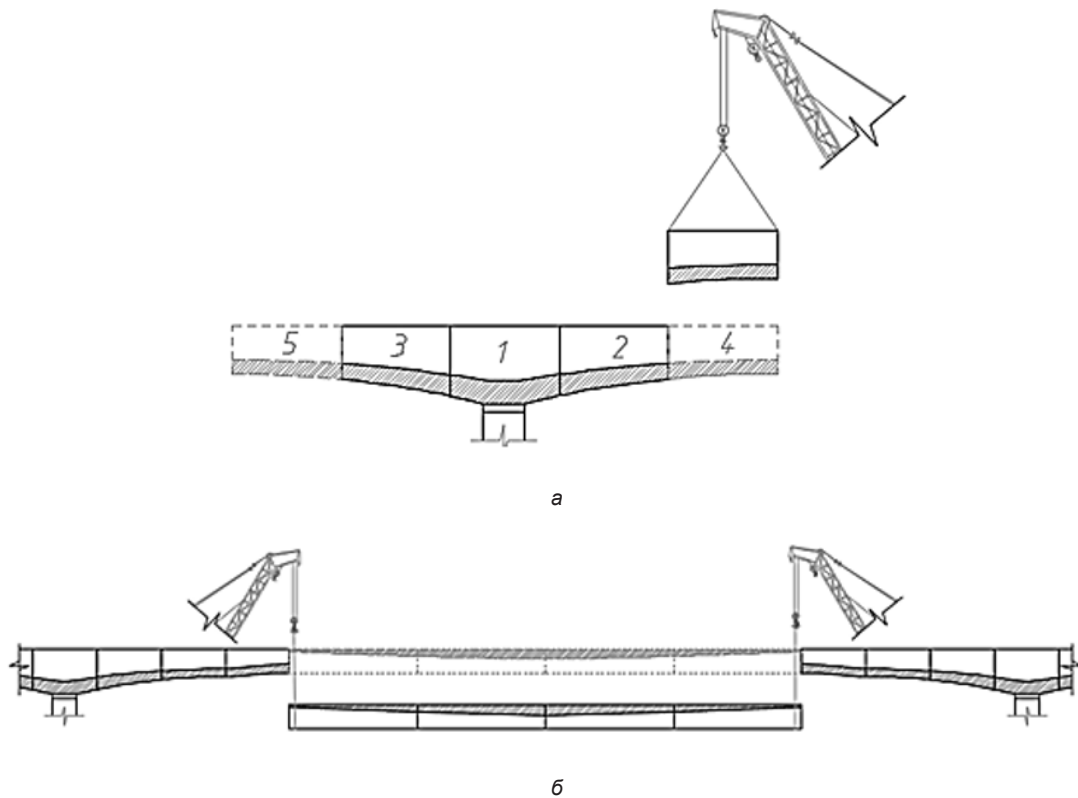


Рисунок 7 – Схемы монтажа пролетного строения:
а – монтаж консольной части;
б – монтаж подвесной части
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Schemes of installation of the span:
a – installation of the console part;
b – installation of the suspended part
Source: completed by authors.

2. В зоне отрицательных изгибающих моментов полная высота сечения переменная, проезд осуществляется по стальной ортотропной плите, а нижний пояс железобетонный. При максимальном моменте высота железобетонной части составляет 2,384 м, а стальной части – 3,842 м. В зонах нулевых моментов высота железобетонной части составляет 0,180 м, а стальной части – 3,744.

Расход стали исследуемого пролетного строения – 6,12 т/п.м., расход железобетона – 6,54 м³/п.м.

МОНТАЖ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ

Изготовление сталежелезобетонных блоков пролетного строения организовывается в непосредственной близости участка строительства, куда с завода металлоконструкций поставляется готовая стальная часть пролетного строения. Бетонирование железобетон-

ной части смежных блоков производится «в отпечаток», для обеспечения плотного обжатия железобетона после монтажа. На монтаже стык железобетонной части обрабатывается герметизирующим клеевым составом. Стык стальной части пролетного строения – фрикционный, на высокопрочных болтах и накладках.

Укрупненные блоки консольной части можно монтировать двумя способами: с применением временных опор, для обеспечения устойчивости конструкции, и с устройством временного анкера на опоре с последующим монтажом блоков с разных сторон (рисунок 7, а).

Укрупненная подвесная часть монтируется целиком в пролет с воды (рисунок 7, б). Монтаж подвесной части пролетного строения может производиться с плавсредства кранами либо с применением технологии Heavy Lifting.

Преимуществом приведенных методов монтажа пролетного строения является отсутствие высотных работ по устройству железобетонной части в пролете и сокращение общего срока производства работ. Также изготовление и монтаж не зависит от сезона производства работ.

Недостатком приведенного способа монтажа является необходимость устройства временного завода железобетонных изделий в непосредственной близости от площадки строительства и применение временных опор у консольной части пролетного строения либо усиление конструкции опоры. Но стоит отметить, что на временном заводе железобетонных изделий возможно организовать изготовление контурных блоков для опор моста, что уменьшит себестоимость опор.

ВЫВОДЫ

В данном исследовании решены следующие задачи:

1. Определена оптимальная статическая схема для расчета сталежелезобетонного пролетного строения моста.

Консольно-балочная схема пролетного строения моста позволяет учесть особенности работы неразрезных и разрезных систем мостов больших пролетов.

2. Разработана методика расчета сталежелезобетонного пролетного строения с разделением материала по нейтральной оси.

Методика расчета сталежелезобетонного пролетного строения позволяет проектировать как разрезные, так и неразрезные системы пролетных строений, состоящих из сталежелезобетонных блоков заводского изготовления. Монтаж таких пролетных строений может осуществляться «целиком», после укрупнительной сборки, или «в навес», что обеспечивает одностадийное включение в совместную работу стальной и железобетонной части.

3. Выполнен аналитический расчет по подбору геометрических параметров поперечных сечений пролетного строения.

Возможность распределить материалы в сечении по их прочностным характеристикам (бетон – сжатие, сталь – растяжение) и контролировать уровень напряжений в каждом сечении пролетного строения позволяет уменьшить расход стали на изготовление пролетного строения.

По результатам аналитического расчета, расход стали исследуемого пролетного строения – 6,12 т/п.м., расход железобетона –

6,54 м³/п.м. В качестве сравнения расход стали главных балок Ленинградского моста через р. Иртыш в г. Омске – 10,04 т/п.м., расход железобетона – 5,68 м³/п.м., что на 39% больше и на 15% меньше исследуемого пролетного строения соответственно.

Перспективы развития работы лежат в детализации конструктивных решений исследуемого пролетного строения и оценки его напряженно-деформированного состояния с применением метода конечных элементов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Козак Н.В. Экспериментальное исследование режима работы гибких штыревых упоров сталежелезобетонного пролетного строения существующего автодорожного моста // Транспортные сооружения. 2022. Т. 9, № 1. DOI 10.15862/07SATS122. EDN CLALTW.

2. Козак Н.В. Комплексный анализ существующих методик проверки выносливости гибких штыревых упоров сталежелезобетонных автодорожных мостов по нормативам ряда стран // Транспортные сооружения. 2021. Т. 8, № 2. С. 10SATS221. URL: <https://t-s.today/10SATS221.html> (дата обращения: 24.12.2021). DOI: 10.15862/10SATS221 EDN: MRLPEF

3. Козлов А.В. Расчет сталежелезобетонных мостов с учетом сдвига плиты по верхнему поясу балки // Строительная механика и конструкции. 2018. № 4. С. 64–71. URL: item.asp?id=36545559 (дата обращения: 24.12.2021). EDN: YPUHVJ

4. Веселов В.В. Применение сталежелезобетонных конструкций в мостовых сооружениях // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20, № 3. С. 633–644. DOI 10.20295/1815-588X-2023-3-633-644. EDN HGPJAF.

5. Мирсаяпов И.Т., Валиев А.Т. Исследование напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок нового типа железнодорожных мостов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 1(63). С. 31–42. DOI 10.52409/20731523_2023_1_31. EDN ECDUWC.

6. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения в строительной практике России // Успехи современной науки. 2017. Т. 4, № 4. С. 205–208. EDN YROOWX.

7. Панова А.С., Сергеев Е.И. Особенности расчета сталежелезобетонных конструкций // Научный взгляд в будущее. 2019. Т. 1, № 14. С. 72–75. DOI 10.30888/2415-7538.2019-14-01-005. EDN CLPEEU.

8. Голованов В.А., Иванов Г.П. Анализ конструктивных решений малых мостов, выполненных из сталежелезобетона // Студенческий. 2019. № 25-1(69). С. 13–16. EDN SOIPXK.

9. Ngoc-Long T., Van-Phuc Ph., Morozov V. Investigating the corrosion initiation process in

reinforced concrete structures under the impact of climate change // *Architecture and Engineering*. 2021. Vol. 6, No. 2. P. 37–44. DOI 10.23968/2500-0055-2021-6-2-37-44. EDN SHOTRV.

10. Pavlov A., Khegay A., Khegay T. Analysis of bending steel fiber reinforced concrete elements with a stress-strain model // *Architecture and Engineering*. 2020. Vol. 5, No. 3. P. 14–21. DOI 10.23968/2500-0055-2020-5-3-14-21. EDN FMJAIK.

11. Johnson R.P. Resistance of stud shear connectors to fatigue // *Journal of Constructional Steel Research*. 2000. T 56. No. 2. pp. 101–116. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X99000826> (дата обращения: 10.12.2021). DOI: 10.1016/S0143-974X(99)00082-6

12. Hassanin A.I., Shabaan H.F., Elsheikh A.I. The Effects of Shear Stud Distribution on the Fatigue Behavior of Steel-Concrete Composite Beams // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020. T 45. No. 10. pp. 8403–8426. Режим доступа: <https://link.springer.com/article/> (дата обращения: 10.12.2021). DOI: 10.1007/s13369-020-04702-4

13. Henderson I.E.J., Zhu X.Q., Uy B., Mirza O. Dynamic behaviour of steel-concrete composite beams with different types of shear connectors. Part I: Experimental study // *Engineering Structures*. 2015. T 130. No. 15. pp. 298–307. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029615005404> (дата обращения: 10.12.2021). DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.08.035

14. Xu C., Sugiura K., Su Q. Fatigue Behavior of the Group Stud Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Bridges. *Journal of Bridge Engineering*. 2018. T 23. No. 8. P. 4018055. Режим доступа: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0001261> (дата обращения: 24.12.2021). DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001261

15. Xue W., Ding M., Wang H., Luo Z. Static Behavior and Theoretical Model of Stud Shear Connectors // *Journal of Bridge Engineering*. 2008. T 13. No. 6. pp. 623–634. Режим доступа: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291084-0702%282008%2913%3A6%28623%29> (дата обращения: 24.12.2021). DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13

16. Wang B., Huang Q., Liu X. Comparison of Static and Fatigue Behaviors between Stud and Perfobond Shear Connectors // *KSCCE Journal of Civil Engineering*. 2019. T 23. No. 1. pp. 217–227. Режим доступа: <https://link.springer.com/article/> (дата обращения: 24.12.2021). DOI: 10.1007/s12205-018-1303-0

17. Steven L.S., Rajan S., Steel bridges with double composite action // *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board*. 1696(1): pp.299–309, January 2000.

18. DU G., Pettersson, L., Karoumi, R., Steel soil composite bridge: an alternative design solution for short-span bridge towards sustainability // *Archives of institute of civil engineering*. 2017. Vol 23. pp. 45–52.

19. Subramanian N., Transportation Infrastructure Needs and Developments // *New Building Materials & Construction World (NBM & CW)*. 2011. Vol.17, No. 3. pp. 106–124.

20. Reese G.A. Innovative Applications of Precast Concrete to Complex Bridge Projects in Colorado // *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2010. 2200(1). DOI: 10.3141/2200-18

21. Уткин В.А. Регулирование положения нейтральной оси при проектировании сечений стале-железобетонных пролетных строений // *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2011. № 4(22). С. 39–42. EDN PBIJVF.

REFERENCES

1. Kozak N.V. Operating regime investigational study of steel-reinforced concrete superstructure flexible pin stops of the existing road bridge. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2022; Vol. 9, No. 1. (In Russ.) DOI 10.15862/07SATS122. EDN CLALTW.

2. Kozak N.V. Comprehensive analysis of existing endurance testing methods of flexible dowel crutches of composite reinforced concrete road bridges according to the standards of a number of countries. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2021; Vol. 8, No. 2: 10SATS221. (In Russ.) Available at: <https://t-s.today/10SATS221.html> (Accessed on: 24.12.2021). DOI: 10.15862/10SATS221. EDN: MRLPEF.

3. Kozlov A.V. Calculation of Steel-Reinforced Concrete Bridges Considering the Shear of the Plate Along the Upper Flange of the Beam. *Stroitel'naja mehanika i konstrukcii*. 2018; No. 4: 64–71. (In Russ.) Available at: item.asp?id=36545559 (accessed: 24.12.2021). EDN: YPUHVJ.

4. Veselov V.V. Application of Steel-Reinforced Concrete Structures in Bridge Constructions. *Journal «Proceedings of Petersburg Transport University»*. 2023; Vol. 20, No. 3: 633–644. (In Russ.) DOI 10.20295/1815-588X-2023-3-633-644. EDN HGPJAF.

5. Mirsayapov I.T., Valiev A.T. Research on the Stress-Strain State of New Type Steel-Reinforced Concrete Beams for Railway Bridges. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 1(63): 31–42. (In Russ.) DOI 10.52409/20731523_2023_1_31. EDN ECDUWC.

6. Babalich V.S., Androsov E.N. Steel-Reinforced Concrete Constructions and Their Prospects for Use in Russian Construction Practice. *Uspehi sovremennoj nauki*. 2017; Vol. 4, No. 4: 205–208. (In Russ.) EDN YROOWX.

7. Panova A.S., Sergeev E.I. Features of Calculating Steel-Reinforced Concrete Structures. *Nauchnyj vzgljad v budushhee*. 2019; Vol. 1, No. 14: 72–75. DOI 10.30888/2415-7538.2019-14-01-005. (In Russ.) EDN CLPEEU.

8. Golovanov V.A., Ivanov G.P. Analysis of Structural Solutions for Small Bridges Made of Steel-Reinforced Concrete. *Studencheskij*. 2019; No. 25-1(69): 13–16. (In Russ.) EDN SOIPXK.

9. Ngoc-Long T., Van-Phuc Ph., Morozov V. Investigating the corrosion initiation process in reinforced concrete structures under the impact of climate change. *Architecture and Engineering*. 2021; Vol. 6, No. 2: 37–44. DOI 10.23968/2500-0055-2021-6-2-37-44. EDN SHOTRV.

10. Pavlov A., Khegay A., Khegay T. Analysis of bending steel fiber reinforced concrete elements with a stress-strain model. *Architecture and Engineering*. 2020; Vol. 5, No. 3: 14–21. DOI 10.23968/2500-0055-2020-5-3-14-21. EDN FMJAIK.

11. Johnson R.P. Resistance of stud shear connectors to fatigue. *Journal of Constructional Steel Research*. 2000; T 56. no 2: 101–116. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X99000826> (accessed: 10.12.2021). DOI: 10.1016/S0143-974X(99)00082-6

12. Hassanin A.I., Shabaan H.F., Elsheikh A.I. The Effects of Shear Stud Distribution on the Fatigue Behavior of Steel-Concrete Composite Beams. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020; T 45. No 10: 8403-8426. Available at: <https://link.springer.com/article/> (accessed: 10.12.2021). DOI: 10.1007/s13369-020-04702-4

13. Henderson I.E.J., Zhu X.Q., Uy B., Mirza O. Dynamic behaviour of steel-concrete composite beams with different types of shear connectors. Part I: Experimental study. *Engineering Structures*. 2015; T 130. No 15: 298–307. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029615005404> (accessed: 10.12.2021). DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.08.035

14. Xu C., Sugiura K., Su Q. Fatigue Behavior of the Group Stud Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Bridges. *Journal of Bridge Engineering*. 2018; T 23. No 8: 4018055. Available at: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0001261> (accessed: 24.12.2021). DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001261

15. Xue W., Ding M., Wang H., Luo Z. Static Behavior and Theoretical Model of Stud Shear Connectors. *Journal of Bridge Engineering*. 2008; T 13. No 6: 623–634. Available at: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291084-0702%282008%2913%3A6%28623%29> (accessed: 24.12.2021). DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13

16. Wang B., Huang Q., Liu X. Comparison of Static and Fatigue Behaviors between Stud and Perfobond Shear Connectors. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2019; T 23. No 1: 217–227. Available at: <https://link.springer.com/article/> (accessed: 24.12.2021). DOI: 10.1007/s12205-018-1303-0

17. Steven L.S., Rajan S., Steel bridges with double composite action. *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board*. 1996(1): pp. 299–309, January 2000.

18. DU G., Pettersson, L., Karoumi, R., Steel soil composite bridge: an alternative design solution for short-span bridge towards sustainability. *Archives of institute of civil engineering*. 2017; Vol 23:45–52.

19. Subramanian N., Transportation Infrastructure Needs and Developments. *New Building Materials &*

Construction World (NBM & CW). 2011; Vol.17, No.3: 106–124.

20. Reese G.A. Innovative Applications of Precast Concrete to Complex Bridge Projects in Colorado. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2010. 2200(1). DOI: 10.3141/2200-18

21. Utkin V.A. Regulation of the Neutral Axis Position in the Design of Steel-Concrete Composite Bridge Sections. *Vestnik SibADI*. 2011; No. 4(22): 39–42. EDN PBIJVF.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Белокопытов А.С. Провел исследование, провел анализ результатов и сформулировал выводы, подготовил публикацию (50%).

Уткин В.А. Автор идеи, сформулировал методику расчета, провел анализ результатов (25%).

Матвеев С.А. Проверил результаты расчетов, провел анализ результатов (25%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Belokopytov A.S. Research conducting, results analyzing and conclusions statement, publication preparation (50%).

Utkin V.A. The author of the idea, calculation method statement and results analyzing (25%).

Matveev S.A. Calculation results verification, results analyzing (25%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Белокопытов Артем Сергеевич – аспирант, старший преподаватель кафедры мостов и тоннелей Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5), инженер-проектировщик ООО ПРОЕКТНО-ИНЖИНИРИНГОВАЯ КОМПАНИЯ «МОСТОВИК», **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-4790-1688>; **SPIN-код:** 1608-5965; e-mail: a.sbel@yandex.ru

Уткин Владимир Александрович – д-р техн. наук, доц. кафедры мостов и тоннелей Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2044-3242>, **SPIN-код:** 4216-7640, e-mail: prof.utkin@mail.ru

Матвеев Сергей Александрович – д-р техн. наук, проф. кафедры мостов и тоннелей Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7362-0399>, **Scopus:** 56297305000; **Researcher ID (WoS):** Y-3137-2018; **SPIN-код:** 8304-1881; e-mail: dfsibadi@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Artem S. Belokopytov – Post-graduate student, senior lecturer of the Bridges and Tunnels Department, Siberian State Automobile and Highway University

(SibADI) (Omsk, 5 Prospekt Mira, 644050), design engineer, OOO MOSTOVIK DESIGN ENGINEERING COMPANY, **ORCID**: <https://orcid.org/0009-0001-4790-1688> **SPIN-code**: 1608-5965; SibADI; e-mail: a.sbel@yandex.ru

Vladimir A. Utkin – Dr. of Sci., Associate Professor, Bridges and Tunnels Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (Omsk, 5 Prospekt Mira, 644050), **ORCID**: <https://orcid.org/0000-0002-2044-3242>, **SPIN-code**: 4216-7640, e-mail: prof.utkin@mail.ru

Sergey A. Matveev – Dr. of Sci., Professor, Bridges and Tunnels Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (Omsk, 5 Prospekt Mira, 644050), **ORCID**: <https://orcid.org/0000-0001-7362-0399>, **Scopus ID**: 56297305000; **Researcher ID (WoS)**: Y-3137-2018; **SPIN code**: 8304-1881; e-mail: dfsibadi@mail.ru

org/0000-0002-2044-3242, **SPIN-code**: 4216-7640, e-mail: prof.utkin@mail.ru