

УДК 624.21.016

Метод продольной надвигки с плавучей опорой металлических комбинированных пролетных строений мостов

П. И. Татаренко, С. В. Чижов, Ю. В. Авдей, А. А. Антонюк

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Татаренко П. И., Чижов С. В., Авдей Ю. В., Антонюк А. А. Метод продольной надвигки с плавучей опорой металлических комбинированных пролетных строений мостов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 685–693. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-685-693

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос о необходимости применения технологии монтажа металлического комбинированного пролетного строения в виде решетчатой фермы с треугольной решеткой и жестким нижним поясом с ездой понизу однопролетных мостов методом продольной надвигки с применением плавучей опоры. Показать значимость и эффективность данного метода. Дать последовательность основным операциям монтажа. Изобразить общую схему надвигки. Обозначить порядок проверки пролетного строения на всех этапах монтажа. Показать методику проверки плавучей опоры по двум группам предельных состояний. **Методы:** Сравнение продольной надвигки с применением плавучей опоры с продольной надвигкой по временным опорам, а также сборкой пролетного строения на временных подмостях. Анализ полученных значений напряжений при проверке пролетного строения на всех этапах монтажа, а также аналитических выражений методики проверки плавучей опоры. **Результаты:** Указаны преимущества продольной надвигки с применением плавучей опоры по сравнению с другими видами монтажа металлического комбинированного пролетного строения. Обозначены основные операции и особенности монтажа металлического комбинированного пролетного строения. Дана общая схема установки обустройств на примере строительства автодорожного моста через реку Пезуапсе, а также даны комментарии к проверке металлического комбинированного пролетного строения. Выражены основные формулы проверки плавучей опоры. **Практическая значимость:** Особенности и преимущества данного метода монтажа металлического комбинированного пролетного строения позволяют упростить строительство однопролетных мостов с данными пролетными строениями, а также повысить экономическую эффективность подобных проектов. Методика проверки плавучей опоры может быть рекомендована к практическому использованию.

Ключевые слова: Метод надвигки с применением плавучей опоры, автодорога, однопролетный мост, комбинированное пролетное строение, металл, технология строительства, проверка плавучей опоры.

Введение

В настоящее время все большее распространение получают однопролетные мосты с комбинированным пролетным строением в виде решетчатой фермы с треугольной решеткой и жестким нижним поясом с ездой понизу.

При строительстве большинства мостов с данным комбинированным пролетным строением были использованы такие варианты сооружения пролетного строения, как сборка пролетного строения на подмостях уже в пролете и метод продольной надвигки по временным опорам.

Однако нужно учитывать множество факторов, которые могут усложнять монтаж. Например, при большой глубине водотока и наличии судоходства экономически неэффективно, а иногда попросту невозможно загромождать русло реки [1].

В данном случае лучшим вариантом монтажа пролетного строения будет являться продольная навивка с применением плавучей опоры.

Причины распространения комбинированных пролетных строений в виде решетчатой фермы с треугольной решеткой и жестким нижним поясом с ездой понизу

Данные пролетные строения, используемые в строительстве автодорожных, а также железнодорожных мостов, имеют существенные достоинства:

– комбинированное пролетное строение в виде решетчатой фермы с треугольной решеткой и жестким нижним поясом с ездой понизу перекрывает большие пролеты по сравнению с железобетонными пролетными строениями [2];

– по сравнению с металлическими или сталежелезобетонными балочными пролетными строениями данные пролетные строения имеют меньшую строительную высоту, что позволяет значительно сократить объем подходов насыпей [3];

– в сравнении с металлическими балочными пролетными строениями, эффективно используются свойства металла, так как в данном пролетном строении, за исключением жесткого нижнего пояса, элементы работают преимущественно на осевые усилия [4];

– архитектурная выразительность, достигаемая строгими геометрическими формами, а также отсутствием стоек и подвесок в комбинированной ферме, делает данный вариант гораздо привлекательнее по сравнению с его «предшественником» — классической фермой [5].

Последовательность работ при продольной навивке с применением плавучей опоры

Данный метод монтажа пролетного строения состоит из таких работ, как:

1. Сборка краном пролетного строения на стапеле.

2. С помощью тяговых и (или) толкающих устройств перемещение пролетного строения в продольном направлении вдоль оси моста и вперед до положения, позволяющего установить плавучую опору под консоль пролетного строения.

3. Балластировка и заведение плавучей опоры под консоль навиваемого пролетного строения.

4. Откачка водного балласта, что позволяет поместить пролетное строение на плавучую опору с одновременной заменой накаточных устройств на каретку с балансиром и демонтажем гидравлических домкратов.

5. Раскрепление плавучей опоры от возможного сноса течением с помощью земляных якорей, якорей адмиралтейского типа, якорей-присосов.

6. Продольная навивка пролетного строения и синхронное перемещение плавучей опоры в направлении навивки с помощью тяговых и (или) толкающих устройств.

7. Фиксация пролетного строения на береговой опоре.

8. Снятие анкеров и освобождение плавучей опоры балластировкой.

9. Помещение пролетного строения на опорные части [6].

Особенности продольной навивки с применением плавучей опоры

Данный вид монтажа пролетного строения помимо преимуществ, описанных выше, имеет ряд особенностей, требующих пристального внимания рабочих, а также высокой их квалификации [7]:

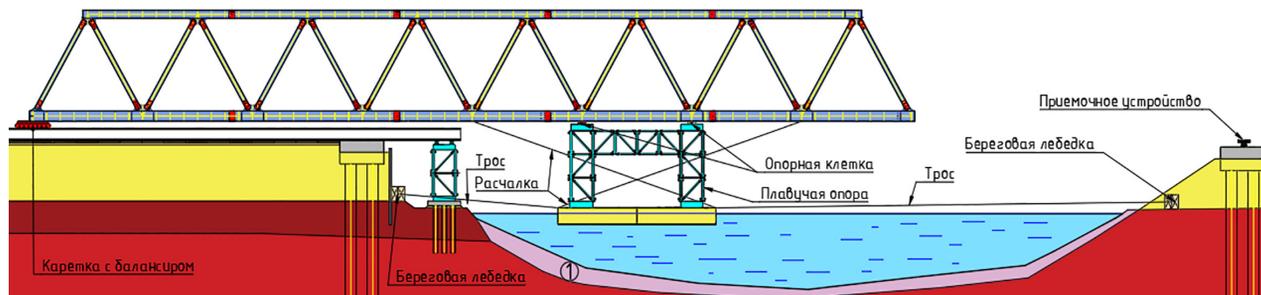


Рис. 1. Общая схема установки устройств при продольной навигации с применением плавучей опоры на примере строительства автодорожного моста через реку Псеузапсе

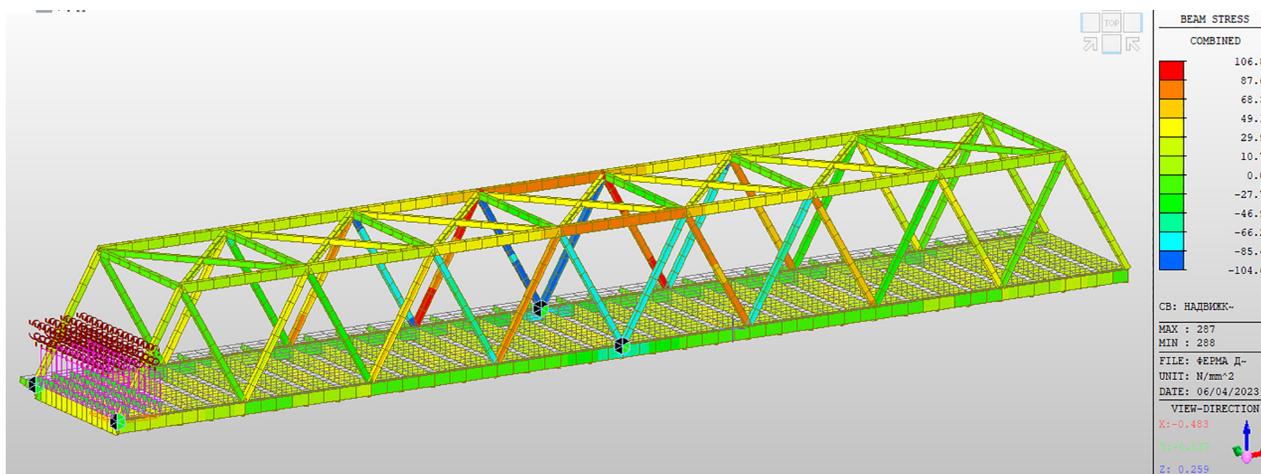


Рис. 2. Эпюра напряжений, когда пролетное строение находится над плавучей опорой

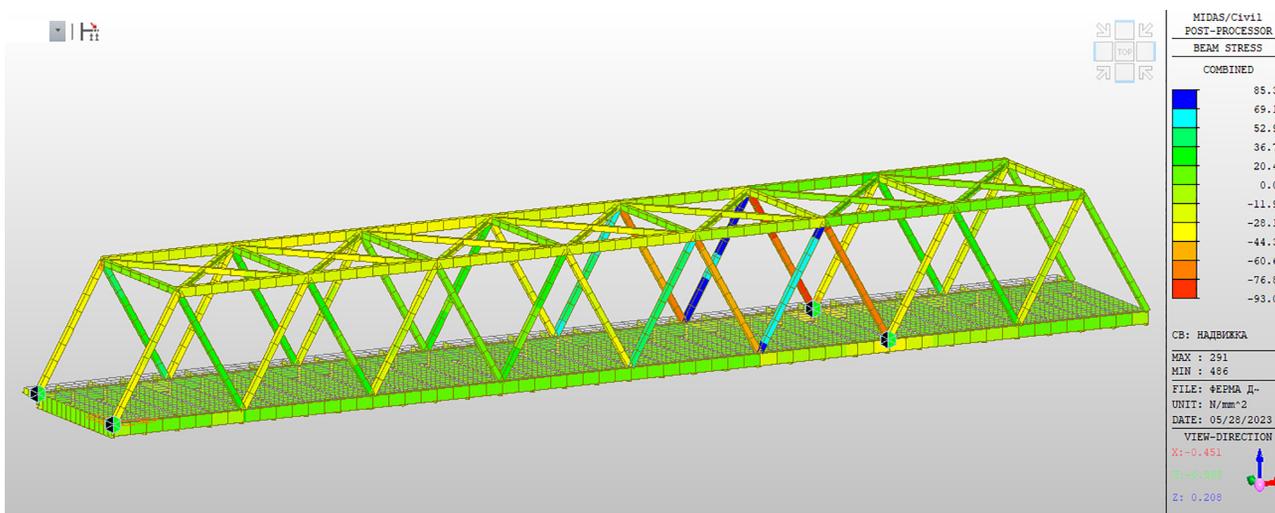


Рис. 3. Эпюра напряжений, когда пролетное строение находится на плавучей опоре и происходит навигация

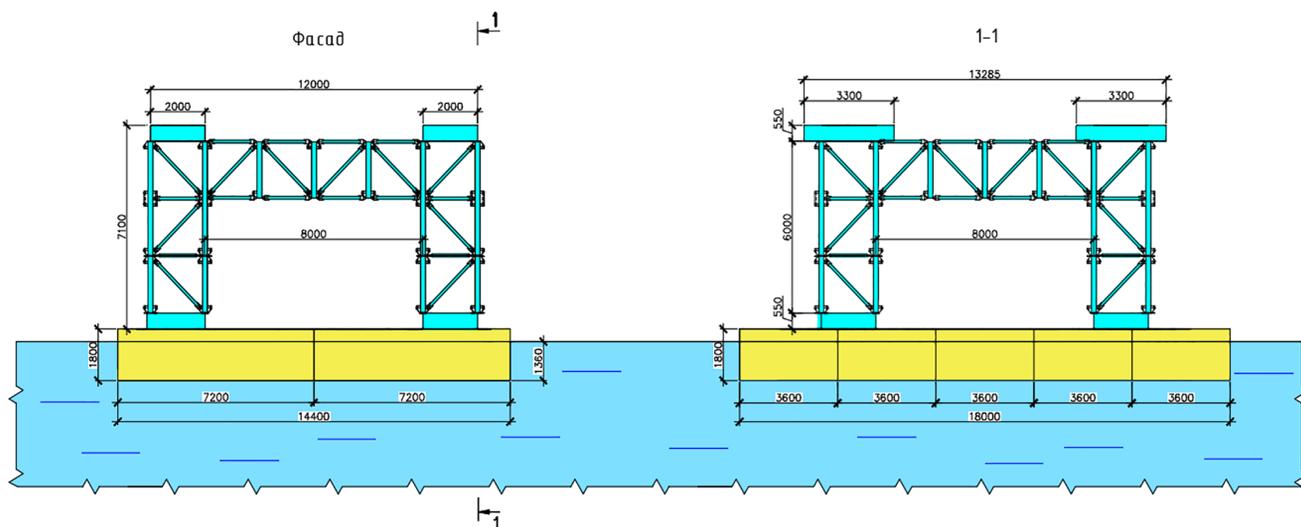


Рис. 4. Конструкция плавучей опоры

- плавучую опору необходимо закреплять установленными на берегу и в реке земляными и адмиралтейскими якорями;
- плавучие опоры должны быть соединены с пролетным строением расчалками, оснащенными винтовыми стяжками;
- во время надвигки с помощью расположенных на плашкоуте лебедок и полиспастов регулируется длина троса, соединяющего плавучую опору и якоря;
- необходимо подводить плавучую опору к пролетному строению и выводить из-под него в направлении вниз по течению;
- одновременная работа толкающих устройств и лебедок, а также перемещение плавучей опоры только в направлении надвигки позволяют минимизировать риск возникновения аварии в ходе монтажа пролетного строения данным методом;
- при надвигке следует корректировать объем балласта плавучей опоры для компенсации возрастающей на нее нагрузки от веса консоли пролетного строения. При этом накаточное устройство должно обеспечивать возможность вертикальных перемещений конца пролетного строения, находящегося на берегу, что достига-

ется использованием кареток, выполненных по балансирной схеме.

Помимо прочего, необходимо, чтобы была выполнена полная проверка прочности пролетного строения на всех этапах монтажа. На рис. 2 и 3 представлена проверка по напряжениям элементов комбинированной фермы с помощью программного комплекса MIDAS Civil на примере строительства автодорожного моста через реку Псезуапсе.

Проверка условия прочности:

$$\sigma_{\max} = 104,85 \text{ МПа} < [\sigma] = 295 \text{ МПа.}$$

Условие выполняется.

Проверка условия прочности:

$$\sigma_{\max} = 93,03 \text{ МПа} < [\sigma] = 295 \text{ МПа.}$$

Условие выполняется.

На рис. 4 представлена конструкция плавучей опоры при строительстве моста через реку Псезуапсе. Плавучая опора состоит из понтонов типа КС-63 и элементов МИК-С и МИК-П [8].

Порядок проверки плавучей опоры

При продольной надвигке с применением плавучей опоры выполняется проверка плавучей опоры [9]:

1. По первому предельному состоянию (на расчетные нагрузки):

- *Плавуемость*:

$$\gamma_{\text{в}} \sum V_{\text{п}} \geq \sum Q \gamma,$$

где $\gamma_{\text{в}}$ — удельный вес воды, кН/м³;

$\sum V_{\text{п}}$ — предельное водоизмещение плавсистемы при максимальной осадке;

$\sum Q$ — расчетный вес плавучей системы, кН(тс), равный сумме расчетных весов:

- пролетного строения;
- плавучих опор Q ;
- регулировочного и остаточного балласта

$$Q_{\text{рег}} + Q_{\text{ост}};$$

$\gamma = 1,25$ — коэффициент надежности по назначению.

$$Q_{\text{рег}} = LBh_{\text{рег}} \gamma;$$

$$Q_{\text{ост}} = LBh_{\text{ост}};$$

где L — длина плашкоута плавучей опоры, м;

B — ширина плашкоута плавучей опоры, м.

- *Остойчивость*, способность выведенной действием внешних сил из положения равновесия опоры возвращаться в него после прекращения действия этих сил:

$$\rho - a_c > 0,$$

где ρ — метацентрический радиус, м;

a_c — расстояние от центра водоизмещения до центра тяжести системы.

- *Прочность* плашкоута и надстройки.

Расчет прочности *надстройки* плавучей опоры выполняется по аналогии с расчетом временных опор для полунавесного монтажа.

Нагрузка на одну стойку надстройки:

$$N_{\text{ст}} = \frac{P + Q_{\text{н}}}{n_{\text{ст}}} \pm \frac{\sum M_w + Pe}{\sum y_i^2} \cdot y_{\text{max}} < [N_{\text{ст}}],$$

где P — расчетный вес пролетного строения;

$Q_{\text{н}}$ — расчетный вес надстройки;

$n_{\text{ст}}$ — количество стоек надстройки плавучей опоры.

$[N_{\text{ст}}]$ — предельная нагрузка на стойку (для МИК-С равна 1000 кН);

y_i — ордината поперек оси перевозимого пролетного строения от оси i -й стойки до центра стоечного поля надстройки плавучей опоры, м;

e — эксцентриситет (возможное смещение) положения пролетного строения относительно центра стоечного поля, м;

$$\sum M_w = W_1 h_1 + W_2 h_2,$$

здесь W_1, W_2 — воздействие ветра, приходящееся соответственно на перевозимое пролетное строение и надстройку, кН;

h_1, h_2 — расстояние от центра тяжести пролетного строения и надстройки до низа последней на палубе, м.

Прочность *плашкоута* плавучей опоры проверяется как прочность пластинки на упругом основании.

Строятся эпюры поперечной силы Q и изгибающего момента M , после чего максимальные значения усилий сравниваются с предельно допустимыми по рис. 5.

Порядок построения эпюр:

1) приближенно определяется интенсивность гидростатического давления воды по днищу плашкоута по формуле:

$$q = \frac{\sum P}{LB},$$

где $\sum P$ — суммарная расчетная вертикальная нагрузка, приходящаяся на плавучую опору, включая балласт;

L и B — длина и ширина плашкоута плавучей опоры.

- 2) строится эпюра нагрузок на судно;
 3) определяются ординаты эпюры поперечной силы Q как для консольной балки длиной $L/2$:

$$y_1 = ql_1 \text{ и т. д.}$$

- 4) ординаты эпюры моментов M в любом сечении находят как площадь эпюры Q слева от рассматриваемого сечения:

$$\eta_1 = \frac{y_1 l_1}{2},$$

$$\eta_2 = \frac{y_1 l_1 + (y_1 + y_2) l_2}{2}.$$

2. По второму предельному состоянию (на нормативные нагрузки):

- Объем водного балласта с учетом деформаций и допустимых осадок плавучей системы:

$$V = V_{\text{раб}} + V_{\text{рег}} + V_{\text{ост}},$$

где $V_{\text{раб}}$ — объем рабочего балласта, м³;

$V_{\text{рег}}$ — объем регулировочного балласта, м³;

$V_{\text{ост}}$ — объем остаточного балласта, м³.

- Осадка и сухой борт. Осадка плавучей опоры определяется по формуле:

$$t = \frac{\sum Q}{k_b \sum \omega},$$

где $\sum Q$ — приходящиеся на плавучую опору нагрузки, кН(тс);

$\sum \omega$ — площадь плавучей опоры по ватерлинии;

k_b — коэффициент полноты водоизмещения.

Сухой борт для плашкоутов из понтонов КС:

$$\Delta = H_{\text{п}} - t \frac{L}{2} \sin \varphi \geq 0,2 \text{ м,}$$

где $H_{\text{п}}$ — высота понтона, м;

L — длина плашкоута, м;

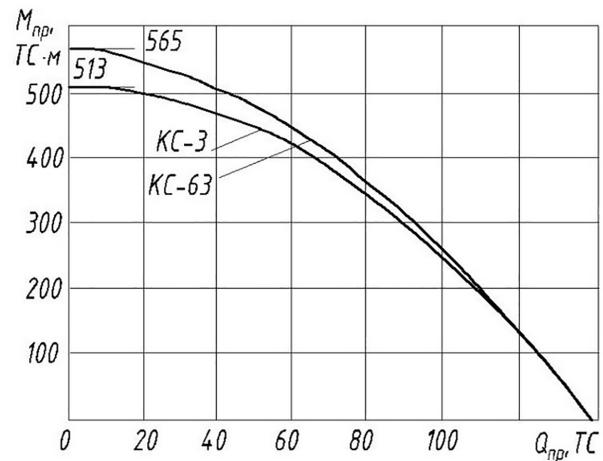


Рис. 5. График предельных усилий на понтон при изгибе в плоскости бортов от местной нагрузки при высоте понтона 1,8 м

$$\sin \varphi = \frac{\sum M (1 + \mu)}{\sum Q n (\rho - a_c)},$$

где $\sum M = W_1 h_1 + W_2 h_2 + W_3 h_3$;

$$\rho = \frac{J - \sum i}{V},$$

здесь J — момент инерции площади плашкоута плавучей опоры (в уровне ватерлинии) относительно оси ее наклона, м⁴;

$\sum i$ — моменты инерции понтонов с водным балластом относительно их собственных осей, м⁴;

V — объем погруженной части опор плавучей системы или отдельной опоры, м³;

a_c — расстояние от центра тяжести системы до центра водоизмещения,

$$a_c = \frac{Q_1 a_1 + Q_2 a_2 + Q_3 a_3}{Q_1 + Q_2 + Q_3},$$

здесь Q_1 — вес перевозимого ПС;

Q_2 — вес надстройки;

Q_3 — вес плашкоута с учетом водного балласта;

a_1, a_2, a_3 — расстояние от центра водоизмещения до центра тяжести пролетного строения, надстройки временной опоры и плашкоута с учетом водного балласта, м [10].

Заключение

1. Монтаж комбинированного пролетного строения в виде решетчатой фермы с треугольной решеткой и жестким нижним поясом с ездой понизу при большой глубине реки и наличии судоходства целесообразнее выполнять продольной надвижкой с применением плавучей опоры, поскольку в данном методе отсутствуют работы по сооружению временных опор, а плавучая опора является подвижной, что позволяет полностью не перекрывать русло реки и обеспечивать судоходство на момент строительства.

2. Следует отметить высокие требования к квалификации рабочих, осуществляющих монтаж пролетного строения, так как необходимо обеспечивать неподвижное положение пролетного строения относительно плавучей опоры и осуществлять постоянный контроль за положением пролетного строения на плавучей опоре. Помимо прочего, необходимо выполнить проверку плавучей опоры по двум группам предельных состояний.

3. Монтаж пролетного строения производится исключительно в теплое время года, так как наличие льда в реке полностью ограничивает применение данного метода.

4. В процессе монтажа пролетного строения необходимо учитывать такие особенности, как достаточная глубина воды в реке, небольшая скорость течения воды в реке и небольшая сила ветра поперек оси моста.

5. Использование данного метода сооружения пролетного строения, в силу его достоинств и особенностей, возможно и на других проектах мостов с аналогичными пролетными строениями, а также схожими геологическими и гидроло-

гическими условиями, что позволит отказаться от временных опор, а значит, получить экономическую выгоду при строительстве данным методом.

Библиографический список:

1. Вайчулис А. Ю. Тенденции и перспективы инвестиционного процесса в строительстве / А. Ю. Вайчулис, В. В. Жукова, Б. В. Волков // Перспективы развития строительного комплекса. — 2015. — № 1. — С. 135–140.
2. Томилов С. Н. Особенности деформаций главных балок железобетонных пролетных строений автодорожных мостов при их усилении внешней арматурой / С. Н. Томилов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2020. — № 3. — С. 151–158.
3. Гречухин В.А., Лосев А.Ю. Исследование процесса надвижки сталежелезобетонного пролетного строения больших мостов / В. А. Гречухин, А. Ю. Лосев // Наука и техника. — 2017. — № 6. — С. 485–492.
4. Смирнов А. Н. Механические свойства длительно работающих сталей и природа предела текучести / А. Н. Смирнов // Технология металлов. 2004. — С. 35–42.
5. Протасов К. Г. Другие виды мостов комбинированных систем / К. Г. Протасов // Металлические мосты. — М.: Транспорт, 1973. — С. 321–332.
6. Устройство металлических пролетных строений автодорожных мостов: СТО НОСТРОЙ 2.29.160—2014. — М.: СОЮЗДОРСТРОЙ, 2016. — 238 с.
7. Софронов Д. С. Качество трудового ресурса строительной отрасли / Д. С. Софронов // Вестник МГСУ. — 2012. — № 3. — С. 159–163.
8. Науменко А. А. Создание модели процесса плавучих опор при строительстве в водных условиях / А. А. Науменко, И. Л. Благовидова, А. В. Пьянов и др. // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № S2. — С. 239–247.
9. Специальные вспомогательные сооружения и устройства для строительства мостов: СТО 136—2009. — М.: Институт Гипростроймост, 2009. — 301 с.
10. Смирнов В. Н. Вспомогательные сооружения для строительства мостов / В. Н. Смирнов. — СПб.: ПГУПС, 2004. — 74 с.

Дата поступления: 25.07.2023

Решение о публикации: 26.08.2023

Контактная информация:

ТАТАРЕНКО Павел Игоревич — аспирант;
pavel-tatarenko99@mail.ru

ЧИЖОВ Сергей Владимирович — канд. техн.
наук, доц.; sergchizh@yandex.ru

АВДЕЙ Юлия Владимировна — канд. пед. наук,
доц.

АНТОНЮК Анатолий Анатольевич — инженер
кафедры «Мосты»; aaa.12.03.1992@mail.ru

The Incremental Launching Method with a Floating Support of Metal Combined Bridge Superstructures

P. I. Tatarenko, S. V. Chizhov, Y. V. Avdey, A. A. Antonyuk

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Tatarenko P. I., Chizhov S. V., Avdey Y. V., Antonyuk A. A. The Incremental Launching Method with a Floating Support of Metal Combined Bridge Superstructures // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 685–693. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-685-693

Summary

Purpose: To consider the necessity of applying the erection technology of metal combined superstructure in the form of a lattice truss with a triangular lattice and a rigid bottom chord with driving underneath single span bridges by the incremental launching method with the use of floating support. To show the significance and efficiency of this method. To give the sequence of the main installation operations. To draw a general scheme of launching. To outline the procedure for checking the superstructure at all stages of erection. To show the method of checking the floating support according to two groups of limit states. **Methods:** Comparison of incremental launching using a floating support with incremental launching using auxiliary supports, as well as construction of the span on falsework. Analysis of the stress values obtained during the inspection of the superstructure at all stages of erection, as well as of the analytical expressions of the floating support inspection methodology. **Results:** The advantages of the incremental launching with the use of floating support in comparison with other types of installation of metal combined superstructure are specified. The main operations and features of metal combined superstructure erection are outlined. The general scheme of installation of facilities is given on the example of construction of the highway bridge over the river Psezuapse, as well as comments on the verification of the metal combined superstructure are given. The basic formulas for checking the floating support are expressed. **Practical significance:** Features and advantages of this method of installation of metal combined superstructure will simplify the construction of single-span bridges with the superstructure of this kind, as well as increase the economic efficiency of such projects. The method of floating support testing can be recommended for practical use.

Keywords: The incremental launching method with the use of floating support, highway, single-span bridge, combined superstructure, metal, construction technology, floating support inspection.

References

1. Vaychulis A. Yu., Zhukova V. V., Volkov B. V. Tendentsii i perspektivy investitsionnogo protsessa v stroitel'stve [Trends and prospects of the investment process in construction]. *Perspektivy razvitiya*

stroitel'nogo kompleksa [Prospects for the development of the construction complex]. 2015, Iss. 1, pp. 135–140. (In Russian)

2. Tomilov S. N. Osobennosti deformatsiy glavnykh balok zhelezobetonnykh proletnykh stroeniy avto-

dorozhnykh mostov pri ikh usilenii vneshney armaturoy [Features of deformations of the main beams of reinforced concrete spans of road bridges when they are reinforced with external reinforcement]. *Vestnik Inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta* [Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University]. 2020, Iss. 3, pp. 151–158. (In Russian)

3. Grechukhin V. A., Losev A. Yu. Issledovanie protsessa nadvizhki stalezhelezobetonnoy proletnoy stroeniya bol'shikh mostov [Investigation of the sliding process of the steel-reinforced concrete superstructure of large bridges]. *Nauka i tekhnika* [Science and Technology]. 2017, Iss. 6, pp. 485–492. (In Russian)

4. Smirnov A. N. Mekhanicheskie svoystva dlitel'no rabotayushchikh staley i priroda predela tekuchesti [Mechanical properties of long-term steels and the nature of the yield point]. *Tekhnologiya metallov* [Technology of metals]. 2004, pp. 35–42. (In Russian)

5. Protasov K. G. Drugie vidy mostov kombinirovannykh sistem [Other types of bridges of combined systems]. *Metallicheskie mosty* [Metallic bridges]. Moscow: Transport Publ., 1973, pp. 321–332. (In Russian)

6. *Ustroystvo metallicheskiykh proletnykh stroeniy avtodorozhnykh odezhd: STO NOSTROY 2.29.160—2014* [Arrangement of metal span structures of road pavements: STO NOSTROY 2.29.160—2014]. Moscow: SOYuZDORSTROY Publ., 2016, 238 p. (In Russian)

7. Sofronov D. S. Kachestvo trudovogo resursa stroitel'noy otrasli [The quality of the labor resource of the construction industry]. *Vestnik MGSU* [Vestnik MGSU]. 2012, Iss. 3, pp. 159–163. (In Russian)

8. Naumenko A. A., Blagovidova I. L., Pyanov A. V. et al. Sozdanie modeli protsessa plavuchikh opor pri stroitel'stve v vodnykh usloviyakh [Creation of a process model for floating supports during construction in water conditions]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Proceedings of the Krylov State Scientific Center]. 2019, Iss. S2, pp. 239–247. (In Russian)

9. *Spetsial'nye vspomogatel'nye sooruzheniya i ustroystva dlya stroitel'stva mostov: STO 136—2009* [Special auxiliary structures and devices for the construction of bridges: STO 136—2009]. Moscow: Institut Giprostroykost Publ., 2009, 301 p. (In Russian)

10. Smirnov V. N. *Vspomogatel'nye sooruzheniya dlya stroitel'stva mostov* [Auxiliary facilities for the construction of bridges]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2004, 74 p. (In Russian)

Received: July 25, 2023

Accepted: August 26, 2023

Author's information:

Pavel I. TATARENKO — Postgraduate Student;
pavel-tatarenko99@mail.ru

Sergey V. CHIZHOV — PhD in Engineering,
Associate Professor; sergchizh@yandex.ru

Yulia V. AVDEY — PhD in Pedagogy, Associate
Professor

Anatoly A. ANTONYUK — Engineer of the
Department “Bridges”; aaa.12.03.1992@mail.ru