

УДК 624.21.016

Конструктивно-технологический аспект возведения сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста через реку Ветлугу

Ю. Н. Зуев, 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: Зуев Ю. Н., Чижов С. В., Авдей Ю. В., Антонюк А. А. Конструктивно-технологический аспект возведения сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста через реку Ветлугу // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 931–942. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-931-942

Аннотация

Цель: Рассмотреть конструктивно-технологические особенности возведения сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста через реку Ветлугу. Рассмотреть вопросы создания расчетной модели в программном комплексе Midas Civil с учетом представленных требований для удовлетворения требований ГОСТ и СП. Привести подробный анализ напряженно-деформированного состояния модели на основе расчета созданной модели. **Методы:** Анализ конструкции и выделение основных параметров; сравнение расчетных моделей, полученных с учетом стадийности бетонирования монолитной железобетонной плиты проезжей части и без учета стадийности работ. **Результаты:** Произведен анализ напряженно-деформированного состояния, и рассмотрены конструктивно-технологические особенности возведения автодорожного моста через р. Ветлугу. Установлено, что напряжения в металлических главных балках значительно возрастают в сравнении с моделью, не учитывающей стадийность возведения. Совместная работа сталежелезобетонного сечения начинается только после набора прочности монолитной железобетонной плиты проезжей части. Установлено, что развитие трещин в бетоне в опорных зонах, вызванных отрицательными моментами, может быть учтено снижением модуля упругости бетона в приопорных зонах в 8 раз. Произведен анализ изменения напряжений и деформаций в конструкции по стадиям. Напряжения и деформации, возникающие в конструкции при ее возведении, при расчете по стадиям «наследуются» от одного этапа к другому. **Практическая значимость:** Показаны способы создания достоверной расчетной модели сталежелезобетонных пролетных строений, отражающей действительный характер работы конструкции как на этапе сооружения, так и на этапе эксплуатации. Описанные в статье методы могут быть рекомендованы для создания расчетной модели в программном комплексе Midas Civil с учетом представленных требований для удовлетворения требований ГОСТ и СП, а также помогут избежать аварий на всех этапах жизненного цикла сооружения.

Ключевые слова: Сталежелезобетонное пролетное строение, автодорога, многопролетный мост, расчетная модель, напряженно-деформированное состояние, сталежелезобетон.

Актуальность работы

Как показывает практика, существуют случаи аварий при строительстве и эксплуатации мостовых переходов со сталежелезобетонными пролетными строениями, расчет которых был выполнен без учета стадийности возведения [1]. Именно поэ-

тому важнейшим условием проектирования сталежелезобетонных пролетных строений мостов является учет стадий их сооружения. Расчеты по этапам позволяют получить более точное представление о напряженно-деформированном состоянии конструкции на различных стадиях ее строительства.

При проведении расчетов по этапам учитываются последовательность и динамика выполнения различных технологических операций процесса строительства, таких как укладка бетона, предварительное напряжение арматуры или устройство мостового полотна. Каждый этап имеет свою особенность и может вызвать изменения в напряженно-деформированном состоянии конструкции.

С помощью метода расчета по этапам можно оценить поведение конструкции при каждом этапе возведения и определить критические фазы, которые требуют дополнительного контроля или корректировок проекта. Это позволяет инженерам прогнозировать возможные деформации и напряжения в конструкции на всех этапах жизненного цикла сооружения для обеспечения соответствия требованиям безопасности и надежности.

В целом учет стадийности расчета при проектировании сталежелезобетонных пролетных строений мостов является важным шагом для получения достоверной картины напряженно-деформированного состояния и обеспечения безопасности конструкции.

При проектировании автодорожного моста через реку Ветлугу необходимо было учесть современные требования к расчету сталежелезобетонных пролетных строений. Для этого производился расчет с использованием расчетного программного комплекса.

Объект исследования — сталежелезобетонные пролетные строения автодорожного моста через реку Ветлугу.

Предмет исследования — напряженно-деформированное состояние пролетных строений в ходе процесса монтажа.

Целью исследования является создание рекомендаций по расчету сталежелезобетонных пролетных строений.

Задачами работы являются:

– проведение анализа существующих требований нормативной документации и их учета при

создании расчетной модели в программном комплексе;

– создание расчетной модели, отражающей стадийность расчета сталежелезобетонных пролетных строений автодорожного моста через реку Ветлугу.

При написании статьи применялись общелогические методы **научного исследования**: анализ, классификация, абстрагирование. Анализ производился для детального разбора данных с целью выявления ключевых элементов, которые могут помочь в понимании объекта исследования. Классификация помогла систематизировать информацию и провести анализ в рамках определенных параметров. Абстрагирование позволило сосредоточиться на самом существенном и развивать более глубокое понимание объекта исследования, игнорируя незначительные детали. Для получения картины напряженно-деформированного состояния объекта применялось моделирование конструкции с использованием метода конечных элементов в программном комплексе Midas Civil.

Описание конструкции

Мостовое сооружение через р. Ветлугу располагается в створе автомобильной дороги общего пользования регионального значения Костромской области Урень — Шарья — Никольск — Котлас на пересечении участка Шарья — Пыщуг с рекой Ветлугой.

Мостовое сооружение неразрезное балочное сталежелезобетонное, в поперечном сечении состоит из двух стальных главных балок коробчатого сечения, объединенных между собой стальными поперечными балками двутаврового сечения и ЖБ-плитой проезда (через гибкие стальные упоры) (рис. 1). Расстояние между осями коробчатых балок постоянное — 6,2 м. Высота пролетного строения в середине пролета — 3,38 м. Стыки главных балок болтосварные: стенка на высокопрочных болтах, пояса на сварке. Основ-

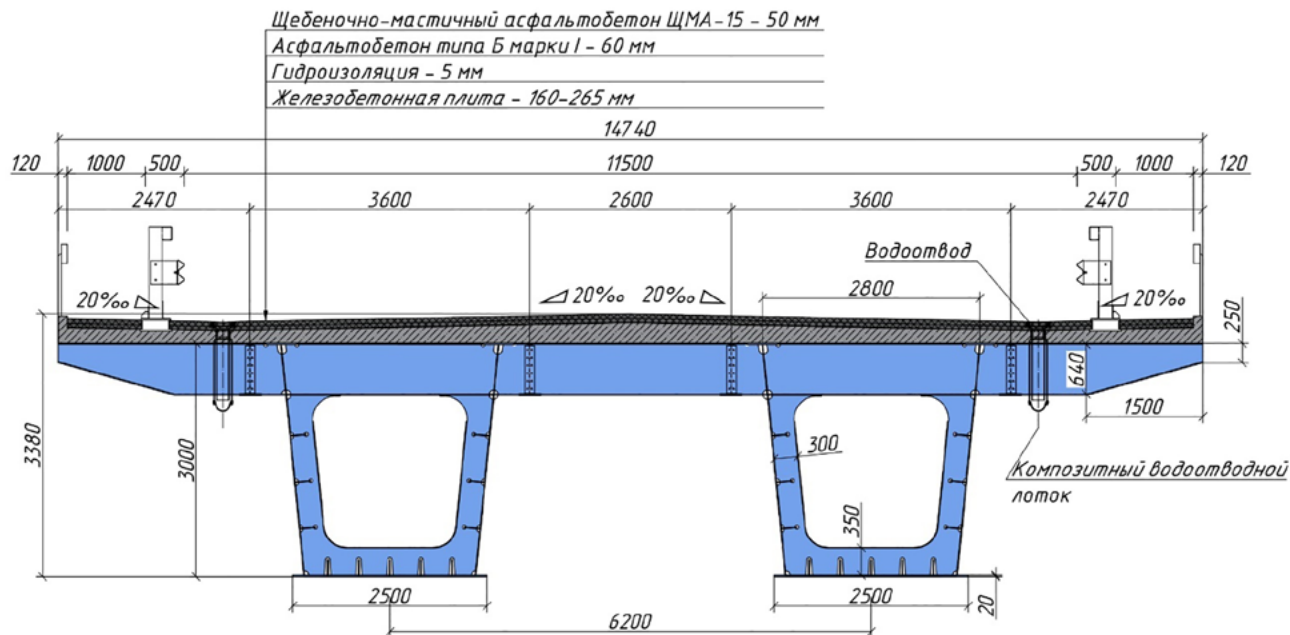


Рис. 1. Поперечное сечение пролетного строения

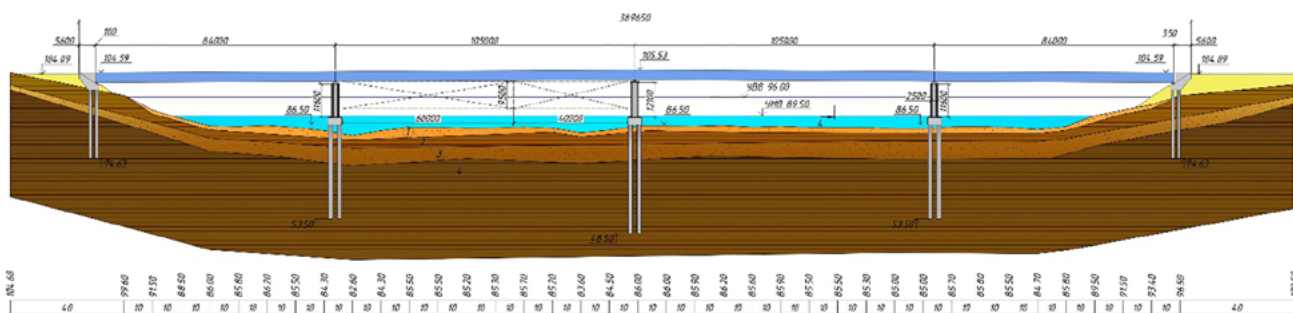


Рис. 2. Общий вид моста

ные металлоконструкции изготавливаются из низколегированного проката для мостостроения из стали марки 10ХСНД.

Устои обсыпные. Фундаменты крайних опор свайные, сваи объединены монолитным железобетонным ростверком. Сваи буронабивные диаметром 1,0 м.

Промежуточные опоры бетонные, монолитные. Фундаменты промежуточных опор свайные, сваи объединены монолитным железобетонным ростверком. Сваи буронабивные диаметром 1,5 м.

Ростверки, оголовки, шкафные стенки изготовлены из монолитного железобетона.

Схема моста: 42,0 + 73,5 + 73,5 + 73,5 + 42,0 м. Общая длина мостового перехода — 388,85 м (рис. 2).

Габарит проезжей части — Г-11,5 + 2 × 1,0.

Опираие пролетного строения на промежуточные опоры и устои осуществляется посредством шарово-сегментных опорных частей.

Основные объемы работ и материалов для возведения моста сведены в табл. 1.

Железобетонная плита выполнена из тяжелого бетона В35 F300 W12 (по ГОСТ 26633—2015). Для армирования железобетонной плиты применяется арматура классов А240, А400 (по ГОСТ 5781—82).

Создание расчетной модели

Вес пролетного строения — 41 069,69 кН (нагрузка собрана автоматически с помощью программного комплекса MIDAS).

Таблица 1. Объемы работ

Наименование работ	Ед. изм.	Кол-во
Устои		
Устройство буронабивных свай при диаметре ствола до 1,5 м, $\varnothing 1,0$ м	м ³	510
Сооружение опор выше обреза фундамента из монолитного железобетона	м ³	340
Промежуточные опоры		
Устройство буронабивных свай при диаметре ствола до 1,5 м, $\varnothing 1,5$ м	м ³	2625
Сооружение монолитного ЖБ-ростверка	м ³	750
Сооружение опоры выше обреза фундамента из монолитного железобетона бетона	м ³	1280
Пролетные строения		
Изготовление и монтаж (надвижка) сплошнотечатых неразрезных пролетных строений пролетом до 100 м	т	1275
Устройство железобетонной плиты, включенной в совместную работу с главными балками без предварительного напряжения	м ³	1135
Устройство асфальтобетонного покрытия	м ²	5570

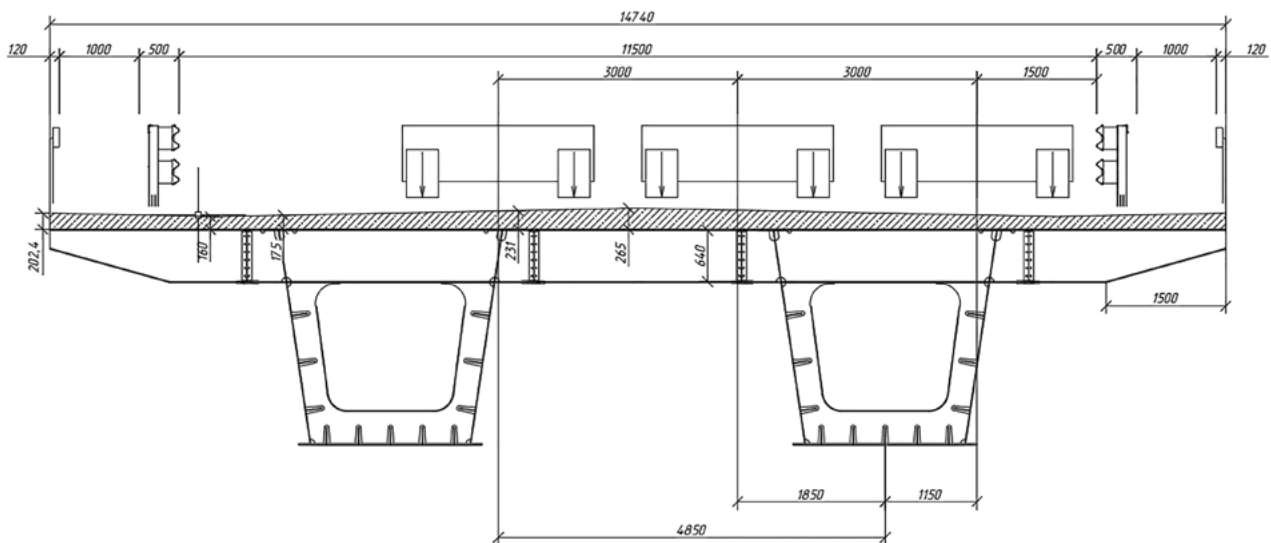


Рис. 3. Схема загрузки поперечного сечения полосами нагрузки АК

Собственный вес задается в программе в зависимости от свойств материала, из которого выполнен элемент. Программа автоматически определяет собственный вес и прикладывает нагрузку.

Вес дорожной одежды — 2,48 кН/м². Асфальтобетон прикладывается на всю поверхность моста, так как расположен по всей плоскости моста и определяется в зависимости от высоты асфальтобетонного покрытия (0,11 м).

Временная вертикальная нагрузка [2, п. 6.12] — максимальное количество полос движения, помеща-

ющихся на мосту, — 3 шт. Каждая из полос загружается нагрузкой А14. Временная нагрузка с классом нагрузки А14 задается в программе при помощи раздела Moving loads. Расстановка тележек производится в соответствии с п. 6.12 СП35.13330.2017 (рис. 3). В программе задаются коэффициенты надежности, коэффициенты поперечной установки в зависимости от количества тележек и класса нагрузки, в нашем случае класс нагрузки А14.

Сечения главных балок задаются через редактор сечений, поперечные балки задаются через свойства сечений (рис. 4).

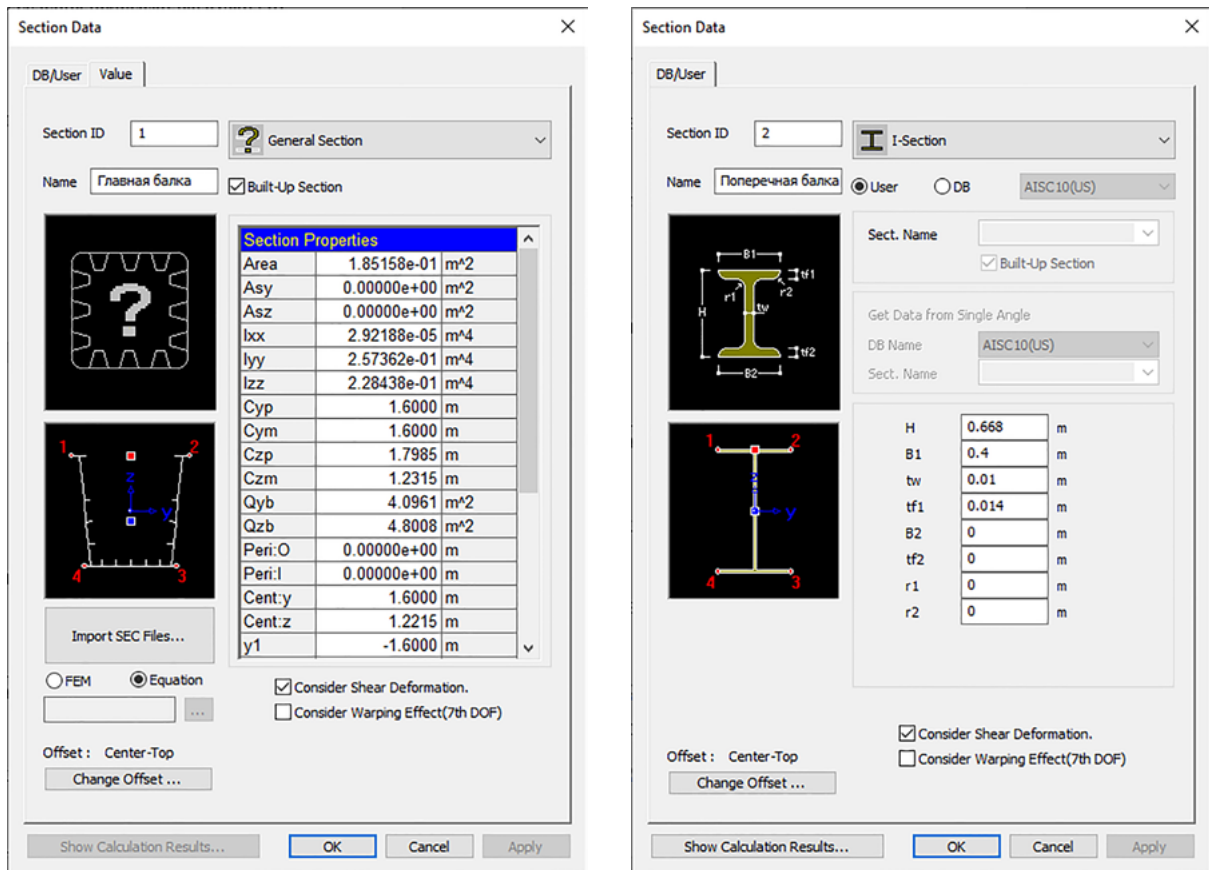


Рис. 4. Сечения главной и поперечной балок

Железобетонная плита проезжей части задается ступенчатой, всего 3 толщины. В опорных сечениях задаются диафрагмы [3] (рис. 5). Общий вид модели изображен на рис. 6, 7.

Расчет сталежелезобетонных мостов требуется вести с учетом стадийности бетонирования [4]. Всего в модели предусмотрено 7 стадий (рис. 8):

1. В проектное положение надвинуты металлические главные балки пролетных строений (главные балки, поперечные балки, диафрагмы), устройство опалубки в центральной зоне.

2. Укладка бетона монолитной железобетонной плиты проезда в центральной зоне.

3. Снятие опалубки центральной зоны и укладка бетона монолитной железобетонной плиты проезда в зоне «края 1».

4. Снятие опалубки в зоне «края 1» и укладка бетона монолитной железобетонной плиты проезда в зоне «края 2».

5. Снятие опалубки в зоне «края 2» и укладка бетона монолитной железобетонной плиты проезда в опорных зонах.

6. Снятие опалубки в опорных зонах.

7. Устройство мостового полотна.

Учет стадийности необходим, чтобы предотвратить обрушение пролетных строений на этапах эксплуатации и этапах возведения моста. Проблема в том, что совместная работа металлических главных балок и железобетонной монолитной плиты проезда за счет объединения гибкими упорами начинается после набора бетоном прочности [5]. На этапе монтажа главные балки воспринимают нагрузку от собственного веса и уложенного в опалубку жидкого бетона, что приводит к увеличению напряжений в металле [6, 7]. Моделирование стадий возведения в расчетном комплексе позволяет с помощью наследования получить достоверные значения усилий и напря-

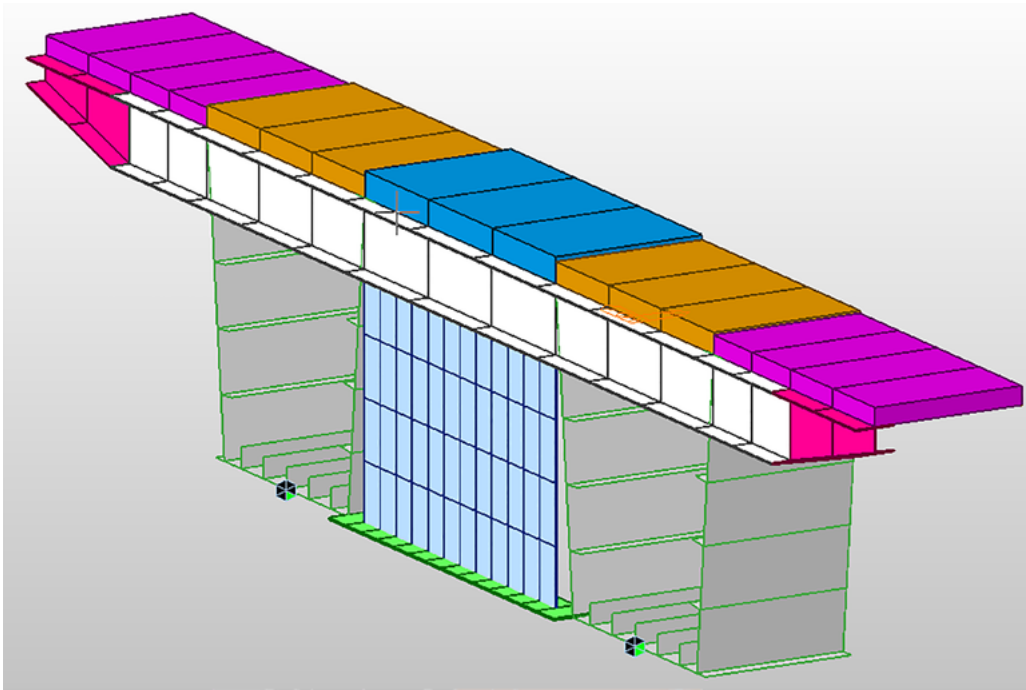


Рис. 5. Поперечное сечение над опорой

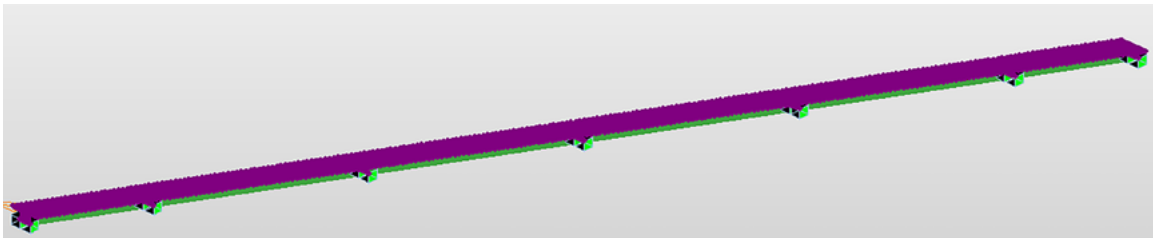


Рис. 6. Общий вид модели

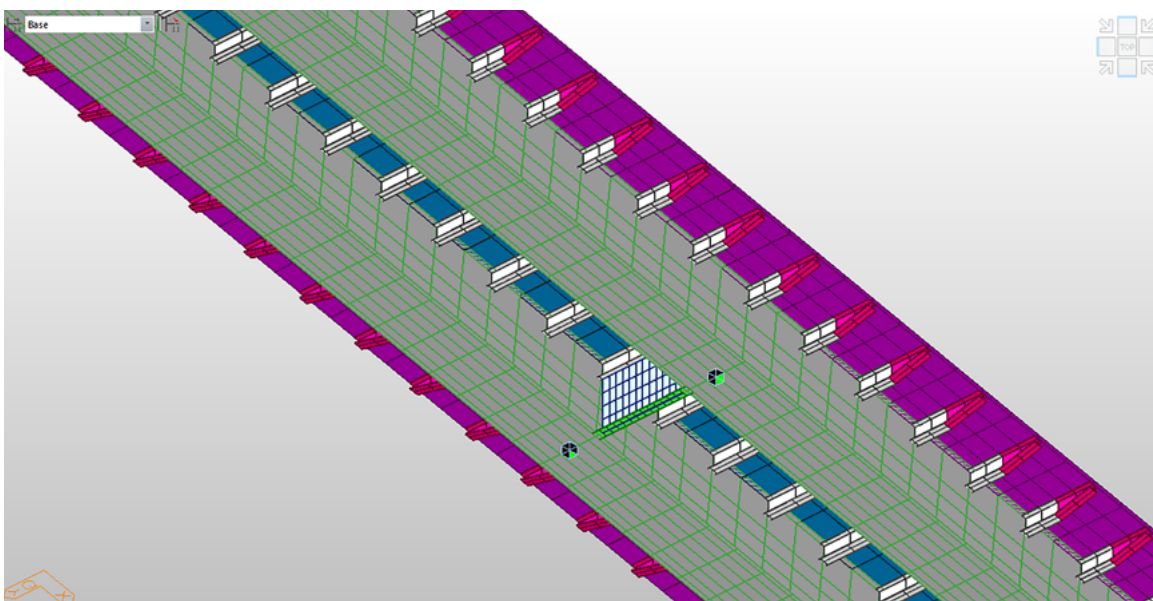


Рис. 7. Вид на модель снизу

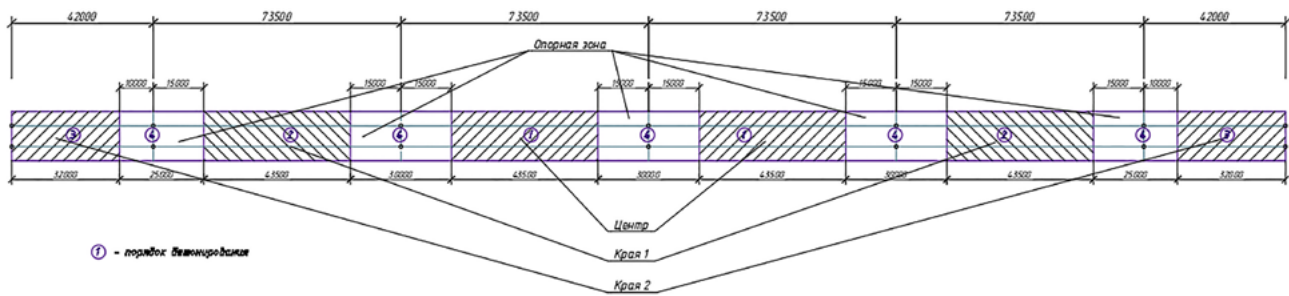


Рис. 8. Стадийность бетонирования

жений в элементах расчетной модели мостового перехода и избежать аварии.

В соответствии с нормативной документацией при расчете сталежелезобетонных пролетных строений требуется учесть усадку и ползучесть бетона. Усадка бетона — это его свойство уменьшаться в объеме после набора прочности. Подобный эффект может привести к изменению напряженно-деформированной системы. Ползучесть бетона связана с деформациями бетона под нагрузкой, что также

вызывает неупругие пластические деформации, влияющие на перераспределение усилия.

На вкладках creep/shrinkage, comp. strength задаются свойства бетона от времени, учитывающие усадку и ползучесть, твердение (рис. 9, 10) [8].

Трещины в растянутой зоне плиты в приопорных зонах учитываются путем снижения модуля бетона в 7-8 раз [9].

Для расчета на прочность все нагрузки задаются расчетными. Для проверки по 2 группе предельных состояний создается отдельная модель с нормативными нагрузками.

Name	Duration	Date	Step	Result
1	30	30	0	Stage
2	30	60	0	Stage
3	30	90	0	Stage
4	30	120	0	Stage
5	30	150	0	Stage
6	30	180	0	Stage
7	10000	10180	5	Stage,...

Рис. 9. Задание стадий в программном комплексе

Анализ полученных результатов

После создания расчетной модели были получены результаты напряженно-деформированного состояния конструкции. Рассмотрим численные результаты наибольших напряжений, возникающих в главных металлических балках. Для удобства результаты сведены в табличную форму (табл. 2).

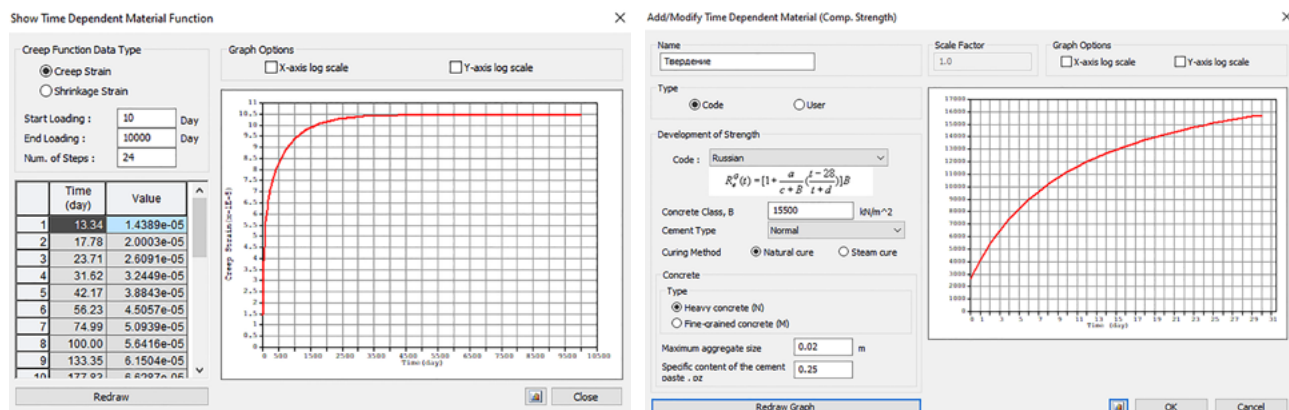


Рис. 10. Графики изменений свойств бетона по времени

Таблица 2. Анализ изменений в напряженно-деформированном состоянии по стадиям монтажа и эксплуатации

Название этапа	σ_{max} , МПа	Рисунок
Этап 1	63,67	
Этап 2	171,90	
Этап 3	172,29	
Этап 4	176,05	

Окончание табл. 2

Название этапа	σ_{max} , МПа	Рисунок
Этап 5	201,33	
Этап 6	204,12	
Этап 7	258,02	
Эксплуатация (расчетная подвижная нагрузка)	338,14	

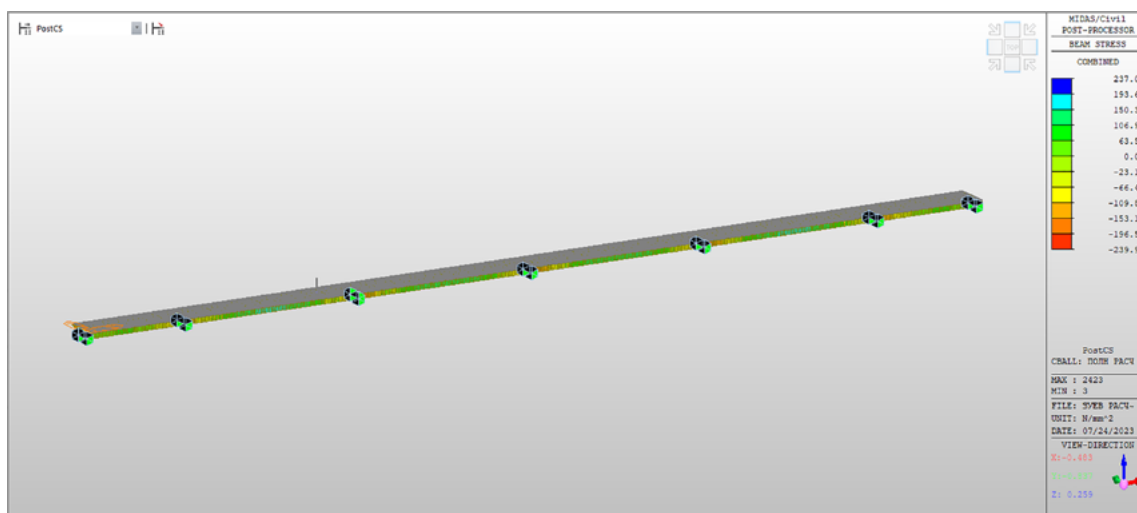


Рис. 11. Наибольшие напряжения в главных балках (239,90 МПа) при загрузке временной подвижной расчетной нагрузкой без учета стадийности

Для сравнения результатов была создана модель, не учитывающая стадийность возведения. В такой модели совместность работы сечений начинается сразу, что невозможно при укладке монолитного бетона железобетонной плиты проезда. Результаты расчета от полной расчетной нагрузки представлены на рис. 11.

В процентном соотношении при расчете по этапам напряжения в металлических главных балках возросли на 40,95 %.

Исходя из полученных результатов становится ясно, что совместная работа сталежелезобетонного сечения начинается только после набора прочности бетоном. До тех пор всю нагрузку от жидкого бетона, уложенного в опалубку, воспринимают металлические главные балки. После застывания бетонной смеси напряженно-деформированное состояние не изменяется, наследуя напряжения на следующую стадию, т. е. релаксации напряжений в металлических главных балках не происходит.

Заключение

1. Произведен анализ напряженно-деформированного состояния, и рассмотрены конструктивно-технологические особенности возведения

автодорожного моста через р. Ветлугу. Напряжения в металлических главных балках значительно возрастают в сравнении с моделью, не учитывающей стадийность возведения. Совместная работа сталежелезобетонного сечения начинается только после набора прочности монолитной железобетонной плиты проезжей части.

2. Развитие трещин в бетоне в опорных зонах, вызванных отрицательными моментами, могут быть учтены снижением модуля упругости бетона в приопорных зонах в 8 раз.

3. Напряжения и деформации, возникающие в конструкции при ее возведении, при расчете по стадиям «наследуются» от одного этапа к другому.

Библиографический список

1. Овчинников И. И. Анализ аварии мостового сооружения из-за неучета стадийности его возведения / И. И. Овчинников, Ш. Н. Валиев, О. Н. Герасимов и др. // Дороги и мосты. — 2022. — № 48. — С. 140–166.
2. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03—84. Мосты и трубы. — М.: ОАО «ЦПП», 2011.
3. Морид А. М. Опорные диафрагмы в зонах разделения сталежелезобетонных пролетных строений / А. М. Морид // Наука и современность. — 2012.

4. ГОСТ Р 59788—2021. Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Правила расчета сталежелезобетонных пролетных строений. — Введен с 01.01.2022 // Информационная система Norma CS.

5. Лыкова А. В. Анализ способов объединения бетона и стали в сталежелезобетонных мостах / А. В. Лыкова, Л. П. Абашева // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. — 2016. — № 2. — С. 86–91.

6. Козлов А. В. Расчет сталежелезобетонных мостов с учетом сдвига плиты по верхнему поясу балки / А. В. Козлов // Строительная механика и конструкции. — 2018. — № 4. — С. 64–71.

7. Морид А. М. Исследование работы сталежелезобетонных пролетных строений мостов в программном комплексе Femap & Nastran / А. М. Морид, В. И. Попов // Наука и современность. — 2012.

8. Краснов С. Н. Конструктивная система сталежелезобетонных мостов / С. Н. Краснов, Е. С. Краснова, Е. А. Вихров // Вестник Харьковского национального

автомобильно-дорожного университета. — 2012. — № 58. — С. 65–69.

9. Белуцкий И. Ю. Конструктивно-технологические особенности проектов реконструкции сталежелезобетонных мостов в разработках ТОГУ / И. Ю. Белуцкий, И. В. Лазарев, А. В. Лапин // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения. — 2020. — С. 72–77.

Дата поступления: 27.07.2023

Решение о публикации: 29.09.2023

Контактная информация:

ЗУЕВ Юрий Николаевич — аспирант;

zuew.yury2015@yandex.ru

ЧИЖОВ Сергей Владимирович — канд. техн. наук, доц.;

sergchizh@yandex.ru

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

АНТОНЮК Анатолий Анатольевич —

aaa.12.03.1992@mail.ru

Structural-Technological Aspect of Erection of Steel Reinforced Concrete Span Structure of the Road Bridge Over the Vetluga River

Yu. N. Zuev, S. V. Chizhov, Yu. V. Avdey, A. A. Antoniuk

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

For citation: Zuev Yu. N., Chizhov S. V., Avdey Yu. V., Antoniuk A. A. Structural-Technological Aspect of Erection of Steel Reinforced Concrete Span Structure of the Road Bridge Over the Vetluga River // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 931–942. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-931-942

Summary

Purpose: To consider structural and technological aspects of construction of steel reinforced concrete span of road bridge over the Vetluga River. To consider the issues of creating a computational model in the Midas Civil program complex with regard to the presented requirements to meet the requirements of GOST and SP. To give a detailed analysis of the stress-strain state of the model on the basis of calculation of the created model. **Methods:** Analysis of the design and allocation of the main parameters; comparison of the calculation models obtained taking into account the stage of concreting of the monolithic reinforced concrete slab of the roadway and without taking into account the stage of work. **Results:** The stress-strain state has been analyzed, and the structural and technological features of the erection of a road bridge over the Vetluga River have been considered. It is established that stresses in metal main girders increase significantly in comparison with the model that does not take into account the stages of erection. The combined operation of steel and reinforced concrete section starts only after the monolithic reinforced concrete slab of the roadway has gained strength. It is established that the development of cracks in concrete in the support zones caused by negative moments can be accounted for by reducing the elastic modulus of concrete in the support zones by 8 times. The change

of stresses and strains in the structure by stages has been analyzed. The stresses and deformations arising in the structure during its erection are "inherited" from one stage to another when calculating by stages. Practical significance: The methods of creating a reliable calculation model of steel-reinforced concrete spans, reflecting the actual nature of the work of the structure both at the stage of construction and at the stage of operation, are shown. The methods described in the article can be recommended for creating a calculation model in the Midas Civil software package with consideration of the presented requirements to meet the requirements of GOST and SP, as well as to avoid accidents at all stages of the life cycle of the structure..

Keywords: Steel-reinforced concrete span structure, highway, multi-span bridge, computational model, stress-strain state, steel-reinforced concrete.

References

1. Ovchinnikov I. I., Valiev Sh. N., Gerasimov O. N. et al. Analiz avarii mostovogo sooruzheniya iz-za neucheta stadiynosti ego vozvedeniya [Analysis of the accident of a bridge structure due to failure to take into account the stages of its construction]. *Dorogi i mosty* [Roads and Bridges]. 2022, Iss. 48, pp. 140–166. (In Russian)
2. SP 35.13330.2011. *Mosty i truby. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.03—84. Mosty i truby* [SP 35.13330.2011. Bridges and pipes. Updated version of SNiP 2.05.03—84. Bridges and pipes]. Moscow: OAO "TsPP" Publ., 2011. (In Russian)
3. Morid A. M. Opornye diafragmy v zonakh razdeleniya stalezhelezobetonnykh proletnykh stroeniy [Support diaphragms in separation zones of steel-reinforced concrete spans]. *Nauka i sovremennost'* [Science and modernity]. 2012. (In Russian)
4. GOST R 59788—2021. *Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Mostovye sooruzheniya. Pravila rascheta stalezhelezobetonnykh proletnykh stroeniy. Vveden s 1.01.2022* [GOST R 59788—2021. Public roads. Bridge structures. Rules for the calculation of steel-reinforced concrete spans. Introduced from January 1, 2022]. *Informatsionnaya sistema Norma CS* [Information system Norma CS]. (In Russian)
5. Lykova A. V., Abasheva L. P. Analiz sposobov ob'edineniya betona i stali v stalezhelezobetonnykh mostakh [Analysis of methods for combining concrete and steel in steel-reinforced concrete bridges]. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika* [Modern technologies in construction. Theory and practice]. 2016, Iss. 2, pp. 86–91. (In Russian)
6. Kozlov A. V. Raschet stalezhelezobetonnykh mostov s uchetom sdviga plity po verkhnemu poyasu balki [Calculation of steel-reinforced concrete bridges taking into account the shear of the slab along the upper chord of the beam]. *Stroitel'naya mekhanika i konstruksii* [Structural mechanics and structures]. 2018, Iss. 4, pp. 64–71. (In Russian)
7. Morid A. M., Popov V. I. Issledovanie raboty stalezhelezobetonnykh proletnykh stroeniy mostov v programmnom komplekse Femap & Nastran [Study of the work of steel-reinforced concrete bridge spans in the Femap & Nastran software package]. *Nauka i sovremennost'* [Science and modernity]. 2012. (In Russian)
8. Krasnov S. N., Krasnova E. S., Vikhrov E. A. Konstruktivnaya sistema stalezhelezobetonnykh mostov [Structural system of steel-reinforced concrete bridges]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of the Kharkov National Automobile and Road University]. 2012, Iss. 58, pp. 65–69. (In Russian)
9. Belutskiy I. Yu., Lazarev I. V., Lapin A. V. Konstruktivno-tekhnologicheskie osobennosti proektov rekonstruktsii stalezhelezobetonnykh mostov v razrabotkakh TOGU [Structural and technological features of projects for the reconstruction of steel-reinforced concrete bridges in the developments of Tomsk State University]. *Dal'niy Vostok. Avtomobil'nye dorogi i bezopasnost' dvizheniya* [Far East. Highways and traffic safety]. 2020, pp. 72–77. (In Russian)

Received: July 27, 2023

Accepted: September 29, 2023

Author's information:

Yuri N. ZUEV — Postgraduate Student;

zuev.yury2015@yandex.ru

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

Yulia V. AVDEI — PhD in Pedagogy, Associate Professor

Anatoly A. ANTONYUK — aaa.12.03.1992@mail.ru