УДК 624.21

© Г. А. Яппаров, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: germanyap@mail.ru, mt@spbgasu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-16-3-177-186

© G. A. Yapparov, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: germanyap@mail.ru, mt@spbgasu.ru

АКТУАЛИЗАЦИЯ ТИПОВЫХ ПРОЕКТОВ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОСТАВНЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ ГЛАВНЫХ БАЛОК

ACTUALIZATION OF TYPICAL PROJECTS OF COMPOSITE REINFORCED CONCRETE BRIDGE SUPERSTRUCTURES USING CFT COMPOSITE MAIN BEAMS

Рассмотрены проблемы использования в практике проектирования типовых проектов (ТП) стале-железобетонных (СТЖБ) мостов с позиции современных нормативных требований. Освещены вопросы правомерности применения ТП серии 3.503.9-43/89. Приведены результаты расчета данного СТЖБ пролетного строения (ПС) под современные нагрузки А14 и Н14 для габарита Г-11,5. Проанализированы последние исследования по трубобетонным элементам, работающим на изгиб. Предложена новая конструкция составных трубобетонных балок. Проведен расчет и сравнение предлагаемых балок с типовыми. Даны рекомендации по совершенствованию и разработке новых конструктивно-технологических решений СТЖБ ПС.

Ключевые слова: сталежелезобетонное пролетное строение, типовый проект, современные нагрузки, малые пролеты, трубобетон, трубчатые сечения, главные балки, замкнутые контуры.

The paper considers the problems of using in the practice of designing typical projects (TP) of steel-reinforced concrete bridges (SRCB) from the perspective of modern regulatory requirements. The author highlights the issues of the application legitimacy of the TP series 3.503.9-43/89. The results of calculation of this SRCB composite superstructure (SS) for modern loads A14 and H14 for G-11.5 clearance are given. There have been analyzed recent studies on bending concrete filled tube elements. A new design of composite CFT beams is proposed. The calculation and comparison of the proposed beams with the typical ones have been carried out. Some recommendations for improvement and development of new constructive-technological solutions of composite bridges are offered.

Keywords: composite reinforced concrete superstructure, typical project, modern loads, small spans, concrete-filled tubes, tubular sections, main beams, closed contours.

С развитием транспортной инфраструктуры страны все острее становится вопрос разработки надежных, быстровозводимых пролетных строений мостов [1–3]. Ярким примером служит мост через Керченский пролив, в котором используется такое количество современных инновационных технологических решений, что некоторые специалисты относят сооружение к «инженерному чуду»¹. Но в то же время для ускорения строительства моста была выбрана

технология возведения пролетов из металлоконструкций, которые, согласно проекту, на всех участках, кроме фарватерного, выполняются с применением решений, приближенных к типовым, ранее положительно зарекомендовавшим себя в других проектах². Даже если такой уникальный масштабный проект нуждается в применении типовых конструкций, то, следовательно, строительство огромного количества мостов малых и средних пролетов, составляющих подавляющее большинство среди строящихся мостов в целом, весьма затруднительно без использования усовершенствованных типовых проектов

¹ Проект моста в Крым получил положительное заключение Главгосэкспертизы и подтвердил достоверность сметной стоимости // Официальный информационный сайт строительства Крымского моста. 2017. URL: <http://www.most.life/novosti/novosti/proekt-mosta-v-krym-poluchil-polozhitelnoe-zaklyuchenie-glavgosekspertizy-i-podtverdil-dostovernost-smetnoj-stoimost/>

² Информационная система МЕГАНОРМ. 2019. URL: <http://meganorm.ru/Index2/1/4293785/4293785544.htm>

(ТП). Многие современные мосты до сих пор возводятся по ним или на их базе. В связи с возрастанием временных нагрузок, автоматизацией методов расчета, ужесточением требований к конструкциям и введением новых регламентирующих, нормативных документов, встает задача актуализации старых и разработки новых ТП, удовлетворяющих современным требованиям и задачам масштабного дорожного хозяйства, с учетом перспектив развития транспортной отрасли.

Ниже рассмотрены некоторые проблемы применения в современных условиях ТП серии 3.503.9-43/89 «Пролетные строения автодорожных мостов сталежелезобетонные разрезные пролетами 15, 24 и 33 м с габаритами Г-8, Г-10 и Г-11,5 в северном исполнении», разработанного ЦНИИ Проектстальконструкция им. Мельникова и представлена новая конструкция главных балок, позволяющая увеличить несущую способность ПС. Согласно письму № 47-924 от 14.05.2004 «О проектной документации на типовые строительные конструкции, изделия и узлы зданий и сооружений для всех видов строительства»³ проектный институт снял с себя ответственность за использование проектной документации на типовые строительные конструкции, выполненные им или с его участием и принятой к применению в период с июля 1977 г. по ноябрь 1993 г. согласно перечню, приложенному к письму. Среди прочих в перечень входит и серия 3.503.9-43/89. В письме Федерального агентства по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству № ВА-3602/06 от 19.07.2004 «О порядке применения типовых строительных конструкций, изделий и узлов зданий и сооружений, разработанных ЦНИИПСК им. Мельникова»⁴ сказано о целесообразности перевода типовых строительных конструкций в разряд «материалы для проектирования» (то есть не подлежащие прямой передаче заводу-

изготовителю). Тем не менее, данный типовой проект до сих пор пользуется популярностью у производителей как железобетонных изделий, например «Ассортимент ЖБИ»⁵ или ООО «Бетондеталь»⁶, так и металлоконструкций, например ЗАО «УЛАН-УДЭСТАЛЬМОСТ»⁷. Ведется и строительство по данному типовому проекту, например, моста через р. Дыдан на 265 км автодороги Епишино–Северо-Енисейск в Северо-Енисейском районе Красноярского края, по схеме 1×33,0 м габаритом Г-8,0+2×0,75 м⁸ с индивидуальными железобетонными плитами проезжей части (рис. 1). В ряде электронных ресурсов с базами нормативной документации данный документ числится как действующий, но относится к справочным материалам.

ТП серии 3.503.9-43/89 согласно «Перечню типовой проектной документации и проектов для опытного и повторного применения на конструкции автомобильных дорог и сооружений

⁵ ОАО «Институт по проектированию и изысканиям автомобильных дорог» СОЮЗДОРПРОЕКТ. «Перечень типовой проектной документации и проектов для опытного и повторного применения на конструкции автомобильных дорог и сооружений на них. Составлен на 01.01.2006 г.». База нормативной технической документации «Complexdoc.ru». 2019. URL: <http://www.complexdoc.ru/ntdtext/541562/38>

⁶ Серия 3.503.9-43/89 «Пролетные строения автодорожных мостов сталежелезобетонные разрезные пролетами 15, 24 и 33 м габаритами Г-8, Г-10 и Г-11,5 в северном исполнении». Введ. 15.03.1989.

⁷ СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» Актуализированная редакция СНиП 2.06.03-84*. Введ. 20.05.2011.

⁸ Мост через р. Дыдан на 265 км автодороги Епишино–Северо-Енисейск в Северо-Енисейском районе Красноярского края. Рабочий проект. Заказчик КГУ «Управление автодорог по Красноярскому краю», г. Красноярск. ООО «Изыскатель-МТ». 2019. URL: <http://iziskatel-mt.ru/object/stroitelstvo-mosta-cherez-rdydan-na-265-km-avtodorogi-epishino-severo-eniseysk-v-severo-eniseyskom-rayone-krasnoyarskogo-kraya>

Рис. 1. Мост через р. Дыдан на 265 км автодороги Епишино–Северо-Енисейск

³ Пролетные строения. ЗАО «УЛАН-УДЭСТАЛЬМОСТ». 2019. URL: <https://uism.ru/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%8B/>

⁴ Мост через р. Дыдан на 265 км автодороги Епишино–Северо-Енисейск в Северо-Енисейском районе Красноярского края. Рабочий проект. Заказчик КГУ «Управление автодорог по Красноярскому краю», г. Красноярск. ООО «Изыскатель-МТ». 2019. URL: <http://iziskatel-mt.ru/object/stroitelstvo-mosta-cherez-rdydan-na-265-km-avtodorogi-epishino-severo-eniseysk-v-severo-eniseyskom-rayone-krasnoyarskogo-kraya>

на них», составленному в 2006 г. ОАО «Институт по проектированию и изысканиям автомобильных дорог» СОЮЗДОРПРОЕКТ⁹ не переработан в соответствии со СНиП 2.05.03–84* и с актуализированным руководящим документом СП 35.13330.2011.

Указанный проект СТЖБ ПС (проектное строение) моста рассчитан под временные нагрузки от автомобильного транспорта А11 и одиночной — НК-80. Причем нагрузка НК-80 на схеме, изображенной на рис. 2, размещена без соблюдения полосы безопасности. Наиболее опасным принимается второй случай воздействия нагрузки.

Автором было принято решение провести уточняющий расчет ПС для габарита Г-11,5 под современные нагрузки А14 и Н14. Постоянные нагрузки на I и II стадиях приняты согласно проекту. Расчетные пролеты равны: 14,6, 23,6 и 32,4 м¹⁰. Расчетные изгибающие моменты по

⁹ ОАО «Институт по проектированию и изысканиям автомобильных дорог» СОЮЗДОРПРОЕКТ. «Перечень типовых проектной документации и проектов для опытного и повторного применения на конструкции автомобильных дорог и сооружений на них. Составлен на 01.01.2006 г.». База нормативной технической документации «Complexdoc.ru». 2019. URL: <http://www.complexdoc.ru/ntdtext/541562/38>

¹⁰ Серия 3.503.9-43/89 «Пролетные строения автодорожных мостов сталежелезобетонные разрезные пролетами 15, 24 и 33 м габаритами Г-8, Г-10 и Г-11,5 в северном исполнении». Введ. 15.03.1989.

середине пролета крайних главных балок от первой части постоянной нагрузки равны: 56,75, 155,95 и 308,37 тс·м для соответствующих пролетов (в проекте приведены величины: 56,7, 156,8 и 318,4 тс·м соответственно).

Сущность расчета изгибающих моментов по СП 35.13330.2011 не меняется, но ось тяжелой одиночной нагрузки Н14 (НК-100) располагается не ближе 1,75 м от кромки проезжей части (в которую не входят полосы безопасности). Также необходимо проверить на воздействие сдвоенных нагрузок НК, устанавливаемых на расстоянии 12 м (между последней осью первой и передней осью второй нагрузки), учитывая понижающий коэффициент 0,75. Но сумма ординат под колесами двух тележек с учетом понижающего коэффициента будет меньше суммы ординат от одной тележки, поэтому этот случай не рассматривается. Для нагрузки АК второй полосы коэффициент полноты принимаем равным 0,6 как для тележек, так и для равномерно распределенной нагрузки¹¹. Значения коэффициентов при Г-11,5 в соответствии с СП 35.13330.2011 сведены в табл. 1.

¹¹ СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» Актуализированная редакция СНиП 2.06.03 84*. Введ. 20.05.2011.

Рис. 2. Схема расположения временных нагрузок при двух случаях воздействия для Г-10 и Г-11,5

Таблица 1

Значения коэффициентов для Г-11,5 в соответствии со СП 35.13330.2011

Коэффициент	$K_{ПУ_{100}}$	$K_{ПУ_{14}}$	$(1+\mu)_{100}$	$(1+\mu)_{14}^T$	$(1+\mu)_{14}^K$	γ_{f100}	γ_{f14}^T	γ_{f14}^K
Значение	0,4375	0,8688	1	1,4	1	1,1	1,5	1,15

Полученные изгибающие моменты от нагрузок НК-100 и А14 для различных пролетов сведены в табл. 2.

Проверка прочности сечений главных балок в середине пролетов от новых нагрузок производится в предположении, что при совместной работе со стальными балками железобетонная плита и металл работают в упругой стадии.

Суммарные величины растягивающих напряжений (σ_n^I) в крайних фибрах нижних поясов главных балок при рассматриваемом нагружении представлены в табл. 3.

Расчетное сопротивление стали 15ХСНД на растяжение $R_y = 295$ МПа, для 10ХСНД $R_y = 350$ МПа. Следовательно, при габарите моста Г-11,5, пролете 33 м в северном исполнении А (с главными балками из стали 15ХСНД) суммарные напряжения в нижних поясах балок выше предельно допустимых, что свидетельствует об опасности эксплуатации данных пролетных строений под современной временной нагрузкой А14.

Тем не менее, применительно к данному ТП требуется дополнительный проверочный рас-

чет для всех габаритов ПС. А на данном этапе можно заключить, что при некоторых доработках данное ПС может быть адаптировано под современные временные нагрузки. Увеличение толщины и конструктивной формы железобетонной плиты, более рациональное включение ее в работу, модернизация главных балок с заменой их конструктивной формы, уменьшение веса конструкции за счет использования современных легких высокопрочных бетонов — все это позволит существенно повысить эксплуатационные характеристики и долговечность типовых СТЖБ ПС. Разработка новых унифицированных конструктивно-технологических решений по принципу модульности позволит повысить технологичность и эффективность строительства, снизить затраты на производство и обеспечить острые потребности мостостроения в отдаленных, труднодоступных регионах страны.

Одним из вариантов достижения повышенных показателей может стать более широкое использование трубобетона в ПС мостов. Трубобетонные конструкции колонн и ферм с металлической оболочкой и бетонным сердечником находят широкое применение в строительстве. Как известно, трубобетонные элементы хорошо работают на осевое сжатие, создается так называемый эффект «обоймы». Металлический контур имеет высокую пластичность, что исключает возможность резкого разрушения составного элемента. Среди основных работ по исследованию трубобетона можно выделить труды таких авторов, как В. Л. Трулль, Р. С. Санжаровский, В. А. Росновский, А. И. Кикин, А. А. Долженко, Л. К. Лукша, Л. И. Стороженко и других. В публикациях вопрос работы составных элементов на изгиб недостаточно разработан либо вовсе не рассматривается.

Наиболее развернутой и экспериментально подтвержденной работой по данной теме является диссертация В. И. Ефименко «Прочность и деформации изгибаемых трубобетонных элементов» [4], результаты которой легли в основу

Таблица 2

Изгибающие моменты от нагрузок НК-100 и А14

Пролет, м	M^H (НК-100), тс·м	M^H (А14), тс·м	Превышение проектного значения, %
15	198,71	249,86	29,3
24	375,46	497,96	24,3
33	586,9	801,22	22,5

Таблица 3

Растягивающие напряжения в крайних фибрах нижних поясов главных балок

Пролет, м	M^I , тс·м	M^H , тс·м	σ_n^I , кг/см ²
15	56,75	249,86	2795,38
24	155,95	497,96	2881,72
33	308,37	801,22	3094,99

монографии Л. И. Стороженко, В. И. Ефименко, П. И. Плахотный «Изгибаемые трубобетонные конструкции» 1994 г. [5]. В данных трудах рассматривалась работа трубобетонных балок различных конструктивных форм и размеров на изгиб. Основные сечения приведены на рис. 3.

В ходе испытаний выяснили, что наибольшей несущей способностью обладают образцы ИВ-2-2Т и ИВ-2-2ТВ за счет восприятия значительных усилий внутренней трубой. Деформации в верхней сжатой зоне сходны у всех образцов. Наименьшие деформации в растянутой зоне наблюдались у образцов серии ИВ-2-2ТВ, у которых растягивающие усилия воспринимала как внешняя, так и внутренняя труба и частично бетон. Стоит также отметить, что образцы ИВ-2-2ТВ имеют более равномерное развитие деформаций, чем образцы ИВ-2-2Т и ИВ-2-2, в которых наблюдается скачкообразный характер за счет образования трещин в растянутом поясе бетона.

В патенте [6] предложена конструкция балки, схожая с той, что затронута в СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования», вид и разрез изображены на рис. 4

Авторы относят свое изобретение к области строительства, а именно к предварительно напряженным элементам пролетных строений малых и средних мостов, а также к строительным конструкционным элементам общего назначения. Увеличение прочности трубобетонной балки на изгиб достигается путем создания предварительно растянутыми элементами арматуры неравномерно распределенных нормальных напряжений в нижнем поясе бетонного ядра. Устраняется трещинообразование в нижнем поясе при значительных поперечных нагрузках. Также в более новом патенте [7] предлагаются

Рис. 4. Предварительно напряженная балка по патенту № 2632798: 1 — труба; 2 — бетонный сегмент ядра; 3 — железобетонный сегмент ядра; 4 — армирующие элементы

Рис. 3. Сечения образцов изгибаемых элементов серий: а — ИВ-2-2; б — ИВ-2-2ТВ; в — ИВ-2-2Т; г — ИВ-2-2ПВ; д — ИВ-2-2П; е — И-2

Рис. 5. Сечения модифицированных предварительно напряженных трубобетонных балок: 1 — труба; 2 — бетонное ядро; 3 — армирующие элементы; 4 — внутренние продольные трубы

модифицированные версии предварительно напряженной балки, достоинства которых заключаются в облегчении балки при обеспечении необходимой прочности конструкции. Сечения приведены на рис. 5.

Стоит также отметить зарубежный опыт применения трубобетона как в арочных [8, 9], так и в балочных [10, 11] конструкциях мостов.

В СТЖБ мостах при объединении главных балок с плитой нейтральная ось смещается вверх. Большая часть балки оказывается в растянутой зоне, что делает нерациональным применение заполненных бетоном труб, пусть и с дополнительным армированием. Применение труб без какого-либо заполнения тоже весьма ограничено. Более рационально применение комбинированного сечения на основе ИВ-2-2ТВ, представленного на рис. 6.

В соответствии с данным решением предлагается заполнить бетоном сечение в местах опирания для предотвращения деформаций контура тонкостенных оболочек и обеспечения совместной работы внешней и внутренней трубы. По остальной длине балки трубы остаются незаполненными. Дополнительно в местах омоноличивания приварить штыревые упоры на внешнюю поверхность внутренней трубы и внутреннюю поверхность внешней трубы для более прочной связи материалов. Такая конструкция проста в изготовлении, удобна для транспортировки и монтажа в условиях стройплощадки.

В качестве образца для сравнительного анализа было взято ПС ТП серии 3.503.9-43/89 длиной 24 м и Г-11,5. Главные двутавровые балки сварные сплошностенчатые переменного сечения по длине, расставленные на расстоянии 3,2 м

друг от друга. В середине пролета сечение имеет верхний пояс размерами 400×16 мм, нижний — 550×25 мм и вертикальный лист — 1200×12 мм. Толщина железобетонной плиты проезжей части 150 мм. В расчетном листе проекта приведены геометрические характеристики и напряжения главной балки в табл. 4, где M^I — расчетный изгибающий момент от первой части нагрузки; M^{II} — расчетный изгибающий момент от второй части нагрузки; F_{st} — площадь поперечного сечения стальной главной балки; F_{bs} — площадь поперечного сечения железобетонной плиты, приведенной к стали; $Z_{b, stb}$ — расстояние между центрами тяжести плиты и объединенного сечения; $Z_{s, stb}$ — расстояние между центрами тяжести стальной балки и объединенного сечения; $Z_{s1, s}$ — расстояние от центра тяжести стальной балки до крайней фибры нижнего пояса стальной балки; J_s — момент инерции чисто стальной балки; J_{stb} — момент инерции объединенного сталежелезобетонного сечения, приведенный к стали; $W_{s1, s}$ — момент сопротивления для крайней фибры нижнего пояса стального сечения, $W_{s2, s}$ — для край-

Рис. 6. Сечения комбинированной балки на основе ИВ-2-2ТВ на опоре (а) и в середине пролета (б): 1 — внешняя труба; 2 — внутренняя труба; 3 — бетонный заполнитель; 4 — штыревые упоры

Таблица 4

Геометрические характеристики и напряжения главной балки ТП серии 3.503.9-43/89

M^I , тс·м	M^{II} , тс·м	F_{st} , см ²	F_{bs} , см ²	Z_{bstb} , см	$Z_{s,stab}$, см	$Z_{s1,s}$, см	J_s , см ⁴	J_{stab} , см ⁴	$W_{s1,s}$, см ³	$W_{s2,s}$, см ³	W_{bs} , см ³	$W_{1,stab}$, см ³	σ_1 , кг/см ²
156,8	400,5	304,5	906	24,8	65	49,4	865 900	2 901 970	17 370	11 300	117 000	25 100	2420

ней фибры верхнего пояса стального сечения, W_{bs} — для центра тяжести плиты объединенного сечения, $W_{1,stab}$ — для крайней фибры нижнего пояса объединенного сечения; σ_1 — напряжение при первом сочетании нагрузок.

Был проведен уточняющий расчет. M^I и M^{II} приняты по проекту, $F_{bs} = F_{b/n}$, $n' = E_s/E_b = 2,1 \cdot 10^6 / 3,32 \cdot 10^5$ (для стали 15ХСНД и бетона В30) = 6,325. Результаты сведены в табл. 5.

Для сравнения с существующей балкой взята составная сварная трубобетонная балка конструкции, предлагаемой выше, состоящая из внешних труб диаметром 1220 мм, толщиной стенки 12 мм, внутренних труб диаметром 530 мм и толщиной стенки 10 мм с бетонированием концов балки на длину 2 м с каждой стороны. Трубы подобраны таким образом, чтобы диаметр внешней трубы соответствовал высоте существующей балки, а диаметр внутренней трубы примерно соответствовал отношению диаметров труб для ИВ-2-2ТВ. Вес каждой такой балки длиной 24 м составит 8,58 т (1220×12) + 3,078 т (530×10) + 5,9 т (бетон В30) = 17,558 т. Вес исходной балки 6,396 т. За счет круглой формы сечения расстояние между краями соседних трубчатых балок при шаге 3,2 м составит 1,98 м, что при том же расположении продольных и поперечных связей позволит снизить вес этих свя-

зей на величину около 30 % — с 5,795 т до 4,057. Тогда нормативная постоянная нагрузка на 1 пог. м крайней главной балки на первой стадии работы от первой части постоянной нагрузки увеличится на

$$\frac{(17,558T - 6,396T)4 - (5,795T - 4,057T)}{4 \cdot 23,6} = 0,45 \text{ тс/м}$$

и составит 2,04 + 0,45 = 2,49 тс/м, расчетная — 1,1·2,49 = 2,739 тс/м (увеличение на 22,3 %). Таким образом, для нового ПС получены следующие значения (табл. 6).

Так как составное трубчатое сечение не цельное, для уточнения характеристик совместной работы внутренней и внешней трубы было проведено математическое моделирование в программном комплексе ANSYS 19.2. Для стали принято расчетное сопротивление растяжению и сжатию по пределу текучести 295 МПа, по временному сопротивлению 415 МПа. Для бетона расчетное сопротивление по предельным состояниям первой группы на сжатие составляет 15,5 МПа, на растяжение — 1,1 МПа, по предельным состояниям второй группы на сжатие — 22,0 МПа, на растяжение — 1,8 МПа. Моделируемые расчетные сечения ПС представляют собой бетонные плиты толщиной 150 мм и шириной 3600 мм (2000 мм с одной стороны и 1600 мм с другой), жестко объединенные с балками раз-

Таблица 5

Геометрические характеристики и напряжения главной балки ТП серии 3.503.9-43/89 (уточненные)

M^I , тс·м	M^{II} , тс·м	F_{st} , см ²	F_{bs} , см ²	Z_{bstb} , см	$Z_{s,stab}$, см	$Z_{s1,s}$, см	J_s , см ⁴	J_{stab} , см ⁴	$W_{s1,s}$, см ³	$W_{s2,s}$, см ³	W_{bs} , см ³	$W_{1,stab}$, см ³	σ_1 , кг/см ²
156,8	400,5	345,5	909,64	24,8	65	49,4	865 898	2 901 108	17 528	11 592	117 015	25 367	2473

Таблица 6

Геометрические характеристики и напряжения предлагаемой главной балки

M^I , тс·м	M^{II} , тс·м	F_{st} , см ²	F_{bs} , см ²	Z_{bstb} , см	$Z_{s,stab}$, см	$Z_{s1,s}$, см	J_s , см ⁴	J_{stab} , см ⁴	$W_{s1,s}$, см ³	$W_{s2,s}$, см ³	W_{bs} , см ³	$W_{1,stab}$, см ³	σ_1 , кг/см ²
190,69	400,5	618,8	909,64	34,4	50,5	52,2	1 019 339	3 689 873	19 528	14 604	107 264	35 929	2091

личной конструктивной формы: двутавровая балка вместе с ребрами согласно проекту (ДВ); полая трубчатая балка, состоящая из одной трубы 1220×12 с бетонным заполнением на длину 2 м на концах (ТП); составная трубчатая балка из двух труб — внешней 1220×12 и внутренней 530×10 с бетонным заполнением на длину 2 м на концах (ТВ); составная трубчатая балка из двух труб — внешней 1220×12 и внутренней 530×10 с бетонным заполнением на длину по 1 м на концах и в местах стыков для создания заводской кривой (6260 мм + 11 080 мм + 6260 мм по проекту) (ТВ4); составная трубчатая балка из двух труб — внешней 1220×12 и внутренней 530×10, жестко связанных (объединенных) друг с другом, с бетонным заполнением на длину 2 м на концах (ТВО). Общий вид исследуемых моделей представлен на рис. 7.

К бетонной плите приложена сосредоточенная нагрузка 678,8 кН в середине пролета, соответствующая $M^I = 400,5$ тс·м для всех сравниваемых моделей. К двутавровой балке переменного сечения приложена сосредоточенная нагрузка 265,7 кН в середине пролета, соответствующая $M^I = 156,8$ тс·м. К трубчатым балкам с внутренней трубой приложена нагрузка 323,2 кН, соответствующая $M^I = 190,69$ тс·м; к трубчатой балке без внутренней трубы — 306,3 кН, соответствующая $M^I = 180,73$ тс·м. Получившиеся напряжения и деформации от указанных загрузок сведены в табл. 7, характер деформаций исследуемых моделей представлен на рис. 8.

Наименьшее напряжение наблюдается у расчетного сечения ТВ4 — 76,054 МПа, что на 35,7 % ниже, чем у типового сечения с двутавровой балкой ДВ. Повышение несущей способности достигается за счет более полного включения в работу внутренней трубы и работы бетонного заполни-

Рис. 7. Общий вид моделируемых расчетных сечений ДВ, ТП, ТВ, ТВ4, ТВО

теля по фиксации контура сечения. Напряжение во внутренней трубе сечения ТВ4 в сравнении с ТВ увеличилось на 26,3 %, в результате такого перераспределения нагрузки напряжение во внешней трубе сечения ТВ4 снизилось на 24,1 %. Разность деформаций верхнего и нижнего пояса (овальность) у ТВ4 ниже, чем у ТВО, на 41 %. Худшими характеристиками обладает расчетное сечение ТП напряжения, в котором оно выше, чем у ДВ, на 8,3 %, а ТВ4 — на 68,5 %.

Таблица 7

Напряжения и деформации расчетных сечений ПС

Расчетное сечение ПС	σ нижней фибры, МПа	σ нижней фибры внутренней трубы, Па	Деформация нижней фибры, мм	Деформация верхней фибры, мм
ДВ	118,37	–	31,099	31,089
ТП	128,14	–	27,898	34,545
ТВ	100,22	59,062	20,343	27,158
ТВ4	76,054	74,595	21,512	25,055
ТВО	83,445	–	20,207	26,213

Рис. 8. Деформации моделируемых расчетных сечений ДВ, ТП, ТВ, ТВ4, ТВО, визуализированные в программном комплексе ANSYS

Потеря устойчивости внешнего замкнутого контура составной трубобетонной балки (овальность) может оказать негативное воздействие на бетон плиты и на саму балку. Заполнение балки бетоном в середине пролета нерационально, так как в объединенном сечении большая ее часть находится в растянутой зоне, само заполнение оказывается технологически сложным, также существенно увеличивается вес конструкции. Повысить устойчивость сечения балки можно использованием поперечных связей и увеличением отношения толщины стенки трубы к ее диаметру. Стоит также отметить способ фиксации замкнутого контура тяжами, предложенный в диссертационной работе А. В. Сыркова, в которой выявлено, что искусственно созданная деформация контура горизонтальными тяжами создает в крайних фибрах оболочки дополнительные растягивающие напряжения [12]. В ходе эксперимента при объединении трубчатых балок с плитой за счет их предварительного обжатия удалось снизить сжимающие напряжения в верхней фибре на 61 % при увеличении растягивающих напряжений в нижней на 29 %. При правильно подобранном усилии обжатия становится возможной такая фиксация тонкостенной оболочки, которая почти полностью исключает овальность контура под нагрузкой и позволяет еще более равномерно распределить напряжение по длине расчетного сечения ПС.

Применение в практике проектирования составных трубобетонных балок в малых сталежелезобетонных мостах в отдаленных северных районах и районах нефтедобычи позволит суще-

ственно снизить трудозатраты и повысить скорость и эффективность дорожно-транспортного строительства.

Библиографический список

1. Быстров В. А. Совершенствование конструкций и расчет элементов сталежелезобетонных мостов. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1987. 185 с.
2. Корнеев М. М. Сталежелезобетонные мосты. СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. 400 с.
3. Быстров В. А., Ярошутин Г. А. Качество и инновационность проектирования — пути управления безопасностью городских надземных и подземных транспортных сооружений // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 6 (59). С. 168–172.
4. Ефименко В. И. Прочность и деформации изгибаемых трубобетонных элементов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01; Полтава: ПИСИ, 1989. 186 с.
5. Стороженко Л. И., Ефименко В. И., Плахотный П. И. Изгибаемые трубобетонные конструкции. Киев.: Будівельник, 1994. 104 с.
6. Патент 2632798 РФ. Трубобетонная предварительно напряженная балка // 09.10.2017/ Овчинников И. Г., Овчинников И. И., Парышев Д. Н., Харин В. В., Моисеев О. Ю., Копырин В. И.
7. Патент 2669814 РФ. Трубобетонная предварительно напряженная балка // 16.10.2018 / Харин В. В., Копырин В. И., Парышев Д. Н.
8. Qingxiong Wu, Kazuo Takahashi, Baochun Chen, Shozo Nakamura. Study on dynamic properties of a concrete filled tubular (CFT) arch bridge constructed in China // NAOSITE: Nagasaki University's Academic Output SITE. China. 2006. P. 32–39.
9. Kazimierz Flaga, Kazimierz Furtak. Examples of solutions for steel-concrete composite structures in bridge engineering // Civil and environmental engineering reports. Poland. 2015. P. 51–68.
10. Hosaka Tetsuya, Nakamura Shunichi, Umehara Toshio. Design and experiments on a new railway bridge system using concrete filled steel pipes // IABSE conference reports. 1997. Pp. 367–372.
11. Shunichi Nakamura, Yoshiyuki Momiyama, Tetsuya Hosaka, Koji Homma. New technologies of steel/concrete composite bridges // Journal of Constructional Steel Research (58). 2002. Pp. 99–130.
12. Сырков А. В. Особенности работы и повышение эффективности использования стальных труб в балочных автодорожных мостах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.15 / СПб.: Петербург. ун-т путей сообщения, 1993. 26 с.

References

1. Bystrov V. A. *Sovershenstvovanie konstruktsiy i raschet ehlementov stalezhelezobetonnykh mostov* [Improvement of designs and calculation of elements of steel-concrete bridges]. Leningrad, LGU Publ., 1987, 185 p.
2. Korneev M. M. *Stalezhelezobetonnye mosty* [Steel-concrete composite bridges]. St. Petersburg, FGBOU VPO PGUPS Publ., 2015, 400 p.
3. Bystrov V. A., Yaroshutin G. A. *Kachestvo i innovatsionnost' proektirovaniya — puti upravleniya bezopasnost'yu gorodskikh nadzemnykh i podzemnykh transportnykh sooruzheniy* [Quality and innovativeness of design as the way of safety management of urban aboveground and underground transport facilities]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov — Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 6 (59), pp. 168–172.
4. Efimenko V. I. *Prochnost' i deformatsii izgibaemykh trubobetonnykh ehlementov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Strength and deformation of bent concrete elements. PhD in Sci. Tech. diss.] Poltava, PISI, 1989, 186 p.
5. Storozhenko L. I., Efimenko V. I., Plakhotnyy P. I. *Izgibaemye trubobetonnye konstruktsii* [Bent pipe composite constructions]. Kiev, Budivel'nik Publ., 1994, 104 p.
6. Ovchinnikov I. G., et al. *Trubobetonnaya predvaritel'no napryazhennaya balka* [Concrete filled pipe pre-stressed beam]. Patent RF, no. 2632798, 2017.
7. Kharin V. V., Kopyrin V. I., Paryshev D. N. *Trubobetonnaya predvaritel'no napryazhennaya balka* [Concrete filled pipe pre-stressed beam]. Patent RF no. 2669814, 2018.
8. Qingxiong Wu, Kazuo Takahashi, Baochun Chen, Shozo Nakamura. *Study on dynamic properties of a concrete filled tubular (CFT) arch bridge constructed in China*. NAOSITE, Nagasaki University's Academic Output SITE, 2006, pp. 32–39.
9. Kazimierz Flaga, Kazimierz Furtak. Examples of solutions for steel-concrete composite structures in bridge engineering. *Civil and environmental engineering reports*, Poland, 2015, pp. 51–68.
10. Hosaka Tetsuya, Nakamura Shunichi, Umehara Toshio. Design and experiments on a new railway bridge system using concrete filled steel pipes. *IABSE conference reports*, 1997, pp. 367–372.
11. Shunichi Nakamura, Yoshiyuki Momiyama, Tetsuya Hosaka, Koji Homma. New technologies of steel/concrete composite bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, 2002, no. 58, pp. 99–130.
12. Syrkov A. V. *Osobennosti raboty i povyshenie ehffektivnosti ispol'zovaniya stal'nykh trub v balochnykh avtodorozhnykh mostakh*. Avtoref. disc. kand. tekhn. nauk [Features of work and increase of efficiency of use of steel pipes in beam road bridges. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 1993, 26 p.