

UDC 624.21  
IRSTI 67.07.03  
REVIEW ARTICLE

## THE USE OF PIPE CONCRETE IN AN ARCHED BRIDGE CONSTRUCTION

N.B. Kudaibergenov<sup>1,\*</sup> , K.Y. Astankov<sup>2</sup> , I.G. Ovchinnikov<sup>2</sup> ,  
T.Sh. Abilmazhenov<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University

<sup>2</sup>Ural State University of Railway Transport

---

**Abstract.** *The experience of using tubular concrete structures in bridge construction is considered on the example of facilities built over the past 30 years in the People's Republic of China. The features of the construction of a bridge over the Xun River in Pingnan County, Guangxi Province, which currently has a record span of 575 m, are considered. An overview of outstanding facilities built using large-span lattice arches made of tubular concrete elements, working mainly on off-center compression, is performed. Various methods of mounting spans of steel-reinforced concrete arch bridges, advantages and disadvantages of each method are considered. The technology of concreting pipes is considered in detail. The designs and methods of construction of facilities using large-span arches of solid cross section with tightening for the construction of bridges with spans of 46 and 96 meters are considered. Modern research in the field of the work of bendable arches is considered in comparison with the model considering the work of a tubular concrete element as an out-of-center compressed column, which in the future can ensure more efficient use of material properties in design. The prospects of using tubular concrete structures for the construction of small bridges are indicated, which is especially important in areas remote from construction industry enterprises with an underdeveloped highway network.*

**Keywords:** *arched bridges, pipe concrete, small bridge construction, bendable pipe concrete, structures*

---

**\*Corresponding author\***

**Nurlan Kudaibergenov, e-mail: [kudaibergenov\\_nb@enu.kz](mailto:kudaibergenov_nb@enu.kz)**

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-07>

Received 22 February 2024; Revised 18 March 2024; Accepted 26 April 2024.

ӘОЖ 624.21  
ҒТАМР 67.07.03  
ШОЛУ МАҚАЛАСЫ

## АРКАЛЫ КӨПІР ҚҰРЫЛЫСЫНДА ҚҰБЫРЛЫ БЕТОНДЫ ҚОЛДАНУ

Н.Б. Құдайбергенов<sup>1,\*</sup> , К.Ю. Астанков<sup>2</sup> , И.Г. Овчинников<sup>2</sup> ,  
Т.Ш. Абилямженов<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

<sup>2</sup>Орал мемлекеттік қатынас жолдары университеті

---

**Аңдатпа.** Қытай Халық Республикасында соңғы 30 жыл ішінде салынған нысандар мысалында көпір құрылысында құбырлы бетон конструкцияларын қолдану тәжірибесі қарастырылады. Гуанси провинциясының Пиннань округіндегі Сюнь өзені арқылы өтетін көпір құрылысының ерекшеліктері қарастырылды, ол бүгінгі күнге дейін 575 м диноймен рекордтық аралыққа ие. Негізінен Орталықтан тыс қысу үшін жұмыс істейтін құбырлы бетон элементтерінен жасалған үлкен аралықты торлы аркаларды қолдана отырып салынған көрнекті нысандарға шолу жасалды. Болат құбырлы Арка көпірлерінің аралықтарын орнатудың әртүрлі әдістері, әр әдістің артықшылықтары мен кемшіліктері қарастырылады. Құбырларды бетондау технологиясы егжей-тегжейлі қарастырылған. 46 және 96 метрлік аралықтары бар көпірлерді салу үшін созылуы бар үлкен аралықты үздіксіз қималы аркаларды қолдана отырып, объектілерді салудың конструкциялары мен әдістері қарастырылған. Құбырлы бетон элементінің жұмысын орталықтан Сығылған баған ретінде қарастыратын модельмен салыстырғанда иілу доғаларының жұмысы саласындағы заманауи зерттеулер қарастырылды, бұл болашақта жобалау кезінде материалдардың қасиеттерін тиімді пайдалануды қамтамасыз ете алады. Шағын көпірлер салу үшін құбырлы бетон конструкцияларын пайдалану перспективасы көрсетілген бұл әсіресе автомобиль жолдарының желісі дамымаған құрылыс индустриясы кәсіпорындарынан алыс аудандарда маңызды.

**Түйін сөздер:** аркалы көпірлер, құбырлы бетон, шағын көпір құрылысы, иілгіш құбырлы бетон, конструкциялар

---

\*Автор-корреспондент\*

Нурлан Құдайбергенов, e-mail: [kudaibergenov\\_nb@enu.kz](mailto:kudaibergenov_nb@enu.kz)

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-07>

Алынды 22 ақпан 2024; Қайта қаралды 18 наурыз 2024; Қабылданды 26 сәуір 2024.

УДК 624.21  
МРНТИ 67.07.03  
ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

## ПРИМЕНЕНИЕ ТРУБОБЕТОНА В АРОЧНОМ МОСТОСТРОЕНИИ

Н.Б. Кудайбергенов<sup>1,\*</sup> , К.Ю. Астанков<sup>2</sup> , И.Г. Овчинников<sup>2</sup> ,  
Т.Ш. Абильмаженов<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева

<sup>2</sup>Уральский государственный университет путей сообщения

---

**Аннотация.** Рассматривается опыт применения трубобетонных конструкций в мостостроении на примере объектов, построенных за последние 30 лет в Китайской Народной Республике. Рассмотрены особенности строительства моста через р. Сюнь в уезде Пиннань провинции Гуанси, имеющего на сегодняшний день рекордный пролёт длиной 575 м. Выполнен обзор выдающихся объектов, построенных с применением большепролётных решётчатых арок из трубобетонных элементов, работающих преимущественно на внецентренное сжатие. Рассмотрены различные способы монтажа пролётов сталеарочных трубобетонных арок, преимущества и недостатки каждого метода. Подробно рассмотрена технология бетонирования труб. Рассмотрены конструкции и методы строительства объектов с применением большепролётных арок сплошного сечения с затяжкой для строительства мостов с пролётами 46 и 96 метров. Рассмотрены современные исследования в области работы изгибаемых арок в сравнении с моделью, рассматривающей работу трубобетонного элемента как внецентренно сжатой колонны, что в перспективе способно обеспечить более эффективное использование свойств материалов при проектировании. Указывается перспективность использования трубобетонных конструкций для строительства малых мостов что особенно важно в районах, удалённых от предприятий стройиндустрии с малоразвитой сетью автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** арочные мосты, трубобетон, малое мостостроение, изгибаемый трубобетон, конструкции

---

\*Автор-корреспондент

Нурлан Кудайбергенов, e-mail: [kudaibergenov\\_nb@enu.kz](mailto:kudaibergenov_nb@enu.kz)

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-07>

Поступило 22 февраля 2024 г.; Пересмотрено 18 марта 2024 г.; Принято 26 апреля 2024 г.

#### **ACKNOWLEDGEMENTS/SOURCE OF FUNDING**

The study was conducted using private sources of funding.

#### **CONFLICT OF INTEREST**

The authors state that there is no conflict of interest.

---

#### **АЛҒЫС / ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ**

Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалана отырып жүргізілді.

#### **МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ**

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

---

#### **БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ**

Исследование проводилось с использованием частных источников финансирования.

#### **КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ**

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Конструкции из трубобетона находят всё большее применение в строительстве – для большепролетных сооружений мостов, а также уникальных зданий большой высоты. Из сталетрубобетонных элементов (СТБ) образуются пространственные стержневые системы различной конфигурации. Трубобетон применяется и в мостостроении, где существуют перспективные поля для расширения его применения, благодаря уникальному сочетанию эффективности работы материалов, простоты конструкции, технологичности, а также высокой степени живучести элементов конструкции, даже после серьёзного повреждения элементов (**Krishan, 2011**).

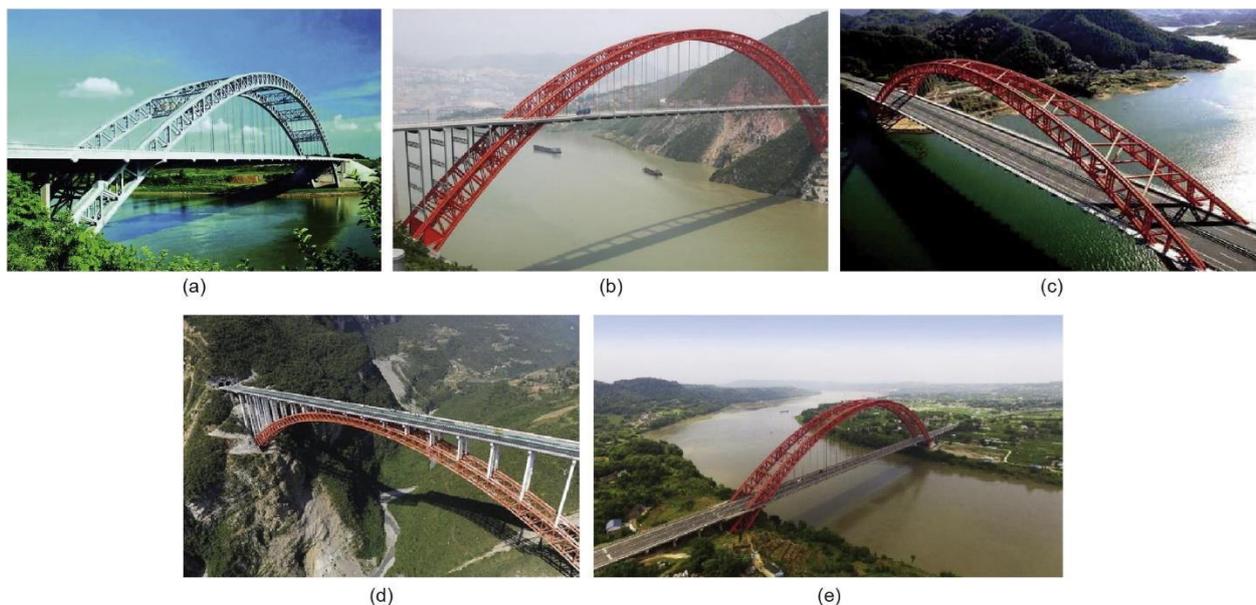
Впервые в практике отечественного мостостроения трубобетон был применён на строительстве Володарского моста в г. Ленинграде по проекту Г.П. Передерия при участии инженера В.И. Крыжановского.

Трубобетонный арочный мост решётчатой конструкции впервые был построен в 1939 году недалеко от г. Каменск-Уральский в Свердловской области и эксплуатируется до настоящего времени (**Рисунок 1**).



**Рисунок 1** – Арочный мост из трубобетона в г. Каменск-Уральский Свердловской области  
(Источник: <http://surl.li/sjifrv>).

Большое развитие получило применение трубобетона в Китайской Народной Республике. Китайские инженеры, в результате выполнения необходимого комплекса исследовательских работ в области изучения конструкции и технологии строительства арочных мостов из трубобетонных элементов, достигли большого успеха в строительстве таких мостов. В течение последних 30 лет в Китае было построено более 400 СТБ арочных мостов (**Zheng & Wang, 2018**). Кроме того, развитие мостостроения с применением трубобетона там и в настоящее время продолжается бурными темпами (**Рисунок 2**).



**Рисунок 2** – Мосты из трубобетона в Китае (Zheng & Wang, 2018): (a) мост через р. Юн в провинции Гуанси (главный пролёт 270 метров, строительство завершено в 1998 году); (b) мост через р. Янцзы в г. Ухань (пролёт 460 метров, построен в 2005 году); (c) мост через озеро Тайпин в провинции Аньхой (главный пролёт 352 м, построен в 2007 году); (d) мост через р. Чжицзин на автомагистрали Хуронси (главный пролёт 430 м, построен в 2009 году); (e) Первый мост через р. Янцзы в провинции Хэйцзян (главный пролёт 430 м, построен в 2009 году).

## 2 ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА СТРОИТЕЛЬСТВЕ СТБ МОСТОВ

«Третий» мост в уезде Пиннань через р. Сюнь с рекордной для всего мира длиной пролёта в 575 метров построен в 2020 году провинции Гуанси (Zheng et al., 2021) (Рисунок 3). Мост представляет собой арку решётчатой конструкции из сталетрубобетонных элементов с ездой посередине.

Строительство моста выполнено с использованием комплекса инновационных организационных и технологических решений, включая следующие:

- взаимная увязка процесса проектирования и заводского изготовления деталей с целью ускорения навесной сборки металлических конструкций фермы главной арки;

- использование технологической системы контроля усилий и перемещений вспомогательных монтажных мачт, а также системы оптимального распределения усилий при одновременном натяжении кабелей подвесок с использованием навигационной спутниковой системы BeiDou (BDS);

- применение технологии вакуумного бетонирования для повышения эффективности заполнения труб бетонной смесью в комплексе с использованием специальных безусадочных составов с увеличенным сроком начала схватывания – такой подход принципиально разрешает проблему присущего трубобетону недостатка, ограничивающего его применение в мостостроении, который заключается в возможном отслоении бетонного ядра от стенки трубы при усадке бетонной смеси;

- сооружение северной опоры моста на фундаменте нового типа, состоящем из цементированного массива галечного грунта, заключённого в железобетонную обойму, выполненную по технологии «стена в грунте»;

- использование новейших подходов в организации строительства моста, заключающихся в объединении информационных технологий, результатов научных исследований и богатого опыта строительства подобных большепролётных объектов.



**Рисунок 3** –Мост через р. Сюнь в уезде Пиннань провинции Гуанси с рекордной, на сегодняшний день, длиной пролёта в 575 метров построен в 2020 году.

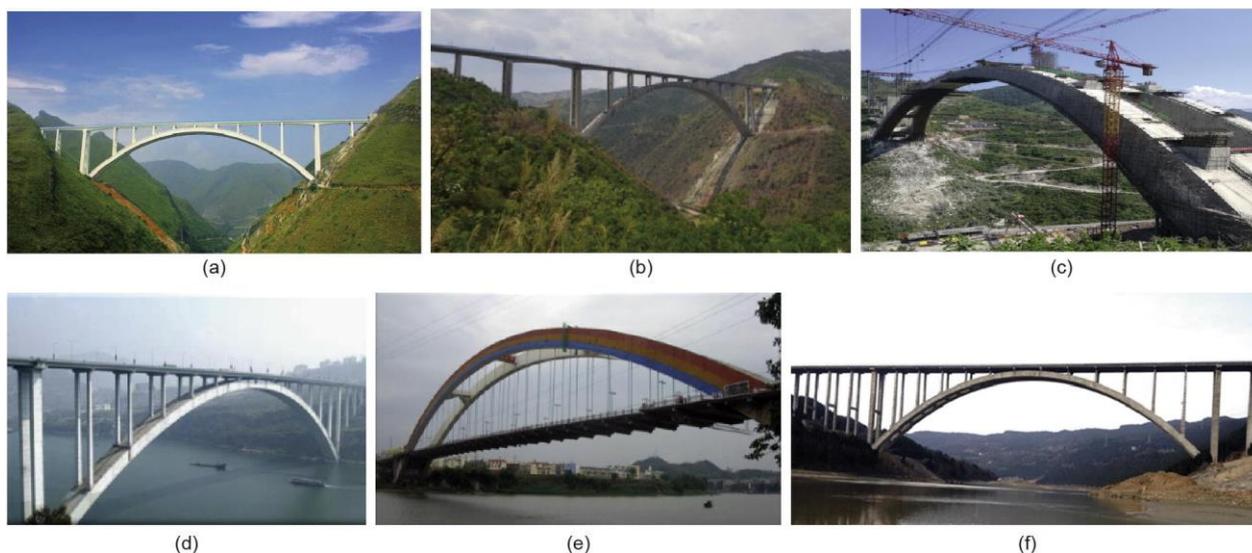
Длины пролётов мостов с решётчатой аркой из трубобетонных элементов на новых объектах постоянно продолжают увеличиваться, поскольку эта технология, является более перспективной даже по сравнению с обычным железобетоном, который используется для строительства уникальных мостов – примеров выдающихся достижений мостостроения мирового уровня. Так, на дату издания статьи Цзилиань Чжэн и Цзяньцзюнь Ван (2018 г.) (Zheng & Wang, 2018), в мире насчитывалось всего четыре железобетонных арочных моста с пролётом более 400 метров. Все эти мосты построены в Китае, причём три из них запущены в эксплуатацию в 2016 году (Рисунок 4).

Первый в Китае арочный мост из СТБ элементов был построен в 1990 году через р. Дон (Dong) в уезде Ванцан провинции Сычуань (Zheng & Wang, 2018). С того времени, около 18 мостов аналогичной конструкции возводится в КНР ежегодно. Таким образом, по данным на 2016 год, в Китае было построено более 400 арочных СТБ мостов, из них 54 имеют пролёт более 200 метров, 11 – пролёт более 300 метров и четыре моста имеют главный пролёт более 400 метров и ещё три таких моста находились в процессе строительства на дату выхода статьи (Zheng & Wang, 2018).

### **3 ОБЗОР МЕТОДОВ МОНТАЖА ПРОЛЁТНЫХ СТРОЕНИЙ БОЛЬШЕПРОЛЁТНЫХ СТБ МОСТОВ**

Интерес представляют не только общие технические параметры рассмотренных объектов, но и технологические приёмы, применяемые китайскими коллегами для строительства этих мостов, их рассматривают Цзилиань Чжэн и Цзяньцзюнь Ван в статье (Zheng & Wang, 2018). Наиболее важным и ответственным этапом при строительстве таких мостов является возведение решётчатой арочной конструкции из стальных труб. Для этого

применяются, в основном, три метода: навесная сборка с использованием вспомогательных вантовых систем, поворот конструкции и подъём предварительно укрупнённых блоков.



**Рисунок 4** – Мосты из железобетона в Китае (Zheng & Wang, 2018): (a) мост через р. Бейпан на перегоне высокоскоростной железной дороги Шанхай – Куньмин (главный пролёт 445 м, построен в 2016 г.); (b) железнодорожный мост через р. Нанпан на перегоне Юньнань – Гуанси (главный пролёт 416 м, построен в 2016 г.); (c) мост через р. Йеланг на перегоне высокоскоростной железной дороги Чунцин – Гуйчжоу (главный пролёт 370 м, построен в 2016 г.); (d) мост через р. Янцзы в городе Вэньчжоу (главный пролёт 420 м, построен в 1997 г.); (e) мост через р. Юн в г. Юннин, провинция Гуанси (главный пролёт 312 м, построен в 1996 г.); (f) мост через р. Цзялин в районе Чжаохуа (главный пролёт 364 м, построен в 2012 г.)

### 3.1 НАВЕСНАЯ СБОРКА

В 1968 году китайские инженеры (Zheng & Wang, 2018) разработали технологию, использующую метод навесной сборки с замыканием последней секции посредством ослабления вспомогательных стальных вант, удерживающих возводимую арку в процессе сборки. Этот метод впервые позволил отказаться от строительства временных опор в пределах возводимого пролёта и обеспечил безопасность и технологичность навесной сборки пролётного строения арки пролётом около 100 метров, разделённой на пять монтажных элементов (марок). Этот же метод, с учётом развития технологии, используется и в настоящее время, он был применён на строительстве «Третьего» моста в уезде Пиннань через р. Сюнь, запущенном в эксплуатацию в 2020 году.

Суть рассматриваемого способа заключается в следующем. Арка возводится с двух сторон навесным методом. Для удержания половинок арки устраивается система временных пилонов и вант, закреплённых одним концом на берегу, а другим на арке. Система временных пилонов и вант, кроме её основного назначения, служит также ещё и опорой для кабельных кранов, осуществляющих подъём монтажных марок. Такой подход сделал возможным возведение арочных мостов без необходимости сооружения временных устройств, поддерживающих в процессе монтажа арку снизу, для которых, в свою очередь, требуются опоры в пределах пересекаемого препятствия, что само по себе зачастую является довольно сложной задачей, решаемой за счёт серьёзных затрат времени, труда и материалов, не говоря уже о влиянии на окружающую среду.

Благодаря простоте системы подвесов и высокой экономической эффективности, стоимость строительства моста с решётчатой аркой из СТБ элементов с пролётом 100 метров эквивалентна стоимости обычного железобетонного балочного моста с пролётом 30 метров (Zheng & Wang, 2018). Такой метод использовался для строительства и других арочных мостов, количество которых превышает 1000. Ярким примером применения этой технологии

является мост Цзюцзичжоу через реку Сян в городском округе Чанша, который был построен в 1972 году, имеет общую длину 1250 метров и пролёты по 76 метров.

В 1994 году была разработана технология замыкания пролёта с использованием навесной консольной сборки на временных вантах с установкой замкового блока и последующим ослаблением поддерживающих вант. Этот способ впервые был применён для сборки каркаса из стальных труб при строительстве арки с главным пролётом 312 метров. Для подачи и возврата в первоначальное положение стальных канатов использовался подъёмный домкрат, что позволило достичь точности в 1 мм. монтаж арки производится последовательно из готовых сегментов. Статическую геометрическую неизменяемость арки при монтаже таким способом можно достичь при наличии только трёх блоков, независимо от количества используемых сегментов, что делает этот метод применимым для монтажа мостов с пролётом более 100 метров. Данный способ применялся при строительстве сотен арочных мостов, включая такие знаменитые объекты, как мост через р. Лупу в Шанхае с главным пролётом 550 м, Первый мост через р. Янцзы в провинции Хэйцзян с пролётом 530 м, мост через р. Янцзы в городе Вэньчжоу с пролётом 420 м и мост через р. Бейпан на автостраде Шанхай – Куньмин с пролётом 445 метров. Эта технология использовалась также и при строительстве моста Фусин в г. Ханчжоу (**Рисунок 5**) (**Zheng & Wang, 2018**), при этом была достигнута высочайшая производительность монтажа – перекрытие одного пролёта выполнялось в течение двух дней, строительство же всего этого двухъярусного моста общей длиной 1376 метров и площадью 70 000 квадратных метров было завершено в течение двух лет.



**Рисунок 5** –Монтаж моста Фусин в г. Ханчжоу с использованием системы временных вант.

### 3.2 МОНТАЖ СПОСОБОМ ПОВОРОТА

Этот способ монтажа для строительства арочных мостов был освоен китайскими инженерами в 1977 году, при этом выполняется поворот пролётного строения в горизонтальной или в вертикальных плоскости (**Zheng & Wang, 2018**). До настоящего времени он применялся на строительстве более, чем 70 мостов. Типовым примером горизонтального поворота пролёта является железнодорожный мост через р. Бейпан на перегоне Гуйчжоу – Шуйбай (**Рисунок 6**). Мост выполнен из трубобетонной арки с ездой поверху, пролёт составляет 236 метров, высота над уровнем реки – 275 метров, построен в

2001 году. Этот способ имеет преимущество в том, что он обеспечивает возведение объекта, совершенно независимо от состояния подмостового пространства, не изменяет статическую схему сооружения в процессе поворота и обеспечивает высокий уровень безопасности производства работ. Однако, существенным недостатком этого способа является высокий уровень затрат на сооружение временного поворотного стола, что препятствует его широкому применению, особенно для строительства мостов с большими пролётами.



Рисунок 6 – Железнодорожный мост через р. Бейпан на железнодорожном перегоне Гуйчжоу – Шуйбай (Beipan River Shuibai Railway Bridge, 2001).

### 3.3 МОНТАЖ КРУПНЫМИ БЛОКАМ

Такой способ монтажа подразумевает использование плавучих средств и домкратов высокой грузоподъемности, он использовался на строительстве двух крупных объектов (Zheng & Wang, 2018), что в масштабе рассматриваемого числа объектов незначительно. Этот метод удобен тем, что минимизирует количество операций, выполняемых на высоте. Перераспределение напряжений в элементах фермы отдельного сегмента арки компенсируется установкой временных распорок или затяжек, это позволяет максимально увеличить длину подаваемого на монтаж сегмента. Увеличение массы поднимаемого сегмента решается увеличением количества подъемных домкратов. Цзилиань Чжэн и Цзяньцзюнь Ван (Zheng & Wang, 2018) считают этот метод очень перспективным, по их мнению, он позволит ещё больше увеличить пролёт возводимых СТБ мостов.

### 4 ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНИРОВАНИЯ СТБ КОНСТРУКЦИЙ МОСТА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ БЕТОНА И СТАЛЬНОЙ ТРУБЫ

Несущая способность СТБ элементов арок моста зависит от взаимодействия между стальной трубой и заключённого в ней бетонного ядра. Множество исследований, в том числе и экспериментальных, было посвящено изучению природы касательной сила сцепления на

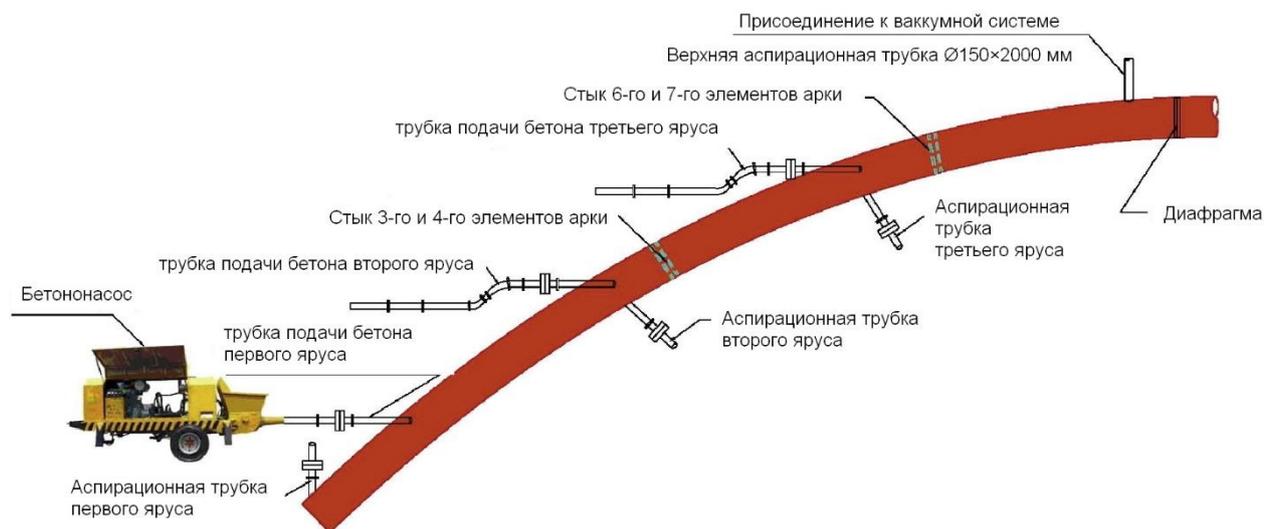
границе материалов внутри СТБ элемента. При этом было установлено (Zheng & Wang, 2018), что она состоит из четырёх компонентов: химические силы межмолекулярного взаимодействия, механические силы трения покоя и трения скольжения, причём силу трения покоя, в свою очередь, Цицилиань Чжэн и Цзяньцзюнь Ван разделяют на две составляющих: для малых перемещений – «механическую» (*mechanical bite force*) и для больших перемещений – «макроскопическую» (*macroscopic bite force*). Так, самыми слабыми из рассматриваемых сил являются силы химического взаимодействия – они исчезают уже при начальных стадиях сдвига, возникающих при действии малейших растягивающих напряжений. Силы трения скольжения и трения покоя (макроскопическая) проявляются только при больших значениях относительного проскальзывания компонентов СТБ элемента. Механические силы трения покоя проявляются, начиная с малых перемещений и действуют до начала работы сил трения скольжения. Отслоение бетона от стальной трубы внутри СТБ элемента оказывает существенное влияние на силу сцепления и местную устойчивость стенки стальной трубы. Для предупреждения этого дефекта необходимо решение двух следующих задач: первая – гарантировать отсутствие воздушных полостей при бетонировании трубы, и вторая – обеспечить баланс параметров расширения и усадки бетонной смеси не только при наборе прочности, но и на протяжении всего жизненного цикла сооружения.

При приготовлении бетонной смеси необходимо соблюдение двух существенных условий. Первое – обеспечение требуемой подвижности и устойчивости смеси против её расслоения для обеспечения укладки без необходимости уплотнения. Второе – придание при этом безусадочных бетону свойств на протяжении всего периода эксплуатации. Необходимая подвижность и устойчивость бетонной смеси достигается контролем толщины водной плёнки, а также сцепления и трения на межфазных поверхностях её компонентов. Усадка бетона исключается применением добавок, компенсирующих деформацию усадки и изменение внутренней структуры цементного камня на химическом уровне, а также применений специальной технологии ухода за бетоном. При этом, в готовом элементе возникают небольшие сжимающие напряжения, поэтому на стадии проектирования должно быть предусмотрено наличие этих начальных напряжений.

Процесс укладки бетонной смеси в своём развитии прошёл несколько стадий: заливка нижележащих отсеков с подачей смеси сверху, закачивание смеси снизу-вверх и метод вакуумирования, который является наиболее современным и гарантирует качество укладки смеси в трубу. Этот метод был экспериментально проверен на натуральных моделях СТБ элементов в процессе подготовки к строительству Первого моста через р. Янцзы в провинции Хэйцзян. Испытания подтвердили, что заполнение труб методом вакуумирования с отрицательным давлением величиной от 0,07 до 0,09 МПа в сочетании с подачей раствора под давлением снизу позволяет достичь лучших результатов, по сравнению с традиционным способом. Длина каждого трубчатого пояса фермы арки приблизительно 600 метров, для её заполнения требуется около 800 м<sup>3</sup> бетона класса С60. Бетонная смесь на весь отсек (представляющий одну захватку) подаётся непрерывно, с выделением трёх ярусов, что позволяет сократить время, в течение которого необходимо обеспечивать задержку начала схватывания смеси, а также уменьшить рабочее давление применяемых бетонных насосов (Рисунок 7). Количество уровней зависит от объёма захватки и доступных на площадке производственных мощностей. Постоянно изменяющиеся по мере заполнения бетонной смесью отклонения свода арки компенсируются натяжением системы временных вант. Для заполнения одного трубчатого пояса арки обычно требовалось 12 часов и процесс бетонирования всех восьми поясов главной арки занял 33 дня. В течение трёх дней была выполнена ультразвуковая дефектоскопия сплошности бетона во всех 144 фланцевых стыках. Исследование показало, что 100% проверенных стыков соответствуют требованиям норм и них 92% – безупречного качества, что подтверждает надёжность принятой технологии.

Разработка технологии вакуумного бетонирования позволяет преодолеть некоторые сложности, препятствующие применению СТБ в мостостроении. С применением этой технологии в 2013 году был построен Первый мост через р. Янцзы в провинции Хэйцзян с

рекордным среди сталетрубобетонных арок пролётом 530 метров. Общая стоимость строительства составила 260 млн. юаней, что на дату написания настоящей статьи составляет около 2,8 млрд. рублей. Это существенно ниже стоимости традиционных мостов с аналогичными параметрами. Например, стоимость строительства Второго моста через р. Янцзы в провинции Хэйцзян с главным пролётом 420 метров оказалась на 100 млн. юаней выше при той же продолжительности строительства.



**Рисунок 7** –Схема непрерывного вакуумного бетонирования захватки с разделением её на три яруса (Zheng & Wang, 2018).

#### 4.1 ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ И МЕТОДОВ СТРОИТЕЛЬСТВА СТБ АРОК С ЗАТЯЖКОЙ

С учётом рассмотренных примеров строительства мостов из СТБ арок больших пролётов, учитывая эффективность материала, доступность и сравнительную простоту технологий, а также привлекательную стоимость строительства, представляет интерес вопрос возможности использования имеющихся достижений для строительства мостов меньших пролётов, а особенно малых мостов

Мост с относительно небольшим пролётом, но при этом обладающий сравнительно простой конструкцией рассмотрен в статье Бао-чан Чен и др. о применении СТБ для строительства арочных мостов с обзором результатов экспериментов по определению предельной нагрузки для арок не только решётчатой конструкции, но и сплошного сечения (Chen et al., 2004). На основании результатов исследований, им был разработан проект арочного трубобетонного моста Куньи в городе Фуан провинции Фуцзянь.

Мост представляет собой арку с ездой посередине. Главный пролёт арки составляет 46 метров, стрела подъёма принята 1/3, что составляет 15,3 метра. Фасад моста показан на **Рисунок 8**. Пояс арки выполнен из одиночной стальной трубы диаметром 800 мм с толщиной стенки 14 мм, заполненной бетоном класса С30. Параллельные пояса арки связаны двумя горизонтальными поперечными связями из одиночных стальных труб, установленными в области свода, а также двумя железобетонными поперечными балками с раскосами из стальных труб – в основании арки.

Габарит автомобильного проезда по ширине составляет 12 метров, с двух сторон от него размещены тротуары шириной 1,5 метра каждый. Проезжая часть моста выполнена из железобетонных плит пролётом 4 метра и толщиной 200 мм, опирающихся на систему продольных и поперечных балок. Продольные балки соединяются с верхней частью арки подвесками из труб Ø109×5 мм, выполненными из высокопрочной стали. Надарочные стойки

выполнены из железобетона. Мост был запущен в эксплуатацию в июле 1998 года, строительство начато в 1996 году.

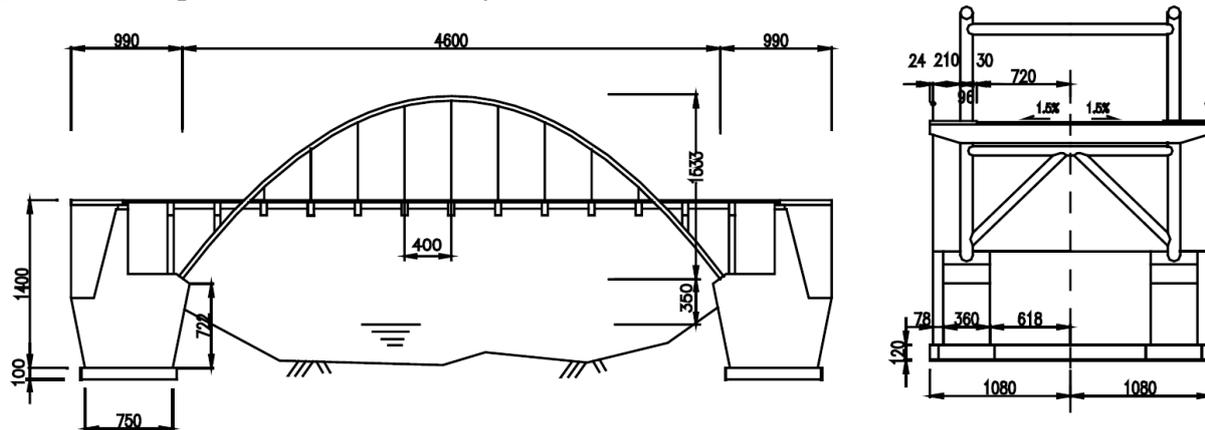


Рисунок 8 –Чертёж моста Куньи в городе Фуан провинции Фуцзянь, размеры указаны в сантиметрах (Zheng, 2021).

Для строительства арочных мостов на равнинных территориях обычно применяются арки с ездой понизу, при этом продольная балка проезжей части моста зачастую используется в качестве затяжки, что существенно повышает эффективность конструкции и позволяет исключить действие распора на устои моста. Конструкция и объём фундаментов моста сильно упрощается, что положительным образом сказывается на их стоимости и стоимости сооружения в целом. Кроме того, в этом случае возможно размещение моста в грунтах, к которым не предъявляются высокие требования по прочности и деформативности, т.к. арочные мосты без затяжки строятся преимущественно на скальном основании, множество примеров таких мостов было рассмотрено в начале настоящей статьи.

Сложность в строительстве арочных мостов с затяжкой в уровне проезжей части связана с тем, что при возведении моста до замыкания всей конструкции (системы затяжек и подвесов) горизонтальный распор воспринимается только фундаментами. Поэтому длина пролёта при строительстве мостов такой конструкции обычно ограничивается величиной 100 метров.

Один из таких мостов – Второй мост через реку Хуанхэ в городе Чжэнчжоу (Chen et al., 2004) (Рисунок 9). Мост состоит из двух параллельных независимых частей и обеспечивает пропуск автотранспорта по четыре полосы в каждом направлении – по четыре на каждой из частей.



Рисунок 9 –Строительство Второго моста через реку Хуанхэ в Чжэнчжоу (Zhang et al., 2004).

Русловая часть моста перекрыта восемью одинаковыми 100-метровыми пролётами (по осям опор), пролёт каждой арки составляет 95,5 метра. Стрела подъёма арок составляет  $1/4,5$ ; ось арки описывается кантернарной кривой с параметром  $a = -1,347$ . Расстояние по осям арок вдоль моста составляет 22,377 метра, жёсткость конструкции в поперечном направлении обеспечивается установкой в каждой арке трёх поперечных связей из полых стальных труб: одной прямой и двух с К-образными подкосами (Рисунок 10).



Рисунок 10 – Конструкция Второго моста через реку Хуанхэ в Чжэнчжоу. Размеры на фасаде указаны в см, на сечении – в мм (Zhang et al., 2004).

Профиль каждой арки представляет собой составное (гантелеобразное) сечение из двух СТБ элементов с жёсткими вставками из стальных двутавров. Такая конструкция арок обеспечивает более высокую жёсткость сечения на изгиб по сравнению с одиночной трубой и при этом она проще в изготовлении и придаёт более лаконичный внешний вид сооружению по сравнению с решётчатой конструкцией фермы. Обычно такое решение применяется для перекрытия пролётов от 60 до 120 метров.

Центры труб в сечении пояса рассматриваемого моста разнесены на расстояние 1400 мм по высоте, вертикальный габарит сечения составляет 2400 мм, обе трубы заполнены бетоном С50. Обычно, диаметры  $D$  применяемых труб находятся в интервале от 150 до 1500 мм, в большинстве случаев – это 750 – 900 мм, просвет между трубами  $L$  назначается из определения соотношения  $D/L$  в пределах от  $1/60$  до  $1/150$ . Общая высота сечения пояса  $H$ , таким образом, составляет от 1200 до 2000 мм, соотношение  $H/L$  – от  $1/30$  до  $1/60$  и  $D/L$  – от  $1/2,11$  до  $1/2,67$  (обычно,  $1/2,5$ ). Толщина стенки стальной трубы – от 8 до 16 мм, в основном – 10 мм. В общем случае, соотношения  $D/L$  и  $H/L$  уменьшаются с увеличением пролёта арки. Подвески выполнены из высокопрочных стальных канатов, защищённых двухслойным покрытием из полиэтилена. Продольная балка проезжей части, используемая в качестве затяжки, выполнена в виде предварительно напряжённой железобетонной балки коробчатого сечения с размерами 2 м шириной и 2,75 м высотой. Каждое пролётное строение опирается на четыре резиновые опорные части грузоподъёмностью по 1750 тонн (Chen et al., 2004). Строительство моста завершено в 2004 году.

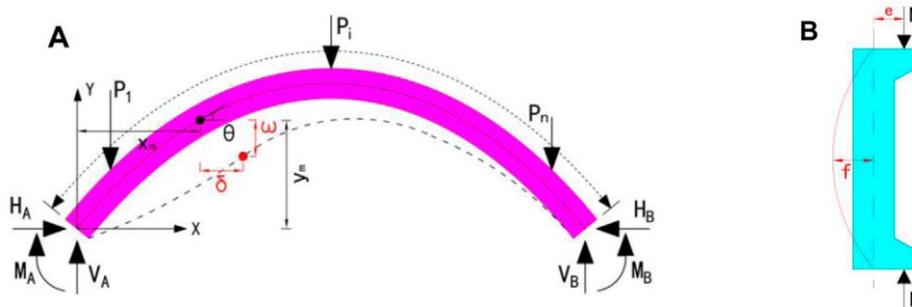
Несмотря на признанную эффективность работы труботетонных элементов на сжатие, работа труботетона на изгиб исследована гораздо меньше. Однако, имеющиеся в этой области работы свидетельствуют о перспективности этого направления и необходимости проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований (Astankov & Ovchinnikov, 2021).

## 4.2 СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ АРКИ НА ИЗГИБ В СРАВНЕНИИ С ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТОЙ СТОЙКОЙ

О результатах исследований, выполняющихся в направлении исследования работы изгибаемой труботонной арки в 2023 году опубликована работа Шаоруи Ван (**Wang et al., 2023**). В статье рассматривается фактическая, наиболее приближенная к реальной, механика работы арочного изгибаемого СТБ элемента по схеме изгибаемой арки в отличие от общепринятой в нормах схемы работы элемента арки как внецентренно сжатого стержня.

Для возможности анализа фактического напряжённо-деформированного состояния, моделей разрушения элементов, а также изгибающего момента с учётом его геометрической нелинейности, была проведена серия натурных испытаний СТБ арок и выполнено сопоставление их результатов с данными, полученными в результате расчётов по традиционной модели внецентренно сжатого элемента.

Результаты экспериментов (**Wang et al., 2023**) показали, что распределение воздействие внешних сил, вызывающих изгиб арки, производит в ней внутренние усилия в виде изгибающего момента, поперечной и продольной сил, вызывающих, в свою очередь, в опоре вертикальную реакцию и отпор. При этом, во внецентренно сжатой колонне возникает только вертикальная реакция в основании и изгиб, вызываемый эксцентриситетом прикладываемой продольной силы (**Рисунок 11**).



**Рисунок 11** – Усилия в элементе в зависимости от принятой модели расчёта: А – при расчёте по схеме изгибаемой арки, В – по схеме внецентренно сжатого стержня (**Wang et al., 2023**).

Стадии деформирования изгибаемой арки, в основном, совпадают со схемой внецентренно сжатой колонны. Однако, модели разрушения в рассмотренных схемах существенно различаются. Так, изгибаемая арка разрушается с образованием пластических шарниров в четырёх точках, а внецентренно сжатая колонна – с образованием шарнира в одной точке. При расчёте элемента по модели внецентренно сжатой колонны деформационная способность изгибаемой арки выше искусственно занижается.

Теоретические значения изгибающего момента, определяемого с учётом геометрической нелинейности, в обоих случаях совпадают. Способ определения значений этого момента в расчётном сечении с использованием эксцентриситета является надёжным, но даёт несколько заниженные результаты, при этом, недостаточно изучено влияние геометрической нелинейности на величину момента в других сечениях. Таким образом, основные различия рассматриваемых моделей заключаются в схемах распределения и путях передачи усилий, а также причинах возникновения деформаций (**Storozhenko et al., 1994**).

Сфера применения труботонных элементов, испытывающих поперечный изгиб, представляется очень обширной и может охватывать почти все случаи применения балок небольших пролётов. Известно, что для строительства малых мостов с пролётами до 40 метров эффективно применение арочной засыпной конструкции. Такой подход позволяет вдвое сократить стоимость строительства и на 30-40% снизить затраты на материалы (**Drobyshevsky, 2020**). Рассмотренные выше примеры применения труботонных конструкций с учётом их

способности эффективно работать не только на внецентренное сжатие, но и на изгиб, позволяют рассматривать их в качестве основных несущих конструкций арок при строительстве малых грунтозасыпных мостов. К настоящему времени разработан ряд оригинальных технических решений для повышения эффективности изгибаемых трубобетонных элементов (Moiseev et al., 2016; Ovchinnikov et al., 2016; Moiseev et al.; 2016a, Ovchinnikov et al., 2019) однако, в основном, балочных. Поэтому большой интерес представляет исследование возможности применения трубобетона для устройства арок малых пролётов при строительстве грунтозасыпных мостов.

## 5 ВЫВОДЫ

Высокая степень надёжности конструкций из трубобетона и их способность длительное время выдерживать нагрузку после начала разрушения (на стадии пластической работы трубобетонного элемента – при разрушении сжатого бетонного ядра) хорошо влияет на повышение общей живучести сооружения, что является обязательным требованием СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» – обеспечение прочности и устойчивости формы и положения остальных элементов при выходе из строя отдельных конструктивных элементов.

Кроме того, использование трубобетонных конструкций для строительства малых засыпных арочных мостов является особенно перспективным в районах, удалённых от предприятий стройиндустрии, с малоразвитой сетью автомобильных дорог, что очень важно для быстрого строительства или восстановления сообщений, из-за отсутствия необходимости транспортировки крупногабаритных и массивных строительных мостовых конструкций и необходимой для их монтажа тяжёлой техники.

Развитие теоретических методов расчёта изгибаемых арок, основанных на результатах экспериментов и опытно-конструкторских работ, является перспективным направлением исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zheng J., Wang J.** (2018). Concrete-Filled Steel Tube Arch Bridges in China. *Engineering*, 4, 143–155. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.12.003>
2. **Krishan A.L.** (2011). Strength of tubular concrete columns with a pre-compressed core [Prochnost' trubobetonnyh kolonn s predvaritel'no obzhatym yadrom]. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Rostov-on-Don: Rostov State University of Construction, 38. (In Russ.)
3. **Storozhenko L.I., Efimenko V. I., Plakhotny P.I.** (1994). Bendable tubular concrete structures [Izgibaemye trubobetonnye konstrukcii]. Kiev: Budivelnik, 104. (In Russ.)
4. **Zheng J., Du H., Mu T., Liu J., Qin D., Mei G., Tu B.** (2021). Innovations in design, construction, and management of Pingnan Third Bridge—the largest-span arch bridge in the world. *Structural Engineering International*, 32 (2), 134-141. <https://doi.org/10.1080/10168664.2021.1956399>
5. **Beipan River Shuibai Railway Bridge.** (2001). Retrieved from: [https://ru.abcdef.wiki/wiki/Beipan\\_River\\_Shuibai\\_Railway\\_Bridge](https://ru.abcdef.wiki/wiki/Beipan_River_Shuibai_Railway_Bridge)
6. **Chen B.C., Chen Y.J., Qin Z.B., Hikosaka H.** (2004). Application of concrete filled steel tubular arch bridges and study on ultimate load-carrying capacity. *Arch Bridges ARCH'04* P. Roca and E. Oñate (Eds). CIMNE, Barcelona. <http://surl.li/uqghrr>

7. **Zhang W.Z., Chen B.C., Huang W.J.** (2004). Design of the second highway bridge over Yellow River in Zhengzhou, China. Arch Bridges ARCH'04 P. Roca and E. Oñate (Eds). CIMNE, Barcelona. <http://surl.li/lawtgz>
8. **Astankov K. Y., Ovchinnikov I.G.** (2021). Prospects for the use of tubular concrete structures for the construction of small arch bridges [Perspektivy primeneniya trubobetonnyh konstrukcij dlya stroitel'stva malyh arochnyh mostov]. Traditions, modern problems and prospects for the development of construction: collection of scientific articles. Grodno: GrGU, 271. (In Russ.)
9. **Wang S., Li Y., Liu Z., Cheng T.** (2023). Calculation model of concrete-filled steel tube arch bridges based on the «arch effect». *Frontiers in Materials*, 9:1084999. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1084999>
10. **Drobyshevsky B.A.** (2020). Small Bridges: a monograph [Malye mosty: monografiya] Moscow: INFRA-M, p. 228 - (Scientific thought). Retrieved from: <https://znanium.com/catalog/product/990005>
11. **Moiseev O.Y., Paryshev D.N., Ovchinnikov I.G., Kharin V.V., Ovchinnikov I.I.** (2016). Tubular concrete beams with a partially prestressed concrete core for spans of small bridges [Trubobetonnye balki s chastichno predvaritel'no napryazhennym betonnym yadrom dlya proletnyh stroenij malyh mostov]. Modernization and scientific research in transport construction. Materials of the international scientific and practical conference (pp. 283-288) Perm: PNRPU Publishing House. (In Russ.)
12. **Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Moiseev, O.Yu., Paryshev D.N., Kharin V.V.** (2016). Improving the efficiency of tubular concrete beams for bridge spans using prestressing [Povyshenie effektivnosti trubobetonnyh balok dlya proletnyh stroenij mostov primeneniem predvaritel'nogo napryazheniya]. V.V. Minin (Ed.) Transport systems of Siberia. The development of the transport system as a catalyst for the growth of the state's economy. International scientific and practical conference: collection of scientific papers: part 1 (pp.147 – 150). Krasnoyarsk: Sib. Feder. Univ. (In Russ.)
13. **Moiseev O.Y., Paryshev D.N., Ovchinnikov I.G., Kharin V.V., Ovchinnikov I.I.** (2016). Innovative tubular concrete beam for spans of small girder bridges [Innovacionnaya trubobetonnaya balka dlya proletnyh stroenij balochnyh malyh mostov]. Innovative transport Scientific and journalistic publication. No. 2(20), 67-71. (In Russ.)
14. **Ovchinnikov I.G., D.N. Paryshev, A.V. Iltyakov, O.Y. Moiseev, V.V. Kharin, I.P. Popov, D.A. Kharin.** (2019). Increasing the load capacity of a tubular concrete beam [Povyshenie nagruzochnoj sposobnosti trubobetonnoj balki]. TRANSPORT. TRANSPORT FACILITIES. ECOLOGY, PNRPU, No. 4, 58-66. (In Russ.)