

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №4 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-4>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/95TVN415.pdf>

DOI: 10.15862/95TVN415 (<http://dx.doi.org/10.15862/95TVN415>)

УДК 624.042

Овчинников Илья Игоревич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»
Россия, Саратов¹

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ)»

Филиал в г. Сочи

Доцент

Кандидат технических наук

E-mail: BridgeArt@mail.ru

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
Россия, Пермь

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»
Россия, Саратов

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ)»

Филиал в г. Сочи

Профессор

Доктор технических наук

E-mail: BridgeSar@mail.ru

Чесноков Георгий Владимирович

«НИИ Графит» Предприятие госкорпорации «Росатом»

Россия, Москва

Главный специалист Проектного офиса «Строительный кластер»

E-mail: gchesnokov@niigrafit.org

Михалдыкин Евгений Сергеевич

«НИИ Графит» Предприятие госкорпорации «Росатом»

Россия, Москва

Главный инженер по строительству «Отдел строительных проектов»

E-mail: emihaldikin@niigrafit.org

¹ 410054, Саратов, Политехническая 77

О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 1.

Опыт применения трубобетона с металлической оболочкой

Аннотация. Приведены сведения о трубобетоне, особенностях работы компонентов трубобетона – металлической оболочки и бетонного сердечника, описаны приемы обеспечения совместной работы металлической трубчатой оболочки и бетонного ядра: приваривание стержней к внутренней поверхности труб, создание предварительного напряжения применением бетона на расширяющемся цементе. Также рассмотрен альтернативный прием – исключение сцепления бетонного ядра с металлической оболочкой. Приведены данные об эффективности трубобетона по сравнению с металлическими и железобетонными конструкциями и кратко освещена история создания трубобетонных конструкций с металлической оболочкой.

Рассмотрен опыт применения трубобетонных конструкций с металлической оболочкой в строительстве, в частности при возведении высотных зданий. Описано применение трубобетона при создании 58 - этажного здания в Сиэтле (США), 57 - этажного здания в Японии, 46 - этажного здания в Австралии. Более подробно рассмотрен опыт Китая в сфере применения трубобетона для возведения высотных зданий и сооружений (72 - этажного здания, телевизионной башни в Гуанчжоу).

Приведены экономические, конструкционные, эксплуатационные и технологические преимущества трубобетонной технологии.

Затем рассмотрен опыт применения трубобетона с металлической оболочкой в транспортном строительстве и отмечена роль российских ученых и инженеров. Описан опыт создания железнодорожного трубобетонного моста через реку Исеть, отмечен значительный вклад Китая в трубобетонное мостостроение. Сделан вывод об эффективности применения трубобетона и в высотном строительстве и в мостостроении и предложено использовать трубобетон с металлическими оболочками из старогодных труб.

Ключевые слова: трубобетон; металлическая оболочка; эффективность трубобетона; высотные здания; мостостроение; старогодные трубы.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 1. Опыт применения трубобетона с металлической оболочкой // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №4 (2015)
<http://naukovedenie.ru/PDF/95TVN415.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/95TVN415

Введение

Как известно, для повышения несущей способности железобетонного стержня сначала пытались применить способ насыщения его продольной арматурой. Однако исследования Р. Залигера [1] показали, что такой способ повышения несущей способности не эффективен, так как продольная арматура не повышала прочности бетона.

Консидером [1] в 1900 – 1903 годах было предложено для увеличения прочности бетонных стержней использовать поперечное армирование в виде спиральной обоймы. Он полагал, что так называемая арматура – оболочка создает боковое давление и тем самым повышает сопротивление бетона.

В 1915 году в Парижской Школе мостов и дорог были поставлены опыты по исследованию поведения трубчатых оболочек, заполненных инертным материалом (песком или гравием) и было установлено, что несущая способность заполненной трубы по осевому сжатию больше суммы сопротивлений трубы и заполнения.

Первые публикации о применении металлических труб, заполненных бетоном, появились в начале прошлого столетия, причем в начале полагали, что бетон препятствует развитию коррозии на внутренней поверхности трубчатых колонн. С этой целью в 1902 г. в Париже Джонс Севел провел испытания стальной трубы, заполненной бетоном с целью препятствия развитию коррозии [2]. При испытаниях же оказалось, что несущая способность трубобетонной колонны на 25% выше, чем суммарная несущая способность трубы и бетонного сердечника, испытанных по отдельности.

После того, как было обнаружено значительное повышение несущей способности трубобетонных колонн при случайной перегрузке, трубобетон начали широко исследовать и применять. Идея использования металлических труб, заполненных бетоном для изготовления несущих колонн зданий была предложена инженером Джоном Лалли (John Lally). В настоящее время заполненные бетоном металлические трубы используются в качестве колонн высотных сооружений или при устройстве ограждений котлованов.

Трубобетон представляет собой бетон, заключенный в металлическую трубу круглого или более сложного поперечного сечения. Бетон в трубобетонной колонне находится в условиях трехосного сжатия и потому несущая способность и деформативность трубобетона при сжатии значительно увеличивается. Если сравнить трубобетонную колонну с металлической, имеющей такую же несущую способность и вес, то снижение расхода металла в случае трубобетона может достигать величины 50%. Если же армировать железобетонную колонну тем же количеством металла, что и в трубчатой оболочке, то окажется, что сечение трубобетонной колонны при той же несущей способности может быть уменьшено также на величину до 50%.

Металлическая трубчатая оболочка играет роль и продольной и поперечной арматуры и одновременно опалубки, сопротивляющейся давлению свежееуложенного бетона, что позволяет упростить процесс возведения несущего каркаса высотных и большепролетных сооружений.

Трубобетонные конструкции надежны в эксплуатации, они способны длительное время выдерживать значительные нагрузки, прикладываемые в произвольных направлениях. Под действием нагрузки бетон стремится расшириться в поперечном направлении, но металлическая обойма препятствует развитию микротрещин и создает условия для эффективной работы бетона. В свою очередь бетонное ядро, заполняя металлическую оболочку, повышает ее жесткость и сопротивляемость общей и местной потере устойчивости.

Благодаря большой слитности круглого сечения трубобетонные конструкции имеют высокую обтекаемость и менее подвержены коррозионному износу, что увеличивает их долговечность, а также обеспечивает повышенную огнестойкость.

Вопросы проектирования различных конструкций из трубобетонных элементов рассмотрены в работах [3-8] и других, краткий обзор которых приведен в публикации [9].

Может сложиться впечатление, что у трубобетонных конструкций практически нет недостатков. Однако это не так. Например, в этих конструкциях очень сложно обеспечить совместную работу металлической трубчатой оболочки и бетонного ядра на всех стадиях эксплуатации. Труба начинает работать как обойма при нагрузках, при которых начинается трещинообразование.

Для обеспечения совместной работы металлической трубчатой оболочки и бетонного ядра применяются различные приемы. Например, к внутренней поверхности трубчатых оболочек приваривают металлические стержни (по аналогии с гибкими упорами в сталебетонных конструкциях) [10]. Еще один прием обеспечения совместной работы металлической оболочки и бетонного сердечника заключается в создании предварительного напряжения металлической обоймы применением бетона на расширяющемся цементе [11]. С другой стороны предлагается и альтернативное решение, когда стараются исключить сцепление между бетонным ядром и металлической трубчатой оболочкой путем использования специальной смазки, обеспечивающей скольжение стенок трубы относительно бетона в процессе деформирования конструкции. При этом нагрузка передается не на весь трубобетонный элемент, а только на бетонную часть и потому металлическая оболочка испытывает только растягивающие усилия в окружном направлении и не работает на сжатие. При этом создается система, при которой эффективно используются высокие прочностные свойства бетона на сжатие и металлической оболочки на растяжение.

Существует еще ряд предложений по обеспечению совместной работы бетонного сердечника и металлической обоймы, но, несмотря на это, эффективных способов обеспечения их совместной работы пока не найдено и в этом направлении можно и нужно проводить исследовательскую работу.

В целом, конструкции с применением трубобетонных элементов оказываются более эффективными, чем железобетонные или металлические в экстремальных условиях работы, при больших напряжениях, когда железобетонные или металлические конструкции могут быстро потерять устойчивость. То есть, другими словами, трубобетонные конструкции имеют весьма большую живучесть.

Эффективность применения трубобетона иллюстрируется нижеследующей таблицей 1.

Таблица 1

Сравнительные затраты трубобетона, металла и железобетона на сооружение несущей колонны под нагрузку 1500 тонн [15]

Материал колонн	трубобетон	металл	железобетон
Площадь сечения колонны, кв. м	0,321	0,059	0,405
Диаметр колонны, м	0,630	1,000	0,670
Площадь металла, кв. м	0,019	0,059	0,023
Площадь бетона, кв. м	0,302	-	0,382
Расход металла, %	100	304	127
Расход бетона, %	100	-	118

Как видно, трубобетон является весьма эффективным сочетанием особенностей работы бетона и металла.

1. Опыт применения трубобетона с металлической оболочкой в строительстве

Конструкции с применением трубобетонных элементов начали широко применяться в промышленном и гражданском строительстве лет 70 тому назад. В последнее время они эффективно используются при строительстве уникальных высотных зданий и сооружений [12-14].

В 1970 году американской фирмой «Skilling Word Magnusson Berkshire Inc.» была разработана особая конструктивная схема возведения высотных зданий, основанная на использовании трубобетонных конструкций из стали и заполнителя из сверхвысокопрочного бетона. Эту систему называли «SWMB» по первым буквам названия фирмы. Она была применена при возведении 58 этажного административного здания «Two Union Square» в Сиэтле (США) (рис. 1) Высота здания 230,7 м, год постройки – 1988. Основные несущие конструкции здания представляют собой четыре трубобетонных колонны, а по контуру здания располагаются еще 14 трубобетонных колонн диаметром от 910мм до 1360мм нижней части и до 410 мм в верхней части. Использование трубобетонных колонн позволило уменьшить затраты на строительство на 30% по сравнению с вариантом с применением железобетонных колонн, а расход металла составил 58 кг на 1 квадратный метр по сравнению с обычно затрачиваемыми для таких зданий 122 кг металла на 1 квадратный метр. Причем скорость сооружения трубобетонного каркаса высотного здания составляла 4 этажа в неделю.



Рис. 1. Здание «Two Union Square». Источник: <http://www.emporis.com/buildings/119483/two-union-square-seattle-wa-usa>

С использованием такой эффективной конструктивной схемы, основанной на использовании трубчатых оболочек, заполняемых сверхвысокопрочным бетоном, в Соединенных Штатах было построено более десятка высотных зданий.

В Японии в городе Кавагучи, недалеко от Токио, было построено здание высотой 185,8 м, состоящее из 57 этажей. Несущий каркас здания выполнен из трубобетона, причем диаметр труб с 1 по 21 этаж равен 812,8 мм при толщине стенки от 22 до 40 мм, прочность бетона на этом участке составляла 60 МПа; диаметр труб с 22 по 42 этаж равен 711,2 мм при толщине стенки от 12 до 28 мм, прочность бетона равна 54 МПа, и диаметр труб с 43 по 55 этаж составляет 609,6 мм при толщине стенки от 12 до 22 мм и прочности бетона 48 МПа.

В Австралии первое здание высотой 46 этажей с применением трубобетона было построено в 1990 г. в Мельбурне. Ядро здания образовано сталебетонными центральными шахтами, а по контуру здания размещены 24 трубобетонные колонны, состоящие из секций длиной 8 м. На внутренней поверхности в концах каждой секции приварены кольца для обеспечения совместной работы стальных оболочек и бетонных сердечников. Причем прочность бетона в сердечнике снижалась от 70 МПа на нижних этажах до 30 МПа на верхних этажах [15].

Как показали исследования [16], трубобетонные конструкции являются наиболее устойчивыми и огнестойкими. Например, огнестойкость трубобетонной колонны диаметром 400 мм составляет около 2 часов без применения какой-либо защиты, а если на наружную поверхность нанести защитную оболочку, то огнестойкость можно повысить до любого требуемого уровня.

При проектировании здания мэрии г. Вупперталь (Германия) решалась проблема создания практически не разрушаемых несущих колонн, что и было сделано путем использования двойных трубобетонных колонн, у которых диаметр внешней трубы был равен 558 мм при толщине стенки 12,5 мм, а диаметр внутренней трубы равен 406,4 при толщине стенки 17,5 мм. При такой конструкции трубобетонной колонны потеря ею несущей способности практически исключена, так как даже при сильном пожаре и повреждении наружной трубы нагрузку будет воспринимать бетонный сердечник и внутренняя труба [15].

В Китайской Народной Республике из трубобетона изготавливали колонны при строительстве станций Пекинского метрополитена. В дальнейшем трубобетонные колонны с металлической оболочкой и сердечником из высокопрочного бетона начали широко применяться при строительстве высотных зданий. К 2000 году в Китае уже было построено более 40 небоскребов с трубобетонными каркасами. Примером является построенное в 1999 году здание «SEG Plaza», которое состоит из 72 наземных и 4 подземных этажей и имеет высоту 291,6 м (рис. 2). Здание рассчитано на действие 7 балльного землетрясения. Несущими элементами здания служат расположенные по периметру здания 16 массивных трубобетонных колонн, и 28 трубобетонных колонн меньшего диаметра, которые образуют центральный ствол. Считается, что на сегодняшний день «SEG Plaza» - самое высокое здание, построенное с применением трубобетона.



Рис. 2. Построенное с использованием трубобетона 72-этажное здание «SEG Plaza».
Источник: http://www.sky-towers.ru/towers/3560/img_page/SEG_Plaza_3560_08.jpg_php

В 2010 году в Гуанчжоу было построено одно из самых высоких сооружений мира – телевизионная башня «Canton Tower» высотой 600 м (рис. 3), имеющая криволинейную форму гиперboloида, которая может быть получена из прямолинейных элементов. Идею получения криволинейных гиперboloидных конструкций из прямолинейных элементов в свое время выдвинул и реализовал на строительстве Шаболовской башни выдающийся русский инженер Шухов В.Г. На телебашне в Гуанчжоу эта идея была весьма плодотворно реализована с использованием прямолинейных трубобетонных конструкций (рис. 4). Особенностью такой конструкции башни является также и то, что в силу сквозной конструкции и обтекаемости и самой конструкции и ее элементов (рис. 5) ветровые потоки проходят сквозь конструкцию без образования завихрений, что обеспечивает сохранение устойчивости башни в условиях действия тайфунов.



Рис. 3. Телебашня «Canton Tower» высотой 600м (г. Гуанчжоу). Источник:
<http://mediasat.info/2015/04/28/canton-tower/>



Рис. 4. Криволинейная форма башни, полученная из прямолинейных трубобетонных элементов. Источник: <http://mediasat.info/2015/04/28/canton-tower/>

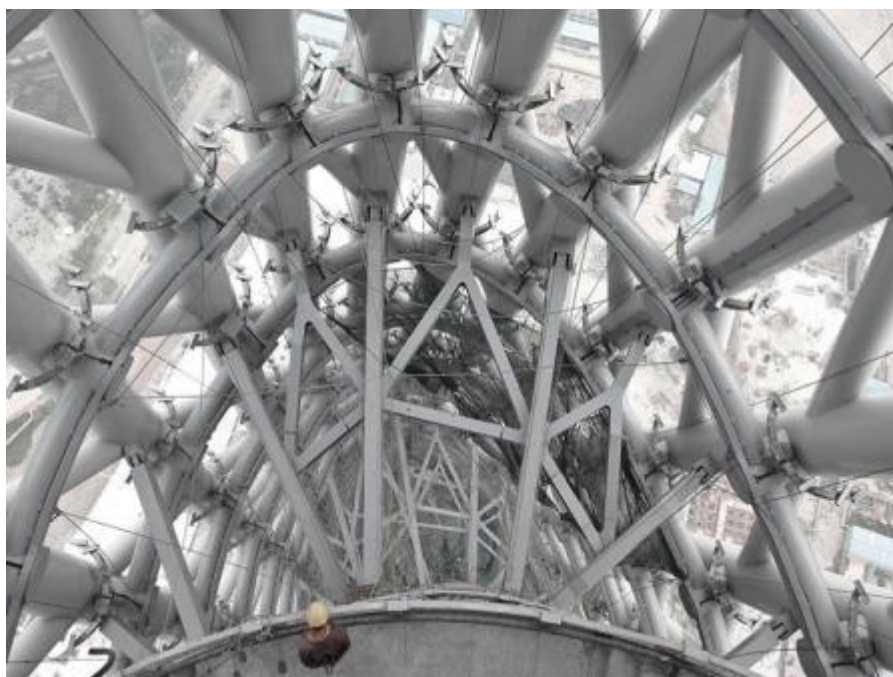


Рис. 5. Сквозная конструкция телебашни, уменьшающая ее ветровое сопротивление. Источник: <http://mediasat.info/2015/04/28/canton-tower/>

В настоящее время телебашня в Гуанчжоу является самым высоким сооружением в Китае. В Китае за последние десять лет было построено более 40 небоскребов с применением трубобетонных каркасов. Опыт строительства высотных зданий с применением трубобетона, накопленный в Китае подтверждает преимущества трубобетонных конструкций (таблица 2).

Таблица 2

**Экономические, конструкционные, эксплуатационные и технологические преимущества
трубобетонной технологии [15, 18]**

Экономические	Конструкционные и эксплуатационные	Технологические
1. Сокращение расхода металла при возведении каркасов высотных зданий в 1,8 – 2 раза; 2. Сокращение сроков строительства коробок зданий и сооружений в 1,5-2 раза; 3. Снижение себестоимости строительства коробок зданий и сооружений на 25-35%.	1. Высокая несущая способность трубобетонных колонн; 2. Эффективность работы стальной обоймы-оболочки вместо арматуры; 3. Повышение прочностных показателей, долговечности и стойкости бетона, заключенного в обойму; 4. Трехосное сжатие бетона в трубе; 5. Снижение массы несущего каркаса здания; 6. Повышение огнестойкости стальных конструкций каркаса; 7. Высокая сейсмостойкость зданий с трубобетонным каркасом, а также сопротивляемость предельным нагрузкам и ударам.	1. Выполнение трубчатой оболочкой роли первичного каркаса здания и несъемной опалубки для бетона; 2. Возможность выполнять работы в зимнее время; 3. Высокая скорость возведения каркасов из трубобетона, в 3 – 4 раза превышающая аналогичную для классического железобетона; 4. Снижение объема сварочных работ в 2 – 3 раза.

2. Опыт применения трубобетона с металлической оболочкой в транспортном строительстве

Как указывается в [4], сначала в мостостроении нашли применение многотрубные системы с использованием трубобетона, когда несущие конструкции набирались в виде пакета из трубобетонных стержней малого диаметра. Наверное, первым сооружением с использованием многотрубных пакетов трубобетонных стержней являлся построенный в 1931 году в окрестностях Парижа однопролетный арочный мост длиной 9 метров [19]. Каждая из двух несущих арок моста состояла из 6 труб 60х3,5 мм, заполненных бетоном.

В Советском Союзе первый опыт применения многотрубного трубобетона в мостостроении был получен еще в тридцатых годах прошлого века, когда под руководством Передерия Г.П. был запроектирован и построен Володарский мост через Неву (рис. 6) в Санкт – Петербурге (тогда Ленинграде) [20].



Рис. 6. Мост через Неву с арками из многотрубного трубобетона. Источник: <http://oldsp.ru>

Конструктивно мост представлял собой безраскосную ферму длиной 101 м, верхний параболический пояс которой выполнен из 40-трубного пакета из труб 140х5 мм. Ввиду новизны проекта сначала было проведено исследование на модели в 1/5 натуральной величины моста, то есть пролетом 20 м. Цель опыта заключалась в исследовании работы отдельных элементов пролетного строения, в основном арок, армированных трубчатой арматурой, как элементов, не применявшихся еще в практике мостостроения. Кроме того, преследовалась цель – выяснить запас прочности модели, для чего ее хотели довести до разрушения. Однако, в процессе испытаний была установлена очевидная надежность модели мостового сооружения, поэтому специальной комиссией было решено отказаться от разрушения модели и в дальнейшем ее использовали в качестве пешеходного моста. Сечение арки в модели прямоугольное 33х17 см², армировано 8 трубками 63х3 мм, расположенными в 2 горизонтальных ряда по 4 трубки с просветами в 24 мм.

По результатам проведенных исследований Г.П. Передерием была написана монография [20], в которой подробно освещены все особенности проведения испытаний и сделан вывод о возможности использования предлагаемой конструкции при создании мостовых сооружений.

Однако в дальнейшем из-за значительной сложности изготовления от применения пакетного трубобетона отказались, перейдя к использованию так называемой монотрубной системы, когда в качестве основного несущего элемента в мостах используют стальную трубу, заполненную бетоном [3].

Автором книги [3] В.А. Росновским проведены исследования прочности бетона в трубах, влияние пластических деформаций, повторного нагружения, температуры, усадки, ползучести бетона. Также рассмотрен ряд возможных конструктивных решений мостовых сооружений с применением трубобетона, в частности, арочные распорные системы, арочные безраспорные системы (с воспринятым распором), конструкция трехпролетного висячего

моста с неразрезной балкой жесткости, пояса которой запроектированы из труб, заполненных бетоном. Пилоны висячего моста также запроектированы трубобетонными.

С использованием одного из предложенных решений был построен железнодорожный мост через реку Исеть, пролет которого длиной 140 метров перекрыт сквозной арочной системой, состоящей из двух трубобетонных поясов из труб 820x13 мм из стали 3, заполненных бетоном марки 350 (рис. 7). Надарочные стойки также выполнены трубобетонными. Анализ показал, что применение трубобетона на этом мосту позволило сэкономить 52% стали и привело к снижению стоимости строительства на 20%.



Рис. 7. Железнодорожный мост с арками из трубобетона через реку Исеть. Источник: http://k-ur.ru/images/stories/2013/putevoditel/mostzhd/IMG_6773.jpg

24 октября 2011 года состоялось торжественное открытие самого длинного моста «Manaos-Iranduba» в бассейне реки Амазонка (рис. 8). Этот вантовый мост соединил два берега реки «Rio Negro» (Черная), а также связал Manaos (Манаус) с городом Iranduba (Ирандуба), длина моста составляет 3 километра 595 метров. Нижние опоры моста выполнены из массивных трубобетонных стоек.

Суммарная стоимость проекта строительства моста составляет 625 миллионов долларов США, продолжительность строительства 3 года и 10 месяцев, расход металла составил около 20 тыс. тонн.



Рис. 8. Вид на мост «Manaus-Iranduba» через левый приток Амазонки «Rio Negro».
Источник: <https://qna.center/question/136611>

3. Опыт применения трубобетона с металлической оболочкой в мостостроении Китая

Так как трубобетон лучше всего проявляет свои положительные свойства при работе на сжатие, то и применение его наиболее эффективно в элементах работающих преимущественно на сжатие. В связи с тем, что несущие элементы арочных мостов (арки) в основном подвергается действию сжимающих нагрузок, то в Китае в 1980-е годы прошлого века началось исследование трубобетона и первый трубобетонный арочный мост пролетом 115 метров (рис. 9), был построен в провинции Сычуань в 1991 году [21].

Трубобетонные арочные мосты позволяют иметь большой пролет, обеспечивают большую грузоподъемность, имеют относительно низкую стоимость, обеспечивают эстетичный внешний вид, поэтому этот тип мостов получил в Китае довольно широкое распространение.

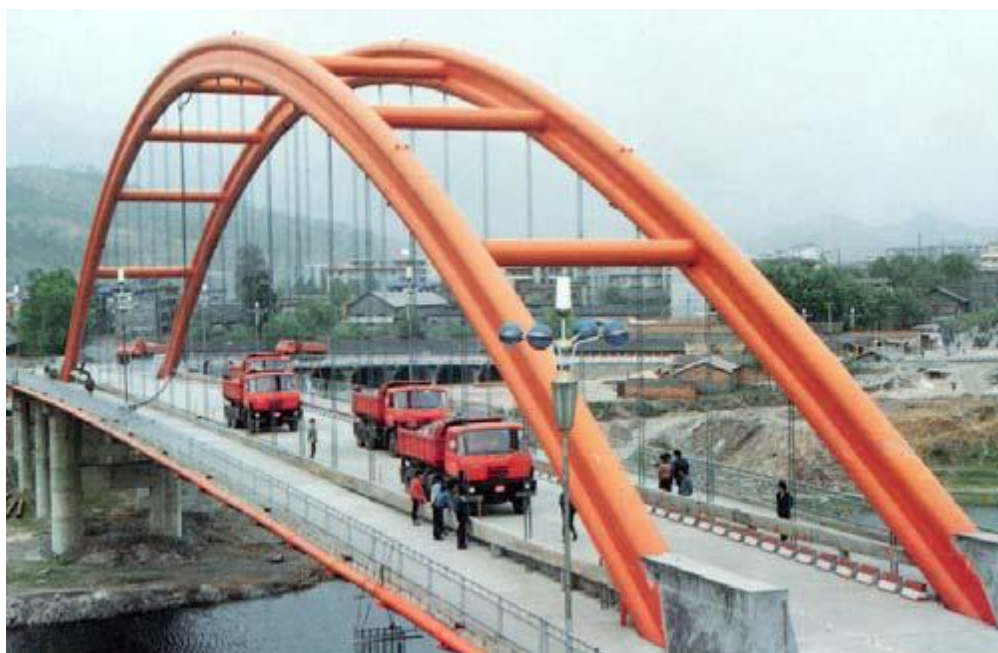


Рис. 9. Первый трубобетонный арочный мост Wangchang East River Bridge в Kumaе.
Источник: [21]

Но, из-за недостаточного количества исследований трубобетонных арочных мостов, отсутствия значительного опыта проектирования, строительства и эксплуатации, отсутствия нормативных документов, дальнейшее применение трубобетонных арочных мостов вначале было ограничено. Поэтому, в отличие от СССР и России, более десятка университетов, проектных фирм, строительных корпораций и научно-исследовательских институтов начали широкомасштабные исследования применимости заполненных бетоном стальных трубчатых конструкций в арочных мостах. Причем проводились исследования и конструктивных форм, и методов проектирования и расчета, и технологий изготовления, монтажа и контроля, а также методологий мониторинга и содержания.

В результате было получено довольно значительное количество инновационных результатов, включая рациональные конструктивные решения трубобетонных арочных мостов, основные параметры для проектирования и конструирования, различные методики расчета, включая методику расчета по предельным состояниям. Были предложены методы учета концентрации напряжений, а также методика прогнозирования усталостной долговечности. Были разработаны компьютерные методы расчета с учетом усадки, ползучести, предварительного напряжения трубчатой оболочки, температурных воздействий. Кроме того, были решены такие вопросы, как: изготовление стальной трубы, заполнение ее высокопрочным бетоном, применение ультразвука для контроля сплошности заполнения труб бетоном, обеспечение безопасности в процессе строительства.

В [22] приведено описание теории проектирования трубобетонных арочных мостов, в том числе рассмотрен вопрос учета усадки и ползучести, влияния температуры и методика анализа устойчивости, рассмотрена методика оценки предельной несущей способности и срока службы, учета концентрации напряжений, а также прогнозирование усталостной долговечности.

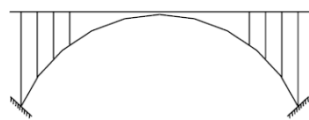
Результаты проведенных исследований были применены при создании большого количества арочных трубобетонных мостов. Всего в Китае построено более 300 арочных мостов с применением трубобетона, в том числе и мост Chongqing Wushan Bridge через реку Янцзы (рис. 10), построенный в 2005 году.



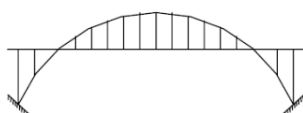
Рис. 10. Трубобетонный арочный мост Chongqing Wushan Bridge. Источник: http://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Wushan_Yangtze_River_Bridge

Основные характеристики этого моста: пролет 460 метров, диаметр стальной трубы 1,22 метра, толщина стенки трубы 22-25 миллиметров, вес рабочего сегмента – 128 тонн, стрела подъема 280 метров – наибольшая у такого типа мостов.

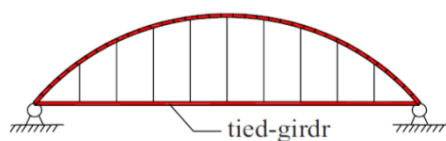
В [23] отмечается, что, в связи с быстрым развитием экономики Китая, трубобетонные арочные мосты стали хорошей альтернативой железобетонным и стальным арочным мостам. К марту 2005 года было построено 229 трубобетонных арочных мостов пролетом более 50 метров, из них 131 мост с главным пролетом более 100 метров и 33 моста с пролетом более чем 200 метров (таблица 3). На рис. 11 приведены характерные использованные схемы арочных мостов.



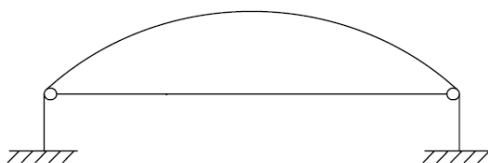
а) арочный мост с ездой поверху



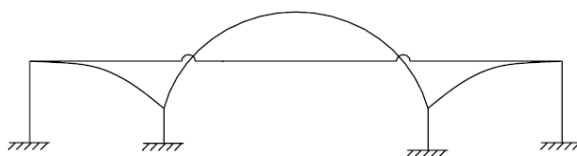
б) арочный мост с ездой посередине



в) арочный мост с ездой понизу (арка с жесткой затяжкой)



г) арочный мост с ездой понизу (жесткая арка с гибкой затяжкой)



д) Арочный мост в виде летящей птицы

Рис. 11. Характерные типы построенных трубобетонных арочных мостов (рисунок подготовлен авторами)

Таблица 3

Характеристика трубобетонных арочных мостов Китая с пролетом более 200 метров
(таблица составлена авторами в хронологическом порядке)

Наименование моста	Тип моста	Длина главного пролета, м	Способ строительства	Год постройки
Мост Nanhai Sanshanxi (Guangdong)	Арочный мост в виде летящей птицы	200	Навесной монтаж	1995
Мост Mianyang Pujiang Bridge (Sichuan)	Арочный мост в виде летящей птицы	202	Навесной монтаж	1997
Мост Luojaohu (Guizhou)	Арочный мост с ездой посередине	240	Навесной монтаж	1998
Мост Sanan Yongjiang (Guangxi)	Арочный мост с ездой посередине	270	Навесной монтаж	1998
Мост Longtanhe (Zigui, Hubei)	Арочный мост с ездой посередине	200	Навесной монтаж	1999
Мост Liujiang Yujiang (Guangxi)	Арочный мост с ездой посередине	220	Навесной монтаж	1999
Мост Hanjiang (Wuhan, Hubei)	Арочный мост с ездой понизу (жесткая арка с гибкой затяжкой)	280	Навесной монтаж	2000
Мост Hanjiang (Wuhan)	Арочный мост в виде летящей птицы	240	Навесной монтаж	2000
Мост Yajisha (Guangzhou, Guangdong)	Арочный мост в виде летящей птицы	360	Метод поворота	2000
Мост Meixi (Fengjie Chongqing)	Арочный мост с ездой поверху	288	Навесной монтаж	2001
Мост Tongwamen (Zhejiang)	Арочный мост с ездой поверху	238	Навесной монтаж	2001

Наименование моста	Тип моста	Длина главного пролета, м	Способ строительства	Год постройки
Мост Sanmen Jiantiao (Zhejiang)	Арочный мост с ездой посередине	245	Навесной монтаж	2001
Мост Beipanjiang (Guizhou) - железнодорожный	Арочный мост с ездой поверху	236	Метод поворота	2001
Мост Enshi Nannidu bridge (Hubei)	Арочный мост с ездой поверху	220	Навесной монтаж	2002
Мост Jialingjiang (Hechuan, Chjngqing)	Арочный мост с ездой посередине	200	Навесной монтаж	2002
Мост Zigui Qingganhe (Hubei)	Арочный мост с ездой посередине	248	Навесной монтаж	2002
Мост Jinghang Canal (Jiangsu)	Арочный мост в виде летающей птицы	235	Метод поворота	2002
Мост Mood Island (Dandong, Liaoning)	Арочный мост с ездой понизу (арка с жесткой затяжкой)	202	другой	2003
Мост Wangcun Yushuihe (Hunan)	Арочный мост с ездой посередине	200	Навесной монтаж	2003
Мост Chunan Nanpu (Zhejiang)	Арочный мост с ездой посередине	308	Навесной монтаж	2003
Мост Jinshajiang Rongzhou (Sichuan)	Арочный мост с ездой посередине	260	Навесной монтаж	2004
Мост Nanning Yonghe (Guanxi)	Арочный мост с ездой посередине	335,4	Навесной монтаж	2004
Мост Qiandaohu (Zhejiang)	Арочный мост с ездой поверху	252	Навесной монтаж	2005
Мост Wushan Yangtze River (Chongqing)	Арочный мост с ездой посередине	460	Навесной монтаж	2005

Наименование моста	Тип моста	Длина главного пролета, м	Способ строительства	Год постройки
Мост Dongguan Shuidao (Guangdong)	Арочный мост в виде летящей птицы	280	Навесной монтаж	2005
Мост Shenmi (Nanchang)	Арочный мост в виде летящей птицы	228	Навесной монтаж	2006
Мост Маосаоjie (Hunan)	Арочный мост в виде летящей птицы	368	Навесной монтаж	2006
Мост Huangsan Taipinghu (Anhui)	Арочный мост с ездой посередине	336	Навесной монтаж	2007
Мост Liancheng (Hunan)	Арочный мост в виде летящей птицы	400	Навесной монтаж	2007
Мост Sanmenkou North-gate (Zhejiang)	Арочный мост с ездой посередине	270	Навесной монтаж	2007
Мост Zhijinghe (Hubei)	Арочный мост с ездой поверху	430	Навесной монтаж	2011
Мост Yangtze River (Yichang, Hubei) - железнодорожный	Арочный мост с ездой понизу (арка с жесткой затяжкой)	264	Метод поворота	2011

Как видно, труботетон использовался в пяти типах арочных мостов (рис. 11): арочный мост с ездой поверху, арочный мост с ездой посередине, арочный мост с ездой понизу (арка с жесткой затяжкой), арочный мост с ездой понизу (жесткая арка с гибкой затяжкой), арочный мост в виде летящей птицы.

Из приведенных в таблице 3 арочных мостов 8% относятся к арочным мостам с ездой поверху, причем у них плита проезжей части выполняется из обычного или предварительно напряженного железобетона. Мосты такого типа могут перекрывать пролеты длиной более 150 метров. Например, мост Fengjie Meixihe (рис. 12 и 13) имеет пролет 288 метров, а пролет моста Zhijinghe (рис. 14) составляет 430 метров.



Рис. 12. Мост Fengjie Meixihe с трубобетонными арками. Источник:
http://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Meixihe_Bridge



Рис. 13. Конструкция арок и надарочной части моста Fengjie Meixihe. Источник:
http://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Meixihe_Bridge



Рис. 14. Арочный мост Zhijinghe пролетом 430 м с трубобетонными арками. Источник: <http://10mosttoday.com/10-highest-bridges-in-the-world/>

Примером арочного трубобетонного моста с ездой посередине является мост Chongqing Wushan (рис. 10), пролет которого составляет 460 метров и является самым большим в мире у арочных трубобетонных мостов.

В арочных мостах с ездой понизу (случай арки с жесткой затяжкой) трубобетонные арки используются совместно с предварительно напряженной железобетонной или металлической затяжкой. Мосты такого типа хороши для средних пролетов длиной от 50 до 150 метров. Представителем мостов такого типа является мост Second Yellow River Highway bridge (рис. 15). Мост состоит из восьми трубобетонных арочных пролетов каждый длиной 100 метров.



Рис. 15. Мост Second Yellow River Highway bridge. Источник [23]

Арочные мосты с ездой понизу (случай жесткой арки с гибкой затяжкой) обычно используются при пролетах 80 – 150 метров. Наибольший пролет у моста такого типа составляет 280 метров (рис. 16).



Рис. 16. Мост No. 3 Hanjiang Bridge. Источник [23]

Наиболее интересными с конструктивной точки зрения являются арочные мосты, силуэт которых напоминает летящую птицу. Мосты такого типа обычно состоят из трех пролетов: центральный пролет представляет собой арочный мост с ездой посередине, а крайние пролеты представляют собой консольные полуарки. Построено девять мостов такого типа с пролетом более 200 метров. Наибольший пролет у моста такого типа Liancheng Bridge составляет 400 метров (рис. 17).



Рис. 17. Мост Liancheng Bridge. Источник: <http://structurae.net/structures/fourth-xiangtan-bridge>

Для мостов такого типа важно соблюдать равновесие между центральным пролетом и боковыми пролетами, чтобы минимизировать изгибающие моменты в зонах опирания. Арки центрального пролета более длинные и для уменьшения веса их изготавливают из трубобетона, а более короткие боковые арки для утяжеления – из более тяжелого материала, обычно железобетона.

Процентное соотношение арочных мостов различного типа с пролетом не менее 100 метров, построенных с применением трубобетона, приведено в таблице 4.

Таблица 4

Соотношение различных типов арочных трубобетонных мостов (составлена авторами)

Тип моста	Количество мостов такого типа	Процентное соотношение
арочный мост с ездой поверху	11	8
арочный мост с ездой посередине	62	47
арочный мост в виде летящей птицы	24	18
арочный мост с ездой понизу (арка с жесткой затяжкой)	18	14
арочный мост с ездой понизу (жесткая арка с гибкой затяжкой)	16	13
Всего	131	100

Вантовый трехпролетный мост с двумя пилонами с пролетами 69+140+69 м и шириной 25,5 м с применением трубобетона построен в 1996 г. в г. Нанхай через реку Чжу [7]. Ванты размещены в одной плоскости и поддерживают балку жесткости по оси моста. Балка жесткости выполнена в виде трубобетонной сквозной пространственной фермы высотой 3 м и шириной 21 м. Шесть нижних поясов фермы выполнены из трубобетонных элементов диаметром 299 мм, а соединительные решетки из трубобетона диаметром 140 мм. Верхние же пояса фермы выполнены из швеллеров, по которым устроено предварительно напряженное в поперечном направлении монолитное железобетонное покрытие толщиной 23 см. Пилоны имеют высоту 36 м над уровнем проезжей части и также выполнены из трубобетона, с использованием труб 1840x25 мм и бетона с прочностью на сжатие 50 МПа.

Выводы. Приведенные примеры реализованных проектов высотных зданий и арочных и вантового мостов показывают эффективность трубобетона. Особенно интенсивно он применяется в Китае. Причем в современных условиях трубобетон является не только высококачественным конструктивным материалом, но и эффективным средством возведения конструкций из него. Поэтому можно предполагать, что применение трубобетона в сочетании с высокопрочными бетонами и технологией насосного бетонирования окажет весьма большое влияние на промышленное, гражданское и транспортное строительство и в России. Применительно к условиям Татарстана и Западной Сибири технологию трубобетона можно использовать вкупе с применением старогонных труб [24, 25], отслуживших свой нормативный срок в нефтяной и газовой промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Залигер Р. Железобетон его расчёт и проектирование. Государственное научно-техническое издательство, 1931 г. 671 с.
2. Sewell J.S. (1902). Columns for Buildings. Engineering News. 1902. Vol. 48. Issue 17. Pp. 10-13.
3. Росновский В.А. Трубобетон в мостостроении. М.: Трансжелдориздат, 1963. 110 с.
4. Кикин А.И., Санжаровский Р.С., Трулль В.А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. М.: Стройиздат, 1974. 144 с.
5. Стороженко Л.И. Трубобетонные конструкции. Киев: Будивельник, 1978. 81 с.
6. Gong C.-J. Lin X. Cai'S. - H. (1994). Application of concrete-filled steel tubular columns in tall buildings in earthquake area. Structures Congress XII. Proceedings of the ASCE Structures Congress 94, Atlanta. GA. 1994. Vol. 1. Pp. 146-151.
7. Cai S.-H. (2003). Modern Street Tube Confined Concrete Structures. Communication Press China. 2003. 358 p.
8. Беккер А.Т., Цимбельман Н.Я. Применение оболочечных конструкций с упругим наполнителем в строительстве // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2010. №2 (4). С. 27-34.
9. Дуванова И.А., Сальманов И.Д. Трубобетонные колонны в строительстве высотных зданий и сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. 6 (21). 2014. 89-103.
10. Boyd P.F., Cofer W.F., McLean D.I. Seismic performance of steel-encased concrete columns under flexural loading // Journal of ACI. - 1995. – Vol. 92, №3. - P. 353-364.
11. Мартиросов Г.М., Шахворостов А.И. Трубобетонные элементы из бетона на напрягающем цементе // Бетон и железобетон. - 2001. - №4. - С. 12-13.
12. Кришан А.Л. Трубобетонные колонны для многоэтажных зданий // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2009. №4. С. 75-80.
13. Кришан А.Л., Ремнев В.В. Трубобетонные колонны для высотных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2009. №10. С. 22-24.
14. Афанасьев А.А., Курочкин А.В. Использование трубобетона в жилищном строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2011. №3. С. 14-15.
15. Принуждение к инновациям: стратегия для России. Сборник статей и материалов / Под ред. В.Л. Иноземцева. - Москва, Центр исследований пост-индустриального общества, 2009. — 288 с.
16. Железобетонные колонны в стальной трубчатой оболочке (Франция) / Строительство и архитектура, сер. Строительные конструкции и материалы. Экспресс-информация. ВНИИТИ Госстроя СССР, Москва, 1989, с. 10 -11.
17. Цай Шаохуай. Новейший опыт применения трубобетона в КНР // Бетон и железобетон. 2001. №3. С. 20-24.

18. S.-H. Cai. Modern Street Tube Confined Concrete Structures. Shanghai, China Communication Press, 2003, p. 358.
19. Mesnager A., Barthes F., Vevrier I. Le pont des Ibis, an vesinet (seine-et-oise). Le Genie Civil 1931, N. 2527/3.
20. Передерий Г.П. Трубчатая арматура. М. Трансжелдориздат. 1945. 50 с.
21. Tingmin Mou, Bikun Fan, Bo Tian, Qiyu Tao. Scheme design of 539 m CFST arch bridge – the first Yangtze River Bridge in Hejiang, Sichuan, China // ARCH'10 – 6th International Conference on Arch Bridges. 2010 p. 113-119.
22. Zhongfu Xiang and Anbang Gu. Research and application of concrete filled steel tube arch bridge // ARCH'10 – 6th International Conference on Arch Bridges. 2010 p. 255-261.
23. Bao-Chun Chen¹ and Ton-Lo Wang. Overview of Concrete Filled Steel Tube Arch Bridges in China // Practice periodical on structural design and construction © ASCE / may 2009. p. 70-80.
24. Овчинников И.И., Миронов М.Ю., Овчинников И.Г., Снегирев Г.В., Черных В.К., Моисеев О.Ю. Обеспечение сохранности малых и средних мостов с металлическими пролетными строениями // Интернет-журнал "Науковедение" №5, 2013. с. 1-17.
25. Овчинников И.И., Снегирев Г.В., Овчинников И.Г., Черных В.К., Моисеев О.Ю. Харин В.В., Кокин А.А., Джумагалиев Э.С. Возможности эффективного применения старогодных труб при сооружении малых и средних мостов// Интернет-журнал "Науковедение" №5, 2013. С. 1-10.

Рецензент: Кокодеева Н.Е., доктор технических наук, зав. кафедрой «Транспортное строительство» «Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.».

Ovchinnikov Ilya Igorevich

Yuri Gagarin state technical university of Saratov
Russia, Saratov
Moscow state automobile&road technical university (Sochi branch)
Russia, Sochi
E-mail: bridgeart@mail.ru

Ovchinnikov Igor Georgievich

Perm national research polytechnic university
Russia, Perm
Yuri Gagarin state technical university of Saratov
Russia, Saratov
Moscow state automobile&road technical university (Sochi branch)
Russia, Sochi
E-mail: bridgesar@mail.ru

Chesnokov Georgiy Vladimirovich

«Research institute Grafit»
Russia, Moscow
E-mail: gchesnokov@niigrafit.org

Mikxaldykin Eugeny Sergeevich

«Research institute Grafit»
Russia, Moscow
E-mail: emihaldikin@niigrafit.org

About the problem of the analysis of tube-confined concrete structures with a shell made of different materials. Part 1. The application of tube-confined concrete with metal shell

Abstract. This article contains information about concrete filled steel tube constructions, the properties of the components of concrete filled steel tube - steel shell and the concrete core; methods of providing collaborative tubular steel shell and the concrete core are described: welding rods to the inner surface of the tube, creating the prestressed concrete application of the expanding cement. It is also considered an alternative method - elimination of adhesion concrete core with a steel shell. The data on the effectiveness of concrete filled steel tube constructions are given, also the history of creation of concrete filled steel tube constructions structures are considered.

Experience of application of concrete filled steel tube e constructions is considered, in particular at construction of high-rise buildings. Application of a concrete filled steel tube constructions at creation of the 58-storeyed building in Seattle (USA), the 57-storeyed building in Japan, 46-storeyed building in Australia is described. Experience of China in concrete filled steel tube constructions for creating of high-rise buildings and constructions is considered (72-storeyed building, a television tower in Guangzhou).

Economic, constructional, operational and technological advantages of concrete filled steel tube constructions technology are given.

Then experience of application of concrete filled steel tube constructions in transport construction is considered and the role of the Russian scientists and engineers is noted. Experience of creation of the railway concrete filled steel tube bridge through the river Iset is described, the significant contribution of China to a concrete filled steel tube bridge building is noted. The conclusion is drawn on efficiency of application of a concrete filled steel tube constructions both in high-rise construction and in a bridges and it is offered to use concrete filled steel tube with used steel shell from old suitable pipes.

Keywords: concrete filled steel tube; metal shell; the effectiveness of concrete filled steel tube; tall buildings; bridges; used pipes.

REFERENCES

1. Zaliger R. Zhelezobeton ego raschet i proektirovanie. Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo, 1931 g. 671 s.
2. Sewell J.S. (1902). Columns for Buildings. Engineering News. 1902. Vol. 48. Issue 17. Pp. 10-13.
3. Rosnovskiy V.A. Trubobeton v mostostroenii. M.: Transzheldorizdat, 1963. 110 s.
4. Kikin A.I., Sanzharovskiy R.S., Trull' V.A. Konstruktsii iz stal'nykh trub, zapolnennykh betonom. M.: Stroyizdat, 1974. 144 s.
5. Storozhenko L.I. Trubobetonnye konstruktsii. Kiev: Budivel'nik, 1978. 81 s.
6. Gong C.-J. Lin X. Cai S. - H. (1994). Application of concrete-filled steel tubular columns in tall buildings in earthquake area. Structures Congress XII. Proceedings of the ASCE Structures Congress 94, Atlanta. GA. 1994. Vol. 1. Pp. 146-151.
7. Cai S.-H. (2003). Modern Street Tube Confined Concrete Structures. Communication Press China. 2003. 358 p.
8. Bekker A.T., Tsimbel'man N.Ya. Primenenie obolocheknykh konstruktsiy s uprugim napolnitelem v stroitel'stve // Vestnik Inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. 2010. №2 (4). S. 27-34.
9. Duvanova I.A., Sal'manov I.D. Trubobetonnye kolonny v stroitel'stve vysotnykh zdaniy i sooruzheniy // Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy. 6 (21). 2014. 89-103.
10. Boyd P.F., Cofer W.F., McLean D.I. Seismic performance of steel-encased concrete columns under flexural loading // Journal of ACI. - 1995. – Vol. 92, №3. - P. 353-364.
11. Martirosov G.M., Shakhvorostov A.I. Trubobetonnye elementy iz betona na napryagayushchem tsemente // Beton i zhelezobeton. - 2001. - №4. - S. 12-13.
12. Krishan A.L. Trubobetonnye kolonny dlya mnogoetazhnykh zdaniy // Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy. 2009. №4. S. 75-80.
13. Krishan A.L., Remnev V.V. Trubobetonnye kolonny dlya vysotnykh zdaniy // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2009. №10. S. 22-24.
14. Afanas'ev A.A., Kurochkin A.V. Ispol'zovanie trubobetona v zhilishchnom stroitel'stve // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2011. №3. S. 14-15.
15. Prinuzhdenie k innovatsiyam: strategiya dlya Rossii. Sbornik statey i materialov / Pod red. V.L. Inozemtseva. - Moskva, Tsentr issledovaniy post-industrial'nogo obshchestva, 2009. — 288 s.
16. Zhelezobetonnye kolonny v stal'noy trubchatoy obolochke (Frantsiya) / Stroitel'stvo i arkhitektura, ser. Stroitel'nye konstruktsii i materialy. Ekspres-informatsiya. VNIINTI Gosstroya SSSR, Moskva, 1989, s. 10 -11.
17. Tsay Shaokhuay. Noveyshiy opyt primeneniya trubobetona v KNR // Beton i zhelezobeton. 2001. №3. S. 20-24.
18. S.-H. Cai. Modern Street Tube Confined Concrete Structures. Shanghai, China Communication Press, 2003, p. 358.
19. Mesnager A., Barthes F., Vevrier I. Le pont des Ibis, an vesinet (seine-et-oise). Le Genie Civil 1931, N. 2527/3.

20. Perederiy G.P. Trubchataya armatura. M. Transzheldorizdat. 1945. 50 s.
21. Tingmin Mou, Bikun Fan, Bo Tian, Qiyu Tao. Scheme design of 539 m CFST arch bridge – the first Yangtze River Bridge in Hejiang, Sichuan, China // ARCH'10 – 6th International Conference on Arch Bridges. 2010 p. 113-119.
22. Zhongfu Xiang and Anbang Gu. Research and application of concrete filled steel tube arch bridge // ARCH'10 – 6th International Conference on Arch Bridges. 2010 p. 255-261.
23. Bao-Chun Chen¹ and Ton-Lo Wang. Overview of Concrete Filled Steel Tube Arch Bridges in China // Practice periodical on structural design and construction © ASCE / may 2009. p. 70-80.
24. Ovchinnikov I.I., Mironov M.Yu., Ovchinnikov I.G., Snegirev G.V., Chernykh V.K., Moiseev O.Yu. Obespechenie sokhrannosti malykh i srednikh mostov s metallichesкими proletnymi stroeniyami // Internet-zhurnal "Naukovedenie" №5, 2013. s. 1-17.
25. Ovchinnikov I.I., Snegirev G.V., Ovchinnikov I.G., Chernykh V.K., Moiseev O.Yu. Kharin V.V., Kokin A.A., Dzhumagaliev E.S. Vozmozhnosti effektivnogo primeneniya starogodnykh trub pri sooruzhenii malykh i srednikh mostov// Internet-zhurnal "Naukovedenie" №5, 2013. S. 1-10.