

## Применение трубобетонных конструкций в зданиях и сооружениях

Казютина М. Н.

Научный руководитель Зверев В. Ф.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

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. 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 применять.

### Опыт применения трубобетона в Европе и Австралии

В первых сооружениях с использованием трубобетона применялось многотрубное армирование, при котором несущим элементом был пакет из трубобетонных стержней малого диаметра. Примером использования многотрубных пакетов является арочный мост пролетом 9 м в восточном предместье Парижа, построенный в 1931 г. (рис. 1). Две арки этого моста состоят каждая из шести труб диаметром  $60 \times 3,5$  мм, заполненных бетоном.

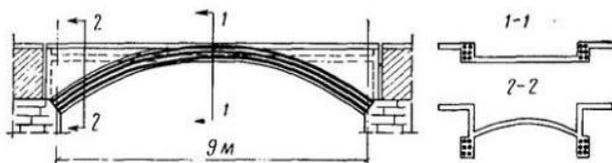


Рис. 1. Мост в предместье Парижа

Во Франции трубобетон использован в качестве стоек каркасов многоэтажных жилых и общественных зданий, например в первом небоскребе в Париже – жилом доме на ул. Крулебарб, в административном здании на ул. Жофре. В здании размером 24×24 м лаборатории научно-исследовательского института в г. Ольное колонны выполнены из труб цилиндрической и призматической формы, заполненных бетоном: в центральной части здания колонны цилиндрические из труб диаметром 216 мм, по периметру здания колонны призматические квадратного сечения 100×100 мм. Применение этой системы монотрубобетона снизило расход стали на стойки каркаса до 40 %.

В Италии в Риме построена 8-этажная гостиница, стойки каркаса которой выполнены из трубобетона. Стойки имеют переменное сечение, уменьшающееся кверху.

В Бельгии при строительстве дока были использованы фермы пролетом 13 м с параллельными поясами. Верхние пояса и стойки ферм выполнены из труб, заполненных бетоном, остальные элементы – из швеллеров и уголков. Расход стали на сжатые элементы ферм снижен на 40%.

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 мм 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.

Особый интерес вызывает построенная во Франкфурте (Германия) 62-этажное здание коммерческого банка – Commerzbank (рис. 2). Это здание является наиболее высоким в Европе (его высота составляет 252,7 м, полезная площадь – 70 тыс. строительный объем – 250 тыс.).



Рис. 2. Коммерческий банк, г. Франкфурт

Основу каркаса здания коммерческого банка составляет жесткое ядро из трех с внешним армированием сталебетонных колонн треугольного поперечного сечения. Размер грани таких колонн 1,4 м, колонны изготовлены из стали St-460 и заполненные бетоном класса В65. В ядро жесткости входят также три сталебетонных мегаподпоры размером 7,8×1,2 м. Для этих подпор применена сталь St-52, высокопрочный бетон класса В65, а также около 200 арматурных стержней 28 Bst-500 S. Безусловно, это сооружение является уникальным как по конструктивным решением, так и по сроку выполнения, который был всего три года.

Также заслуживает внимания возведенное в Берлине производственное здание известной немецкой фирмы Сименс (Der Neubau der Siemens AG Vehrkehrstechnr in Berlin-Treptow). Это здание высотой почти 22 м, сетка колон – 14,4 м, полезная нагрузка на перекрытия – до 30 кН/м<sup>2</sup>. Основу каркаса составляют несущие сталебетонные колонны из труб диаметром 910 мм и толщиной стенки 12,5 мм, изготовленные из стали St 37-2 и заполненные бетоном класса В45. Ригели каркаса изготовлены из стальных профилей HEA 300, 600 с бетоном в сжатой зоне.

Особенно удачно решена конструкция узлов соединения круглых трубобетонных колонн с двутавровых ригелями. Для осу-

шествления узлового соединения колонн с ригелями использована вставка из трубы квадратного сечения, заполненная бетоном. Такая на первый взгляд простая конструкция позволяет без особых проблем выполнять это достаточно сложное соединение.

Особое место принадлежит использованию в Германии сталебетонных конструкций в мостостроении. Например, общеизвестный мост через реку Эльбу пролетом 178 м, арочный мост через автобан А-96 Мюнхен Линдау пролетом 70,2 м, а также целый ряд мостов в Гамбурге, в которых с успехом в течение длительного времени эксплуатируются сталежелезобетонные конструкции.

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 (рис. 3). 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.

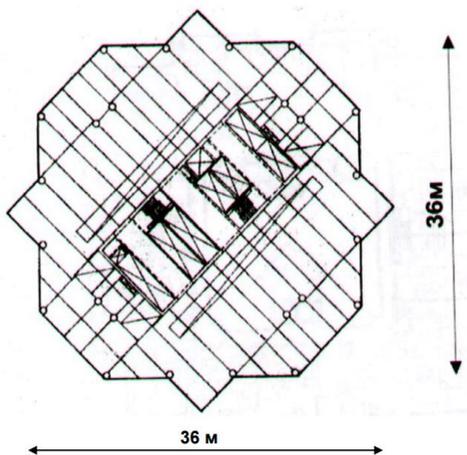


Рис. 3 – План жилого здания с трубобетонными колоннами в г. Мельбурне, Австралия

## **Опыт применения трубобетона в Китае и Японии**

Наиболее широко в последние десятилетия трубобетон начал применяться в КНР, где создана нормативная база его применения в строительстве. Опыт китайских строителей во многом базируется на научных работах российских, украинских и белорусских инженеров и ученых. В период с 1991–2001 гг. были построены более 30 высотных зданий и 120 мостов с применением таких конструкций. По данным в настоящее время КНР построено более 100 небоскребов и ежегодно возводятся около 100 высотных зданий в 30–40 этажей с вертикальными несущими конструкциями из трубобетонных элементов.

Среди них здание небоскреба на площади Сайгэ в Шэньчжэне – оно является на сегодняшний день самым высоким в мире зданием с каркасом из трубобетона. В наземной части – 72 этажа, в подземной – 4, общая высота составляет 291,6 м, общая площадь здания превышает 160 тыс. кв. м. Это многофункциональное комплексное сооружение, спроектированное и построенное с учетом допустимости семибалльного землетрясения.

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 г. в Китае уже было построено более 40 небоскребов с трубобетонными каркасами. Примером является построенное в 1999 г. здание «SEG Plaza», которое состоит из 72 наземных и 4 подземных этажей и имеет высоту 291,6 м (рис. 4). 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. 4. Построенное с использованием трубобетона  
72-этажное здание «SEG Plaza».

В 2010 г. в Гуанчжоу было построено одно из самых высоких сооружений мира – телевизионная башня «Canton Tower» высотой 600 м, 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. 5). Особенностью такой конструкции башни является также и то, что в силу сквозной конструкции и обтекаемости и самой конструкции и ее элементов (рисунок б) ветровые потоки проходят сквозь конструкцию без образования завихрений, что обеспечивает сохранение устойчивости башни в условиях действия тайфунов.



Рис. 5. Криволинейная форма башни, полученная из прямолинейных трубобетонных элементов.

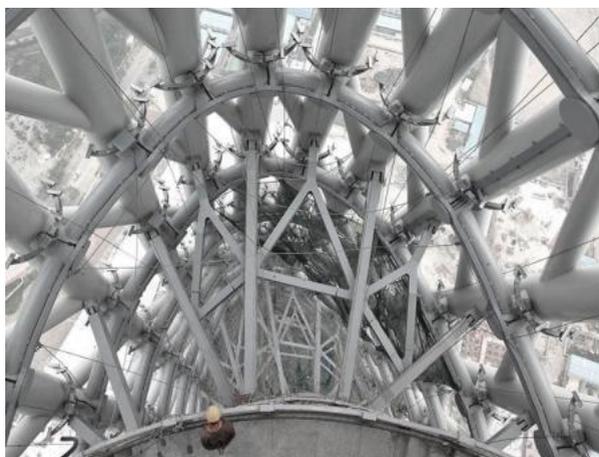


Рис. 6. Сквозная конструкция телебашни, уменьшающая ее ветровое сопротивление.

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.

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.

Соединения между трубобетонными колоннами и H-образными балками часто используются в Японии. Соединение изготавливается на заводской сварке, а балки крепятся болтами к кронштейнам на месте. В случае соединений, использующих внутренние и проходные диафрагмы, диафрагменные пластины располагаются внутри трубки и имеют отверстие для бетонной отливки. Стальной кольцевой ребра жесткости используется для круглой трубобетонной колонны. В этом случае внутри кольцевого элемента жесткости внешней диафрагмы нет препятствий, который могли бы препятствовать гладкому литью бетона. Бетонное литье, как правило, выполняется трубой Tremie или методом накачки. Однако недостаточное уплотнение бетона может создать слабую точку в системе, особенно при наличии внутренних и проходных диафрагм, где литье бетона под диафрагмой может вызвать разрыв между бетоном и сталью. В настоящее время нет способа обеспечить компактность или устранить этот недостаток. Для компенсации в строительстве используется высококачественный бетон с низким содержанием воды и суперпластификатор для повышения удобоукладываемости.

В Японии применение трубобетона позволило увеличить объем строительства жилья. Высотное здание в 57 этажей высотой 185,8 м построено в г. Кавагучи, недалеко от Токио. Площадь участка застройки составила 1982 м<sup>2</sup>, общая площадь здания 66057 м<sup>2</sup>, в нем расположены 650 квартир (рис. 7.). Основой здания является каркас из трубобетона, стальные трубы с 1-го по 21-й этаж имеют диаметр 812,8 мм толщиной стенки 22–40 мм, с 22-го по 42-й этаж – диаметр 711,2 толщиной стенки 12–28 мм, с 43-го по 55-й этаж – 609,6 толщиной стенки 12–22 мм. По прочности бетон внутри труб, соответственно, составлял: 60; 54 и 48 мПа. Стальные трубы делятся на секции на каждом этаже. Бетон подавался с верхней части труб сво-

бодным падением. Перекрытие заполняли бетоном по этажам. Строительство высотного здания заняло 15 месяцев.

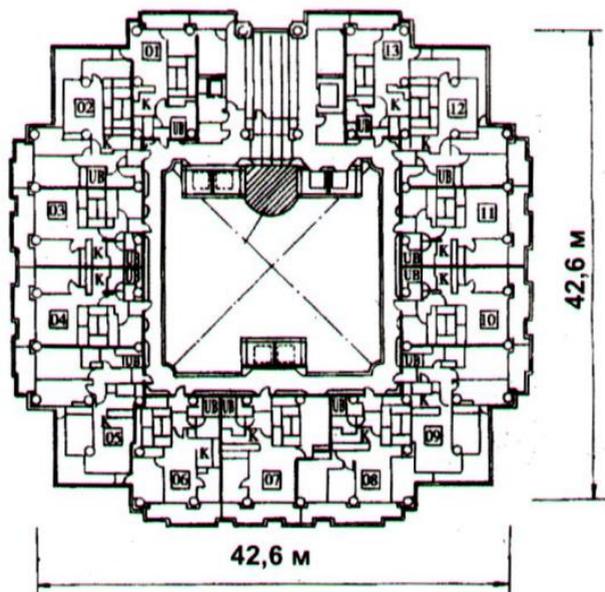


Рис. 7. План высотного жилого высотного здания с трубобетонными колоннами в г. Кавачуги, Япония

Японскими специалистами фирмы «Симидзу» в начале 90-х годов разработано новое конструктивное решение трубобетонных колонн, в которых отсутствует сцепление между бетоном и стальной трубчатой обоймой посредством предварительной смазки внутренней поверхности стальной трубы запатентованным составом, способствующим скольжению бетона относительно стенок в процессе деформирования конструкции. При этом нагрузка, приложенная к колонне, передается только на бетонное ядро с помощью распределительной плиты, входящей внутрь металлической трубы, тем самым стальная оболочка не вовлекается в работу на сжатие, а испытывает только растягивающие усилия в кольцевом направлении. Таким образом, возникают наиболее благоприятные условия для оптимального использования прочностных свойств двух материалов: высокой прочности бетона на сжатие, и стали на растяжения.

Результаты экспериментальных исследований и сопоставительный технико-экономический анализ показали, что разработанная труботонная конструкция для колонн 50-этажного здания позволяет снизить их стоимость на 20–40% по сравнению с железобетонными колоннами и снизить площадь поперечного сечения труботонных колонн в два раза.

В Японии, по сравнению с Китаем, технология создания труботонного элемента совершенно иная. Внутри стальной трубы помещают полимерный чулок. Таким образом изолируют бетон от стальной трубы и заливают бетон в стальную трубу с изоляцией. В Японии считают, что труботон показывает более высокие характеристики в том случае, когда у него нет контакта с металлом.

### **Опыт применения труботона в США**

В 1970 г. американской фирмой «Skilling Word Magnusson Berkshire Inc.» была разработана особая конструктивная схема возведения высотных зданий, основанная на использовании труботонных конструкций из стали и заполнителя из сверхвысокопрочного бетона. Эту систему назвали «SWMB» по первым буквам названия фирмы. Она была применена при возведении 58-этажного административного здания «Two Union Square» в Сиэтле (США) (рис. 8.) Высота здания 230,7 м, год постройки – 1988. Основные несущие конструкции здания представляют собой четыре труботонных колонны, а по контуру здания располагаются еще 14 труботонных колонн диаметром от 910 мм до 1360 мм нижней части и до 410 мм в верхней части. Использование труботонных колонн позволило уменьшить затраты на строительство на 30 % по сравнению с вариантом с применением железобетонных колонн, а расход металла составил 58 кг на один квадратный метр по сравнению с обычно затрачиваемыми для таких зданий 122 кг металла на один квадратный метр. Причем скорость сооружения труботонного каркаса высотного здания составляла четыре этажа в неделю.



Рис. 8. Здание «Two Union Square»

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

### **Опыт применения трубобетона в России**

В 1936 г. под руководством академика Г. П. Передерия был сооружен мост пролетом 101 м через р. Неву в Санкт-Петербурге, в котором применена известная схема безраскосной фермы. Крупногабаритный пакет из 40 труб диаметром 140×5 мм использован в качестве верхнего параболического пояса пролетного строения. Трубы изготовлены из малоуглеродистой стали марки Ст5. На 1 м<sup>2</sup> поперечного сечения арки приходится 104 м пролета, что почти в два раза больше, чем у других подобных мостов. Впоследствии система пакетного трубобетона не применялась из-за сложности изготовления.

Началом широкого развития трубобетонных конструкций следует считать появление монотрубной системы. В 40-х годах профессор В. А. Росновский предложил использовать в качестве конструктивного элемента мостов одну тонкостенную стальную трубу, заполненную бетоном, и в ряде проектов показал ее преимущества по сравнению с обычными решениями. Им были предложены

различные конструкции мостов с применением такого решения, а впоследствии по одному из этих предложений был построен железнодорожный мост через р. Исеть вблизи г. Каменск-Уральского. Применение трубобетона в соте на р. Исеть снизило стоимость строительства на 20 % и позволило сэкономить 52 % стали.

Главный речной пролет моста перекрыт сквозной аркой пролетом 140 м и стрелой подъема 22 м. Высота арочных ферм на среднем участке – от 1/4 до 3/4 пролета – одинакова и равна 6 м. На концевых участках пояса очерчены по двум параболам, сближающимся к опорным узлам. Расстояние между арочными фермами составляет 7 м, т. е. 1/20 пролета. Длина панелей арки 6,083 м.

Пояса арок выполнены из труб диаметром 820×13 мм, изготовленных из стали марки Ст3, заполненных бетоном марки 350. Трубы имеют в стыках фланцевые соединения на болтах. Элементы решетки, т. е. раскосы и стойки, металлические двутаврового сечения.

В России считается, что можно применять ржавые трубы. Это вариант, когда вместо полимерных прослоек, которые используют японцы, работает ржавчина как демпфирующий слой. Потому что процесс ржавления не продолжается в трубобетоне, там цементный камень работает как ингибитор, он закрывает кислород.

В России примером применения трубобетонных конструкций в промышленных зданиях стало производственное здание Семилукского завода огнеупоров с применением стоек рам из трубобетонных стержней диаметром 114 мм и толщиной стенки 4 мм. Оно наглядно демонстрирует экономический эффект. Масса отдельной несущей стойки снизилась более чем в 6 раз, их стоимость в 3,5 раза, а расход металла в 1,5 раза.

В Санкт-Петербурге в качестве вертикальных несущих элементов высотной части административного здания ОАО «Банк Санкт-Петербург» были приняты трубобетонные колонны с внутренним армированием пространственными каркасами (рис. 9). Из-за принятых узлов сочетания трубобетонных элементов с перекрытиями, стальная оболочка не выступает в роли обшивки, являясь лишь несъемной опалубкой, а заключенное внутри железобетонное ядро – традиционная железобетонная цилиндрическая колонна.



Рис. 9. Административное здание ОАО «Банк Санкт-Петербург»

### **Опыт применения трубобетона в Украине**

На Украине ведется проектирование и строительство 17-этажных жилых домов с применением в металлическом каркасе из трубобетонных стоек (рис. 10). Применение данной технологии позволило практически уйти от сезонности в строительстве, а также значительно сократить трудовые и энергетические затраты в процессе возведения. Установлено, что эта технология на 15 % дешевле, чем применение традиционных конструкций.



Рис. 10. Пример применения трубобетонных конструкций при строительстве многоэтажных зданий

Также ярким примером применения трубобетонных конструкций являются опоры транспортных галерей склада руды, возведенные в Новокриворожском и Южном Горно-обогатительном комбинатах в

Кривом Роге. Такие опоры выдерживают воздействия различных комбинаций статических, динамических и ударных нагрузок.

Первоначально эти опоры, длиной свыше 20 м, были запроектированы из монолитного железобетона кольцевого сечения диаметром 6 м с толщиной стенки 500 мм. По предложению ученых Криворожского технического университета эти опоры были заменены на трубобетонные без дополнительной стержневой арматуры. Трубобетонные опоры представляют собой многоэтажную пространственную раму, состоящую из четырех стоек и поперечных распорок. Стойки опор были выполнены из стальных труб с внешним диаметром 1020 мм и толщиной стенки 10 мм. Трубчатые конструкции опор были изготовлены на заводе металлических конструкций, заполнение бетоном, который подавался снизу, осуществлялось на месте строительства с помощью бетононасоса.

Замена железобетонных опор на трубобетонные позволило значительно сократить время строительства и получить на каждую опору экономию 100 м<sup>3</sup> бетона, 3,5 т стали, 6,3 м<sup>3</sup> древесины.

Еще одним из выдающихся примеров применения трубобетона являются несущие колонны нижнего яруса вентиляционной градирни коксохимического завода в Кривом Роге. Основой причиной замены железобетонных колонн на трубобетонные были особые условия эксплуатации - наличие агрессивной среды (фенольные воды) и попеременный цикл замораживания и оттаивания в зимне-весенний период (конструкции открыты и подвергаются непосредственно действию окружающей среды), в которых железобетон очень плохо работает. Поэтому в 1977 г. было принято решение заменить железобетонные колонны нижнего яруса на трубобетон. Вентиляционная градирня с трубобетонными колоннами успешно эксплуатируется с 1980 г.. Для исключения влияния агрессивной фенольной воды на металлическую оболочку трубобетона было запроектировано прокрыть их защитным слоем на основе эпоксидной смолы.

Также трубобетон был применен для возведения подпорных стенок на Полтавском ГЗК, колонн в Дворце молодежи и студентов в Кривом Роге, Дворце культуры, здании Государственной автомобильной инспекции, игровом корпусе турбазы «Алые паруса», в торгово-развлекательных комплексах и т. д.