

## Экспериментальные исследования

### ТРУБОБЕТОННЫЕ КОЛОННЫ ДЛЯ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ

А. Л. КРИШАН, *канд. техн. наук,*  
*Магнитогорский государственный технический университет*

С конца прошлого тысячелетия в мировой практике строительства наметилась тенденция к возведению высотных зданий. Строительство таких зданий предполагает применение высокопрочных, экономичных и безопасных в эксплуатации вертикальных несущих конструкций.

Анализ конструктивных систем высотных зданий свидетельствует о том, что оптимальное количество этажей (с точки зрения обеспечения необходимых эксплуатационных качеств и экономической целесообразности) обычно составляет 40÷60. Для таких зданий наиболее подходящей является каркасно-ствольная несущая система. В данной системе изгибающие моменты, возникающие от горизонтальных нагрузок, воспринимаются преимущественно монолитными стволами или ядрами жесткости. Колонны рассчитывают, главным образом, на вертикальные нагрузки.

Подобные условия наиболее благоприятны для работы трубобетонных колонн (ТБК). Сжатые трубобетонные элементы, имеющие небольшую гибкость и малые эксцентриситеты приложения продольной силы, обладают исключительно высокой несущей способностью при относительно малых поперечных сечениях. Этому способствует эффект обоймы, который создает стальная оболочка для бетонного ядра. Данный эффект особенно ярко проявляется в колоннах круглого поперечного сечения. Стальная обойма в свою очередь, благодаря благоприятному влиянию внутреннего давления твердой среды, предохранена от потери местной устойчивости.

Другое важное достоинство трубобетонных элементов – их повышенная жесткость, обусловленная увеличением приведенного модуля упругости за счет большей жесткости металла оболочки.

Трубобетонные конструкции очень надежны в эксплуатации. В предельном состоянии они не теряют несущую способность мгновенно, как обычные железобетонные элементы, а еще длительное время способны выдерживать действующую нагрузку. Следовательно, в таких конструкциях открывается широкая возможность для использования современных высокопрочных бетонов. Здесь практически преодолен один из основных недостатков таких бетонов – их высокая хрупкость.

Сжатые трубобетонные стержни, изготовленные из круглых стальных труб, отличаются равноустойчивостью вследствие осевой симметрии их поперечного сечения. Жесткость на кручение такого стержня на порядок выше, чем у стержней незамкнутого профиля.

Изоляция бетонного ядра от окружающей среды создает более благоприятные условия для его работы под нагрузкой. В неизолированном бетоне большие нагрузки вызывают более значительную деструкцию, чем в изолированном [1]. При высоких уровнях напряжений в неизолированном бетоне развитие микротрещин все время прогрессирует, у изолированного бетона при тех же напряжениях оно полностью прекращается в течение первых 2 ÷ 3 дней. Если в неизолированных образцах нелинейность деформаций ползучести наблюдается, в основном, в течение первых 20 ÷ 30 суток после их нагружения, то в изолированных – в первые 2 ÷ 7 суток.

Благодаря стальной оболочке, ТБК сохраняют все достоинства металлических конструкций в плане монтажа. За ненадобностью опалубочного оборудования процесс изготовления трубобетонных элементов значительно облегчается и становится выгоднее как по трудозатратам, так и по стоимости.

Наружная поверхность трубобетонных конструкций круглого поперечного сечения примерно в два раза меньше, чем стальных конструкций из профильного проката. Вследствие этого у них заметно меньше расходы по антикоррозионной и огнезащитной окраске.

Также следует отметить, что огнестойкость трубобетонных элементов значительно выше, чем у металлических конструкций и при величине наружного диаметра поперечного сечения трубы 426 мм достигает 2,5 часов без использования огнезащитных покрытий.

Мировой опыт практического применения ТБК показывает [2], что экономия стали при трубобетонном исполнении конструкций по сравнению с металлическими составляет до 56 %, стоимость уменьшается до 1,74 раз, а приведенные затраты снижаются на 62 %. Масса трубобетонных колонн по сравнению с железобетонными уменьшается до 83 %.

С архитектурной точки зрения следует отметить эстетичный внешний вид трубобетонных колонн. Это придает зданиям и сооружениям, построенным из них, несколько большую выразительность.

Однако в процессе проектирования следует учитывать и некоторые недостатки, присущие трубобетонным конструкциям. Среди них можно отметить следующие:

- относительно высокая стоимость стальных труб большого диаметра;
- пониженная, по сравнению с обычным железобетоном, коррозионная стойкость, что ведет к дополнительным затратам на ее обеспечение;
- возможность расслоения бетонной смеси при заполнении труб большого диаметра;
- отсутствие надежных вариантов стыков трубобетонных колонн с несущими конструкциями перекрытий зданий;
- возможность отслаивания бетонного ядра от оболочки вследствие неблагоприятного влияния усадки бетона;
- возможность разрыва металлической оболочки под действием внутреннего давления паров связанной воды, освобождающейся при сильном нагревании во время пожара.

Большая часть отмеченных конструктивных недостатков относительно легко устранима. Наличие эффективных покрытий для защиты металла от коррозии позволяет обеспечить сохранность наружной поверхности труб в течение сколь угодно длительного срока. Существующие методы огнезащиты металла способны обеспечить требуемую огнестойкость несущих трубобетонных элементов. Современные суперпластификаторы позволяют получать литые бетонные смеси, с использованием которых процесс формирования бетонного ядра существенно облегчается. Все более широкое применение в практике строительства труб из ПВХ делает стальные трубы менее дефицитными и более доступными по цене.

Наиболее значительным конструктивным недостатком сжатых трубобетонных элементов, на котором стоит остановиться более подробно, является сложность обеспечения совместной работы бетонного ядра и внешней стальной оболочки при эксплуатационных нагрузках. Ввиду разности начальных коэффициентов поперечной деформации бетона и стали ( $\nu_b \approx 0,18 \div 0,25$ ,  $\nu_s \approx 0,3$ ), в процессе постепенного увеличения приложенной к трубобетонной

конструкции сжимающей силы, ядро и обойма работают совместно только в начальный период загрузки. Затем, из-за указанной разницы в деформационных свойствах и низкой прочности сцепления бетона со сталью, внешняя оболочка стремится оторваться от поверхности бетона, способствуя возникновению в нем радиальных растягивающих напряжений. В этот момент, естественно, никакого поперечного обжатия бетона в трубе происходить не может, и бетон работает в условиях одноосного сжатия, а труба - как продольная арматура.

Фактором, усугубляющим этот процесс, может стать усадка бетона. В выполненных под руководством А.А.Долженко [3], Р.С.Санжаровского [4], Л.И.Стороженко [2] и др. ученых исследованиях наблюдалось, что усадка бетона, твердеющего в стальной трубчатой оболочке, существенно меньше усадки бетона, твердеющего на воздухе. Причем в течение первых лет твердения часто фиксируется набухание бетонного ядра. Проявляющиеся в дальнейшем усадочные деформации зависят от ряда факторов, среди которых можно выделить состав бетонной смеси, климатические параметры внешней среды, геометрические размеры трубобетонных элементов и др. В случае заметной усадки бетонного ядра она будет способствовать нарушению сцепления между ним и внешней стальной обоймой.

Практика эксплуатации сжатых трубобетонных конструкций свидетельствует о том, что отрыв сердечника от трубы происходит чаще всего именно при эксплуатационных нагрузках и приводит к снижению долговечности, а иногда и к снижению несущей способности элемента. Такой факт имел место, например, в трубобетонных арках железобетонного моста через реку Исеть пролетом 140 метров, построенного по проекту В.А.Росновского.

Теоретические исследования, выполненные в этом направлении [5], подтверждают вывод о том, что в большинстве случаев классический трубобетон представляет собой недостаточно технически совершенную конструкцию, в которой труба фактически является опалубкой, работающей как обойма лишь перед разрушением бетонного ядра. Только при достижении высоких уровней нагружения, когда в бетоне начинают интенсивно проявляться процессы микротрещинообразования (при этом значение  $v_b$  может возрастать до 0,5 и более), стальная труба начинает работать как внешняя обойма. Эффект обоймы положительно сказывается на дальнейшей работе сжатых трубобетонных элементов. Труба, сдерживая поперечные деформации бетонного ядра, блокирует дальнейший рост уже образовавшихся в нем трещин и существенно отдалает момент его разрушения. Поэтому прочность негибких трубобетонных конструкций, работающих на осевое сжатие, значительно выше прочности сопоставимых с ними по расходу бетона и стали традиционных железобетонных конструкций.

Однако эксперименты свидетельствуют о невозможности полного использования прочностных свойств объемно сжатого бетонного ядра классических трубобетонных конструкций из-за их высокой деформативности.

Деформации укорочения сжатого трубобетонного элемента перед его разрушением достигают величин, не позволяющих обеспечить условия нормальной эксплуатации для несущего каркаса здания. По результатам наших опытов и данным Р.С.Санжаровского деформации укорочения центрально сжатых ТБК могут достигать 15 % и более [4].

В связи с чрезвычайно высокой деформативностью, с чисто практической точки зрения предельно достигаемая в опытах величина нагрузки для таких элементов большого интереса не представляет. Для вертикальных несущих конструкций подобные деформации не допустимы.

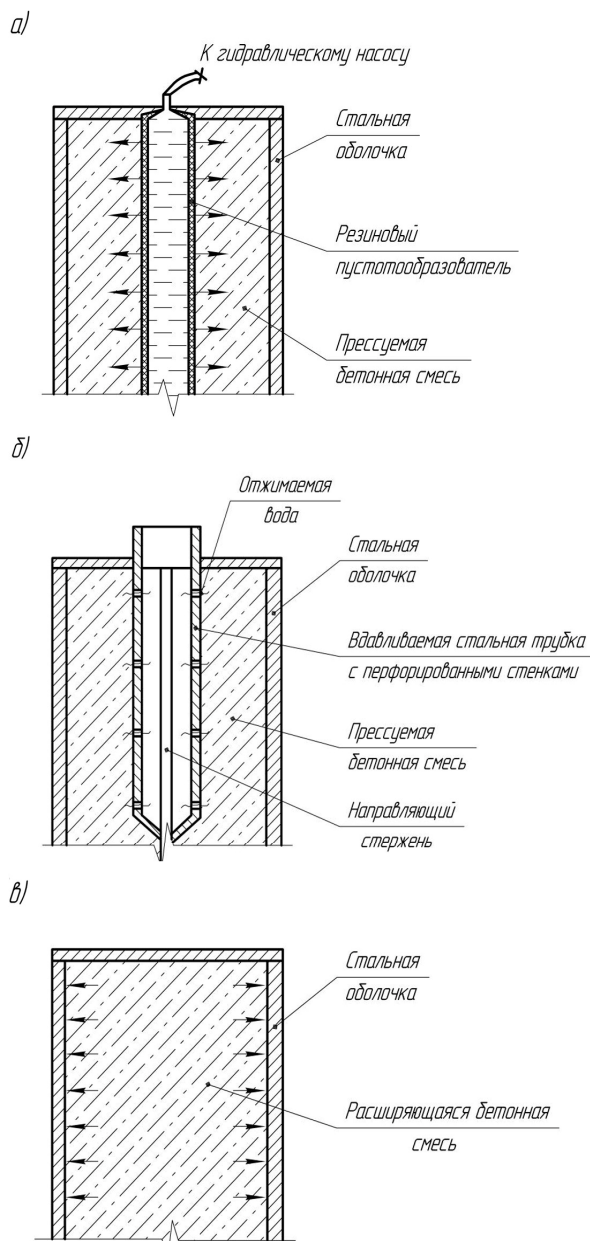


Рис. 1. Принципиальные схемы предварительного обжатия ТБК

а – длительное прессование бетонной смеси с помощью пустотообразователя; б – прессование смеси путем последовательного вдавливания стальных трубок; в – использование энергии

внешней обойме, трех стальных трубочек, имеющих постепенно увеличивающиеся диаметры [7];

3) посредством использования в качестве вяжущего реопластичного расширяющегося быстротвердеющего цемента.

Специалистам известно, что бетон, твердеющий под давлением  $2 \div 3$  МПа, имеет на 50...60 % более высокую прочность, а также существенно меньшие величины деформаций усадки и ползучести [8]. Кроме того, благодаря предва-

Перечисленные недостатки свидетельствуют о том, что на сегодняшний день остается весьма актуальной задача разработки и практического использования более совершенной конструкции сжатого трубобетонного элемента.

В Магнитогорском государственном техническом университете предложено изготавливать ТБК с предварительно обжатым бетонным ядром. Основной особенностью их формирования является применение длительного прессования бетонной смеси давлением  $1,5 \div 3$  МПа. Прессующее давление через бетонную смесь передается на внутреннюю поверхность стальной трубы-оболочки и создает в ней предварительные растягивающие напряжения.

В качестве внешней оболочки используются стальные трубы промышленного производства, а для заполнения ядра – тяжелый бетон с современными пластифицирующими добавками, повсеместно применяемый в современном строительстве.

Длительное прессование бетонной смеси в трубобетонных элементах производится одним из трех методов (рис. 1):

1) с помощью пустотообразователя специальной конструкции [6];

2) путем последовательного вдавливания в эту смесь вдоль направляющего стержня, расположенного коаксиально внешней

рительному растяжению стальной оболочки и обжатию бетонного ядра на всех этапах работы сжатого трубобетонного элемента обеспечивается совместная работа бетонного ядра и стальной оболочки. Бетон, работающий в условиях объемного сжатия, имеет прочность в  $1,8 \div 2,7$  раза выше, чем при одноосном сжатии. Таким образом, ТБК с предварительно обжатым ядром имеют значительно большую несущую способность, по сравнению с необжатыми колоннами. Для экспериментальной проверки влияния длительного прессования бетонной смеси и предварительного бокового обжатия ядра на несущую способность элементов предложенной конструкции были проведены испытания лабораторных образцов, работающих на осевое и внецентренное сжатие в диапазоне относительных эксцентриситетов продольной силы  $e_0/d = 0, 0,065, 0,13, 0,26, 0,37$ . Гибкость исследуемых элементов находилась в пределах  $\lambda = 12 \div 20$ , что характерно для колонн многоэтажных зданий. Всего было испытано 162 таких образца.

Основные численные результаты экспериментальных исследований центрально сжатых образцов приведены в табл. 1. В ней представлены осредненные по сериям данные по призменной ( $R_{bu}$ ) прочности исходного бетона, а также экспериментально определенные значения нагрузок, соответствующие:

- пределу упругой работы  $N_{el}$ ;
- текучести металла оболочки  $N_y$ ;
- верхней границе микротрещинообразования в бетоне  $N_{crc}$ ;
- максимально достигнутой нагрузке  $N_u$ ;
- суммарному усилию, воспринимаемому бетонным ядром и стальной оболочкой, испытанными отдельно ( $N_{bs} = R_{bu}A_b + \sigma_{s,y}A_s$ ).

Отношение  $N_u/N_{bs}$  представляет количественную оценку эффективности работы трубобетонных элементов под нагрузкой.

Таблица 1.

Основные результаты испытаний сжатых трубобетонных образцов

Серия	$R_{bu}$ , МПа	$N_{el}$ , кН	$N_y$ , кН	$N_u$ , кН	$N_{bs}$ , кН	$N_{el}/N_u$	$N_y/N_u$	$N_{crc}/N_u$	$N_u/N_{bs}$
НЦ.106.4	41,3	633	740	1075	789	0,59	0,69	0,72	1,36
НЦ.159.6	40,0	1300	1620	2223	1555	0,57	0,71	0,75	1,42
ВЦ.159.6	62,3	1535	1860	2603	1859	0,59	0,71	0,77	1,40
ВЦ.159.6	37,9	827	910	1355	939	0,61	0,67	0,72	1,44
ОЦ.159.6	38,6	1780	1990	2884	1972	0,62	0,69	0,81	1,46
РЦ.106.4	70,7	1070	1210	1733	1154	0,61	0,69	0,79	1,50
РЦ.159.6	72,0	2400	2700	3750	2527	0,64	0,72	0,81	1,48

Результаты экспериментов показывают, что образцы с предварительно обжатым ядром работают на сжатие эффективнее образцов из обычного бетона. Практически для всех предварительно напряженных образцов наблюдалось значительное повышение предела упругой работы и уровня разрушающей нагрузки. Степень увеличения несущей способности зависела от относительного эксцентриситета  $e_0/d$ . Наибольший рост несущей способности наблюдался в центрально сжатых образцах – до 50 %. По сравнению с традиционными железобетонными элементами, имеющими аналогичные параметры бетона и арматуры, несущая способность выросла в  $2 \div 2,4$  раза.

С увеличением эксцентриситета приложения сжимающей нагрузки эффективность трубобетонных конструкций, естественно, снижается. Рациональной областью применения ТБК являются случаи сжатия с эксцентриситетами внешней продольной силы, не выходящими за пределы ядра сечения.



Рис. 2. Характер разрушения бетонного ядра трубобетонных элементов при осевом (а) и внецентренном (б) сжатии

Полученные результаты можно объяснить значительным ростом прочности бетонного ядра в предварительно обжатых элементах вследствие одновременного проявления трех известных эффектов – длительного прессования бетонной смеси, предварительного бокового обжатия бетонного ядра и его работе в условиях объемного сжатия. Прочность бетонного ядра в центрально сжатых элементах оказалась в  $3,0 \div 4,0$  раза выше по сравнению с прочностью исходного бетона. На основании результатов экспериментов можно утверждать, что использование в предварительно обжатых ТБК высокопрочного бетона позволяет существенно повысить их несущую способность, одновременно обеспечивая пластичный характер разрушения (рис. 2). В трубобетонных элементах усовершенствованной конструкции удалось достичь прочности бетонного ядра 210 МПа при исходной прочности используемого бетона 70 МПа. Практическое использование таких конструкций в качестве сильно нагруженных колонн высотных зданий представляется весьма целесообразным.

#### Л и т е р а т у р а

1. Берг О.Я., Рожков А.И. Исследование неупругих деформаций и структурных изменений высокопрочного бетона при длительном действии сжимающих напряжений// Тр. ЦНИИС, вып. 70, М., 1969. – С. 11-18.
2. Стороженко Л.И. Железобетонные конструкции с косвенным армированием. – Киев, 1989. – 99 с.
3. Долженко А.А. Усадка бетона в трубчатой обойме// Бетон и железобетон. – 1960. – №8. – С. 353-358.
4. Санжаровский Р.С. Теория и расчет прочности и устойчивости элементов конструкций из стальных труб, заполненных бетоном: Дисс. ... д.т. н. – М, 1977. – 453 с.
5. Катаев В.А. Теоретическое исследование и расчет трубобетонных стержней// Бетон и железобетон. – 1993. – № 2. – С. 26-28.
6. Свидетельство на полезную модель № RU 26575 U1, МКИ 7 Е 04 С 3/36. Строительный элемент в виде стойки. Кришан А. Л., Гареев М.Ш., Матвеев В. Г., Матвеев И. В. БИМП. 2002. № 34.
7. Патент на полезную модель № RU 49861. «Строительный элемент в виде стойки». Кришан А.Л., Сагадатов А.И., Аткишкин И.В., Кузнецов К.С., Чернов А.В. БИМП. 2005. № 34.
8. Мурашкин Г.В. К вопросу о роли длительности приложения давления в физико-химических процессах твердеющего давления// Железобетонные конструкции. – Куйбышев: КГУ, 1984. – С. 5-20.

### THE CONCRETE-FILLED STEEL TUBE COLUMNS FOR HIGH-RISE BUILDINGS

A.L. Krishan

The concrete-filled steel tube columns should be used in the structures of high-rise buildings. The experimental and theoretical researches of new structures of concrete-filled steel tube columns with pressed structure of concrete are executed. The results of experiences testify to its high bearing capacity.