

УДК 622.28: 624.07: 624.012.45: 624.9: 69.07: 624.075.23

*д.т.н. Литвинский Г.Г.,  
к.т.н. Фесенко Э.В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **ТЕОРИЯ РАСЧЁТА ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КРЕПИ**

*Виконано теоретичні дослідження несучої спроможності центрально-стиснутих трубобетонних елементів. Розроблено новий метод визначення міцності таких елементів по першому граничному стану. Доказана достатня точність і адекватність розрахунків експериментам.*

**Ключові слова:** *трубобетон, міцність, несуча спроможність, розрахунок, граничний стан, несуча конструкція.*

*Выполнены теоретические исследования несущей способности центрально-сжатых трубобетонных элементов. Разработан новый метод определения прочности таких элементов по первому предельному состоянию. Доказана достаточная точность и адекватность расчётов экспериментам.*

**Ключевые слова:** *трубобетон, прочность, несущая способность, расчет, предельное состояние, несущая конструкция.*

Повышение эффективности шахтного и подземного строительства невозможно без рационального использования ресурсов, снижения материалоемкости, стоимости, увеличения надежности строительных материалов и конструкций, применяемых для возведения зданий и сооружений поверхностного комплекса горных предприятий и крепей подземных горных выработок. Один из способов рационального сочетания свойств различных строительных материалов при их совместной работе – использование в качестве несущих конструкций стальных труб, заполненных бетоном (трубобетона).

Трубобетон обладает высокой несущей способностью при небольших поперечных сечениях элементов, являясь примером оптимального сочетания прочностных характеристик металла и бетона. При этом стальные трубы выполняют функции несъемной опалубки при бетонировании, обеспечивая как продольное, так и поперечное армирование бетона.

Особенно эффективны трубобетонные конструкции при работе на сжатие с относительно малыми эксцентриситетами. Как показали многочисленные исследования [1-5 и др.], несущая способность трубобетонного элемента (ТБЭ), как правило, выше суммарной несущей способности металла и бетона, из которого он изготовлен. При продольном сжатии ТБЭ реактивное боковое давление, действующее со стороны стальной оболочки на бетонное ядро, создает для бетона благоприятные условия работы – объемное сжатие, в результате чего резко снижается возможность возникновения трещин в бетоне. При этом прочность бетона при сжатии существенно возрастает (примерно в 1,8-2,7 раза) [5]. Стальная обойма, в свою очередь, благодаря благоприятному влиянию внутреннего давления твердой среды, предохранена от потери местной устойчивости. Кроме того, ТБЭ обладают значительно более высокой огнестойкостью, чем металлические. Особенно важным для горностроительных конструкций и шахтной крепи является сопротивление коррозии металла при воздействии внешней среды, которое у ТБЭ меньше в 2 раза из-за невозможности коррозии во внутренней полости.

Сравнение технико-экономических показателей металлических, железобетонных и трубобетонных колонн [3] показывает, что экономия стали при трубобетонном исполнении конструкций по сравнению с металлическим составляет до 56%, их стоимость уменьшается до 74%, а приведенные затраты снижаются на 62%. Масса трубобетонных колонн по сравнению с железобетонными уменьшается до 83%.

Сейчас широкое применение трубобетонных конструкций сдерживает отсутствие достоверной методики расчёта их прочности и несущей способности. Обосновывая выбор критерия прочности ТБЭ при центральном сжатии, одни исследователи, основываясь на данных экспериментов, считают предельным состоянием полного разрушения ТБЭ в момент достижения максимальной нагрузки [6, 7]. Другие авторы [1-4, 8, 9] предлагают рассматривать в качестве предельного состояния начало текучести трубы в продольном направлении. Оба подхода являются правильными, однако, поскольку здесь учитываются разные предельные состояния ТБЭ, они должны использоваться в зависимости от условий эксплуатации рассматриваемых ТБЭ. В ответственных сооружениях, когда предельные деформации несущих элементов ограничены технологическими требованиями, расчет должен вестись по первому предельному состоянию, т.е. за критерий прочности принимается нагрузка, вызывающая в обойме напряжения, равные пределу текучести стали. В большинстве известных на данный момент методиках расчета, основанных на таком подходе, несущая способность центрально-сжатого ТБЭ определяется из выражения, имеющего следующую структуру:

$$N = c \cdot R_b \cdot A_b + \alpha \cdot R_c \cdot A_c, \quad (1)$$

где  $A_b, R_b$  – площадь сечения и цилиндрическая прочность бетонного ядра;

$A_c, R_c$  – площадь сечения и предел текучести стальной оболочки;

$c$  – коэффициент, повышающий напряжения сжатия, достигаемые бетонным ядром в условиях объемного сжатия по сравнению с его призмной прочностью;

$\alpha$  – понижающий коэффициент, учитывающий перераспределение напряжений в стальной оболочке, вследствие ее распора бетонным ядром.

Проведенные за весь период изучения и применения трубобетона многочисленные эксперименты по исследованию его несущей способности позволили оценить пределы изменения коэффициентов  $c$  и  $\alpha$  для различных геометрических и механических характеристик стальных труб и бетонов, что позволило сформулировать практические рекомендации по их выбору или расчету.

Однако, из-за эмпирического подхода, положенного в основу данного метода расчета, эти рекомендации и формулы имеют ограниченную область применения и не могут быть распространены на все многообразие используемых строительных материалов, особенно на появляющиеся в настоящее время новые марки сталей, высокопрочных и легких бетонов, полимерных труб и т.д. Уточнение эмпирических коэффициентов для таких материалов потребует проведение новых обширных и трудоёмких экспериментов, поскольку использование существующих зависимостей приведет к появлению грубых ошибок при расчетах несущей способности центрально-сжатых ТБЭ. Это обусловлено тем, что эмпирическая зависимость (1) не отражает физику процессов перераспределения напряжений и деформаций при работе трубобетона. Нельзя распространить эту формулу и на ТБЭ разных форм сечения.

Поэтому особую актуальность приобретает проблема разработки достоверного и научно обоснованного метода расчёта центрально-сжатых ТБЭ, особенно ввиду перспективности их применения в шахтном и подземном строительстве.

**Цель исследований** состоит в разработке теории и установлении закономерностей совместной работы под нагрузкой и деформирования центрально-сжатых ТБЭ. **Объектом** исследований являются ТБЭ при их нагружении центральной сжимающей силой, а **предмет исследований** – несущая способность этих элементов. **Задачи исследований** состоят в разработке теоретической модели и методики определения несущей способности центрально-сжатых ТБЭ. **Основная идея** исследова-

ний заключается в использовании физически обоснованной теоретической модели взаимодействия бетона и стали в ТБЭ.

Создание физически обоснованной модели сводится к принятию адекватной расчётной схемы ТБЭ произвольного (в нашем случае – квадратного) поперечного сечения, находящегося под действием центральной сжимающей силы  $N$  (рис. 1). Основная физическая гипотеза, положенная в основу теоретической модели взаимодействия бетона и стали в ТБЭ, состоит в том, что под действием внешней нагрузки оба материала деформируются совместно, т.е. как единая композитная конструкция, следовательно:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_\delta = const, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_c$ ,  $\varepsilon_\delta$  – относительные деформации соответственно стальной обоймы и бетонного ядра.

Предельное состояние рассматриваемого элемента, вызванное приложенной нагрузкой  $N$  наступит, когда напряжения в стальной обойме достигнут предела текучести стали  $R_c$ . При этом предельно допустимая деформация стальной трубы составит:

$$[\varepsilon_c] = \frac{R_c}{E_c}, \quad (3)$$

где  $E_c$  – модуль упругости стали.

Напряжения в бетоне будут равны:

$$\sigma_\delta = \varepsilon_\delta \cdot E_\delta, \quad (4)$$

где  $E_\delta$  – модуль упругости бетона.

С учётом (2):

$$\sigma_\delta = [\varepsilon_c] \cdot E_\delta.$$

Исходя из условия равновесия всех сил по оси  $z$ :  $\sum z = 0$ :

$$N = N_c + N_\delta = R_c \cdot A_c + \sigma_\delta \cdot A_\delta, \text{ или}$$

$$N = R_c \cdot A_c + \frac{R_c}{E_c} \cdot E_\delta \cdot A_\delta$$

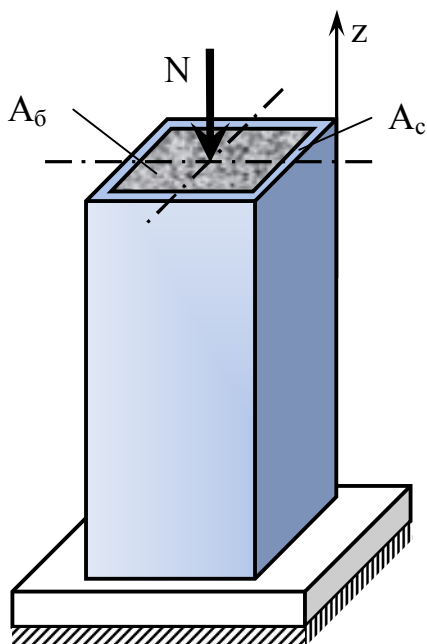


Рисунок 1 – Расчётная схема

Выполнив несложные преобразования, получим:

$$N = R_c \cdot A_c \cdot \left( 1 + \frac{E_{\delta}}{E_c} \cdot \frac{A_{\delta}}{A_c} \right), \quad (5)$$

где  $A_c, A_{\delta}$  – соответственно площадь поперечного сечения стальной обоймы и бетонного ядра.

Обозначим

$$k_{\delta} = 1 + \frac{E_{\delta}}{E_c} \cdot \frac{A_{\delta}}{A_c},$$

тогда:

$$N = k_{\delta} \cdot R_c \cdot A_c, \quad (6)$$

где  $k_{\delta}$  – коэффициент, учитывающий совместную работу бетона и стальной трубы путём повышения несущей способности стальной обоймы за счёт сопротивления бетонного ядра,  $k_{\delta} > 1$ .

Как видно из формулы (5), прочность на сжатие  $N$  пустой стальной трубы равна произведению площади её поперечного сечения  $A_c$  на предел текучести стали  $R_c$ . Повышение несущей способности при заполнении трубы бетоном зависит от соотношения модулей упругости и площадей поперечного сечения бетона и стали, которое отражено в коэффициенте  $k_{\delta}$ .

Как следует из определения  $k_{\delta}$ , в этот коэффициент совершенно равноправным образом вошли соотношения жесткостей бетонного ядра и стальной трубы и отсутствует влияние формы поперечного сечения трубы, что позволяет распространить формулу (6) на произвольную форму ТБЭ при его центральном сжатии. В то же время из (1) этот важный вывод не следует, что ещё раз демонстрирует преимущество теоретического подхода над эмпирическим.

Для учёта влияния длины элемента на его несущую способность необходимо рассчитать коэффициент продольного изгиба  $\varphi$  [10], зависящий от гибкости  $\lambda$ . Тогда в формуле (6) вместо  $A_c$  следует использовать произведение  $A_c \cdot \varphi$ .

**Пример.** Определим прочность трубобетонного элемента, представляющего собой стальную трубу 160x160x4 мм, заполненную бетоном разных марок с кубиковой прочностью  $R_{\delta} = 10, 20$  или 30 МПа. Расчётный предел текучести стали  $R_c = 235$  МПа, площадь поперечного сечения стальной трубы  $A_c = 24,55$  см<sup>2</sup>, площадь бетонного ядра

$A_{\delta} = 231 \text{ см}^2$ . Модуль упругости бетона  $E_{\delta} = 1,6 \cdot 10^4 \dots 2,8 \cdot 10^4$  МПа, стали –  $E_c = 2,1 \cdot 10^5$  МПа.

Согласно (5), при кубиковой прочности бетона  $R_{\delta} = 20$  МПа:

$$N = 235 \cdot 10^{-4} \cdot 24,55 \cdot \left( 1 + \frac{2,3 \cdot 10^4}{2,1 \cdot 10^5} \cdot \frac{231}{24,55} \right) = 1,17 \text{ МН.}$$

Аналогично выполним расчёты для  $R_{\delta} = 10$  МПа и 30 МПа. Сопоставим результаты расчета по предложенной методике с расчетами по методам, изложенным в [2, 8] (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнение результатов расчета прочности  $N$  центрально-сжатого трубобетонного элемента

Бетон		Прочность $N$ , МН по методике		
$R_{\delta}$ , МПа	$E_{\delta}$ , МПа	ДонГТУ	Кикин А.И. [2]	Синельник А.П. [8]
10	$1,6 \cdot 10^4$	0,99	0,97	0,89
20	$2,3 \cdot 10^4$	1,17	1,12	1,11
30	$2,8 \cdot 10^4$	1,30	1,23	1,26

Как видим, по всем трем методикам получены примерно одинаковые результаты (разброс не превышает 11%).

Следует отметить, что точность определения прочности ТБЭ по предложенному методу зависит от достоверности исходных данных, которые зависят от многих факторов и иногда могут значительно варьироваться. Так, для приведённого выше расчёта использованы усреднённые показатели начальных модулей упругости бетона  $E_{\delta}$  по [11]. Использование реальных характеристик материалов позволит повысить надёжность расчётов.

#### **Выводы.**

Предложена теоретически обоснованная модель взаимодействия бетона и стальной трубы, основанная на учёте совместного деформирования металла и бетона в единой грузонесущей конструкции – трубобетоне. Это позволило получить аналитический метод определения прочности центрально-сжатых трубобетонных элементов. Преимущество разработанной методики в том, что она не требует проведения трудоёмких и длительных экспериментов для получения эмпирических коэффициентов в расчётных формулах, как это необходимо в других методах, и позволяет рассчитывать прочность трубобетона любой формы трубы (круглой, прямоугольной и др.) в первом предельном состоянии для любого сочетания механических и геометрических параметров бетона и стали. Но главным достоинством предложенного подхода является воз-

возможность его распространения на другие случаи нагружения ТБЭ, что и составляет задачу дальнейших исследований.

### **Библиографический список**

1. *Стороженко Л.И. Расчёт трубобетонных конструкций / Л.И. Стороженко, П.И. Плахотный, А.Я. Черный. – К.: Будивэльнык, 1991. – 120 с.*
2. *Кикин А.И. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном / А.И. Кикин, Р.С. Санжаровский, В.А. Труль. – М.: Стройиздат, 1974. – 144 с.*
3. *Лукиша Л.К. Прочность трубобетона. Минск: Высшая школа, 1977. – 96 с.*
4. *Кришан А.Л. Определение разрушающей нагрузки сжатых трубобетонных элементов / А.Л. Кришан, А.И. Заикин, М.С. Купфер // Бетон и железобетон. – 2008. – № 2. – С. – 22-25.*
5. *Кришан А.Л. Оценка напряженно-деформированного состояния сжатых трубобетонных элементов / А.Л. Кришан, А.И. Сагадатов // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Межвуз. сб. науч. тр. – М., 2009. – Вып. 8. – С. 509-515.*
6. *Дегтярев В.В. Колонны с высокой несущей способностью из трубобетона с нагружением на бетонное ядро / В.В. Дегтярев, Н.В. Смирнов, В.М. Васькин // Транспортное строительство. - 1995. - №4-5. - С. 40-45.*
7. *Митрофанов В.П. Вдосконалений розрахунок міцності трубобетонних елементів варіаційним методом / В.П. Митрофанов, Д.К. Онипенко // Будівництво України. - 1999. - №1. - С.44-46.*
8. *Сінельник О.П. Інженерний метод розрахунку трубобетонних конструкцій при центральному завантаженні // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – Макіївка, 2011. – Вып. 4. – С. 47 – 52.*
9. *Резван И.В. Расчёт прочности центрально-сжатых трубобетонных элементов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 1.*
10. *СНиП II-23-81\* Стальные конструкции. Нормы проектирования. – М.: Стройиздат, 1990. – 134 с.*
11. *СНиП 2.03.01-84\* Бетонные и железобетонные конструкции / Минстрой России. — М.: ГП ЦПП, 1996. — 77 с.*

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. Бабиюком Г.В.**