

## ИССЛЕДОВАНИЕ НДС КОМПОЗИТНОЙ СЕЙСМОСТОЙКОЙ ТРУБОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ

**А.С. Береснев, А.Ю. Большаков, Г.Л. Колмогоров**

Пермский государственный технический университет

*Рассматривается НДС трубобетонной колонны при воздействии на неё осевой нагрузки. Дается оценка прочностных характеристик силовых элементов и рассматривается распределение усилий между стальной оболочкой и бетонным наполнителем. Описываются зоны концентрации напряжений. Определяются основные параметры оптимизации.*

Трубобетон – композитный стержень, состоящий из стальной трубы, заполненной бетоном. Бетон в данной конструкции выполняет не только роль элемента, воспринимающего осевые сжимающие усилия, но и упругого основания, повышающего устойчивость металлической оболочки. Стальная оболочка, в свою очередь, помимо осевого сжатия, воспринимает растягивающие напряжения при изгибах, сдвигах. Также исследователями установлено [1], что в стальной трубе вместо ожидаемой усадки происходит набухание бетона и его расширение, сохраняющееся на протяжении многих лет, что обеспечивает поджатие бетона и дополнительно повышает несущую способность трубобетонной колонны.

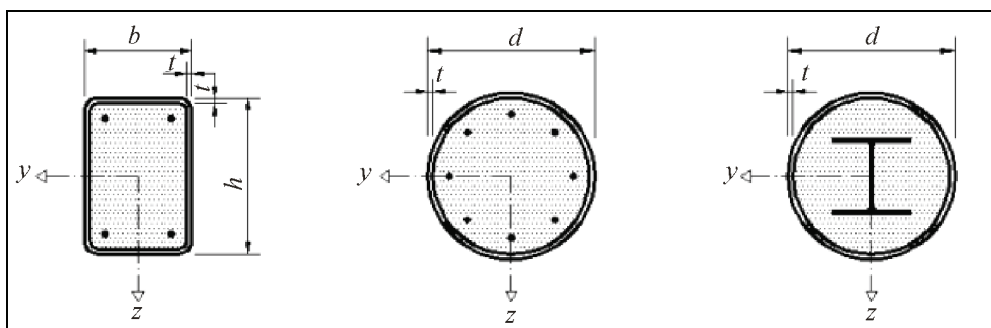


Рис. 1. Некоторые варианты трубобетонных конструкций

Трубобетонные конструкции очень надежны в эксплуатации – в предельном состоянии они не теряют несущую способность мгновенно, как железобетонные, а еще длительное время способны выдерживать

вать нагрузку. Несущая способность трубобетонных элементов увеличивается за счет повышения устойчивости элемента из-за наличия бетонного ядра.

Благодаря описанным качествам трубобетонные колонны успешно применяются в строительстве мостов, высотных зданий, различных ферменных конструкций, путепроводов.

Расчет на несущую способность стальных труб, заполненных бетоном, а также трубобетона с дополнительным армированием, описывают строительные стандарты проектирования различных стран: Eurocode-4 (EC4)[2], Australian Standards (AS), American Concrete Institute, Chinese code [3] и т.д.

В настоящее время общепринятым стандартом расчетов трубобетона является Eurocode 4. Предлагаемый здесь метод расчета достаточно прост для инженерных расчетов и дает запас по несущей способности. Ниже приведена формула для круглых труб, учитывающая относительную гибкость трубы на изгиб и комбинированную нагрузку сжатие-изгиб:

$$N_{EC4} = \eta_a A_a f_{yd} + A_c f_{cd} \left( 1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_c} \right)$$

где  $A_c$  и  $A_a$  – площади бетона и арматуры соответственно в поперечном сечении колонны;  $f_{cd}$ ,  $f_{yd}$  – расчетные значения прочности бетона на сжатие и предела текучести стали;  $f_c$ ,  $f_y$  – нормативные значения прочности бетона на сжатие и предела текучести стали;  $\eta_a$ ,  $\eta_c$  – постоянные коэффициенты, зависящие от гибкости колонны.

Однако очень часто результаты этой методики не совпадают с результатами испытаний и, кроме того, дают как заниженные в среднем на 15–20 % значения расчетной несущей способности трубобетона по сравнению с экспериментом, так и завышенные до 15 % [4]. Таким образом, неточные результаты заставляют проектировщиков прибегать к большим коэффициентам запаса, что приводит к увеличению стоимости проекта и к его трудоемкости.

Для возможности сравнения и анализа результатов исследования с экспериментальными данными построена конечно-элементная модель, максимально приближенная к экспериментальной установке исследования трубобетонных стержней. В качестве модели материалов была принята модель Прандтля (модель идеального упруго-пластического материала), что позволило сравнить результаты МКЭ моделирования с аналитическими результатами и наглядно наблюдать

за взаимным влиянием бетонного ядра и стальной оболочки на разных стадиях деформирования колонны.

Для качественного исследования НДС трубобетонного стержня и сравнения результатов аналитических решений с МКЭ экспериментом и принятыми методиками начальный модуль упругости бетона принимался по СП 52-101—2003 «Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры». Для сравнения результатов моделирования с опытными данными модуль принимался по результатам испытаний бетона для конкретного эксперимента.

Геометрические характеристики системы определялись с учетом существующих ограничений различных стандартов и практического применения в строительстве, а также по данным конкретных экспериментов.

В результате численных экспериментов получены диаграммы распределения суммарной осевой нагрузки между упругим заполнителем и стальной оболочкой в зависимости от осевых деформаций колонны. Данная диаграмма построена для различных отношений геометрических и физических характеристик компонентов трубобетонного стержня. На рис. 2 приведен пример такого распределения, а на рис. 3 показан качественный график экспериментальной зависимости для различных марок бетона по ЕС4. Стоит заметить, что получение такого распределения на практике затруднительно, так как в качестве экспериментальных установок применяются прессы, для которых определяется общая нагрузка.

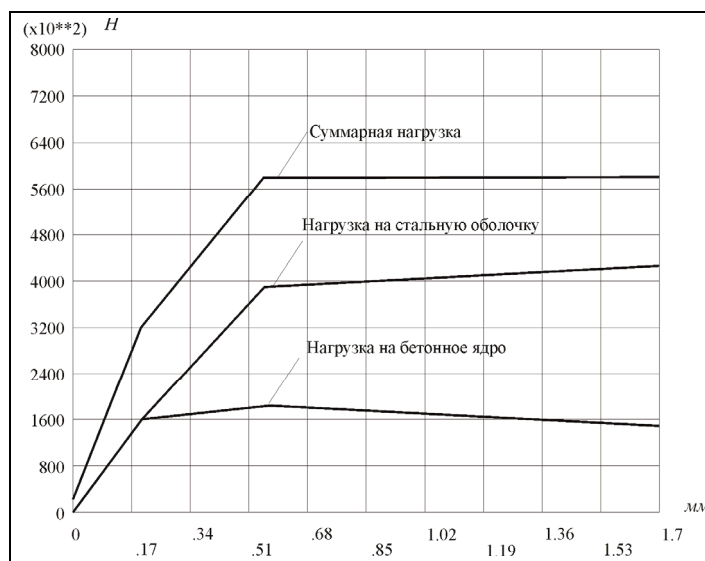


Рис. 2. Распределение нагрузок между бетонным ядром и трубой

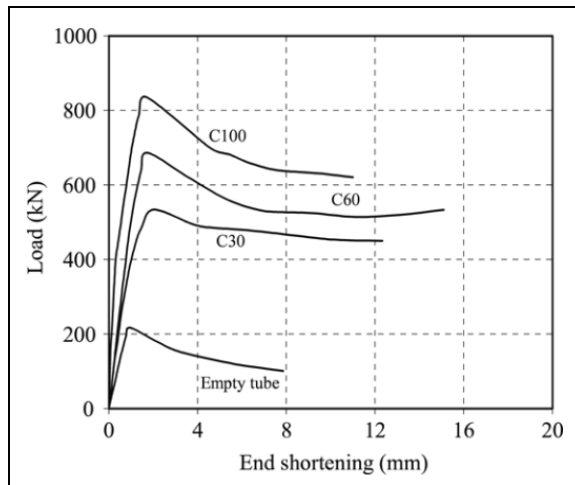


Рис. 3. Качественный график экспериментальной зависимости

Анализируя данные, представленные на рис. 2, можно сделать вывод, что при переходе бетона из зоны упругих деформаций в пластическую стадию продолжается незначительный рост нагрузки на ядро. Данный факт вызван снижением значений радиальных напряжений в зоне пластического течения, что объясняется различием коэффициентов Пуассона упругой стальной оболочки ( $\nu_s = 0,3$ ) и ядра бетона при пластических деформациях ( $\nu_b = 0,5$ ). На этапе совместного пластического деформирования стальной оболочки и бетонного заполнителя наблюдается незначительное перераспределение постоянно действующей нагрузки между компонентами трубобетона, и, как следствие, возрастет нагрузка на стальную оболочку.

Стоит также заметить, что для коротких образцов трубобетонных колонн ( $L/D < 3$ , где  $L$  – длина колонны,  $D$  – диаметр колонны) характерна бочкообразная форма деформирования при сжатии, у длинных образцов ( $L/D > 3$ ) появляются характерные кольца на расстоянии  $z \approx D$  (рис. 4). В области данных колец наблюдается незначительное увеличение осевых напряжений в бетоне на 3–6 %, тогда как радиальные напряжения сжатия увеличиваются по абсолютному значению примерно в 2 раза. Это свидетельствует о том, что для длинных образцов влияние граничных условий способствует образованию двух потенциальных мест разрушения конструкции. На данный момент разработан ряд конструктивных мер по усилению данных элементов колонн.

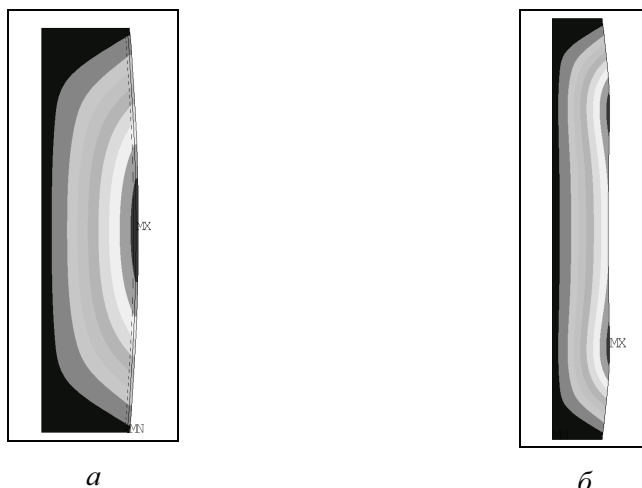


Рис. 4. Характерные формы деформирования трубобетона при разных длинах образцов (изополя радиальных перемещений):  
 $a - L/D = 2,88$ ;  $б - L/D = 5,77$

В настоящий момент основные трудности по оценке несущей способности трубобетонных колонн заключаются в экспериментальном определении прочностных характеристик бетона, консолидированного в замкнутой стальной оболочке. Повышение прочности бетонного ядра является основополагающим фактором эффективности трубобетонных колонн и требует более детального изучения и более качественной проработки математической модели работы материала.

Отсутствие нормативной базы по проектированию трубобетонных конструкций, недостаточное количество теоретических и экспериментальных исследований в нашей стране, низкая осведомленность и практическое применение рассматриваемых композитных конструкций делают задачу исследования, внедрения и разработки стандартов для трубобетона наиболее актуальной и перспективной для России.

### Список литературы

1. Берг О.Я., Рожков А. Исследование неупругих деформаций и структурных изменений высокопрочного бетона при длительном действии сжимающих напряжений. Тр. ЦНИИС, вып. 70, М., 1969.
2. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures (BS EN 1994-1-1:2004 published 2005 (EC4), Ref. 1.

3. Sakino K., Nakahara H., Morino S., Nishiyama I. Behavior of centrally loaded concrete-filled steel tube short columns // *Journal of Structural Engineering*. 2004. Vol. 130(2). P. 180–188.

4. Kuranovas A., Good D., Kvedaras A., Zhong S. Load-bearing capacity of concrete-filled steel columns // *Journal of civil engineering and management*. 2009. Vol. 15, No. 1. P. 21–33.

Получено 16.08.2010