

Для цитирования: Акаев А.И., Магомедов М.Г., Пайзулаев М.М. Перспективы возведения сейсмостойких зданий из трубобетонных конструкций. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (1):138-149. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-1-138-149

For citation: Abdujafar I. Akaev A.I., Magomedov M.G., Payzulaev M.M. Prospects of establishing earthquake resistant buildings from tube concrete constructions. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (1):138-149. (InRuss.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-1-138-149

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.016:693.98

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-1-138-149

ПЕРСПЕКТИВЫ ВОЗВЕДЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКИХ ЗДАНИЙ ИЗ ТРУБОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Акаев А.И.¹, Магомедов М.Г.², Пайзулаев М.М.³

^{1,2}Дагестанский государственный университет народного хозяйства,
367051, г. Махачкала, ул. Д. Атаева, 5,

³Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70,

e-mail: ^{1,2}aabduldzhafar@mail.ru, ³smdstu@mail.ru

Резюме: Цель. Целью исследования является поиск оптимальных проектных решений при возведении зданий, которые обеспечат их надежность и долговечность, соблюдение экологических требований, огнестойкость и сейсмостойкость. В связи с этим поставлена задача определения преимуществ и перспектив возведения сейсмостойких зданий из трубобетонных конструкций, поскольку они отличаются конструктивной, технологической и экономической эффективностью при использовании в качестве вертикальных несущих элементов каркасов высотных зданий. **Метод.** Использована методика расчета прочности нормальных сечений внецентренно-сжатых трубобетонных элементов с использованием нелинейной деформационной модели, позволяющая учитывать совместную работу стальной оболочки и бетонного ядра, находящегося в условиях трехосного сжатия. **Результат.** В статье проведен обзор новейшего мирового опыта применения в качестве вертикальных несущих конструкций трубобетона для объектов гражданского назначения с позиций сейсмостойкого строительства. Изучен мировой опыт возведения гражданских зданий высотой от 100 до 600 м с применением трубобетонной технологии, в том числе регионах с опасными природно-техногенными условиями. Проанализированы конструкционные, эксплуатационные и технологические преимущества и недостатки трубобетонной технологии. Рассмотрены методики расчета прочности трубобетонных элементов при центральном сжатии: по состоянию полного разрушения бетона и текучести трубы, достигаемому при максимальной нагрузке, итак называемая деформационная теория – по состоянию начала «текучести трубы в продольном направлении». Показаны достоинства и недостатки обоих методов. Рассмотрены факторы, сдерживающие широкое применение и внедрение трубобетонных конструкций в России. **Вывод.** При всех очевидных преимуществах трубобетонных конструкций для широкого использования их в сейсмостойком строительстве необходимы дальнейшие углубленные исследования поведения трубобетонных элементов, работающих на статические и динамические нагрузки в составе многократно статически неопределимых несущих каркасов зданий.

Ключевые слова: трубобетон, трубобетонный элемент, металлическая труба, бетон, адгезия, объемное сжатие, прочность, бетонное ядро, методы расчета прочности сжатых трубобетонных элементов

TECHICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

PROSPECTS OF ESTABLISHING EARTHQUAKE RESISTANT
BUILDINGS FROM TUBE CONCRETE CONSTRUCTIONS

Abdujafar I. Akaev¹, Magomed G. Magomedov², Magomed M. Payzulaev³

^{1,2}DaghestanStateUniversity of National Economy,

5D.Ataeva street, Makhachkala 367008, Russia

³DaghestanStateTechnicalUniversity,

70 I. Shamil Ave, Makhachkala 367015, Russia

e-mail: ^{1,2}aabduldzhafar@mail.ru, ³smdstu@mail.ru

Abstract. Objectives The aim of the research is to find optimal design solutions for the erection of buildings that will ensure their reliability and durability, compliance with environmental requirements, fire resistance and earthquake resistance. In this regard, the task is to determine the advantages and prospects of erecting earthquake resistant buildings from tube concrete constructions, since they are distinct in constructive, technological and economic efficiency when are used as vertical load-bearing struts of high-rise buildings. **Method** The technique for calculating the strength of normal sections of eccentrically-compressed tube concrete elements uses a nonlinear deformation model, taking into account the joint operation of the steel shell and the concrete core under the conditions of triaxial compression. **Results** In the article the review of the newest world experience of using tube concrete as vertical load-bearing structures for public facilities from the standpoint of earthquake resistant construction is given. The international practices of public facility construction ranging in height from 100 to 600 m with the use of tube concrete technology, including regions with dangerous natural and man-made conditions, have been studied. The structural, operational and technological advantages and disadvantages of tube concrete technology are analysed. Methods for calculating the strength of concrete tube elements in the case of central compression are considered: according to the so-called deformation theory, the state of total destruction of both concrete and tube fluidity attained at maximum pressure are indicated by the beginning of "tube flow on the longitudinal axis". The advantages and disadvantages of both methods are shown. Factors constraining the introduction and wider application of tube concrete constructions in Russia are considered. **Conclusion** While the advantages of concrete tube constructions in their extensive implementation in earthquake-resistant construction are obvious, further in-depth studies of the behaviour of tube concrete elements operating under both static and dynamic stresses repeatedly, statically indeterminate load-carrying building frames are needed.

Keywords: tube concrete, tube concrete element, metal pipe, concrete, adhesion, volumetric compression, strength, concrete core, methods for calculating the strength of compressed tube concrete elements

Введение. Трубобетон – это комплексная конструкция (ТБК), состоящая из стальной оболочки (металлической трубы), заполненной бетоном. Стальная оболочка может выполнять роль несущей арматуры, тогда внутреннее бетонное ядро не армируется, либо используется в качестве несъемной опалубки, и тогда перед заполнением бетона внутритрубное пространство усиливается металлическим каркасом (рис. 1).

Трубобетонные элементы (ТБЭ) связаны с несущим стволом на уровне этажей монолитными перекрытиями с внутренним стальным профилированным настилом и с внешним жестким профилем из стального прокатного двутавра и швеллера, а в вертикальном направлении – раскосами коробчатого или круглого сечения, заполненными бетоном или без заполнения.



Рис.1. Примеры армирования трубобетонного ядра: а – трубобетонный сердечник неармированный; б – то же, армированный высокопрочной арматурой; в – жесткий рамный узел стыка колонны с перекрытием

Fig.1. Examples of reinforcement of the pipe-concrete core: a - pipe-core core not reinforced; b - the same, reinforced with high-strength reinforcement; v - rigid column joint frame with overlapping

Постановка задачи. Обзор отечественных и мировых тенденций применения различных конструктивных решений в строительстве показал, что одним из способов решения проблемы снижения материалоемкости, веса высотных зданий, уменьшения объема строительных конструкций, обеспечения свободы планировки (с большим шагом колонн и оригинальными фасадами) при повышении технических показателей конструкций, их надежности и сейсмостойкости является применение комбинированной каркасно-стволовой конструктивной системы с использованием трубобетонных технологий.

Значительный вклад в исследование свойств и теорию расчета ТБК внесли работы Передерия Г.П., Гвоздева А.А., Берга О.Я., Росновского В.А., Кикина А.И., Трулля В.А., Лукши Л.К., Гениева Г.А., Маренина В.Ф. и др. Среди зарубежных работ по исследованию и развитию трубобетона следует отметить работы Ф. Бойда, Р.В. Фурлонга, Н. Гарднера, Г. Георгиуса, Д. Лама, М. Юхансона, Р.С. Джонсона, Д.И. Кима, Д.Ф. Хаджара, М. Моллера, Дзяо, Х. Дзу, Т. Ямамото, С. Дзонга, К.Дзю и др.

Методы исследования. Анализ мирового опыта расчёта, проектирования и строительства различных высотных объектов применением трубобетонных конструкций (ТБК), проведенных авторами [1-19] подтверждает обоснованность тезисов об эффективности их использования (вместо железобетонных) как более устойчивых к сжатию. Конструкционные и строительно-технические свойства трубобетона позволяют строителям США, Австралии, Японии, Франции, Германии, Китая, Объединённых Арабских Эмиратов, на основе созданной широкой нормативной базы, эффективно применять его в самых различных областях строительства (рис. 2).

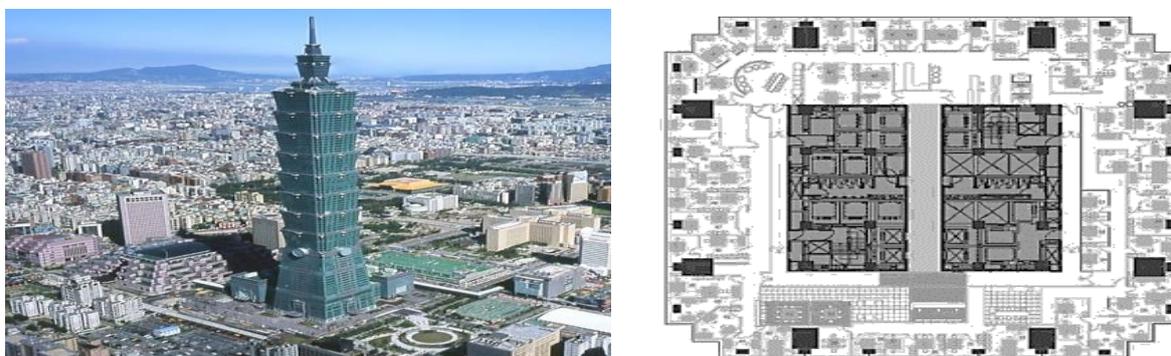


Рис.2.Общий вид и план 509 метрового торгово-офисного здания Taipei 101 в Тайване (Китай), построенного с применением трубобетона
Fig.2. General view and plan of the 509 meter Taipei 101 trade and office building in Taiwan (China), constructed with the use of pipe concrete

Из стран бывшего СССР и СНГ трубобетонные технологии в высотном строительстве наиболее активно используются в Казахстане, на Украине, а в последнее время и в России.

Обсуждение результатов. Технические особенности и практика применения трубобетона при строительстве в сейсмически активных регионах выявили определенные преимущества его использования.

Наиболее значительные достоинства ТБК.

1. Внешняя стальная труба-оболочка выполняет одновременно функции: опалубки; продольного и поперечного армирования; жесткого несущего упора, способного воспринимать высокие усилия во всех направлениях и под любым углом, устойчивого к ударным и сейсмическим воздействиям.

2. Боковое давление трубы препятствует развитию микротрещин разрыва в изолированном бетоне, который при продольном нагружении стремится увеличить свои размеры в радиальном направлении. Эффект обоймы, в колоннах круглого поперечного сечения, создает идеальные условия для работы бетонного ядра под нагрузкой – условия объемного сжатия, тем самым повышая несущую способность всего массива. В предельном состоянии ТБК прочность бетона при сжатии возрастает примерно на 50-80% [1].

В работах Стороженко Л.И. экспериментально доказано, что для бетона, заключенного в трубу, коэффициент повышения его прочности $\eta = \sigma_{by}/R_b$ зависит в основном от толщины стенки трубы: при $\delta d = 0,01$ он составляет 1,74÷1,88; при $\delta d = 0,02$: 2,02÷2,34; при $\delta d = 0,03$: 2,34÷2,72.

3. Исследования [1, 4÷6, 9÷11] подтверждают вывод, что из-за отсутствия влагообмена между бетоном и внешней средой в начальный период вместо усадки происходит набухание бетона в трубе и его расширение, которое сохраняется на протяжении многих лет и создает благоприятные условия для его работы под нагрузкой.

4. В ТБК возможно использование современных высокопрочных бетонов, что увеличивает эффективность работы стальной обоймы, так как здесь практически преодолевается один из основных их недостатков - высокая хрупкость. Исследования Людковского И.Г., Альпериной О. Н., Фонова В.М., Макаричевой Н.В., Нестеровича А.П., Кришана А.Л. показали: образцы с ядром из бетонов классов В60÷В100 всегда имели предел упругой работы на 20÷30 % выше, по сравнению с образцами из бетонов классов В12,5÷В40.

5. Сжатые ТБЭ, имеющие небольшую гибкость и малые эксцентриситеты приложения продольной силы (что характерно для вертикальных несущих элементов каркасов высотных зданий), обладают исключительно высокой несущей способностью при относительно малых поперечных сечениях. В диапазоне исследованных нагрузок, трубобетонные элементы не требуют внутреннего или дополнительного армирования вследствие того, что металлическая труба является коаксиальным армированием. Предельная деформативность у таких элементов резко возрастает, и их разрушение даже при использовании высокопрочных бетонов имеет пластический характер [4, 10], что исключает опасность внезапного разрушения при техногенных и других воздействиях, как отдельной конструкции, так и всего здания в целом.

6. Стальная труба, благодаря благоприятному влиянию внутреннего давления твердой среды, оказывается в значительной степени, предохраненной от потери местной и общей устойчивости. Это увеличивает способность трубобетонных колонн сопротивляться значительным горизонтальным перемещениям, а также действию гравитационных сил от веса сооружения и вертикальной составляющей землетрясения без разрушения, причем не только в упругой области, но и в пластическом состоянии. При землетрясении здание с ТБК, наподобие эластичного хлыста, может совершать значительные поперечные колебания, оставаясь невредимым [1].

7. Использование цилиндрических стержней в сооружениях, подверженных ветровым нагрузкам, позволяет снизить эти воздействия за счет улучшения аэродинамических свойств. Стержень круглого сечения является равноустойчивым при одинаковых расчетных длинах. Жесткость на кручение такого стержня значительно выше, чем у стержней открытого профиля.

8. Мировой опыт свидетельствует, что расход бетона в трубобетонных колоннах сокращается в 1,5÷2 раза, а масса конструкций уменьшается в 2÷2,5 раза [1÷14] по сравнению с традиционными железобетонными. В связи с отсутствием арматурных и сварочных работ, а также работ по монтажу опалубки затраты труда на возведение колонн сокращаются вдвое. По сравнению со стальными конструкциями, применение трубобетонных колонн позволяет в 2÷3 раза сократить расход металла. Изготовление стальных труб, по сравнению с изготовлением стальной арматуры, экономичней как по затратам стали, так и по трудоемкости.

9. ТБК сохраняют все преимущества трубчатых металлических конструкций. Их легче очищать, окрашивать и осматривать, что также повышает их долговечность. Наружная поверхность ТБК примерно в 2 раза меньше, чем конструкций из профильного проката, вследствие этого у них меньше расходы по окраске и эксплуатации. Заполнение стальной трубы бетоном защищает внутреннюю поверхность от коррозии и не требует её дополнительной окраски, металлизации или герметизации [3].

10. Огнестойкость трубобетонных элементов значительно выше, чем металлических, и при величине наружного диаметра 400 мм составляет около 2 часов без какой-либо защиты, а при нанесении защитной оболочки можно обеспечить практически любую требуемую огнестойкость [6÷9].

11. Применение трубобетона позволяет сократить технологические процессы армирования, опалубки, выдерживания конструкций до получения проектной прочности, распалубки. За ненадобностью опалубочного оборудования (стальная труба уже является опалубочной системой), кружал, хомутов, отгибов, петель, закладных деталей значительно упрощается монтаж и улучшаются условия возведения сооружений. Стальные трубы позволяют использовать передовые методы заливки бетона с помощью насосов. Отсутствие распределительной и рабочей арматуры позволяет получить более качественную укладку жестких бетонных смесей. Объем сварных работ со стальными трубами неизмеримо меньше объема работ по сварке обычной арматуры, что дает возможность упростить технологию, уменьшить количество строительных лесов, уменьшить площадь производства работ. Меньшая масса трубобетонных элементов, большая выносливость и меньшая подверженность механическим повреждениям в сравнении с железобетонными облегчает их транспортирование и монтаж. Использование трубобетонных конструкций позволяет вести строительство круглый год: в зимнее время можно выполнять монтаж труб-оболочек, их сварку с закладными деталями, элементами перекрытия [4, 5, 7-9], а их бетонирование производить весной. Таким образом, процесс изготовления трубобетонных элементов облегчается и становится выгоднее как по трудозатратам, так и по стоимости. Полная стоимость сооружений из трубобетона значительно ниже стоимости аналогичных железобетонных и стальных.

Несмотря на приведенные достоинства ТБК, все же они пока не находят широкого практического применения в России, и вопрос о целесообразности их использования при строительстве в сейсмически активных регионах нашей страны пока остается открытым.

Наиболее значительные недостатки ТБК.

1. Существенным недостатком ТБК является сложность обеспечения совместной работы бетонного ядра и внешней стальной оболочки при эксплуатационных нагрузках. В процессе постепенного увеличения сжимающей силы, приложенной к ядру и обойме, они работают совместно только в начальный период времени. Из-за разницы коэффициентов поперечной деформации бетона и стали ($\nu_b=0,18\div0,25$; $\nu_s=0,3$) внешняя оболочка стремится оторваться от поверхности бетона [2, 3, 6÷9, 12, 13]. Это способствует возникновению в нем радиальных растягивающих напряжений и приводит к нарушению сцепления.

В этот момент никакого поперечного обжатия бетона в трубе происходить не может, и бетон начинает работать отдельно от оболочки в условиях одноосного сжатия (коэффициент повышения прочности бетона $\eta = \sigma_{by}/R_b=1$), а труба - как продольная арматура. Конструкторам необходимо понимать, что прочность сложноподвинутого бетона в каждой точке ТБК не есть раз и навсегда заданная величина, а определяется характером и величиной напряженного состояния в последней [12, 13].

Факторами, которые влияют на напряженно-деформированное состояние (НДС) в окрестности точки ТБЭ, являются физическая нелинейность, усадка и ползучесть бетона, реологические факторы, режим его силового нагружения, наследственность, предыстория, в том числе упрочнение, наличие и развитие трещин [4], общий характер нагружения ТБК (передача нагрузки на бетон, на трубу или на бетон и трубу одновременно), геометрические размеры и геометрическая нелинейность самих ТБК, гидрогеологические и сейсмические условия площадки строительства, температурные и климатические параметры внешней среды.

2. Отсутствуют общепризнанные инженерные методики расчета несущей способности ТБК с учетом эффекта обоймы. Из анализа работ авторов [3] следует, что, при выборе критерия прочности центрально-сжатых трубобетонных элементов (ЦС ТБЭ) одни исследователи, основываясь на данных экспериментов, считают предельным состояние полного разрушения ТБЭ в момент достижения максимальной нагрузки.

Другие авторы предлагают рассматривать в качестве предельного состояния ЦС ТБЭ начало текучести трубы в продольном направлении. Последний критерий обосновывается тем, что по мнению д.т.н., профессора Стороженко Л.И., ТБЭ «не имеют явного предела разрушения» и поэтому необходимо «ограничивать продольную относительную деформацию из условий эксплуатации трубобетона». Почти все известные методы расчета ЦС ТБЭ не учитывают должным образом обнаруженное в экспериментах существенное влияние на прочность способа приложения нагрузки на концах ТБЭ (одновременно на бетон и трубу, только на бетон, только на трубу) и соответствующего сцепления бетона с трубой. Так, японские исследователи считают оптимальным нагружение только на бетон при отсутствии сцепления бетона с трубой: поперечные деформации трубы опережают продольные, а поперечные и продольные деформации бетона значительно больше соответствующих деформаций трубы, т.е. в этом случае труба, начиная с упругой стадии, работает преимущественно в поперечном направлении, сдерживая поперечные деформации бетона и испытывая плоское НДС «растяжение-сжатие».

Стадия упругой работы ТБЭ продолжается примерно до уровня 0,5...0,7. Напротив, американские конструкторы стремятся усилить сцепление бетона с трубой посредством коротышей, привариваемых перпендикулярно к внутренней поверхности трубы. Но поскольку большинство экспериментов проведено с нагружением одновременно бетона и трубы, без специальных усилений сцепления бетона с трубой, эти условия работы ТБЭ под нагрузкой приняты в большинстве известных методов расчета. Как отмечено выше, существует два принципиально разных подхода к определению критерия предельного состояния ТБЭ. В первом случае предельным считается состояние полного необратимого разрушения ТБЭ в момент достижения максимальной нагрузки. По мере того, как нагрузка возрастает, в бетоне образуются микротрещины, увеличивается давление между бетоном и косвенной арматурой. При достижении нагрузок, близких к разрушающим, «включается» эффект обоймы, который положительно сказывается на последующей работе сжатых трубобетонных элементов, блокируя дальнейший рост уже образовавшихся в бетонном ядре трещин и отдаляя момент его разрушения [3÷9, 12, 13]. При дальнейшем увеличении нагрузки и приближении ее к максимальной продольные напряжения в трубе достигают предела текучести, в бетонном ядре начинается лавинообразное образование трещин и формирование плоскостей сдвига, по которым происходит разрушение.

Ряд авторов, как было отмечено, предлагает рассматривать в качестве предельного состояния начало текучести трубы в продольном направлении, т.е. предлагается критерий предельной деформации. Сторонниками второго критерия Кикиным А.И., Санжаровским Р.С., Труллем В.А. была предложена удобная в инженерных расчетах формула определения несущей способности ЦС ТБЭ, основанная на суммарном учете составляющих — бетонного ядра и металлической оболочки:

$$N = (k_b \sigma_T^b A_b + k_s R_s^n A_s) \gamma_f \gamma_c \quad (1)$$

где k_b — коэффициент однородности бетонного ядра; $\sigma_T^b = R_{bn} + \mu_p R_{sn,p}$ — нормативное сопротивление бетонного ядра, работающего в условиях равномерного объемного сжатия; $\mu_p = A_b/A_s$ — коэффициент армирования; A_b, R_{bn} — площадь поперечного сечения бетонного ядра и нормативное сопротивление бетона осевому сжатию при однородном напряженном состоянии; $A_s, R_{sn,p}$ — площадь поперечного сечения стальной трубы и нормативное сопротивление стали растяжению; k_s — коэффициент однородности стали; γ_f и γ_c — коэффициенты надежности и условия работы. Однако зависимость (1) справедлива только при совместной работе ядра и оболочки, что на практике может быть достигнуто только с применением специальных средств и технологий [10].

Второй критерий игнорирует упругопластические свойства трубобетона, что снижает его эффективность. Трубобетонные конструкции и элементы не являются пластически упрочняющимися, а относятся к пластически разупрочняющимся, поскольку их диаграмма «нагрузка F - характерная деформация ε » имеет строгий максимум (F_u, ε_u) и последующую нисходящую ветвь [14]. Очевидно, современный расчет прочности ТБЭ должен учитывать связанное друг с другом влияние способа приложения нагрузки и сцепления бетона с трубой. Значительные пластические свойства центрально-сжатых ТБЭ, близкие к идеальным вблизи строгого максимума диаграммы сжатия трубобетона, обусловили, что в большинстве случаев расчет прочности ЦС ТБЭ производится по состоянию полного разрушения и теориям пластичности [3, 6, 12, 13,].

Однако следует иметь в виду, что задолго до наступления полной потери несущей способности продольные деформации труб достигают значений, при которых эксплуатация строительных конструкций нецелесообразна. В таких случаях предельная деформация может стать главенствующей, определяющей предельное состояние, а силовой фактор уже подбирается по ее величине [9].

Следует отметить, что в работе [4] приведена весьма обстоятельно разработанная методика расчета прочности нормальных сечений внецентренно-сжатых трубобетонных элементов с использованием нелинейной деформационной модели, позволяющая учитывать совместную работу стальной оболочки и бетонного ядра, находящегося в условиях трехосного сжатия. Данная модель описана в трудах таких известных ученых, как В.Н. Байков, В.М. Бондаренко, С.В. Бондаренко, А.А. Гвоздев, С.В. Горбатов, М.И. Додонов, Н.И. Карпенко и др. Прочность бетона при объемном напряженном состоянии вычисляют по формуле

$$R_{b,3} = R_b + k\sigma_{br,u}, \quad (2)$$

где k — коэффициент бокового давления, значение которого для ТБК круглого сечения рекомендуется определять по формуле

$$k = 5,3 - 0,8\rho, \quad (3)$$

в которой ρ — конструктивный коэффициент трубобетона, определяемый по формуле

$$\rho = (R_s A_s) / (R_b A_b), \quad (4)$$

здесь A_b, R_b, A_s, R_s — площади поперечного сечения и расчетные сопротивления соответственно бетона и стальной трубы на сжатие.

Боковое давление стальной трубы в предельном состоянии $\sigma_{br,u}$ первоначально вычисляется по приближенной формуле

$$\sigma_{br,u} = 0,4 R_s A_s / A_b, \quad (5)$$

В ходе расчета значение $\sigma_{br,u}$ может быть уточнено.

Несущая способность (предельное продольное усилие N) вертикальных конструкций при совместной работе бетонного ядра и оболочки может быть представлена следующей зависимостью:

$$N = A_b R_{b,3} + \alpha_s A_s R_s, \quad (6)$$

где α_s – коэффициент, учитывающий долю сопротивления стальной оболочки усилиям от внешних нагрузок в продольном направлении.

При внецентренном сжатии несущая способность трубобетонной колонны определяется по формуле:

$$N = (kN_{np}) / \left(1 + \frac{e_0 \eta D_n}{2,5 r^2} \right), \quad (7)$$

где N_{np} – максимальное усилие в трубобетонной колонне; D_n – наружный диаметр оболочки; e_0 – величина эксцентриситета; η – коэффициент, учитывающий прогибы; r – радиус инерции; k – коэффициент однородности.

При одновременном действии на трубобетонный элемент круглого поперечного сечения изгибающих моментов M_x и M_y проверка прочности производится с учётом суммарного эксцентриситета.

Расчет прочности внецентренно-сжатых ТБК производится по этой методике на ЭВМ по специально разработанной программе. Как свидетельствуют авторы, сопоставление результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными показывает их хорошую сходимость. Основные недостатки обоих методов расчета: эмпирический подход, положенный в основу методов, не отражает физику процессов перераспределения напряжений и деформаций при работе ТБЭ, поэтому рекомендации и формулы имеют ограниченную область применения и не могут быть распространены на все многообразие используемых строительных материалов, особенно новых марок сталей, высокопрочных и легких бетонов, полимерных труб и т.д.; нельзя распространить формулы(1), (6) и (7) на ТБЭ разных форм сечения.

3. Результаты комплекса исследований по оценке несущей способности трубобетонных элементов при внецентренном сжатии [3, 6, 9] свидетельствуют о снижении расчетной нагрузки на 15—20 % в момент появления предельных деформаций.

4. Существующие узлы сочленения колонн из трубобетонных элементов с перекрытиями (рис.3) решены таким образом, что касательные напряжения, возникающие от последних, передаются непосредственно на стенку металлической трубы.



Рис.3.Фрагмент строительства многоэтажного здания с применением в качестве вертикальных несущих конструкций трубобетона
Fig.3.Fragment of construction of multi-storey building With the use of as vertical bearing structures of pipe concrete

Но возникает проблема их передачи на бетонное ядро, т.к. возможен отрыв металлической оболочки от бетонного ядра вследствие малой адгезии трубы с бетоном из-за неравности коэффициентов Пуассона и избыточной поперечной силы от перекрытия. Следовательно, для повышения несущей способности и надежности конструкции следует организовывать дополнительные мероприятия по обеспечению совместной работы двух композиционных материалов.

5. Широкое применение ТБК в России сдерживается отсутствием нормативных документов по их проектированию и расчету не только для сейсмических, но и для обычных районов. Несмотря на то, что работа ТБК при сжатии изучена с достаточной полнотой, существующие инженерные и вариационные методы расчета существенно отличаются друг от друга. Не решен вопрос физически адекватного моделирования трубобетонного элемента в простых вычислительных комплексах (Scad, Lira и др. ПК). В них не учитываются в комплексе свойства материалов, неполно отражаются основные особенности и специфика сопротивления трубобетона деформированию в зависимости от характера действующей нагрузки, режима и длительности нагружения, усадки, ползучести бетона, реологических факторов [2, 6, 12, 13]. Недостаточно изучены характер набора прочности высокопрочных бетонов, их адгезия со стальной оболочкой, влияние В/Ц на ранний набор прочности бетоном и др. Это требует создания, теоретического и экспериментального обоснования более совершенной методики расчета ТБК, более точно учитывающей их напряженно-деформированное и предельное состояние в составе несущего каркаса высотных сооружений при различных воздействиях.

Вывод. Новейший мировой опыт применения ТБК в области строительства показывает явно выраженную конструктивно-технологическую и экономическую эффективность инженерных решений сооружений с использованием трубобетона.

В то же время, широкое применение и внедрение ТБК в России сдерживается отсутствием нормативных документов по их проектированию и расчету. Несмотря на весьма обстоятельные исследования в этой области, надо признать, что до сих пор отсутствуют эффективная методика расчета и технологии возведения ТБК, нет надежной и приемлемой для практического использования расчетной модели трубобетонного сечения в предельном состоянии, адекватно отражающей его специфические особенности.

Отсутствует единое мнение о влиянии условий обжатия на повышение несущей способности бетона в ядре, значительная часть исследований выполнена с применением бетонов без предварительного обжатия ядра. Нет определенности с критерием предельного состояния ТБЭ, нет универсального метода их расчета с учетом особенностей характера передачи нагрузок на поперечные сечения. Указанные моменты определяют актуальность дальнейших исследований по расчету трубобетона.

Применение трубобетона требует дополнительной проработки основных узлов сопряжения с другими конструкциями. Отсутствуют надежные решения узлов сочленения трубобетонных элементов по высоте с перекрытиями многоэтажных каркасов, обеспечивающих совместную работу стальной «оболочки» и бетонного ядра, что также является сдерживающим фактором на пути широкого использования ТБК при строительстве зданий и сооружений.

Еще одним фактором, требующим внимательного рассмотрения, является проблема «мостиков холода», которая неизбежно возникает в холодном климате России.

Наконец, вызывает серьезные опасения пространственная устойчивость зданий из трубобетона в случае продолжительных по времени землетрясений. Принятые в реализуемых проектах конструктивные решения могут оказаться уязвимыми, т.к. из работы сооружения могут быть выключены при начальных толчках вертикальные сквозные (решетчатые) диафрагмы, образованные колоннами и раскосами. При этом качественно изменяются динамические характеристики сооружения, после чего может сыграть негативную роль геометрическая нелинейность как результат резкого увеличения амплитуд колебаний здания при афтершоках. В дальнейшем (при продолжении афтершоков) нельзя исключить опасность прогрессирующего разрушения остова сооружения в результате вхождения в резонансную полосу в такт с длиннопериодными колебаниями основания.

Таким образом, при всех своих преимуществах ТБК нуждаются в дальнейших исследованиях для широкого их использования в сейсмостойком строительстве.

Библиографический список:

1. S.-H. Cai. Modern Street Tube Confined Concrete Structures. Shanghai, China Communication Press, 2003, p. 358.
2. Паньшин Л.Л., Крашенинников М.В. Опыт реализации неупругой деформационной модели в практических расчетах конструкций высотных зданий // Бетон и железобетон - пути развития: Науч. тр. 2-й Всероссийской конф. по бетону и железобетону. Т. 6. М.: Дипак, 2005. С. 249-256.
3. Митрофанов В. П., Довженко О. А. О критерии предельного состояния по прочности центрально сжатых трубобетонных элементов // Научно-технический сборник "Коммунальное хозяйство городов" № 63: Серия: Економічні науки. Харьков, Украина, 2005, С. 73-86.
4. Кришан А.Л. Расчет прочности трубобетонных колонн / А.Л.Кришан, А.И.Заикин, А.С.Мельничук // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений – № 1, 2010. - С. 20-25.
5. Курочкин А. В. Возведение каркасных зданий с несущими конструкциями из трубобетонных элементов // Вестник МГСУ. 2010. № 3. С. 82-86.
6. Етекбаева А.Б. Прочность и деформация трубобетонных сжатых элементов при знакопеременных горизонтальных нагрузках: Дисс.на соиск. учен. степ. к.т.н. Спец.05.23.01. – Алматы, 2010. 132 с.
7. Дуванова И.А., Сальманов И.Д. Трубобетонные колонны в строительстве высотных зданий и сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. №6 (21). 2014, С. 89-103.
8. 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, 2015. №4. С.1-25.
9. Аймагамбетова С.М. Высотное строительство с учетом применения трубобетонных конструкций. Дис. на соиск. квалиф. магистра техники и технологии строительства. Санкт-Петербург: ФГБОУ ВПО СПбГПУ, 2013. - 71 с.
10. Morino S., Tsuba K. Design and Construction of Concrete- Filled Steel Tube Column System in Japan // Earthquake and Engineering Seismology. 2005. No 1. Vol. 4. P. 51-73.
11. 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.
12. Суров К.Л., Акаев А.И., Римшин В.И. К вопросу о расчете прочности и жесткости сталебетонных станин с учетом физической нелинейности // Бетон и железобетон. – 1996. № 1. С. 24-28.
13. Акаев А.И., Пайзулаев М.М. Расчет прочности по первой группе предельных состояний изгибаемых элементов, усиленных стальными обоймами // Журнал «Научное обозрение». – Москва, 2015. №9. С. 112-115.
14. Yu Q., Tao Z., Chen Z.-B. Analysis and calculations of steel tube confined concrete (stcc) stub columns. Journal of Constructional Steel Research. 2010. Vol. 66. Issue 1. Pp. 53-64.
15. Liu F.-Q., Yang H. Fe analysis of fire-resistance performance of concrete filled steel tubular columns under different loading cases. Harbin Gongye Daxue Xuebao/Journal of Harbin Institute of Technology. 2010. Vol. 42. Issue 1. Pp. 201-204.
16. Qian J., Jiang Z., Ji X. Experimental study on seismic behavior of steel tube-reinforced concrete composite shear walls with high axial compressive load ratio. Jianzhu Jiegou Xuebao. Journal of Building Structures. 2010. Vol. 31. Issue 7. Pp. 40-48.
17. Garanzha I.M. About approaches to the calculation of composite tubes in Ukraine and abroad // Metal constructions. 2014, vol.20, №1, p. 45-53.
18. Min Yu, Xiaoxiong Zha, Jianqiao Ye, Yuting Li. A unified formulation for circle and polygon concretefilled steel tube columns under axial compression / Engineering Structures.- 2013. - 49. - p. 1-10.

19. Xinzheng Lua, Linlin Xiea, Hong Guanb, Yuli Huangc, Xiao LuA shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using Open Sees / Finite Elements in Analysis and Design. 2015, vol, pp. 14–25

References:

1. S.-H. Cai. Modern Street Tube Confined Concrete Structures. Shanghai: China Communication Press; 2003. 358 p.
2. Pan'shin L.L., Krasheninnikov M.V. Opyt realizatsii neuprugoy deformatsionnoy modeli v prakticheskikh raschetakh konstruksiy vysotnykh zdaniy. Nauch. tr. 2-y Vserossiyskoy (Mezhdunarodnoy) konf. po betonu i zhelezobetonu "Beton i zhelezobeton - puti razvitiya". Moscow: Dipak; 2005. S. 249-256. [Pan'shin L.L., Krasheninnikov M.V. Experience in the realisation of inelastic deformation model in practical calculations of high-rise buildings. Proceedings of the 2nd All-Russian conference on concrete and reinforced concrete "Beton i zhelezobeton - puti razvitiya". Moscow: Dipak; 2005. P. 249-256. (in Russ.)]
3. Mitrofanov V. P., Dovzhenko O. A. O kriterii predel'nogo sostoyaniya po prochnosti tsentral'no szhatykh trubobetonnykh elementov. Nauchno-tehnicheskiiy sbornik "Kommunal'noe khozyaystvo gorodov" № 63: Seriya: Ekonomichni nauki. Khar'kov, Ukraina; 2005. S. 73-86. [Mitrofanov V. P., Dovzhenko O. A. About the criterion of the limiting state of strength of centrally compressed pipe-concrete elements. Scientific and technical collection "Kommunal'noe khozyaystvo gorodov" № 63: Seriya: Ekonomichni nauki. Khar'kov, Ukraina; 2005. P. 73-86. (in Russ.)]
4. Krishan A.L., Zaikin A.I., Mel'nichuk A.S. Raschet prochnosti trubobetonnykh kolonn. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy. 2010; 1:20-25. [Krishan A.L., Zaikin A.I., Mel'nichuk A.S. Calculation of strength of pipe-concrete columns. Structural mechanics of engineering constructions and buildings. 2010; 1:20-25. (in Russ.)]
5. Kurochkin A. V. Vozvedenie karkasnykh zdaniy s nesushchimi konstruksiyami iz trubobetonnykh elementov. Vestnik MGSU. 2010; 3:82-86. [Kurochkin A. V. Construction of frame buildings with load-bearing structures from pipe-concrete elements. Vestnik MGSU (Scientific and Engineering Journal for Construction and Architecture). 2010; 3:82-86. (in Russ.)]
6. Etekbayeva A.B. Prochnost' i deformatsiya trubobetonnykh szhatykh elementov pri znako-peremennykh gorizontal'nykh nagruzkakh: Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk. Almaty; 2010. [Etekbayeva A.B. Strength and deformation of pipe-concrete compressed elements under alternating horizontal loads. Published summary of Candidate of Technical Sciences thesis. Almaty; 2010. (In Russ.)]
7. Duvanova I.A., Sal'manov I.D. Trubobetonnye kolonny v stroitel'stve vysotnykh zdaniy i sooruzheniy. Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy. 2014; 6(21):89-103. [Duvanova I.A., Sal'manov I.D. Tube-concrete columns in the construction of high-rise buildings and structures. Construction of Unique Buildings and Structures. 2014; 6(21):89-103. (in Russ.)]
8. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. O probleme rascheta trubobetonnykh konstruksiy s obolochkoy iz raznykh materialov. Chast' 1. Opyt primeneniya trubobetona s metallicheskoy obolochkoy. Internet-zhurnal «Naukovedenie». 2015; 7(4):1-25. [Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. On the problem of calculating pipe-concrete structures with a shell of different materials. Part 1. Experience of using pipe-concrete with a metal shell. Scientific open access journal «Naukovedenie». 2015; 7(4):1-25. (in Russ.)]
9. Aymagambetova S.M. Vysotnoe stroitel'stvo s uchetom primeneniya trubobetonnykh konstruksiy. Dissertatsiya na soiskanie kvalifikatsii magistra tekhniki I tekhnologii stroitel'stva. Sankt-Peterburg; 2013. [Aymagambetova S.M. High-rise construction taking into account the use of pipe-concrete structures. Dissertation of Master of Building Technics and Technology. Saint-Petersburg; 2013. (in Russ.)]
10. Morino S., Tsuba K. Design and Construction of Concrete- Filled Steel Tube Column System in Japan. Earthquake and Engineering Seismology. 2005; 1(4):51-73.

11. Boyd P.F., Cofer W.F., McLean D.I. Seismic performance of steel-encased concrete columns under flexural loading. *Journal of ACI*. 1995; 92(3):353-364.
12. Surov K.L., Akaev A.I., Rimshin V.I. K voprosu o raschete prochnosti i zhestkosti stalebetonnykh stanin s uchetom fizicheskoy nelineynosti. *Beton i zhelezobeton*. 1996; 1:24-28. [Surov K.L., Akaev A.I., Rimshin V.I. On the calculation of strength and stiffness of steel concrete stations accounting for physical nonlinearity. *Beton i zhelezobeton*. 1996; 1:24-28.]
13. Akaev A.I., Payzulaev M.M. Raschet prochnosti po pervoy gruppe predel'nykh sostoyaniy izgibaemykh elementov, usilennykh stal'nymi oboymami. *Nauchnoe obozrenie*. 2015; 9:112-115. [Akaev A.I., Payzulaev M.M. Calculation of the strength of the first group of limiting states of bent elements reinforced with steel clips. *Science Review*. 2015; 9:112-115. (in Russ.)]
14. Yu Q., Tao Z., Chen Z.-B. Analysis and calculations of steel tube confined concrete (stcc) stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2010; 66(1):53-64.
15. Liu F.-Q., Yang H. Fe analysis of fire-resistance performance of concrete filled steel tubular columns under different loading cases. *Harbin Gongye Daxue Xuebao/Journal of Harbin Institute of Technology*. 2010; 42(1):201-204.
16. Qian J., Jiang Z., Ji X. Experimental study on seismic behavior of steel tube-reinforced concrete composite shear walls with high axial compressive load ratio. *Jianzhu Jiegou Xuebao. Journal of Building Structures*. 2010; 31(7):40-48.
17. Garanzha I.M. About approaches to the calculation of composite tubes in Ukraine and abroad. *Metal constructions*. 2014; 20(1):45-53.
18. Yu M., Zha X., Ye J., Li Y. A unified formulation for circle and polygon concretefilled steel tube columns under axial compression. *Engineering Structures*. 2013; 49:1-10.
19. Lua X., Xie L., Guanb H., Huangc Y., Lu X. A shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using Open Sees. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2015; 98:14-25.

Сведения об авторах.

Акаев Абулуджафар Имамусейнович - кандидат технических наук, доцент кафедры сейсмостойкого строительства.

Магомедов Магомед Гаджиевич - кандидат технических наук, доцент

Пайзулаев Магомед Муртазалиевич - кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры сопротивление материалов, теоретическая и строительная механика

Information about the authors.

Abdujafar I. Akaev – Cand. Sc.(Technical), Associate Professor

Magomed G. Magomedov – Cand. Sc.(Technical), Associate Professor

Magomed M. Payzulaev – Cand. Sc.(Technical), Senior lecturer.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 25.01.2017.

Received 25.01.2017.

Принята в печать 29.02.2017.

Accepted for publication 29.02.2017.