DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-114-122

УДК 624.046

Некоторые особенности ресурсосбережения в строительстве

Докт. техн. наук, проф. С. Н. Осипов[1], асп. А. В. Захаренко[1], Д. А. Поздняков[1]

[1]ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Для Республики Беларусь с ограниченными важными природными ресурсами их сбережение является одним из стратегических направлений развития строительной отрасли. При этом наибольшая эффективность использования закономерностей ресурсосбережения может достигаться не путем экономии денежных средств за счет применения более дешевых материалов с худшими свойствами, а, наоборот, путем выбора более дорогих качественных строительных материалов и изделий, но, безусловно, в определённых условиях изменения цены. Так, анализ изменения цены бетона с ростом прочности на сжатие показал, что цена 1 м^3 бетона возрастает гораздо медленнее увеличения прочности. Поэтому для работы на сжатие высокопрочные бетоны являются более выгодными по сравнению с низко- и среднепрочными. Для оценки ресурсоэффективности предложены новые сравнительные единицы прочностных и других физических свойств: удельные цена (при использовании) и стоимость (при производстве) позволяют сравнить различные материалы и изделия, что, например, необходимо при использовании трубобетонных конструкций в строительстве. Как показывают расчеты, в обычных условиях эксплуатации для трубобетонных конструкций следует применять высокопрочный бетон и трубы с минимальной толщиной стенок, выдерживающих боковое давление деформирующегося под нагрузкой сердечника. При этом для компенсации различия в деформационных характеристиках бетона и материала трубы необходимо использовать демпфирующие устройства, обеспечивающие предельно допустимые нагрузки бетонного сердечника и материала трубы.

Ключевые слова: ресурсосбережение, цена, высокопрочный бетон, трубобетон, труба, деформационные характеристики, демпфирующее устройство, предельные нагрузки

Для цитирования: Осипов, С. Н. Некоторые особенности ресурсосбережения в строительстве / С. Н. Осипов, А. В. Захаренко, Д. А. Поздняков // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 114–122. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-114-122

Some Specific Features of Resource Saving in Construction

S. N. Osipov[1], A. V. Zakharenko[1], D. A. Pozdnyakov[1]

[1]UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The Republic of Belarus possesses a limited number of important natural resources and their conservation is considered as one of the strategic directions for the development of construction industry. Regularities in resource saving can be used not only for cost-cutting at the expense of cheaper materials with worse properties but they can also be used under certain specific conditions for price formation through selection of expensive qualitative construction materials and products. Thus an analysis of changes in concrete price due to higher compressive strength has shown that the price per one concrete cubic metre is increasing much more slowly than an increase in strength. For this reason high-performance concrete is more advantageous in comparison with low- and medium-strength concrete. New comparative units for strength and other physical properties have been proposed for assessment of resource efficiency: unit price (in case of being used) and cost price (in case of being manufactured) make it possible to compare various materials and products and such approach is necessary while using steel tube confined concrete (STCC) structures in construction. Estimates suggest that high-strength concrete and tubes with minimum thickness of walls withstanding lateral pressure of a core which is deformed under load must be applied for STCC structures under normal operational conditions. In this context it is necessary to use damping devices for compensation

Адрес для переписки
Осипов Сергей Николаевич
ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.»
ул. Ф. Скорины, 15б,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

Address for correspondence
Osipov Sergey N.
UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.”
15b F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

of difference in characteristics of concrete and tube material and these devices ensure maximum safe load of concrete core and tube material.

Keywords: resource saving, price, high-performance concrete, tube concrete, tube, deformation characteristics, damping device, maximum safe load

For citation: Osipov S. N., Zakharenko A. V., Pozdnyakov D. A. (2018) Some Specific Features of Resource Saving in Construction. *Science and Technique*. 17 (2), 114–122. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-114-122 (in Russian)

Ресурсосбережение [1, с. 446] при строительстве различных объектов является одним из основных факторов эффективности проектирования и проведения строительных работ. При этом наибольшая эффективность использования закономерностей ресурсосбережения может достигаться не путем экономии денежных средств за счет применения более дешевых материалов с худшими свойствами, а, наоборот, путем выбора более дорогих качественных строительных материалов и изделий, но, безусловно, в определенных условиях изменения цены [1, с. 580]. Особенно интересно проанализировать возможности ресурсосбережения при применении бетона и его сочетании с другими материалами вследствие того, что в Республике Беларусь производство высококачественного цемента [2, 3], являющегося главной составляющей бетона, превышает внутренние потребности.

Анализ изменения стоимости бетона [4, 5] с ростом его средней прочности на сжатие (СТБ 1544–2005, приложение А) показывает, что цена 1 м^3 бетона возрастает гораздо медленнее увеличения прочности. Как видно из графика на рис. 1, где приведены зависимости стоимости 1 м^3 бетона от его прочности [4], значения цены в виде точек располагаются на одной прямой линии, описываемой выражением

$$Ц = a_1 + b_1\sigma, \quad (1)$$

где Ц – цена 1 м^3 бетона, у. е.; a_1, b_1 – эмпирические коэффициенты при a в у. е. и b в у. е./(кгс/см^2); σ – прочность полностью затвердевшего бетона на сжатие, кгс/см^2.

При помощи корреляционной обработки параметров восьми фактических значений цены (точки на рис. 1) определены величины $a_1 \approx$ $\approx$ 27,5 у. е. и $b_1 \approx$ 0,05 у. е./(кгс/см^2). Коэффициент линейной корреляции при этом составил $r \approx$ 0,998, что характеризует возможную погрешность в размере около 0,0015. Эти значения показывают почти идеальную линейную связь между прочностью данного бетона и его ценой, что позволяет экстраполировать полученную зависимость до σ = 0, т. е. до полного отсутствия цемента в бетонной смеси. Следовательно, исходная смесь щебня с другими добавками для получения бетона оценивается примерно в a_1 = 27,5 у. е., что для бетона марки ПЗ М500 (класс С30/37) составляет только около половины цены (≈ 53 у. е.).

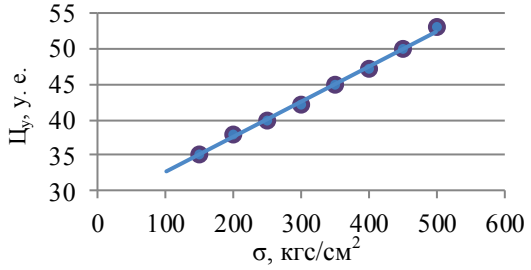

Рис. 1. Зависимость стоимости бетона на щебне от прочности на сжатие (точки соответствуют цене в у. е. из [4] при 1 у. е. ≈ 2 бел. руб.)

Fig. 1. Dependence of crushed-stone concrete cost on compression strength (points correspond to price in currency units from [4] when 1 c. u. ≈ 2 BYR)

Анализ соотношения «прочность–цена» для других бетонов и производителей показывает примерно аналогичные зависимости, но с меньшими значениями коэффициентов корреляции и возможными отклонениями при использовании различных, особенно специфических, добавок.

Однако для лучшего понимания изменения цены (при покупке) и стоимости (при производстве) при росте прочности бетона необходимо ввести новые показатели: удельную цену Ц$_у$ и удельную стоимость С$_у$, которые относятся к единице прочности. В данном случае – количество наиболее устойчивых денежных единиц к единице прочности, т. е. Ц$_у$ и С$_у$ в у. е./(кгс/см^2).

Следовательно, удельная цена и удельная стоимость определяются по зависимостям:

$$Ц_у = Ц/\sigma; \quad (2)$$

$$С_у = С/\sigma, \quad (3)$$

где Ц, С – цена и стоимость; σ – прочность в физических единицах.

В качестве примера на рис. 2 приведена зависимость удельной цены бетона на щебне от прочности на сжатие, построенная по значениям цены для точек на рис. 1.

Для аппроксимации этой зависимости были выбраны следующие алгебраические выражения:

$$Ц_у = a_2 + b_2\sigma^n; \quad (4)$$

$$Ц_у = a_3 + b_3/\sigma. \quad (5)$$

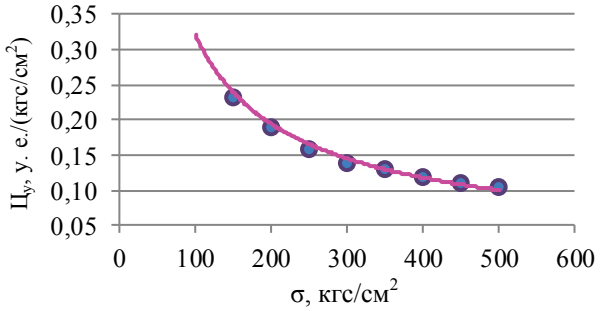

Рис. 2. Зависимость удельной цены бетона на щебне от прочности на сжатие

Fig. 2. Dependence of crushed-stone concrete price on compression strength

Как показал корреляционный анализ этих линеаризованных выражений, для них коэффициенты корреляции составили около –0,94, что для подобных приближенных расчетов достаточно хороший результат. Поэтому принимаем (5) при $a_3 \approx 0{,}05$ и $b_3 \approx 27{,}7$. Для сравнения, в (4) получено $a_2 \approx 0{,}048$; $b_2 \approx 25{,}9$ и $n = -0{,}985$.

В Российской Федерации наблюдается еще более резкая зависимость удельной цены бетона от прочности на сжатие. Так, для бетона на гранитном щебне при увеличении прочности со 100 кгс/см^2 (М100) до 1000 кгс/см^2 (М1000) цена повышается в 6500/3070 = 2,12 раза [6]. Стоимость бетона на гравийном щебне при увеличении прочности со 100 кгс/см^2 (М100) до 400 кгс/см^2 (М400) повышается в 3600/2810 = = 1,28 раза. В цене бетона существенная роль принадлежит цементу. При отсутствии цемента или другого связующего в бетоне прочность на сжатие стремится к нулю.

Приведенные расчеты показывают, что в случае отсутствия каких-либо условий на объем при необходимости использования прочности бетона на сжатие наиболее экономически выгодными являются высокопрочные бетоны. Кроме цены, при использовании высокопрочных бетонов уменьшаются расходы на транспорт и монтаж. Поэтому рекомендации по применению бетона различных марок следует пересмотреть.

Выгода использования высокопрочного бетона видна из сравнения удельной цены бетонов марок ПЗ М150 (класс С10/12,5) и ПЗ М450 (класс С28/35) на щебне (рис. 2), которая составляет 0,23/0,11 ≈ 2 раза при трехкратном повышении прочности.

Необходимо также отметить долговечность и трещиностойкость высокопрочных бетонов по сравнению с низкопрочными [7, с. 148, 169], что делает их применение еще более привлекательным.

Значительный интерес представляет возможное ресурсосбережение при сочетании бетона и стали, которое будет рассмотрено на примере трубобетонного эффекта.

Впервые трубобетонный эффект, характеризуемый превышением допустимой нагрузки на металлическую трубу, заполненную бетоном, суммарной нагрузки на незаполненную трубу и бетонное ядро раздельно, обнаружен J. S. Sewell [8]. С той поры проведено много исследований, часть из которых описана в монографии Л. К. Лукши [9].

Определенная сложность правильного расчета трубобетонных конструкций заключается в необходимости учета нагружения оболочки сжатием и внутренним давлением твердой дилатансирующей среды (бетона), способной к сопротивлению и в осевом направлении. При этом в технической литературе недостаточно полно описан учет аналогичного воздействия оболочки на бетон, что дало возможность получить патент [10] на способ повышения прочности трубобетонной конструкции [11]. В этом способе используется учет возможного различия в деформации стальной оболочки и бетонного наполнителя, характеризуемых различными (примерно на порядок) величинами модулей упругости и деформаций при одинаковом воздействии сжимающих нагрузок.

При осевом нагружении трубобетонной конструкции для бетонного сердечника в трубе создают возможность поперечной деформации без существенного обжатия до величины нагрузки, соответствующей прочности бетона при одноосном сжатии, а при этом воз-

можные продольные деформации бетонного стержня и стальной трубы обеспечивают отдельно до расчетного предела их прочности с учетом трубобетонного эффекта и необходимого различия в деформациях в соответствии с выражением

$$\Delta l = l\left[\frac{1}{E_б}\left(\sigma_{1.о} + \frac{1-\mu}{\mu}\frac{2\delta}{d_{вн}}\sigma_т\right) - \frac{\sigma_т}{E_т}\right], \quad (6)$$

где l – продольная длина трубобетонной конструкции, см; $E_б$, $E_т$ – модуль упругости бетона и стали трубы, МПа; $\sigma_{1.о}$ – предел прочности бетона на одноосное сжатие, МПа; $\sigma_т$ – предел прочности стали трубы, МПа; μ – коэффициент Пуассона; δ – толщина стенки трубы, см; $d_{вн}$ – внутренний диаметр трубы, см.

Продольный деформационный промежуток создают за счет использования легкодеформируемого специального слоя на внутренней поверхности трубы, обеспечивающего возможность некоторого перемещения бетонного сердечника вдоль трубы при восприятии нагрузки до момента начала продольного нагружения трубы сжимающей нагрузкой.

С целью обеспечения раздельного учета возможных продольных деформаций бетонного сердечника и стальной трубы продольную сжимающую нагрузку на трубобетонную конструкцию начинают с нагружения бетонного столба и после достижения его усадки на величину продольного деформационного промежутка продольную сжимающую нагрузку распространяют и на стальную трубу.

Способ решения технической задачи поясняет принципиальная схема работы трубобетонной конструкции, представленная на рис. 3.

Столб бетона, представленный в виде сердечника 1 цилиндрической формы, через боковую податливую прокладку 2 взаимодействует с внутренней поверхностью заполняемой им стальной трубы 3. Конструкция содержит также торцевую податливую прокладку 4 и верхнюю торцевую накладку 5 для передачи вертикальной нагрузки (показана стрелкой на рис. 3) на трубобетонную конструкцию, а также твердое основание 6. Как известно [12, с. 99–100], разрушение образца бетона при продольном сжатии в случае отсутствия влияния торцов происходит путем трещинообразования параллельно направлению сжимающих сил.

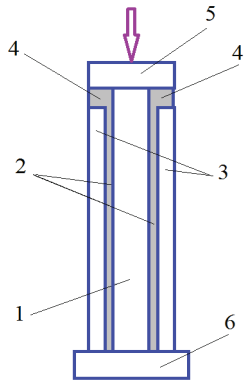

Рис. 3. Схема работы трубобетонного устройства

Fig. 3. Operational scheme of tube confined concrete device

Как следует из обобщенного закона Гука [12, с. 173–175], при объемном напряженном состоянии материала и равенстве боковых напряжений ($\sigma_{2бок} = \sigma_3$) осевое напряжение при локализации (практическом отсутствии) боковых деформаций ($\varepsilon_2 = \varepsilon_3 \approx 0$, что характерно для трубобетона) составляет

$$\sigma_1 = \frac{1-\mu}{\mu}\sigma_{2,3бок}, \quad (7)$$

где μ – коэффициент Пуассона (для бетона $\mu_б$ = = 0,15–0,20 [9, с. 15], для стали трубы $\mu_т$ = = 0,33); $\sigma_{2,3бок}$ – боковые напряжения, воспринимаемые стальной трубой.

Тогда при $\mu_б = 0{,}15\sigma_1 = 5{,}7\sigma_{2,3бок}$, а при $\mu_б$ = $= 0{,}20\sigma_1 = 4\sigma_{2,3}$, т. е. при полном силовом взаимодействии бетона с оболочкой прочность бетона на действие осевой нагрузки, по крайней мере в области упругой реакции стальной трубы, увеличивается от 4 до 5,7 раза в зависимости от свойств бетона.

Как следует из результатов опытов проф. А. А. Долженко, приведенных в [9, табл. 1.1], и расчетов автора (табл. 1), при совместной нагрузке бетонного заполнителя и трубы повышение прочности бетона за счет трубобетонного эффекта составляет $\frac{\Delta N_б^э}{N_{б.о}}$ = 2,08–3,23 раза (табл. 1, колонка 9), что значительно меньше теоретически возможных $\frac{\Delta N_б}{N_{б.о}}$ = 2,08–6,27 (колонка 10) и 1 + $\frac{\Delta N_б^р}{N_{б.о}}$ = 3,08–7,27 раза (колонка 11).

Таблица 1

№	d, см	δ, см	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_б$, МПа	$N_т$, кН	$N_{б.о}$, кН	$N_о$, кН	$N^э_{т.б}$, кН	$\frac{\Delta N^э_б}{N_{б.о}}$	$\frac{\Delta N^р_б}{N_{б.о}}$	$1+\frac{\Delta N^р_б}{N_{б.о}}$	$\sigma^р_б$, МПа	$\frac{N^р_{т.б}}{N^э_{т.б}}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	25,4	0,86	304	16,1	2150	820	2970	4800	3,23	4,70	5,70	92	1,5
2	25,6	0,92	345	16,1	2650	830	3480	4900	2,70	6,27	7,27	117	1,78
3	25,5	0,84	304	16,1	2100	820	2920	4740	3,22	4,90	5,90	95	1,48
4	25,4	0,84	304	16,1	2100	820	2920	4740	3,22	4,90	5,90	95	1,5
5	20,6	0,25	340	15,1	560	500	1060	1600	2,08	2,08	3,08	46,5	1,32
6	20,3	0,33	330	15,1	710	490	1200	1800	2,22	2,82	3,82	57,5	1,43
7	30,5	0,36	334	15,1	1170	1100	2270	3700	2,31	2,24	3,24	49	1,25
8	30,5	0,56	334	15,1	1820	1100	2920	5000	2,90	3,24	4,24	64	1,31

Примечания: d – диаметр трубы; δ – толщина стенки трубы; $\sigma_т$ – предел прочности материала трубы; $\sigma_б$ – то же бетона при одноосном сжатии; $N_т$ – предельная нагрузка на трубу; $N_{б.о}$ – то же для бетона при одноосном сжатии; $N_о$ – то же на трубу и бетон без учета трубобетонного эффекта; $N^э_{т.б}$ – то же, полученное экспериментально с учетом трубобетонного эффекта при одновременном нагружении.

Как видно из приведенных в табл. 1 результатов расчетов, при $\mu_б$ = 0,20 для бетона теоретически возможное использование общего трубобетонного эффекта значительно (на 25–73 %, колонка 13) превышает достигнутое в эксперименте. При этом необходимо отметить, что первоначальное использование прочности бетона, почти свободно деформирующегося в поперечном направлении внутри трубы, увеличивает общий трубобетонный эффект при $\sigma_б$ = = 15,1–16,1 МПа на 10–30 % в зависимости от соотношения начальной прочности трубы (колонка 5) и бетона (колонка 6). О принципиальной правильности представленных в табл. 1 результатов расчетов свидетельствует тот факт, что теоретические расчеты трубобетонного эффекта при одновременном восприятии нагрузки трубой и бетоном и небольшом различии в их первоначальной прочности (табл. 1, пересечения строк 5 и 7 с колонками 9 и 10) примерно совпадают.

Технический результат достигается тем, что при осевом нагружении трубобетонной конструкции для бетонного сердечника 1 в трубе создают возможность поперечной деформации без существенного обжатия до величины нагрузки, соответствующей прочности бетона при одноосном сжатии (рис. 3). Практически это достигается посредством того, что при заполнении трубы бетоном и образовании бетонного сердечника между ним и внутренней поверхностью стальной трубы 3 создается продольный деформационный промежуток, достаточный для свободной боковой деформации бетонного сердечника при его первоначальном нагружении до предела прочности при одноосном сжатии. Такой промежуток может быть создан за счет использования легкодеформируемого специального слоя в виде боковой податливой прокладки 2 на внутренней поверхности трубы. Величина первоначальной деформации этого слоя в радиальном направлении трубы должна соответствовать величине боковой деформации бетонного сердечника при его первоначальном нагружении до предела прочности при одноосном сжатии. Одновременно этот слой должен обеспечивать возможность некоторого перемещения столба бетона вдоль трубы при восприятии нагрузки до момента начала продольного нагружения трубы сжимающей нагрузкой. В качестве материала для создания прокладки для такого слоя могут быть использованы, например, многослойные и высокопористые пластмассы.

Кроме возможности поперечного расширения бетона в трубе, необходимо создать условия последовательного восприятия сжимающей нагрузки сначала бетоном, а в конце процесса нагружения – и стальной трубой в соответствии с усадочными характеристиками (модулями упругости) бетона ($E_б$ = (0,146–0,232) · 10^5 МПа в зависимости от предела прочности [12, с. 662, приложение 9]) и стали (E = (2,0–2,1) · 10^5 МПа), которые отличаются примерно на порядок.

Ввиду большой разницы усадочных и прочностных характеристик бетона и стали, их со-

вместная работа на сжатие должна начинаться в условиях, когда полное использование прочностных характеристик согласуется в пространстве и времени. Поэтому начальное разделение воздействия нагрузки на бетонный сердечник и стальную трубу заключается в разделении пространственно-временных характеристик нагружения бетона 1 и трубы 3 (рис. 3) и производится за счет конструктивных элементов, таких как торцевая податливая прокладка 4, верхняя торцевая прокладка 5. При этом вся трубобетонная конструкция упирается в твердое основание 6.

Для такой реализации способа можно использовать приведенный выше вариант обобщенного закона Гука при условном обозначении $\sigma_{2,3} = \sigma_2$. Тогда порядок расчета параметров работы трубобетонной конструкции для полного использования трубобетонного эффекта можно описать следующим образом:

1) боковая деформация бетонного цилиндра и зазор между ним и внутренней поверхностью трубы

$$\Delta r = \frac{\mu}{1-\mu} r_{б.о} \frac{\sigma_{1.о}}{E_б}, \qquad (8)$$

где $r_{б.о}$ – начальный радиус бетонного цилиндра, см; $\sigma_{1.о}$ – прочность бетона при одноосном сжатии, МПа; $E_б$ – модуль упругости Юнга для бетона, МПа;

2) предельная реакция внутренней поверхности трубы на боковое расширение бетона

$$\sigma_2 = \frac{2\delta}{d_{вн}} \sigma_т, \qquad (9)$$

где $\sigma_т$ – предел упругости стали, МПа;

3) предельно допустимое продольное напряжение бетона

$$\sigma_{1.б} = \sigma_{1.о} + \frac{1-\mu}{\mu} \frac{2\delta}{d_{вн}} \sigma_т; \qquad (10)$$

4) полная продольная деформация бетонного цилиндра

$$\Delta l_б = \frac{1}{E_б}\left(\sigma_{1.о} + \frac{1-\mu}{\mu} \frac{2\delta}{d_{вн}} \sigma_т\right); \qquad (11)$$

5) полная продольная деформация стальной трубы с учетом $\Delta l << l$, когда различие в длинах бетонного цилиндра и стальной трубы можно не учитывать ($l_б \approx l_т \approx l$)

$$\Delta l_т = \frac{\sigma_т}{E_т} l; \qquad (12)$$

6) превышение величины усадки бетонного цилиндра над усадкой стальной трубы

$$\Delta l = \Delta l_б - \Delta l_т = l\left[\frac{1}{E_б}\left(\sigma_{1.о} + \frac{1-\mu}{\mu} \frac{2\delta}{d_{вн}} \sigma_т\right) - \frac{\sigma_т}{E_т}\right] =$$

$$= \sigma_{1.о} \frac{1}{E_б}\left[1 + K_1\left(\frac{1-\mu}{\mu} \frac{2\delta}{d_{вн}} - \frac{1}{K_2}\right)\right], \qquad (13)$$

где $K_1 = \sigma_т/\sigma_{1.о}$; $K_2 = E_т/E_б$.

Следовательно, возможные продольные деформации бетонного сердечника и стальной трубы обеспечиваются отдельно до расчетного предела их прочности с учетом трубобетонного эффекта и необходимого различия в деформациях посредством того, что продольную сжимающую нагрузку на трубобетонную конструкцию начинают с нагружения бетонного столба, и только после достижения его усадки на Δl продольную сжимающую нагрузку следует распространить и на стальную трубу.

Как видно из приведенной методики расчета, величина Δl зависит от многих параметров, из которых самый влиятельный коэффициент Пуассона μ. При анализе коэффициентов эффективности трубобетона и Пуассона в [1, с. 32–33] приведены значения $\mu = 0{,}10$ и 0,15–0,50 (по О. Я. Бергу), а также сказано, что μ бетона изменяется нелинейно в зависимости от действующих напряжений. По-видимому, значения $E_б$ также зависят от действующих напряжений, что подтверждается данными [12, с. 662, приложение 9] для бетона при $\sigma_{1.о}$ = 10, 15 и 20 МПа, характеризуемого $E_б$, равным $(1{,}46–1{,}96) \cdot 10^4$, $(1{,}64–2{,}14) \cdot 10^4$ и $(1{,}82–2{,}32) \cdot 10^4$ МПа. Здесь при увеличении $\sigma_{1.о}$ в два раза предельные значения $E_б$ увеличились на 18 %.

Следует отметить, что в соответствии с [12, с. 662] величины коэффициентов Пуассона составляют: μ = 0,24–0,28 – для углеродистых сталей; μ = 0,25–0,30 – для легированных

сталей. Тогда при $\mu = 0{,}33$ $\sigma_1 \approx 2\sigma_{2.3}$, а при $\mu = 0{,}25$ $\sigma_1 \approx 3\sigma_{2.3}$, что в 1,5 раза больше. Для бетона при $\mu = 0{,}2$ $\sigma_{1.б} \approx 4\sigma_{2.3б}$, а при $\mu = 0{,}15$ $\sigma_{1.б} \approx 5{,}7\sigma_{2.3б}$, что примерно в 1,4 раза больше.

Как указывается в [9, с. 14], логика подсказывает, что очень существенно влияние прочности стали на прочность трубобетонного элемента. Однако относительно прочности бетона известны разные мнения [13–15]. Так, формулы В. Ф. Маренина [13] основываются на предположении, что при сжатии труба не сопротивляется в осевом направлении, а несущая способность трубобетонного элемента определяется прочностью бетонного ядра. По мнению А. А. Долженко [14], в трубобетоне эффективнее применение низкомарочных бетонов. В [15] отмечается, что более эффективно использование высокомарочных бетонов и сталей низкой прочности. Что касается относительной толщины стенки δ/d, то здесь мнение едино [9, с. 14]: чем тоньше стенка трубы, тем эффективнее работа трубобетона. Вообще, следует отметить, что за последние примерно 100 лет проблеме прочности трубобетонных конструкций посвящено много работ, часть из которых (80) приведена в списке литературы монографии Л. К. Лукши [9].

Однако выдача евразийского патента автору данной статьи [10, 11] свидетельствует о том, что многие свойства трубобетонных конструкций еще изучены недостаточно, а преимущества применения различных сортов стали и бетона при использовании трубобетонных конструкций зависят от конкретных условий и экономической эффективности.

В качестве примера можно привести расчет величины превышения усадки бетонного цилиндра над стальной трубой. Воспользовавшись данными табл. 1, принимаем для самой тонкостенной трубы: $d_{вн} = 20{,}6$ см; $\delta = 0{,}25$ см; $\sigma_{1.о} = 15{,}1$ МПа; $E_б = 2 \cdot 10^4$ МПа [12, с. 662]; $\mu = 0{,}17$ [12, с. 662]; $\sigma_т = 330$ МПа; $E_т = 2 \cdot 10^5$ МПа; $l = 8$ м. Тогда

$$\Delta l = 800 \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot 10^4} \cdot \left(15{,}1 + \frac{1 - 0{,}17}{0{,}17} \cdot \frac{2 \cdot 0{,}25}{20{,}6} \cdot 330 \right) - \right.$$
$$\left. - \frac{330}{2 \cdot 10^5} \right] = 0{,}85 \text{ (см)}.$$

Таким образом, деформационный промежуток между воздействием нагрузки на бетонный стержень и одновременно на бетонный стержень и трубу составляет 8,5 мм.

Начальный боковой зазор между бетонным стержнем и внутренней поверхностью трубы

$$\Delta r = \frac{0{,}17}{1 - 0{,}17} \cdot 10{,}3 \cdot \frac{15{,}1}{2 \cdot 10^4} =$$
$$= 1{,}32 \cdot 10^{-3} \text{ см} = 0{,}013 \text{ мм},$$

что достаточно только для тонкого пленочного покрытия, при этом $\sigma_{2,3} = 8$ МПа.

Элементарный расчет возможных нагрузок для данной трубобетонной конструкции дает с учетом использования предлагаемого способа $N^{р}_{т.б} = 2320$ кН, что почти в 1,45 раза больше эксперимента (экспериментальная величина $N^{э}_{т.б} = 1600$ кН).

В случае применения существующей технологии одновременной нагрузки бетона и трубы (без использования $\sigma_{1.о}$) $N^{р}_{т.б} = 2320 - 520 = 1800$ кН, что только на 12 % больше полученного в эксперименте.

Для самой толстостенной трубы: $d_{вн} = 25{,}6$ см; $\delta = 0{,}92$ см; $\sigma_{1.о} = 16{,}1$ МПа; $E_б = 2 \cdot 10^4$ МПа [12, с. 662]; $\mu = 0{,}17$ [12, с. 662]; $\sigma_т = 345$ МПа; $E_т = 2 \cdot 10^5$ МПа; $l = 8$ м. Тогда

$$\Delta l = 800 \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot 10^4} \cdot \left(16{,}1 + \frac{1 - 0{,}17}{0{,}17} \cdot \frac{2 \cdot 0{,}92}{25{,}6} \cdot 345 \right) - \right.$$
$$\left. - \frac{345}{2 \cdot 10^5} \right] = 5{,}05 \text{ (см)}.$$

Таким образом, деформационный промежуток между воздействием нагрузки на бетонный стержень и одновременно на бетонный стержень и трубу составляет 50,5 мм, что почти в шесть раз больше, чем в предыдущем случае с тонкостенной трубой.

Начальный боковой зазор между бетонным стержнем и внутренней поверхностью трубы

$$\Delta r = \frac{0{,}17}{1 - 0{,}17} \cdot 12{,}8 \cdot \frac{16{,}1}{2 \cdot 10^4} =$$
$$= 1{,}89 \cdot 10^{-3} \text{ см} = 0{,}019 \text{ (мм)},$$

что примерно в 1,5 раза больше по сравнению с предыдущим случаем, при этом $\sigma_{2,3}$ = 24,8 МПа.

Элементарный расчет возможных нагрузок для толстостенной трубобетонной конструкции дает с учетом использования предлагаемого изобретения $N^{р}_{т.б}$ = 9400 кН, что почти в 1,9 раза больше эксперимента (экспериментальная величина $N^{э}_{т.б}$ = 4900 кН).

В случае применения существующей технологии одновременной нагрузки бетона и трубы (без использования $\sigma_{1.о}$), но с созданием возможности раздельной продольной деформации бетона и стали возможная расчетная нагрузка составляет $N^{э}_{т.б.1}$ = 8580 кН, что в 1,75 раза превышает эксперимент.

Таким образом, в тонкостенных трубобетонных конструкциях при одновременном воздействии нагрузки на бетон и трубу трубобетонный эффект используется почти полностью, а в толстостенных трубах – только частично.

Относительно недавно была успешно защищена диссертация по трубобетону [16], где проанализирован существенный недостаток сталетрубобетонных элементов, обусловленный расслоением композитного сечения по границе двух материалов. Эффект расслоения может наблюдаться еще до нагружения элемента вследствие развития усадочных деформаций в бетоне, а также на стадии действия эксплуатационных нагрузок по причине положительной разницы между коэффициентами Пуассона стали и бетона. Это подтверждает полезность учета различий во всех деформациях бетона и оболочки при различиях в их деформационных и прочностных свойствах.

Для оценки возможностей ресурсосбережения при использовании трубобетонных конструкций в строительстве необходимо сравнить удельные стоимости бетона и стальных труб, цена которых около 600 у. е./т [17]. При массе 1 м^3 стали около 7,8 т и расчетной (упругой) прочности на сжатие $\sigma_{ст}$ ≈ 1600 кгс/см^2 [12] удельная стоимость составляет примерно $Ц_{у.ст}$ ≈ ≈ 2,9 · 10^{-4} у. е./(кгс/см^2).

При удельных ценах разных марок бетона от 0,10 до 0,25 у. е./(кгс/см^2) (рис. 2) удельная стоимость стальной трубы примерно на порядок больше, что обеспечивает относительную дешевизну бетона по сравнению со стальной трубой при любых разумных колебаниях цен на рынке.

При использовании предела текучести стали на растяжение в качестве расчетной величины [16, табл. 1 и рис. 6] удельная цена может уменьшиться в 1,5–2,5 раза, но все равно будет больше удельной цены на бетон.

Поэтому при использовании трубобетона следует применять прочные бетоны и стальные трубы с минимальной толщиной стенки, выдерживающей внутренний распор бетона.

ВЫВОДЫ

1. Появление новых материалов, изделий и технологий требует оценки условий их безопасного, эффективного и ресурсосберегающего применения в строительной отрасли.
2. Предложены новые единицы измерения ресурсоемкости прочностных и других механических и физических свойств материалов и изделий.
3. При использовании бетона в несущих конструкциях зданий и сооружений необходимо оценивать ресурсоемкость его различных марок (классов).
4. В настоящее время при отсутствии особых условий для ресурсосбережения в несущих бетонных и железобетонных конструкциях целесообразно использовать высокопрочные бетоны.
5. В обычных условиях эксплуатации для трубобетонных конструкций следует использовать высокопрочный бетон и трубы с минимальной толщиной стенок, выдерживающих боковое давление деформирующегося бетона сердечника.
6. Для компенсации различия в деформационных характеристиках бетона и материала трубы необходимо использовать демпфирующие устройства, обеспечивающие их предельно допустимые нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Большой строительный терминологический словарь-справочник: официальные и неофициальные термины и определения в строительстве, архитектуре, градостроительстве и строительной технике / В. Д. Наумов [и др.]; под ред. Ю. В. Феофилова. Минск: Минсктипроект, 2008. 811 с.

2. Цементы. Общие технические условия: ГОСТ 30515–2013. Введ. 01.08.2016. Минск: Госстандарт, 2016. 43 с.
3. Цементы общестроительные. Технические условия: ГОСТ 31108–2003. Введ. 01.07.2005. Минск: Минстройархитектуры, 2005. 14 с.
4. Цены на бетон в Минске [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://betonminsk.by/prodazha-betona/cena. Дата доступа: 13.12.2016.
5. Марки и характеристики бетона [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.betontrans.by/produkcia/marki-i-harakteristiki-betona. Дата доступа: 13.12.2016.
6. Стоимость бетона за куб [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://atlantbeton.ru/price. Дата доступа: 12.12.2016.
7. Леонович, С. Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения / С. Н. Леонович. Минск: Тыдзень, 1999. 263 с.
8. Sewell, J. S. Columns for Buildings / J. S. Sewell // Engineering News. 1902. Vol. 48, No 17. P. 10–17.
9. Лукша, Л. К. Прочность трубобетона / Л. К. Лукша. Минск: Вышэйш. шк., 1977. 95 с.
10. Способ повышения прочности трубобетонной конструкции: Евразийский пат. № 017610 / С. Н. Осипов. Опубл. 30.01.2013.
11. Осипов, С. Н. Повышение прочности трубобетонной конструкции за счет полного использования «эффекта обоймы» / С. Н. Осипов // Тандем: цемент & строительство. 2015. Т. 11, № 3. С. 48–50.
12. Писаренко, Г. С. Сопротивление материалов: учеб. для машиностроит. специальностей втузов / под ред. Г. С. Писаренко. Киев: Вища шк., 1973. 671 с.
13. Маренин, В. Ф. Исследование прочности стальных труб, заполненных бетоном при осевом сжатии / В. Ф. Маренин. М.: Моск. ордена Трудового Красного Знамени инж.-строит. ин-т имени В. В. Куйбышева, 1959. 15 с.
14. Долженко, А. А. Исследование сопротивления трубобетона осевому сжатию / А. А. Долженко // Сб. тр. Воронежского ИСИ. Вып. 1: Теория сооружений и конструкций. 1964. № 10. С. 31–40.
15. Ситников, Ю. В. Исследование железобетонных элементов со стальной обоймой для несущих конструкций промышленных зданий / Ю. В. Ситников. Воронеж: Воронежский инж.-строит. ин-т, 1970. 32 с.
16. Бондаренко, В. М. Сопротивление осевому сжатию сталетрубобетонных элементов круглого сечения с ядром из напрягающего бетона / В. М. Бондаренко. Минск: Белор. нац. техн. ун-т, 2010. 19 с.
17. Труба круглая [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.stalnoy.by/truba-kruglaja. Дата доступа: 13.12.2016.

Поступила 12.01.2017
Подписана в печать 15.03.2017
Опубликована онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Naumov V. D., Alyavdina T. I., Bedula N. V., Zholud' A. S., Zholud' T. V., Poslova T. G., Feofilova Yu. Yu., Frolova T. S. (compilers), Feofilov Yu. V. (ed.) (2008) *Large Dictionary Reference Book of Construction Terminology: Official and Unofficial Terms and Definitions in Construction, Architecture, Urban Planning and Construction Machinery*. Minsk: Minsktipproyekt Publ. 811 (in Russian).
2. State Standard 30515–2013. *Cement. General Technical Specifications*. Minsk, State Standard Publishing House, 2016. 43 (in Russian).
3. State Standard 31108–2003. *Standard Cement. Technical Specifications*. Minsk, Minstroyarkhitektura Publishing House, 2005. 14 (1n Russian).
4. *Concrete Cost in Minsk.* Available at: http://betonminsk.by/prodazha-betona/cena. (Date Access 13 December 2016) (in Russian).
5. *Concrete Grades and Characteristics*. Available at: http: // www.betontrans.by / produkcia/marki-i-harakteristiki-betona. (Date Access 13 December 2016) (in Russian).
6. *Concrete Cost Per Cube.* Available at: http://atlantbeton.ru/price. (Date Access 12 December 2016) (in Russian).
7. Leonovich S. N. (1999) *Crack Resistance and Longevity of Concrete and Reinforced Concrete Elements in Terms of Force and Energy Criteria of Fracture Mechanics*. Minsk, Board of “Tydzen”. 263 (in Rusian).
8. Sewell J. S. (1902) Columns for Buildings. *Engineering News*, 48 (17), 10–17.
9. Louksha L. K. (1977) *Strength of Tube Confined Concrete*. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ. 95 (in Russian).
10. Osipov S. N. (2013) *Method for Improvement of Strength in Tube Confined Concrete Structure.* Eurasian Patent No 017610 (in Russian).
11. Osipov S. N. (2015) Improvement of Strength in Tube Confined Concrete Structure Due to Complete Usage of Casing Effect. *Tandem: Tsement i Stroitelstvo = Tandem: Cement & Construction,* 11 (3), 48–50 (in Russian).
12. Pisarenko G. S. (ed.) (1973) *Material Resistance*. Kiev, Visha Shkola Publ. 671 (in Russian).
13. Marenin V. F. (1959) *Research on Strength of Steel Pipes Filled with Concrete while Using Centric Compression.* Moscow, Moscow Civil Engineering Institute of the Order of the Red Banner of Labour named after V. V. Kuibyshev. 15 (in Russian).
14. Dolzhenko A. A. (1964) Research on Resistance of Tube Confined Concrete to Centric Compression. *Sbornik Trudov Voronezhskogo Inzhenerno-Stroitel'nogo Instituta, Vyp. 1: Teoriya Sooruzhenii i Konstruktsii* [Collected Papers of Voronezh Construction Engineering Institute. Issue 1: Theory of Buildings and Structures], (10), 31–40 (in Russian).
15. Sitnikov Yu. V. (1970) *Research on Reinforced Concrete Elements with Steel Casing for Bearing Structures of Industrial Buildings.* Voronezh, Voronezh Construction Engineering Institute. 32 (in Russian).
16. Bondarenko V. M. (2010) *Resistance of Steel Tube Confined Concrete Elements of Round Section with Self-Stressing Concrete Core to Centric Compression*. Minsk, Belarusian National Technical University. 19 (in Russian).
17. *Circular Pipe*. Available at: http://www.stalnoy.by/truba-kruglaja. (Date Access 13 December 2016) (in Russian).

Received: 12.01.2017
Accepted: 15.03.2017
Published online: 30.03.2018