

DOI: 10.34031/article\_5da44d75248a17.80826244

Наумов А.Е., Шевченко А.В., \*Долженко А.В., Бодяков С.Н., Гвасалия Х.Д.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46

\*E-mail: dolzhenko.av@bstu.ru, da7182@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КОНТАКТА ПЛАСТИКОВОЙ ТРУБЫ И БЕТОНА ПРИ РАСЧЕТЕ ПЛАСТИКОТРУБОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Аннотация.** Представлены численные исследования напряженно-деформированного состояния центрально сжатых коротких пластикотрубобетонных (ПТБ) цилиндрических стоек, экспериментально получено и проанализировано влияние касательных сил трения на границе слоев бетонного ядра и пластиковой оболочки на напряженно-деформированное состояние ПТБ стойки в предположении упругой работы материалов ядра и оболочки. Необходимость проведения данных исследований связана с недостатком теоретических и численных исследований влияния касательных сил трения на напряженно-деформированное состояние такого вида конструктивных элементов, в том числе и классического решения со стальной оболочкой. В связи с этим, математическое моделирование и создание инженерных методик расчета ПТБ на основе изучения действительной совместной работы бетонного ядра и цилиндрической пластиковой оболочки имеет существенный научный потенциал.

Выполненные расчеты продемонстрировали справедливость с инженерной точностью использования математической модели короткой ПТБ стойки для проведения инженерных расчетов и структурного анализа конструкции. Установлено, что использование аналитической модели позволяет исследовать влияние вариации физико-механических свойств материалов ядра и оболочки ПТБ на параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции и осуществлять рациональное проектирование ПТБ элементов в составе конструкций гражданских и промышленных зданий с привязкой к фактически используемым широко представленным на рынке материалам.

**Ключевые слова:** пластикотрубобетон, труботетон, трехосное сжатие, касательные силы, трение, прочностные расчеты строительных конструкций.

Труботетонные колонны с оболочкой из стальных труб широко используются в строительстве из-за своей высокой прочности, устойчивости, пластичности и огнестойкости [1]. Такие колонны имеют более высокую чем у обычных железобетонных колонн жесткость. Существующие методики их расчета основываются на эмпирических данных, однако требуют учета ненормируемых, определяемых экспериментально, параметров, существенно усложняющих применение этих методик реальном проектировании [2–6].

Ранее авторами было предложено использование в качестве оболочки труботетонных колонн пластиковой трубы и обоснована возможность её использования в качестве оболочки центрально сжатых труботетонных элементов при малых сжимающих нагрузках с сохранением основных преимуществ классического труботетона [7, 8]. Однако, полученные аналитические зависимости и результаты численного моделирования пластикотрубобетонной стойки нуждаются в экспериментальном подтверждении [9].

В текущей работе авторы рассматривают влияние касательных сил трения на границе слоев бетонного ядра и пластиковой оболочки на напряженно-деформированное состояние ПТБ стойки в предположении упругой работы материалов ядра и оболочки с учетом экспериментально

полученных данных по влиянию сил трения на напряженно-деформированное состояние ПТБ стойки.

Рассмотрим работу сил трения при осевом сжатии ПТБ стойки. Вырежем круговой сегмент  $d\theta$ . За счет разности модулей деформации, в продольном направлении, происходит передача сдвигающих усилий с пластиковой оболочки на бетонное ядро. В случае передачи через силы трения сдвигающие усилия на контакте вызовут сдвигающие напряжения в оболочке и ядре. Рассмотрим всю конструкцию, как составной стержень. Участок между осями, будет играть роль шва, обладающего некоторой податливостью (рис. 1).

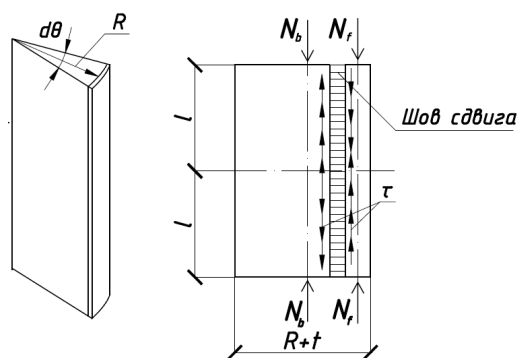


Рис. 1. К определению сил трения в пластикотрубобетоне

Для оценки взаимодействия на контакте пластиковой оболочки и бетонного ядра рассмотрим испытанный образец как составной стержень, передающий усилия с одного элемента на другой [8, 9].

Решение для суммарных сдвигающих усилий во внецентренно сжатом составном стержне, согласно [10, 11] имеет вид:

$$T = C_1 sh(\lambda x) + C_2 ch(\lambda x) - \frac{A}{\gamma},$$

$$\sum EJ = E_b \int_0^{2\pi} \frac{1}{36} R^4 d\theta + E_f \int_0^{2\pi} \frac{5}{36} [(R+t)^4 - R^4] d\theta = E_b \frac{\pi}{18} R^4 + E_f \frac{5\pi}{18} [(R+t)^4 - R^4]$$

$A_b$  – площадь бетона;  $A_f$  – площадь оболочки;  $R$  – внутренний радиус цилиндрической оболочки;  $t$  – толщина оболочки;  $E_b$  – модуль деформации бетона;  $E_f$  – модуль деформации оболочки;  $s$  – расстояние между осями инерции сектора ядра батона и оболочки;  $N_f$  – усилие в оболочке;  $\xi$  – коэффициент жесткости шва.

Коэффициент жесткости шва найдем, интегрируя характеристику жесткости шва по контакту между бетоном и материалом оболочки:

$$\xi = \int_0^{2\pi} \left( \frac{1}{\frac{2}{3}G_f} + \frac{1}{\frac{2}{3}G_b} \right)^{-1} R d\theta = \left( 2\pi R \left( \frac{2}{tG_f} + \frac{3}{RG_b} \right)^{-1} \right),$$

$$G_b = \frac{E_b}{2(1+\mu_b)},$$

$$G_f = \frac{E_f}{2(1+\mu_f)},$$

здесь  $G_b$  – модуль сдвига бетона;  $G_f$  – модуль сдвига пластика;  $\mu_b$  – коэффициент Пуассона бетона;  $\mu_f$  – коэффициент Пуассона материала оболочки.

Усилия сдвига передаются от оболочки на бетонное ядро по известной зависимости [4]:

$$T = \frac{1}{\gamma sh(\lambda L)} \left[ \frac{P}{E_b A_b} sh(\lambda(L-x)) - \frac{P}{E_b A_b} sh(\lambda L) - \frac{P}{E_f A_f} sh(\lambda x) \right], \quad (1)$$

а сдвигающие напряжения будут равны:

$$\tau = \frac{\lambda}{\gamma sh(\lambda L)} \left[ -\frac{P}{E_b A_b} ch(\lambda(L-x)) - \frac{P}{E_f A_f} ch(\lambda x) \right]. \quad (2)$$

При решении этой задачи необходимо учесть следующие особенности: физическую нелинейность бетона и пластика [12, 13], учет обжатия бетонного ядра пластиковой оболочкой, а также напряженно-деформированное состояние шва.

Для вычисления сил трения, будем считать их пропорциональными прижимающим силам, а именно давлению пластика на бетон –  $p$ . Трение противодействует сдвигу с силой:

$$T_{тр} = pA\phi l, \quad (3)$$

здесь

$$\Delta = -\frac{N_f}{E_f A_f} + \frac{N_b}{E_b A_b} = -\frac{\sigma_{f2}}{E_f} + \frac{\sigma_b}{E_b},$$

$$\gamma = \frac{1}{E_f A_f} + \frac{1}{E_b A_b} + \frac{c^2}{\sum EJ},$$

$$\lambda = \sqrt{\xi \gamma},$$

где  $\phi$  – коэффициент трения пластика по бетону,  $p$  – давление оболочки на бетонное ядро;  $A$  – площадь;  $l$  – длина участка.

С целью уточнения коэффициента  $\phi$  авторами были проведены экспериментальные исследования, моделирующие смещение бетона относительно пластика (рис. 2 и 3).

По результатам испытания сдвиг элементов ПТБ стойки на большинстве испытанных образцов произошел при нагрузках 600–700 кг (рис. 4).



Рис. 2. Экспериментальные исследования

Предельную прочность сцепления пластика с бетоном (сопротивление сдвигу)  $R_{b,sh}$ , примем на основе псевдозернистой модели бетона, описанной в [14].

При значении угла наклона площадок сдвига  $\alpha = 0$  и наличия на них нормального давления  $p$  предельное сопротивление сдвигу равно

$$R_{b,sh} = R_{bt,n} \frac{\phi}{2} + p\phi,$$

где  $R_{bt,n}$  – нормативное сопротивление бетона осевому растяжению.



Рис. 3. Деформация образца в процессе испытания нагрузкой

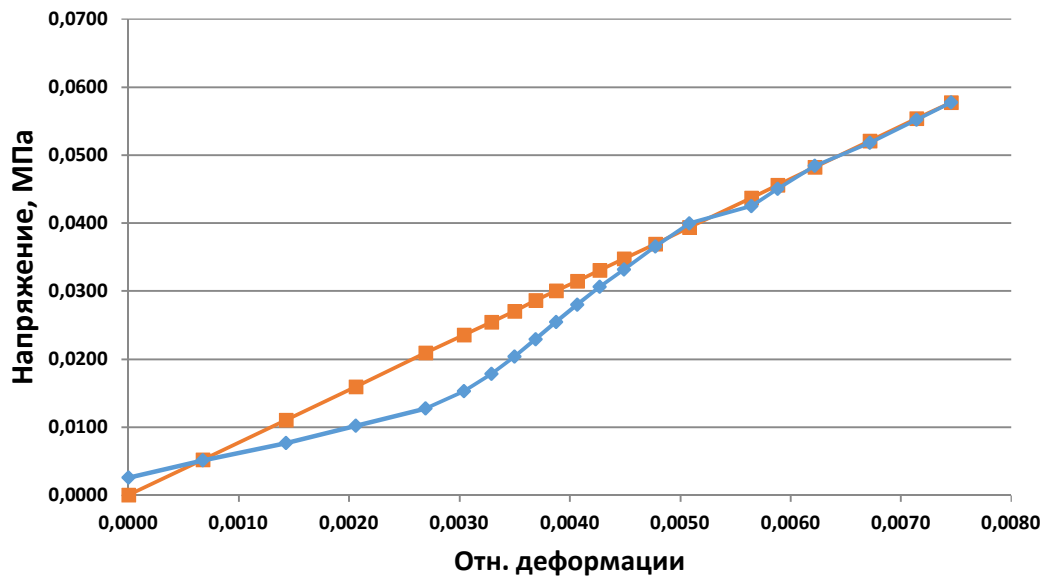


Рис. 4. График зависимости напряжений на границе слоев  $\sigma_2$  от относительной деформации их смещения  $\xi$  относительно друг друга

В расчете принимается следующая предпосылка-если напряжения на контакте меньше прочности сцепления пластика с бетоном  $R_{b,sh}$ , то усилия в шве вычисляются по зависимостям (1) и (3), в противном случае на контакте действуют только силы трения.

$$\frac{\tau}{2\pi R} = \begin{cases} \frac{\tau}{2\pi R}, & \frac{\tau}{2\pi R} \leq R_{b,sh} \\ p\varphi, & \frac{\tau}{2\pi R} > R_{b,sh} \end{cases}$$

В случае, если напряжения на контакте превышают величину  $R_{b,sh}$ , то напряжения в бетоне и пластике находим по следующим формулам полученным ранее [9].

Если условие прочности на контакте выполняется, то напряжения в бетоне и пластике находим по формулам

$$\sigma_{f2} = \frac{T_{tot}}{A_f}, \tag{4}$$

$$\sigma_{b3} = \frac{N - T_{tot}}{A_b}, \tag{5}$$

здесь  $T_{tot}$  сдвигающие силы в рассматриваемом сечении, определяемые по формулам 1 и 3.

Для учета физической нелинейности в формулах 1 и 3, а также в коэффициенте жесткости шва заменим  $E_b$  на  $k_3 E_b$  и  $E_f$  на  $v_f E_f$ .

В качестве реализации данной методики рассчитаем элемент длиной 100 мм с внутренним

диаметром трубы 100 мм. Толщина стенки пластиковой оболочки 5 мм. Материал ядра – тяжелый бетон класса В15. Начальный модуль упругости бетона  $E_b=24000$  МПа. Коэффициент Пуас-

сона  $\mu_b^0 = 0,2$ . Материал оболочки – полипропилен (ТУ 2248-001-22230841-2004). Модуль упругости пластика  $E_f=1983$  МПа. Коэффициент Пуассона  $\mu_f^0 = 0,42$ . Диаграммы деформирования материалов даны на рис. 5 и 6.

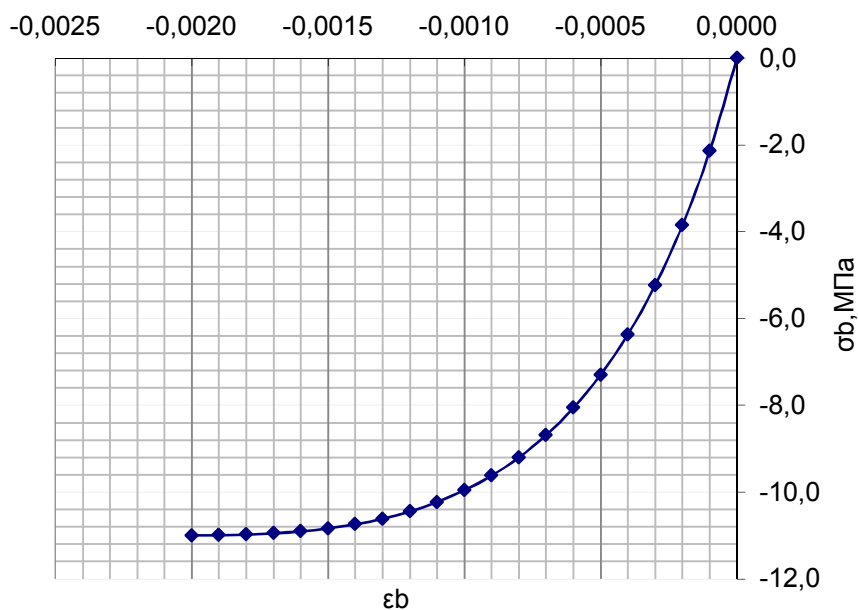


Рис. 5. График деформации бетонного ядра

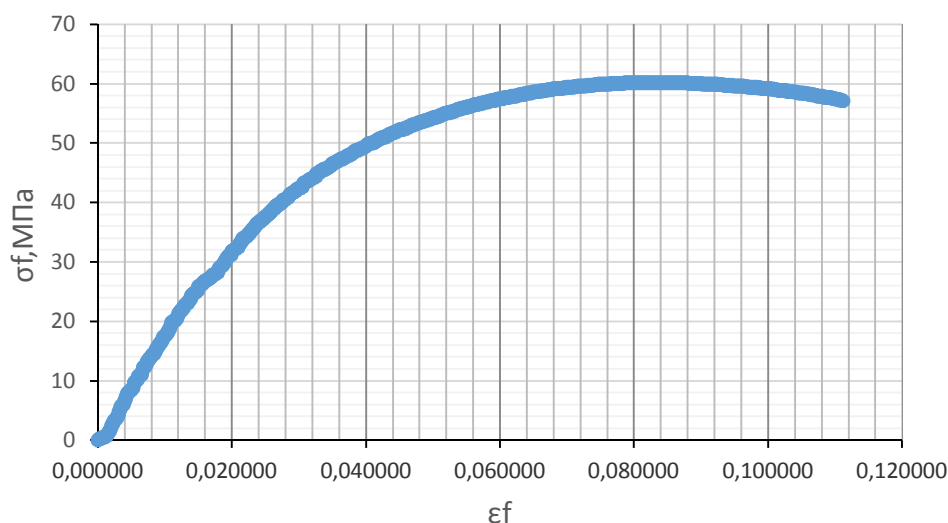


Рис. 6. График деформации пластиковой оболочки

Расчет ведем шагово-итерационным методом. Параметры, по которым контролируется сходимость-относительные деформации бетона и пластика, силы в контактном шве, длина контакта, где соблюдается условие прочности шва. Разбиваем конструкцию на участки длиной 5 мм и производим расчет по формулам 1 и 3.

Расчет показал, что разрушение трубобетона по контакту наступило при нагрузке 825 Н.

Результаты расчетов показаны на рис. 7–9.

Из графиков видно, что полные деформации бетона и относительные смещения имеют разные характеристики. Например, тангенсы углов наклона до начала разрушения на контакте различаются на порядок. Поэтому применение зависимости « $\tau$ - $U$ » на основе полных перемещений бетонного ядра, которое легко получить экспериментально, справедливо лишь при оценке прочности конструкции в целом, а именно в момент разрушения.

Расчет показал, что разрушение контактной зоны «пластик-бетон» начался гораздо раньше полного разрушения при сдвиге. Начало разрушения составило 54,5 % от разрушающей нагрузки. Далее постепенно происходило выключение контакта и препятствие сдвигу переходило к силам трения (см. графики распределения сдвигающих напряжений на контакте). Характер деформаций сдвига показывает, что после начала разрушения контакта относительные смещения

практически прекратились, что связано с выключением контакта «пластик-бетон» и дальнейшей работой только сил трения в этой зоне. Этот конструктивно-нелинейный эффект необходимо учесть при расчете трещиностойкости трубобетона, когда образованию и раскрытию трещин препятствуют силы на контакте, что особенно важно для слабо армированных трубобетонных конструкций.

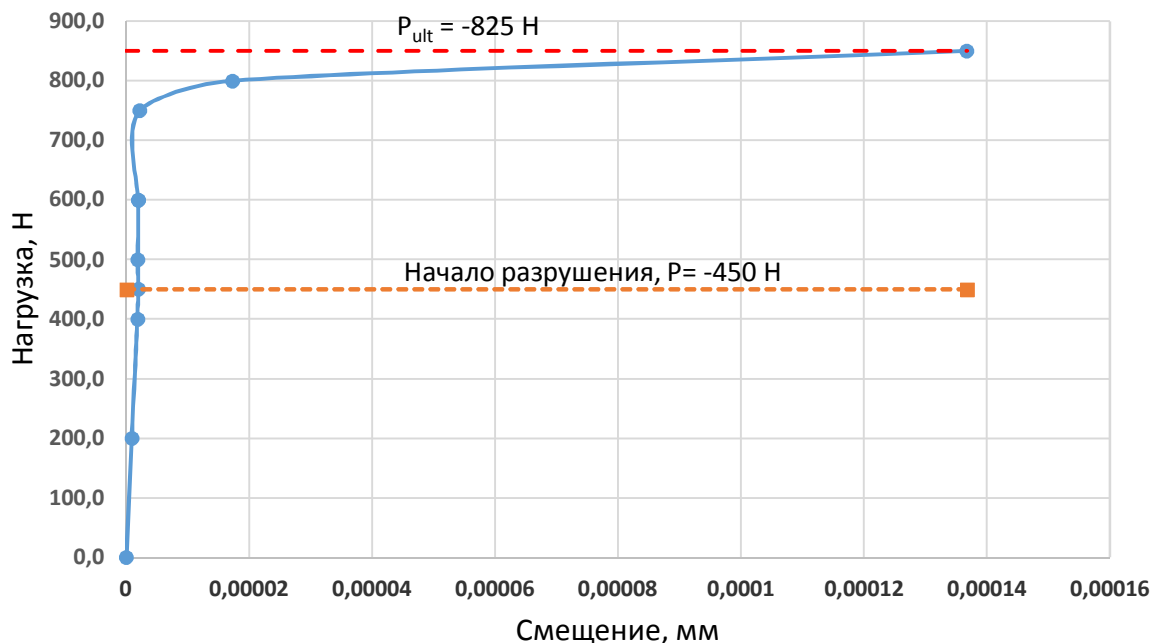


Рис. 7. График относительных смещений бетонного ядра относительно пластиковой оболочки

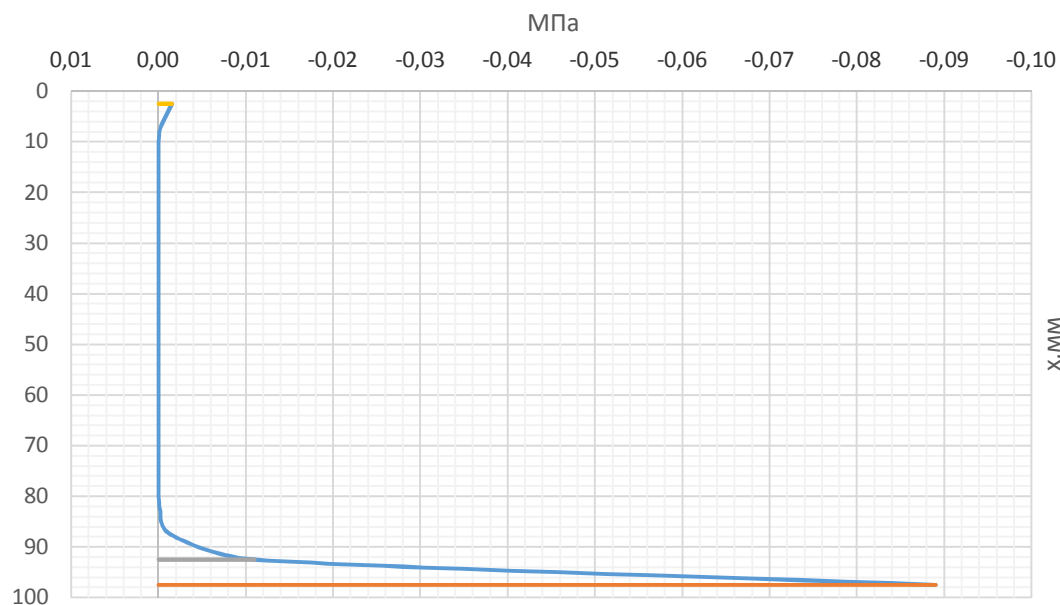


Рис. 8. Распределение сдвигающих напряжений на контакте при P=200Н

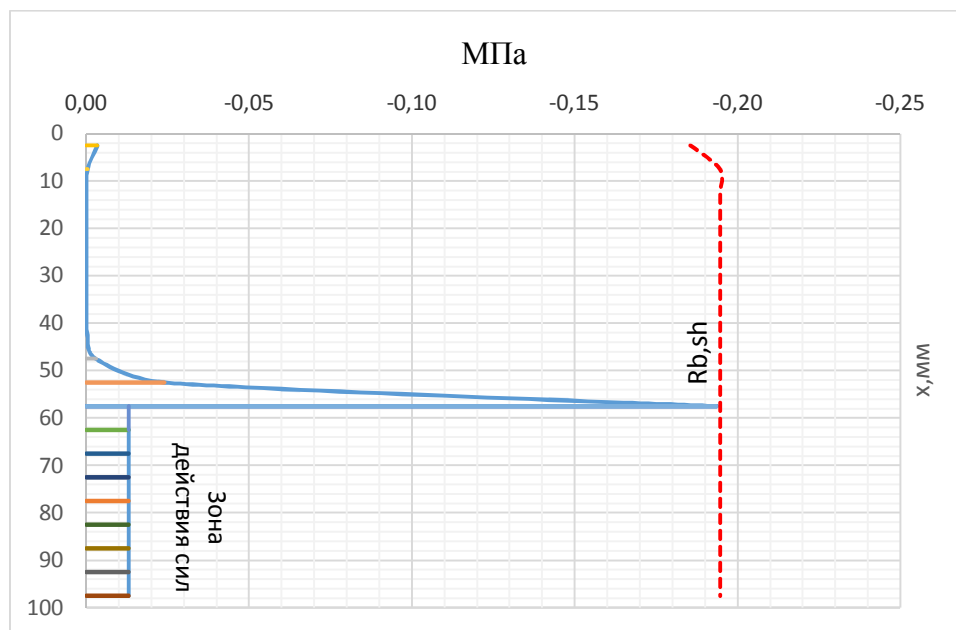


Рис. 9. Распределение сдвигающих напряжений на контакте  $P=-600\text{H}$

Таким образом, представленные в работе аналитические зависимости, анализ экспериментальных данных и сформированная на их основе методика расчета параметров НДС ПТБ стоек позволяет учитывать фактическое трение между бетонным ядром и пластиковой оболочкой, реализуя потенциал детального учета фактических условий работы конструкций, в действительности выполняемых из широкого спектра материалов, обладающих существенным разнообразием прочностных и деформативных свойств.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шахворостов А.И. Исследование напряженно-деформированного состояния трубобетона на напрягающем цементе, Дисс...канд. техн. наук. М, 2000.
2. Кришан А.Л., Сагадатов А.И. Трубобетонные элементы с предварительно обжатом ядром - Бетон и железобетон - пути развития. Научные труды 2-ой Всероссийской конференции по бетону и железобетону. 5-9 сентября 2005. Т. 2. М.: НИИЖБ, 2005.
3. Sakino K., Nakahara H., Morino S., Nishiyama I., Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns // Struct. Eng. ASCE 2004. Vol. 130(2). Pp. 180–188.
4. Schneider S.P. Axially loaded concrete-filled steel tubes // Struct. Eng. ASCE. 1998. Vol. 124. Pp. 1125–1138.
5. Huang C.S., Yeh Y.K., Liu G.Y., Hu H.T., Tsai K.C., Weng Y.T., Wang S.H., Wu M.H., Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns // Struct. Eng. ASCE. 2002. Vol. 128(9). Pp. 1222–1230.
6. Uy B., High-strength steel-concrete composite columns for buildings // Struct. Build. 2003. Vol. 156. Pp. 3–14.
7. Dolzhenko A., Naumov A., Shevchenko A. Bearing capacity and rigidity of short plastic-concrete-tubal vertical columns under transverse load // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. 327 p.
8. Долженко А.В., Наумов А.Е., Шевченко А.В., Стойкович Н. Численные исследования напряженно-деформированного состояния пластикотрубобетонного центрально-сжатого короткого стержня // Вестник БГТУ. 2018. № 10. С. 23–32.
9. Долженко А.В., Наумов А.Е. Шевченко А.В., Стойкович Н. Влияние касательных сил трения на напряженно-деформированное состояние пластикотрубобетонного центрально-сжатого короткого стержня // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №12. С. 42–51.
10. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки, М.: Стройиздат, 1986. 316 с.
11. Колчунов В.И., Панченко Л.И. Расчет составных тонкостенных конструкций. М.: Изд-во АСВ, 1999. 281 с.
12. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
13. Филин А.П. Элементы теории оболочек. Изд. 2-е, доп. и перераб. Л.: Стройиздат, 1975. 256 с.
14. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном, М.: Стройиздат, 1981. 184 с.

*Информация об авторах*

**Наумов Андрей Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: andrena@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Шевченко Андрей Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: andsheff@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Долженко Александр Валериевич**, старший преподаватель кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: dolzhenko.av@bstu.ru, da7182@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Бодяков Сергей Николаевич**, аспирант кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: kafeun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Гвасалия Хатуна Давидовна**, магистрант кафедры промышленной экологии. E-mail: gvasalia-83@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

---

*Поступила в августе 2019 г.*

© Наумов А.Е., Шевченко А.В., Долженко А.В., Бодяков С.Н., Гвасалия Х.Д., 2019

***Naumov A.E., Shevchenko A.V., \*Dolzhenko A.V., Bodiakov S.N., Gvasalia K.D.***

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

*Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46*

*\*E-mail: dolzhenko.av@bstu.ru, da7182@mail.ru*

## **RESEARCH OF STRENGTH OF CONTACT OF THE PLASTIC PIPE AND CONCRETE WHEN CALCULATING PLASTIC PIPE CONCRETE STRUCTURES**

**Abstract.** *This article presents numerical studies of the stress-strain state of centrally compressed short plastic-tube-concrete (PTC) cylindrical cores, having experimentally obtained and analyzed the influence of the tangential friction forces at the boundary of the concrete core and plastic shell layers on the stress-strain state of the PTC core under the assumption of elastic work of the core materials and shell. The need for these studies is associated with a lack of theoretical and numerical studies of the influence of tangential friction forces on the stress-strain state of this type of structural elements, including the classical solution with a steel shell. In this regard, mathematical modeling and the creation of engineering methods for calculating the PTC based on the study of the actual joint work of the concrete core and the cylindrical plastic shell has significant scientific potential.*

*The performed calculations demonstrated the relevance with engineering accuracy of using the mathematical model of a short PTC rack for engineering calculations and structural analysis of the structure. It has been established that the use of an analytical model allows us to study the effect of variations in the physical and mechanical characteristics of the materials of the core and shell of the PTC on the parameters of the stress-strain state of the structure and to rationally design the PTC elements in the construction of civil and industrial buildings with reference to the widely used materials market.*

**Keywords:** *plastic-tube-concrete, tube concrete, triaxial compression, tangential forces, friction, strength calculations of building structures.*

### **REFERENCES**

1. Shahvorostov A.I. The study of the stress-strain state of concrete on stress cement. [Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya trubobetona na napryagayuschem cemente]. Moscow, 2000.
2. Krishan A.L., Sagadatov A.I. Pre-compressed tube-concrete elements [Trubobetonnye elementy s predvaritel'no obzhatym yadrom]. Beton i zhelezobeton - puti razvitiya. Nauchnye trudy 2-oy Vserossiyskoy konferencii po betonu i zhelezobetonu. 5-9 sentyabrya, t.2 Moscow: NIIZhB, 2005.
3. Sakino K., Nakahara H., Morino S., Nishiyama I. Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns. Struct. Eng. ASCE 2004. Vol. 130(2). Pp. 180–188.



4. Schneider S.P. Axially loaded concrete-filled steel tubes. *Struct. Eng. ASCE*. 1998. Vol. 124. Pp. 1125–1138.
5. Huang C.S., Yeh Y.K., Liu G.Y., Hu H.T., Tsai K.C., Weng Y.T., Wang S.H., Wu M.H., Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns. *Struct. Eng. ASCE*. 2002. Vol. 128(9). Pp. 1222–1230.
6. Uy B., High-strength steel-concrete composite columns for buildings. *Struct. Build.* 2003. Vol. 156. Pp. 3–14.
7. Dolzhenko A., Naumov A., Shevchenko A. Bearing capacity and rigidity of short plastic-concrete-tubal vertical columns under transverse load. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 327 p.
8. Dolzhenko A.V., Naumov A.E., Shevchenko A.V., Stoykovich N. Numerical studies of the stress-strain state of a plastic-tube concrete centrally compressed short core [Chislennye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya plastikotrubobetonogo central'no-szhatogo korotkogo sterzhnya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018. No. 10. Pp. 23–32. (rus)
9. Dolzhenko A.V., Naumov A.E. Shevchenko A.V., Stoykovich N. The influence of tangential friction forces on the stress-strain state of a plastic-tube concrete centrally compressed short core [Vliyaniye kasatel'nyh sil treniya na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie plastikotrubobetonogo central'no-szhatogo korotkogo sterzhnya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018. No. 12. Pp. 42–51. (rus)
10. Rzhanicyn A.R. Compound rods and plates [Sostavnye sterzhni i plastinki]. Moscow: Stroyizdat, 1986. 316 p.
11. Kolchunov V.I., Panchenko L.I. Calculation of composite thin-walled structures. [Raschet sostavnyh tonkostennyh konstrukciy]. M: ASV, 1999. 281 p. (rus)
12. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. [Obschie modeli mehaniki zhelezobetona]. Moscow: Stroyizdat, 1996. 416 p. (rus)
13. Filin A.P. Shell theory elements. [Elementy teorii obolochek]. Leningrad: Stroyizdat, 1975. 256 p. (rus)
14. Holmyanskiy M.M. Reinforcement contact with concrete. [Kontakt armatury s betonom]. Moscow: Stroyizdat, 1981. 184 p. (rus)

#### *Information about the authors*

**Naumov, Andrey E.** PhD, Assistant professor. E-mail: andrena@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Shevchenko, Andrey V.** PhD, Assistant professor. E-mail: andsheff@rambler.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Dolzhenko, Alexander V.** Senior lecturer. E-mail: da7182@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 3 08012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Bodiakov, Sergey N.** Postgraduate student. E-mail: kafeun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Gvasalia, Khatuna D.** Master student. E-mail: gvasalia-83@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in August 2019*

#### **Для цитирования:**

Наумов А.Е., Шевченко А.В., Долженко А.В., Бодяков С.Н., Гвасалия Х.Д. Исследование прочности контакта пластиковой трубы и бетона при расчете пластикотрубобетонных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 38–45. DOI: 10.34031/article\_5da44d75248a17.80826244

#### **For citation:**

Naumov A.E., Shevchenko A.V., Dolzhenko A.V., Bodiakov S.N., Gvasalia K.D. Research of strength of contact of the plastic pipe and concrete when calculating plastic pipe concrete structures. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 8. Pp. 38–45. DOI: 10.34031/article\_5da44d75248a17.80826244