

DOI: 10.12737/article_5c1c99553a7828.01508345

^{1,*}Долженко А.В., ¹Наумов А.Е., ¹Шевченко А.В., ²Стойкович Н.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

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

²Высшая техническая школа профессионального образования Ниш

Республика Сербия, 18000, г. Ниш, ул. Александра Медведова 20

*E-mail: dolzhenko.av@bstu.ru

ВЛИЯНИЕ КАСАТЕЛЬНЫХ СИЛ ТРЕНИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛАСТИКОТРУБОБЕТОННОГО ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТОГО КОРОТКОГО СТЕРЖНЯ

Аннотация. Представлены численные исследования напряженно-деформированного состояния центрально сжатых коротких полимертубобетонных (ПТБ) цилиндрических стоек, 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 содержательного рассмотрения совместной работы бетонного ядра и цилиндрической пластиковой оболочки имеет существенный научный потенциал.

Проведенное авторами конечноэлементное моделирование позволило оценить влияние сил трения на напряженно-деформированное состояние элементов пластиковой цилиндрической оболочки и бетонного ядра рассматриваемой короткой ПТБ стойки как незначительное. Выполненные расчеты продемонстрировали справедливость с инженерной точностью использование математической модели короткой ПТБ стойки для проведения инженерных расчетов и структурного анализа конструкции. Установлено, что использование аналитической модели верифицированной методом конечных элементов позволяет исследовать влияние вариации физико-механических свойств материалов ядра и оболочки ПТБ на параметры напряжённо-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: полимертубобетон, тубобетон, трехосное сжатие, касательные силы, трение, прочностные расчеты строительных конструкций.

Трубобетонные колонны с оболочкой из стальных труб широко используются в строительстве из-за своей высокой прочности, устойчивости, пластичности и огнестойкости. Такие колонны имеют более высокую жесткость чем у обычных железобетонных колонн. Ранее авторами было предложено использование в качестве оболочки пластиковой трубы и обоснована возможность её использования в качестве оболочки центрально сжатых трубобетонных элементов при малых сжимающих нагрузках [1] с сохранением основных преимуществ классического трубобетона.

Но, несмотря на все достоинства трубобетонных колонн, их широкому внедрению в строительство не территории Российской Федерации препятствует отсутствие в нормах проектирования методик расчета таких элементов. Проведенные за последние 20 лет исследования центрально сжатых трубобетонных элементов в

нашей стране позволили разработать методики их расчета, основанные на эмпирических данных [2, 3]. При этом, большая часть этих методик требует учета ненормируемых, определяемых экспериментально, параметров, что существенно усложняет применение этих методик реальном проектировании.

Исследованию влияния касательных сил трения на напряженно-деформированное состояние центрально сжатых трубобетонных элементов в науке уделено незначительное внимание. Большинство авторов в своих работах пренебрегают силами трения на стыке оболочки и бетонного ядра [9–12].

В ранних работах авторов [1, 4] рассматривались вопросы рациональности использования коротких ПТБ стоек в качестве ресурсоэффективных конструкций в гражданском строительстве и методические аспекты количественного

анализа напряженно-деформированного состояния конструкций с учетом факторов действительной работы под нагрузкой и экспериментально определенных физико-механических свойств материалов ПТБ. В частности, в работе [4] были проанализировано распределение продольных сжимающих и поперечных растягивающих напряжений в композитной конструкции, выработаны подходы к построению аналитических зависимостей, предложены результаты численного моделирования конструкции и произведена оценка достоверности аналитического решения задачи сопоставлением с результатами конечно-элементного расчета. 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 целью определения сопоставляемых с аналитическим решением численных параметров НДС конструкции было выполнено конечно-элементное моделирование и расчет элемента в программе Лира. Рассчитываемая конструкция

$$E_f A_f + E_b A_b = E_f \cdot \left(R + \frac{t}{2} \right) \frac{2\pi H}{24 \cdot 16} + E_b \left(\frac{5}{6} R \frac{2\pi H}{24 \cdot 16} \right) \quad (1)$$

здесь H – высота рассчитываемой конструкции, которую разбиваем на 24 сектора в плане и на 16 частей по высоте.

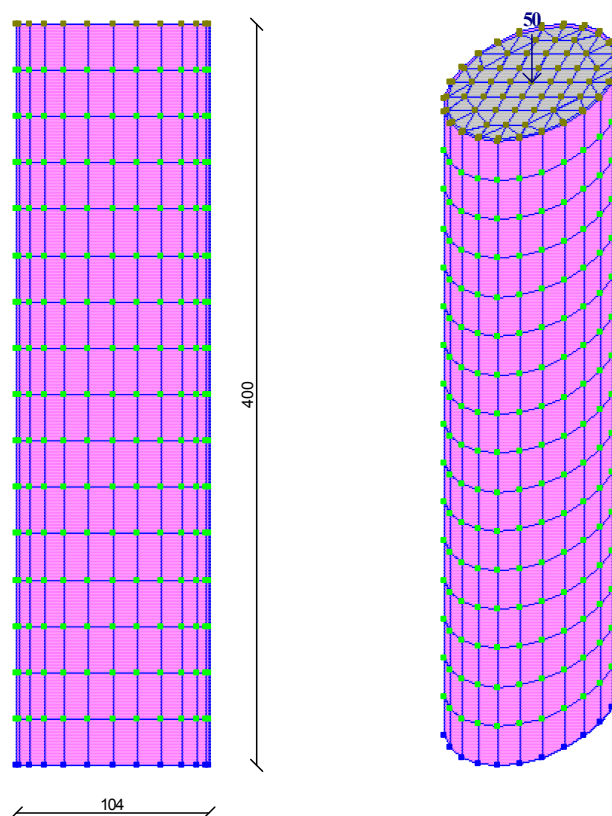


Рис. 1. Расчетная схема, размеры

имеет высоту 400 мм, внутренний диаметр трубы $2R=100$ мм, толщину стенки $t=5$ мм. Материал оболочки – полипропилен с модулем упругости $E_f=1190$ МПа и коэффициентом поперечных деформаций $\nu_f=0,20$. Материал ядра – бетон с начальным модулем упругости $E_b=24000$ МПа, и коэффициентом поперечных деформаций согласно пособия по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84) $\mu_b = 0,42$, коэффициент трения пластика о бетон $\mu = 0,33$ [5]. Расчет производился на величину центральных сжимающих напряжений 20 МПа.

Элементы оболочки смоделированы КЭ 44 (универсальным четырехугольным конечным элементом оболочки), элементы бетонного ядра – КЭ 34 (универсальным пространственным шестизуловым изопараметрическим конечным элементом). Контактная задача решалась с помощью двухузлового одностороннего элемента трения, работающего на сжатие (КЭ 264). Осевую жесткость элемента определяем по формуле:

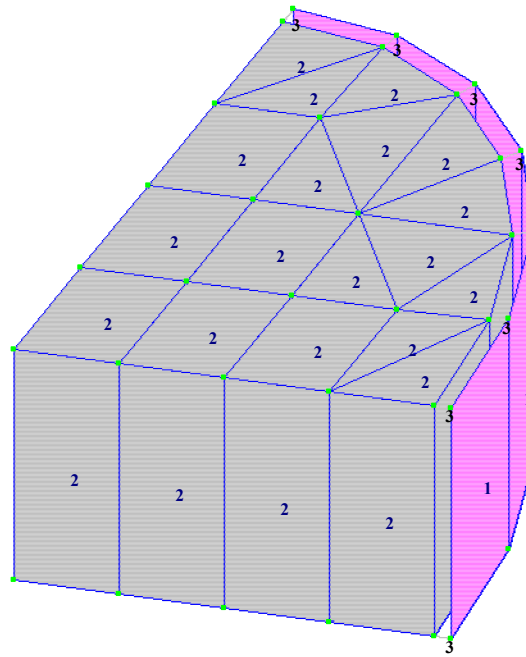


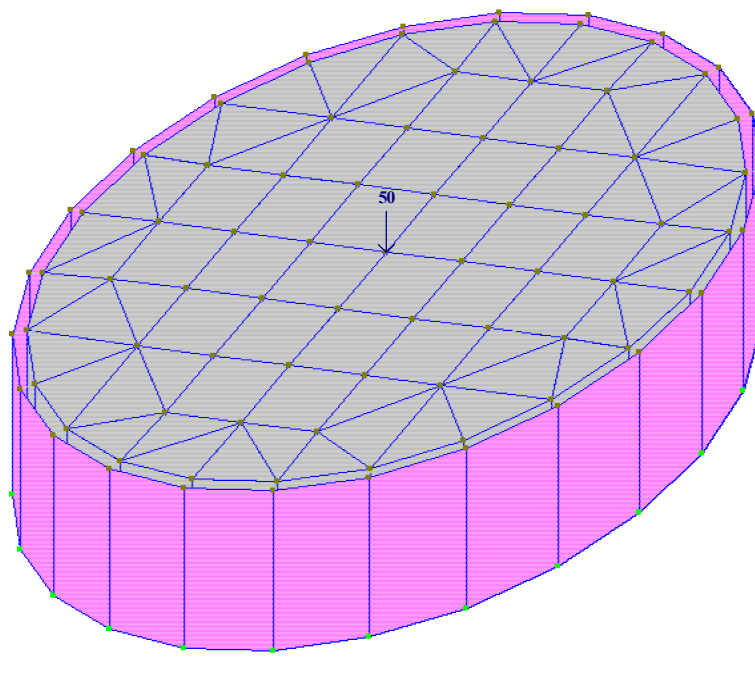
Рис. 2. Жесткости

Таблица 1

Типы жесткостей

Тип жесткости	Имя	Параметры
1	Пластина Н 0.5	$E=1190, V=0.2, H=5, R_0=0$
2	3D	$E=24000, V=0.42, R_0=0$
3	КЭ 264 численное	$E1=6.954e+006, k=0.33, E2=2.29482e+006$
		Сжатие, зазор:0

Заружение 1



Z

Рис. 3. Нагрузки, кН

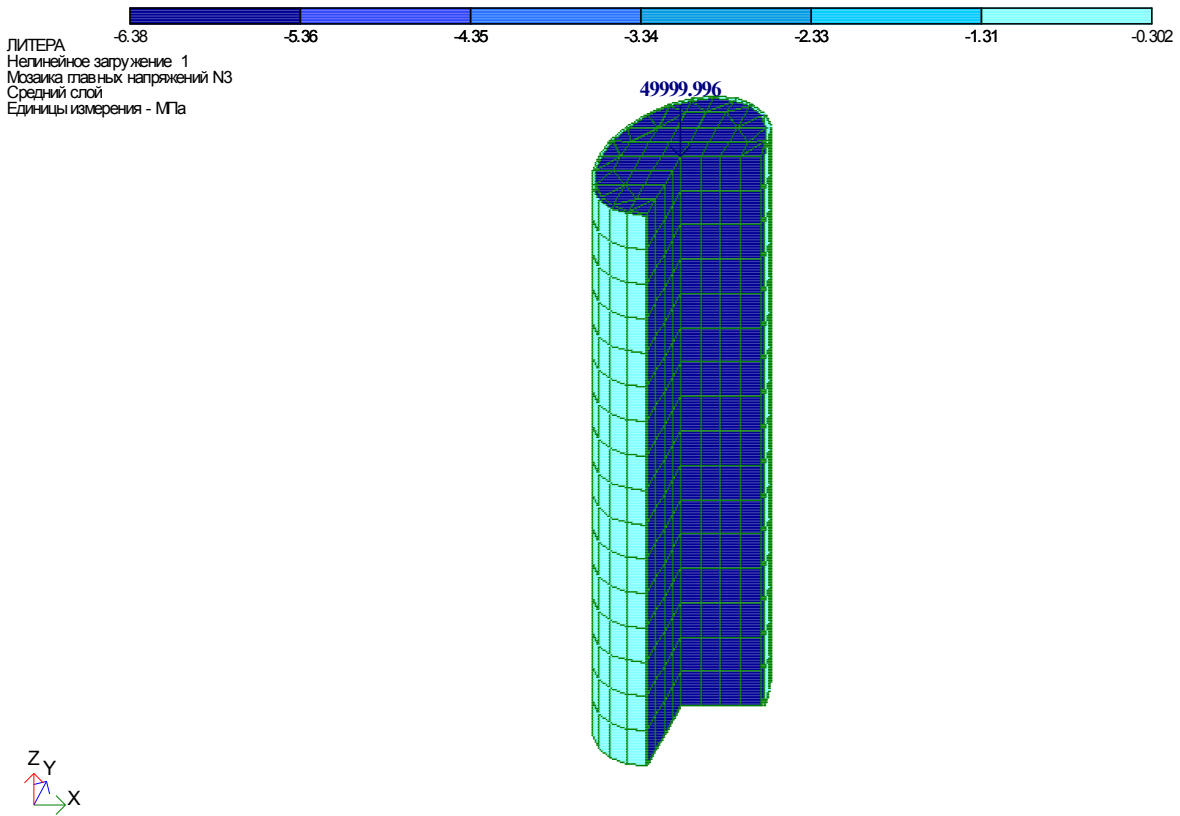


Рис. 4. Главные напряжения в бетоне и оболочке σ_{b3} и σ_{f2}

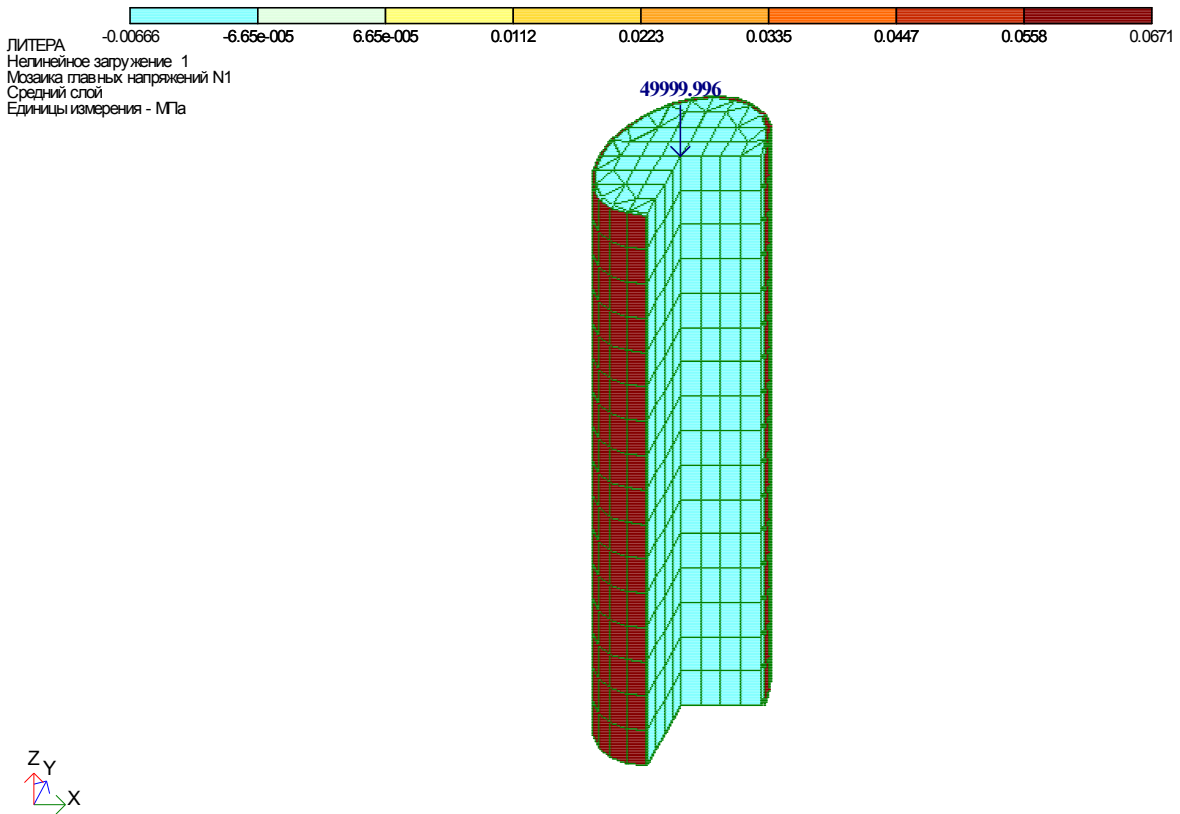


Рис. 5. Главные напряжения в бетоне и оболочке σ_{b1} и σ_{f1}

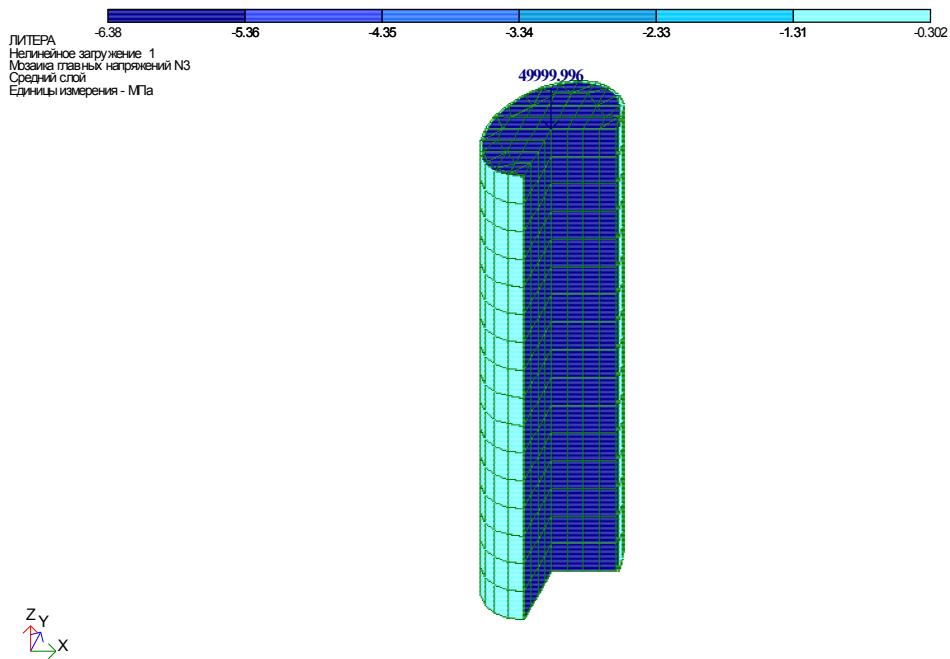


Рис. 6. Главные напряжения в бетоне σ_{b2}

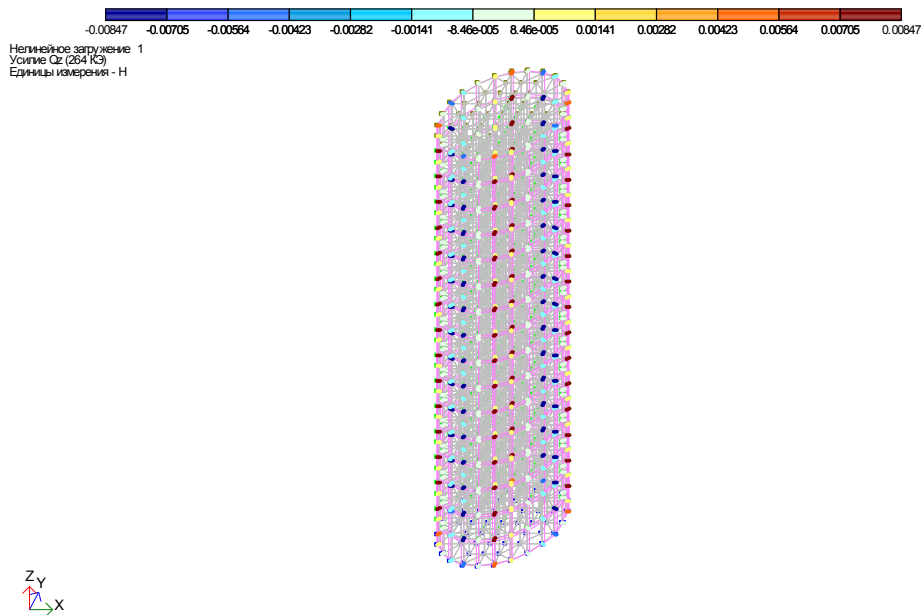


Рис. 7. Силы трения в конечных элементах

В связи с тем, что в данном расчете изменилась только нагрузка, то коэффициенты k_1 и k_2 останутся, такими же, как и в предыдущей задаче [4].

Теоретически в соответствии с предложенной авторами математической моделью [4] кольцевые и продольные напряжения в оболочке без учета сил трения соответственно равны

$$\sigma_{f1} = -\frac{N}{k_1 A_b + k_2 A_f} = 0,071 \text{ МПа} \quad (2)$$

$$\sigma_{f2} = \frac{N}{\frac{k_1}{k_2} A_b + A_f} = -0,298 \text{ МПа} \quad (3)$$

Главные напряжения в бетонном ядре будут иметь значения:

$$\sigma_{b3} = \frac{N}{A_b + \frac{k_2}{k_1} A_f} = -6,304 \text{ МПа} \quad (4)$$

$$\sigma_{b1} = \sigma_{b2} = -\sigma_{f1} \frac{t}{R} = -0,0071 \text{ МПа} \quad (5)$$

Оценим влияние сил трения по формулам, полученным в [4] с учетом [6, 7, 8].

Коэффициенты, входящие в зависимости [4] принимаем равными:

$$\Delta = -\frac{\sigma_{f2}}{E_f} + \frac{\sigma_b}{E_b} = -1,225 \cdot 10^{-5} \quad (6)$$

$$G_b = 8450 \text{ МПа,}$$

$$G_f = 496 \text{ МПа,}$$

$$\xi = \left(2\pi R \left(\frac{2}{tG_f} + \frac{3}{RG_b} \right) \right)^{-1} = 3,913 \frac{H}{\text{мм}^2} \quad (7)$$

$$c = \frac{R}{3} + \frac{t}{2} = 19,17 \text{ мм} \quad (8)$$

$$\Sigma EJ = E_b \frac{\pi}{18} R^4 + E_f \frac{5\pi}{18} [(R+t)^4 - R^4] = 2,919 \cdot 10^{10} \text{ Нмм}^2 \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{1}{E_f A_f} + \frac{1}{E_b A_b} + \frac{c^2}{\Sigma EJ} = 5,272 \cdot 10^{-7} \text{ Н}^{-1} \quad (10)$$

$$\lambda = \sqrt{\xi \gamma} = 1,436 \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

Находим распределение сдвигающих сил и сдвигающих напряжений без учета силы трения:

$$C_2 = \frac{\sigma_{f2} A_f + \frac{\Delta}{\gamma}}{ch(\lambda l)} = -499,60 \quad (12)$$

$$T = -499,60 \cdot ch(1,436 \cdot 10^{-3} x) - 475,0 \quad (13)$$

$$\tau = -0,717 \cdot sh(1,436 \cdot 10^{-3} x) \quad (14)$$

Перед вычислением сдвигающих сил и сдвигающих напряжений с воздействием силы трения найдем ее значение в середине оболочки:

$$p2\pi R l \varphi = 147,23 \text{ Н} \quad (15)$$

Постоянная интегрирования равна:

$$C_2 = \frac{\sigma_{f2} A_f - p2\pi R l \varphi + \frac{\Delta}{\gamma}}{ch(\lambda l)} = -635,78 \quad (16)$$

Силы сдвига и напряжения с учетом сил трения запишем в виде:

$$T = -635,78 \cdot ch(1,436 \cdot 10^{-3} x) - 475,0 \quad (17)$$

$$\tau = -0,727 \cdot sh(1,436 \cdot 10^{-3} x) \quad (18)$$

Максимальные сжимающие напряжения в оболочке с учетом сил трения равно:

$$\sigma_{f2} + \frac{ch(\lambda l) \left(\left(\sigma_{f2} A_f + \frac{\Delta}{\gamma} \right) \left(1 - \frac{1}{ch(\lambda l)} \right) - 2\sigma_{f1} t \pi \varphi \right)}{A_f} = -0,404 \text{ МПа} \quad (19)$$

Степень влияния сил трения оценим по формуле:

$$\left| \left(ch(\lambda l) - 1 \right) - \frac{p2\pi R l \varphi}{\left(\sigma_{f2} A_f + \frac{\Delta}{\gamma} \right)} \right| 100\% = 33,6\% \quad (20)$$

Распределение усилий даны на рисунках 8–11.

Результаты численных исследований даны в таблице 2.

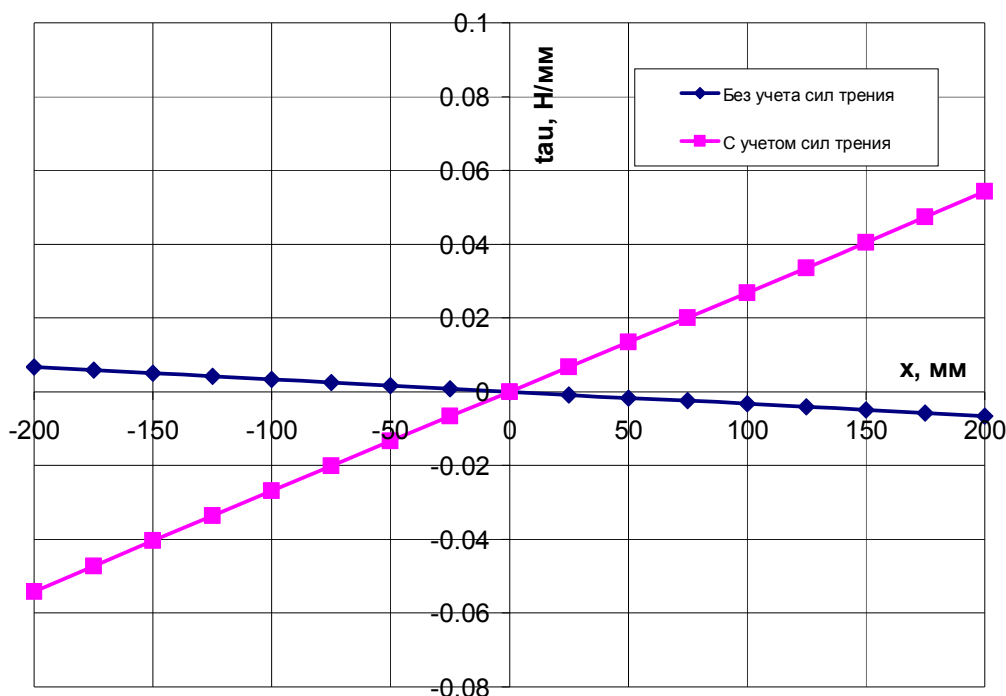


Рис. 8. Напряжения сдвига с учетом и без учета сил трения

Результаты численных исследований

№ п./п.	Наименование показателя	Численные значения, полученные расчетом по методам:		Примечание
		Теории упругости и расчета составных стержней	МКЭ	
1	Главные напряжения в бетоне σ_{b3} , МПа	-6,304	-6,38	$\mu_f = 0,42$ $\mu_b = 0,20$
2	Главные напряжения в бетоне σ_{b2} , МПа	-0,0071	-0,0075	
3	Продольные напряжения - σ_{f2} , МПа	-0,298	-0,302	
4	Кольцевые напряжения - σ_{f1} , МПа	0,071	0,067	
5	Усилие в элементе трения, Н	$\pm 0,06$	$\pm 0,008$	

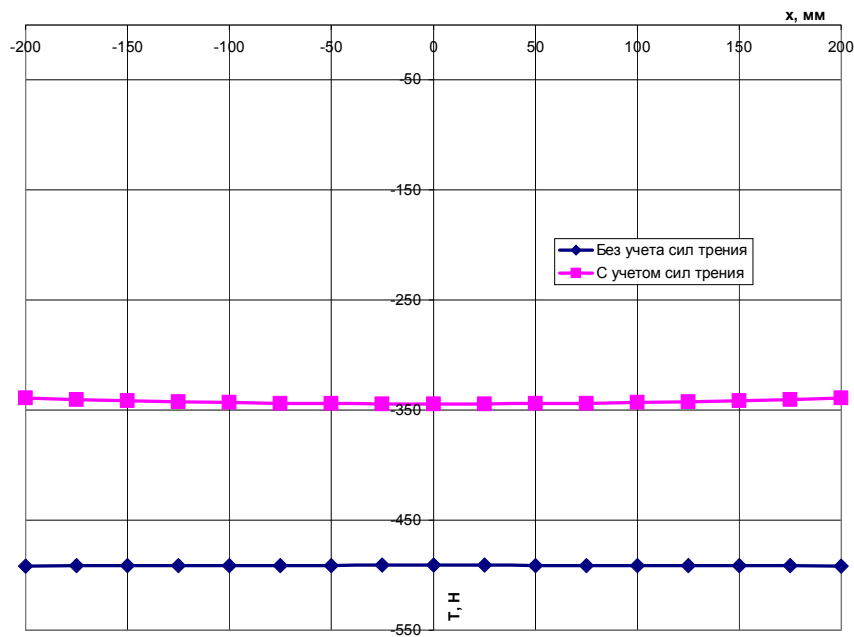


Рис. 9. Силы сдвига с учетом и без учета сил трения

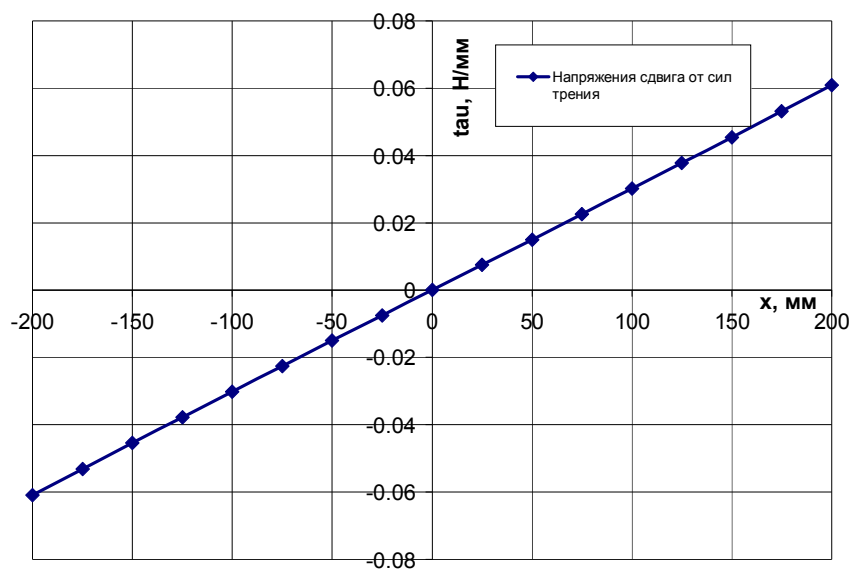


Рис. 10. Напряжения сдвига на контакте оболочки и бетонного ядра от сил трения

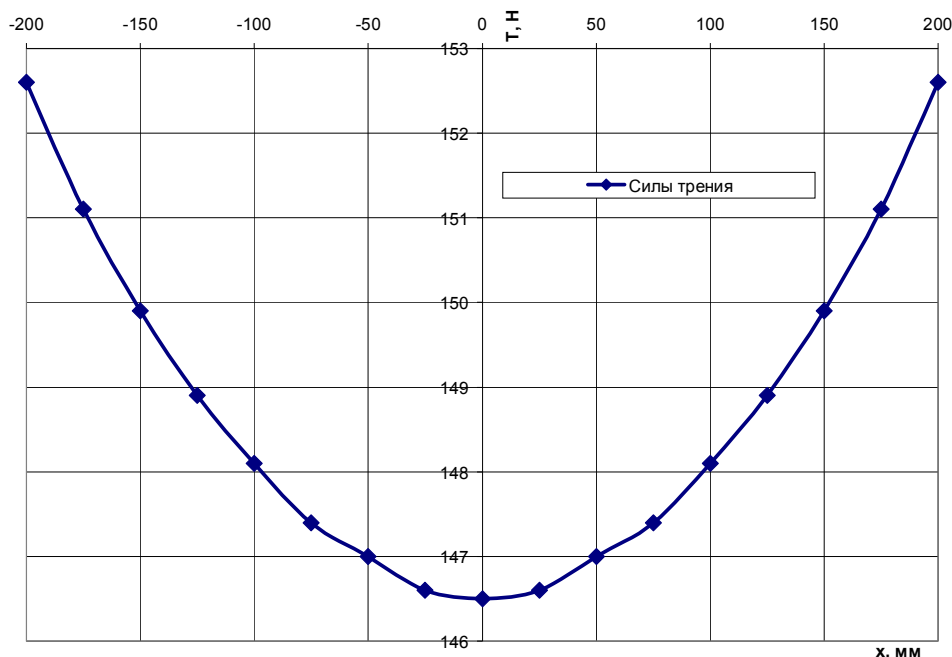


Рис. 11. Силы сдвига на контакте оболочки и бетонного ядра от сил трения

На основании вышеприведенных конечно-элементных и численных исследований можно сделать следующие выводы:

- установленное влияние сил трения элементов пластиковой оболочки и бетонного ядра на напряженно-деформированное состояние конструкции исчерпывающим образом определяется физико-механическими характеристиками материала оболочки, что определяет необходимость дальнейшего исследования вариации свойств пластика ПТБ;

- аналитическое решение задачи с инженерной точностью совпадает с конечноэлементным решением, что позволяет использовать его для инженерных расчетов конструкций;

- использование аналитической модели, верифицированной методом конечных элементов, позволяет исследовать влияние вариации физико-механических свойств материалов ПТБ (ядра и оболочки) на параметры 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.

Источник финансирования. Программа развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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, 327, 2018.

2. Шахворостов А.И. Исследование напряженно-деформированного состояния трубобетона на напрягающем цементе, Дисс...канд. техн. наук. М, 2000.

3. Кришан А.Л., Сагадатов А.И. Трубобетонные элементы с предварительно обжатым ядром – Бетон и железобетон – пути развития. Научные труды 2-ой Всероссийской конференции по бетону и железобетону. 5–9 сентября 2005г. т.2. М.:НИИЖБ, 2005.

4. 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.

5. Александров А.В., Алфутов Н.А., Астанин В.В. и др. Машиностроение. Энциклопедия, М.: Машиностроение, 1995. 624.

6. Вольмир А.С. Устойчивость упругих систем, М., 1963. 984с.

7. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.

8. Филин А.П. Элементы теории оболочек. Изд. 2-е, доп. и перераб. Л.: Стройиздат, 1975. 256 с.

9. 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.

10. Schneider S.P., Axially loaded concrete-filled steel tubes. J. Struct. Eng. ASCE 124, 1998. Pp. 1125–1138.

11. 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. J. Struct. Eng. ASCE. 2002. Vol. 128(9). Pp. 1222–1230.

12. Uy B. High-strength steel-concrete composite columns for buildings. Struct. Build. 2003. Vol. 156. Pp. 3–14.

Информация об авторах

Долженко Александр Валериевич, старший преподаватель кафедры городского кадастра и инженерных изысканий. E-mail: dolzhenko.av@bstu.ru; da7182@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Наумов Андрей Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: naumov.ae@bstu.ru; kafeun@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.

Стойкович Ненад, PhD. E-mail: nenad.stoikovic@vtsnis.edu.rs. Высшая техническая школа профессионального образования Ниш. Республика Сербия, 18000, г. Ниш, ул. Александра Медведева 20.

Поступила в сентябре 2018 г.

© Долженко А.В., Наумов А.Е., Шевченко А.В., Стойкович Н., 2018

^{1,*}*Dolzhenko A.V.*, ¹*Naumov A.E.*, ¹*Shevchenko A.V.*, ²*Stoykovich N.*

¹*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46*

²*The Higher Technical School of Professional Education Nis
Serbia, 18000, Nis, st. Alexander Medvedev, 20*

**E-mail: dolzhenko.av@bstu.ru*

INFLUENCE OF THE TANGENTIAL FORCES OF FRICTION ON STRESSED-DEFORMED STATE OF POLIMER CONCRETE PIPE OF CENTRALLY COMPRESSED SHORT ROD

Abstract. Numerical studies of the stressed-deformed state of centrally compressed short polymer concrete pipe of cylindrical struts are presented. The influence of the tangential friction forces at the concrete core layers and the plastic covering on the stressed-deformed state of the polymer concrete pipe strut in the assumption of an elastic work of the core and covering materials is analyzed. The need to conduct a research is associated with a lack of theoretical and numerical studies of tangential friction influence on the stressed-deformed state of this type of structural elements, including the classical solution with a steel covering. In this regard, mathematical modeling and creation of engineering methods to calculate the polymer concrete pipe based on a meaningful consideration of the joint work of the concrete core and the cylindrical plastic covering have significant scientific potential. The finite element modeling carried out by the authors allows to estimate the influence of friction forces on the stressed-deformed state of the plastic cylindrical covering and concrete core of the short polymer concrete pipe strut as is an insignificant. The performed calculations demonstrate fairness with engineering accuracy to use a mathematical model of a short polymer concrete pipe strut for engineering calculations and structural analysis of a construction. It is established that the use of analytical model verified by the finite element method allows to investigate the influence of physical and mechanical properties of the core and covering material of short polymer concrete pipe on the parameters of the stressed-deformed state of construction. It also provides to carry out rational design of short polymer concrete pipe elements in the structures of civil and industrial buildings with reference to the actually used and widely available materials on the market materials.

Keywords: polymer concrete pipe, pipe concrete, triaxial compression, tangential forces, friction, strength calculations of building constructions.

REFERENCES

1. 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, 327, 2018.
2. Shahvorostov A.I. The study of the stress-strain state of the concrete on the straining cement, Diss ... Cand. tech. sciences, M, 2000.
3. Krishan A.L., Sagadatov A.I. Reinforced concrete elements with pre-compressed core - Concrete and reinforced concrete - the path of development. Proceedings of the 2nd All-Russian Conference on Concrete and Reinforced Concrete. September 5-9, 2005 v.2. M.: NIIZHB, 2005.
4. Dolzhenko A.V., Naumov A.E., Shevchenko A.V., Stoykovich N. Numerical researches of the stressed-strained state of plastic tubed concrete pier under central compression load. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 10, pp. 23–32.
5. Aleksandrov A.V., Alfotov N.A., Astanin V.V. etc. Mechanical Engineering. Encyclopedia, M.: Mechanical Engineering, 1995. 624 p.
6. Volmir A. S. Stability of elastic systems, M., 1963. 984 p.
7. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. M.: Stroiizdat, 1996. 416 p.
8. Filin A.P. Elements of the theory of shells. Ed. 2nd, add. and pererabat. L.: Stroyizdat, 1975, 256 p.
9. Sakino K., Nakahara H., Morino S., Nishiyama I., Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns. J. Struct. Eng. ASCE 2004, vol. 130(2), pp. 180–188.
10. Schneider S.P., Axially loaded concrete-filled steel tubes. J. Struct. Eng. ASCE 124, 1998, pp. 1125–1138.
11. 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. J. Struct. Eng. ASCE, 2002, vol. 128(9), pp. 1222–1230.
12. Uy B. High-strength steel-concrete composite columns for buildings. Struct. Build, 2003, vol. 156, pp. 3–14.

Информация об авторах

Dolzhenko, Alexander V. Senior lecturer. E-mail: da7182@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Naumov, Andrey E. PhD, Assistant professor. E-mail: naumov.ae@bstu.ru; kafeun@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.

Stoykovich Nenad, PhD, Assistant professor. E-mail: nenad.stoikovic@vtsnis.edu.rs. The Higher Technical School of Professional Education Nis, Serbia. Serbia, 18000, Nis, st. Alexander Medvedev 20.

Received in September 2018

Для цитирования:

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. DOI: 10.12737/article_5c1c99553a7828.01508345

For citation:

Dolzhenko A.V., Naumov A.E., Shevchenko A.V., Stoykovich N. Influence of the tangential forces of friction on stressed-deformed state of polymer concrete pipe of centrally compressed short rod. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 12, pp. 42–51. DOI: 10.12737/article_5c1c99553a7828.01508345