

DOI: 10.12737/article_5bd95a716cf0c5.55926144

^{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

²Вышская техническая школа профессионального образования Ниш

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

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

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТИКОТРУБОБЕТОННОГО ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТОГО КОРОТКОГО СТЕРЖНЯ

Аннотация. Полимертруробетонные (ПТБ) стойки современной наукой рассматриваются как прогрессивная конструктивная инновация. Установлено, что прочность и жесткость ПТБ стоек существенно возрастает по отношению к безоболочечным конструкциям аналогичных сечений и материала, что позволяет осуществлять их рациональное проектирование. Качественное объяснение упрочнению бетона ПТБ конструкций находится в рассмотрении его работы на условное трехосное сжатие, однако количественно пространственная работа ПТБ в существующих на сегодня отечественных нормах не представлена. Во-многом это связано с недостатком теоретических и численных исследований такого вида конструктивных элементов, в связи с чем математическое моделирование и создание инженерных методик расчета ПТБ на основе содержательного рассмотрения совместной работы цилиндрической оболочки и бетонного ядра имеет существенный научный потенциал. Проведенное авторами конечноэлементное моделирование и анализ возникающих в сечениях конструкций деформаций и эквивалентных напряжений по теории прочности Мора при вертикальном нагружении позволили ранее качественно установить, что несущая способность короткой ПТБ стойки по прочности на 25 %, а по жесткости – на 15 % выше, чем равной по объему бетонной стойки без оболочки, что позволяет с оптимизмом смотреть на потенциальную ресурсоэффективность инновационной конструкции. В работе представлен количественный анализ действительной работы элементов короткой ПТБ стойки на основе рассмотрения авторской пространственной нелинейной деформационной модели конструкции с учетом работы бетонного ядра, находящегося в условиях трехосного сжатия и совместной работы с полимерной оболочкой, показана применимость модели для различных условий осуществления расчетного процесса.

Ключевые слова: полимертруробетон, труробетон, трехосное сжатие, прочностные расчеты строительных конструкций.

Авторами ранее были исследованы прочностные и деформативные характеристики ПТБ элементов, работающих на вертикальные нагрузки, представляющих собой заполненные тяжелым бетоном полипропиленовые и полиэтиленовые трубы технического назначения, распространённые в инженерном строительстве. Экспериментальные исследования при центральном сжатии коротких ПТБ стоек наружным диаметром 110 мм и высотой 400 мм, заполненных бетоном класса В15, с ручным уплотнением бетона заполнения показали существенное (до 35 %) увеличение прочности заключенного в трубу бетона по сравнению с кубиковой того же класса вместе с высокой степенью сплошности и монолитности бетона ядра [1, 2, 3, 4].

Расчет прочности нормальных сечений ПТБ стоек предлагается выполнять по нелинейной деформационной модели железобетона. В качестве исходных данных для построения предлагаемой методики расчета являются:

– система уравнений, описывающих связь между напряжениями и деформациями для любой точки трансверсально-изотропного бетонного ядра в форме обобщенного закона Гука, но с учетом физической нелинейности;

– условие прочности объемно-сжатого бетонного ядра;

– криволинейные диаграммы деформирования бетона и пластика.

Предельное состояние первой группы может наступить в рассматриваемых ПТБ стойках в следующих случаях:

– исчерпание несущей способности сечения;

– потеря общей устойчивости;

– местная потеря устойчивости.

В первом случае, для определения несущей способности используем следующие предположения:

а) для пластиковой оболочки две гипотезы Киргхофа-Лява [5]:

– прямолинейные и нормальные к срединной поверхности волокна недеформированной обо-

лочки остаются прямолинейными и нормальными к деформированной срединной поверхности и не меняют своей длины,

– нормальные напряжения на площадках, параллельных площадкам срединной поверхности, пренебрежимо малы по сравнению с другими напряжениями,

б) кольцевые и меридиональные напряжения постоянны в каждом сечении оболочки,

в) физическую нелинейность работы бетона принимаем по трансформированной диаграмме трехосного сжатия или области смешанных напряжений бетона (рис. 1),

г) физическую нелинейность работы материала пластика принимаем из экспериментальных данных (рис. 2).

Бетон при работе в трубе испытывает трехосное сжатие. Для описания связи между напряжениями и деформациями применим модель Н. И. Карпенко [6]. В процессе нагружения бетон теряет сплошную структуру вследствие образования микротрещин и трещин значительной протяженности в стадии разрушения. При этом трещины имеют ориентацию вдоль площадок главных напряжений или деформаций и, следовательно, развиваются направленно и бетон имеет разные физико-механические характеристики в разных направлениях. Таким образом, в процессе нагружения бетон приобретает еще ярче выраженные ортотропные свойства.

Ортотропный материал, находящийся в трехосном напряженно-деформированном состоянии, можно описать, согласно [6], следующей математической моделью:

$$\{\varepsilon\}_n = [C_b]_n \{\sigma\}_n, \quad (1)$$

где $\{\varepsilon\}_n$ – вектор-столбец относительных деформаций бетона; $\{\sigma\}_n$ – вектор-столбец напряжений бетона, $[C_b]_n$ – матрица податливости бетона.

Оси 1, 2, 3 (m, n, l) являются осями ортотропии материала. Согласно классической ортотропной модели, коэффициенты матрицы податливости будут равны:

$$C_{b11} = \frac{1}{E_{b1}}; C_{b22} = \frac{1}{E_{b2}}; C_{b33} = \frac{1}{E_{b3}}; \quad (2)$$

$$C_{b12} = -\frac{\mu_{b12}}{E_{b2}}; C_{b13} = -\frac{\mu_{b13}}{E_{b3}}; \quad (3)$$

$$C_{b21} = -\frac{\mu_{b21}}{E_{b1}}; C_{b23} = -\frac{\mu_{b23}}{E_{b3}}; \quad (4)$$

$$C_{b31} = -\frac{\mu_{b31}}{E_{b1}}; C_{b32} = -\frac{\mu_{b32}}{E_{b2}}; \quad (5)$$

$$C_{b44} = \frac{1}{G_{b12}}; C_{b55} = \frac{1}{G_{b23}}; C_{b66} = \frac{1}{G_{b31}}, \quad (6)$$

где E_{bi} – модули деформации по трем главным направлениям ($i=1, 2, 3$); μ_{bij} – коэффициенты поперечной деформации (Пуассона), характеризующие поперечное расширение при сжатии или сокращение вследствие растяжения, причем первый индекс показывает направление сокращения или удлинения, а второй – номер напряжения, вызывающего это сокращение или удлинение; G_{bkj} – модули сдвига в трех плоскостях $kj=12, 23, 31$, характеризующие изменение прямых углов между главными направлениями k, j .

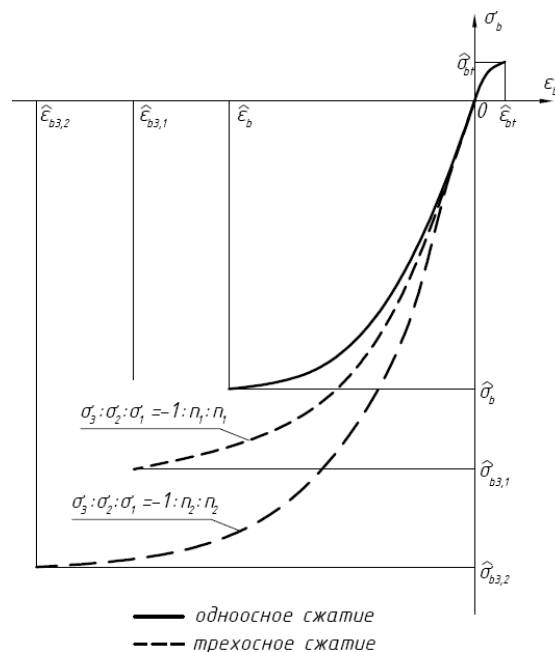


Рис. 1. Трансформированные диаграммы трехосного сжатия, принимаемые в расчетах

Для описания работы бетона примем также допущение, что все составляющие главных напряжений по их определенным направлениям изменяются пропорционально одному параметру, т.е. нагружение является простым и трехосным (гидростатическим).

Для случая трехосного сжатия (области напряжений $\sigma_1 < 0$) применим следующие зависимости.

Коэффициент изменения секущего модуля бетона, согласно [6] равен:

$$\nu_{b3} = \hat{\nu}_{b3} + (\nu_{03} - \hat{\nu}_{b3}) \sqrt{1 - \omega_{13}\eta_3 - \omega_{23}\eta_3^2}, \quad (7)$$

где

$$\omega_{13} = 2 - 2,05\hat{\nu}_{b3}, \quad (8)$$

$$\omega_{23} = 1 - \omega_{13}, \quad (9)$$

$$\mu_{b13} = \mu_b^0 + (1 - \sqrt[3]{\hat{\nu}_{b3}})\chi_{13}, \quad (13)$$

уровень главных напряжений

$$\eta_3 = \frac{\sigma_{b3}}{\hat{\sigma}_{b3}}, \quad (10)$$

где $\hat{\sigma}_{b3}$ – предельные значения напряжений при трехосном сжатии; $\hat{\nu}_{b3}$ – значение коэффициента изменения в вершине трансформированной диаграммы трехосного сжатия.

Коэффициент изменения в вершине трансформированной диаграммы трехосного сжатия, согласно [6], равен:

$$\nu_{b3} = \nu_b \varphi_R^n \quad (11),$$

$$n \approx 1, \quad \varphi_R = \left| \frac{\hat{\sigma}_b}{\hat{\sigma}_{b3}} \right| \leq 1, \quad (12)$$

где коэффициент φ_R учитывает увеличение предельных деформаций бетона при трехосном сжатии в сравнении с одноосным сжатием ($\hat{\sigma}_b = -R_{b,ser}$).

Коэффициент поперечной деформации бетона (коэффициент Пуассона)

где $\mu_b^0 = 0,15 - 0,2$ — начальный коэффициент поперечной деформации; χ_{13} – коэффициент, учитывающий неравномерность развития поперечных деформаций в трех направлениях главных напряжений ($\chi_{13}=1$), возможна корректировка по данным эксперимента).

Для материала оболочки имеем зависимости между деформациями и напряжениями:

$$\varepsilon_{f2} = \frac{1}{\nu_f E_f} (\sigma_{f2} - \mu_f \sigma_{f1}), \quad (14)$$

$$\varepsilon_{f1} = \frac{1}{\nu_f E_f} (\sigma_{f1} - \mu_f \sigma_{f2}), \quad (15)$$

где $\varepsilon_{f1}, \sigma_{f1}$ – поперечные (кольцевые) относительные деформации и напряжения; $\varepsilon_{f2}, \sigma_{f2}$ – продольные (меридиональные) относительные деформации и напряжения, ν_f – коэффициент изменения секущего модуля пластика; μ_f – коэффициент Пуассона материала оболочки; E_f – модуль упругости материала оболочки.

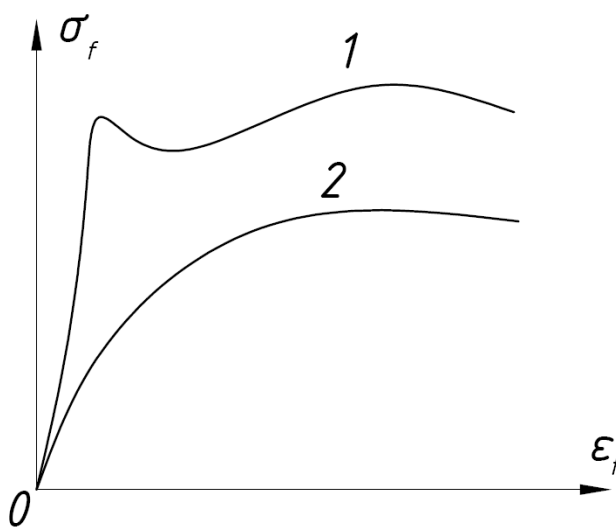


Рис. 2. Стандартный вид диаграмм растяжения пластика, принимаемых в расчетах:
1 – материал имеет предел текучести, 2 – материал не имеет предела текучести

Кольцевые деформации расширения трубы от бокового давления бетона можно выразить через боковое расширение бетона:

$$\varepsilon_{f1} = \frac{1}{\nu_{b3} E_b} (\sigma_{b1} - \mu_{b13} (\sigma_{b3} + \sigma_{b1})), \quad (16)$$

Здесь ν_{b3} – коэффициент изменения секущего модуля бетона; E_b – начальный модуль упругости бетона; μ_{b13} – коэффициент поперечной деформации бетона (коэффициент Пуассона);

$\sigma_{b3}, \sigma_{b1}, \sigma_{b1}$ – главные напряжения в бетонном ядре.

Рассмотрим работу цилиндрической оболочки. Продольную относительную деформацию, выражая через усилия можно записать

$$\varepsilon_{f2} = \frac{1}{\nu_f E_f} (q - \mu_f R_p), \quad (17)$$

где q – вертикальная нагрузка, действующая на оболочку (т.е. доля общей, воспринимаемой оболочкой); p – внутреннее давление на оболочку

от бокового расширения бетонного ядра; R – радиус цилиндрической оболочки.

Согласно [7, 8, 9], продольное перемещение равно:

$$u(x) = \frac{1}{\nu_f E_f} \int_0^x \left(\frac{q}{t} - \frac{\mu_f R p}{t} \right) dx + g(s) = \frac{1}{\nu_f E_f} \left(\frac{q}{t} - \frac{\mu_f R p}{t} \right) x + g(s), \quad (18)$$

здесь $g(s)$ – произвольная функция общего решения однородной системы дифференциального уравнения равновесия оболочки [7, 8].

$$u(L) = \frac{1}{\nu_f E_f} \left(\frac{q}{t} - \frac{\mu_f R p}{t} \right) L. \quad (19)$$

При $x = 0$

$$u(0) = 0, g(s) = 0.$$

При $x = L$

Так как перемещения при $x=L$, бетона и пластиковой оболочки равны, то –

$$\frac{1}{\nu_f E_f} \left(\frac{q}{t} - \frac{\mu_f R p}{t} \right) L = \varepsilon_{b3}; \quad L = \frac{1}{\nu_{b3} E_b} (\sigma_{b3} - \mu_{b13} (\sigma_{b2} + \sigma_{b1})) L, \quad (20)$$

и, следовательно, равны относительные деформации пластиковой оболочки и бетонного ядра (по крайней мере, малые приращения).

Тогда

$$\varepsilon_{f2} = \varepsilon_{b3}, \quad (21)$$

$$\frac{1}{\nu_f E_f} (\sigma_{f2} - \mu_f \sigma_{f1}) = \frac{1}{\nu_{b3} E_b} (\sigma_{b3} - \mu_{b13} (\sigma_{b2} + \sigma_{b1})). \quad (22)$$

Так как давление от оболочки на бетон:

$$\frac{\sigma_{f1} t}{R} = -\sigma_{b1} = -\sigma_{b2}, \quad (23)$$

то, добавив, условие равновесия, получим следующие соотношения, описывающие работу ПТБ

$$\frac{1}{\nu_f E_f} (\sigma_{f2} - \mu_f \sigma_{f1}) = \frac{1}{\nu_{b3} E_b} \left(\sigma_{b3} + 2\mu_{b12} \frac{\sigma_{f1} t}{R} \right), \quad (24)$$

$$\frac{1}{\nu_f E_f} (\sigma_{f1} - \mu_f \sigma_{f2}) = -\frac{1}{\nu_{b3} E_b} \left(\frac{\sigma_{f1} t}{R} + \mu_{b13} (\sigma_{b3} - \frac{\sigma_{f1} t}{R}) \right), \quad (25)$$

$$N = \sigma_{b3} A_b + \sigma_{f2} A_f, \quad (26)$$

здесь A_b – площадь бетона; A_f – площадь оболочки; t – толщина оболочки.

$$k_1 = \frac{(\mu_{b13} + 2\mu_{b12}\mu_f - 1)\alpha_f \frac{t}{R} + \frac{\nu_{b3}}{\alpha_f \nu_f} (\mu_f^2 - 1)}{\mu_f - \mu_{b13}}, \quad (30)$$

Решая совместно уравнения 23, 24, 25 получим:

$$k_2 = \frac{[(2\mu_{b12} + 1)\mu_{b13} - 1] \frac{\alpha_f \nu_f t}{\nu_{b3} R} + \mu_{b13} \mu_f - 1}{\mu_f - \mu_{b13}}, \quad (31)$$

$$\sigma_{f1} = \frac{N}{k_1 A_b + k_2 A_f}, \quad (27)$$

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_b}. \quad (32)$$

$$\sigma_{f2} = \frac{N}{\frac{k_1}{k_2} A_b + A_f}, \quad (28)$$

$$\sigma_{b3} = \frac{N}{A_b + \frac{k_2}{k_1} A_f}, \quad (29)$$

В предельном состоянии при разрушении бетона при трехосном сжатии коэффициент изменения, ν_{b3} достигнет своего значения в вершинах диаграмм $\hat{\nu}_{b3}$ соответственно, а напряжения своего предельного значения при трехосном сжатии – $\hat{\sigma}_{b3}$.

Тогда условия прочности для элемента запишутся:

где коэффициенты k_1, k_2 находят по формулам

$$N \leq (A_b + \frac{k_2}{k_1} A_f) k_3 R_b, \quad (32)$$

$$-\frac{N}{k_1 A_b + k_2 A_f} \leq R_f, \quad (33)$$

$$\frac{N}{\frac{k_1}{k_2} A_b + A_f} \leq R_{fc} \quad (34)$$

где N – расчетная продольная сила от внешней нагрузки, R_b – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию, R_f – расчетное сопротивление материала трубы растяжению, R_{fc} – расчетное сопротивление материала трубы сжатию, k_{1-3} – коэффициенты, учитывающие трехосное сжатие бетона.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов $k_3, \mu_{b13}, \mu_{b12}, \nu_b, \mu_{b13}, \mu_{b12}, \hat{\nu}_b$ для труб из полипропилена.

Таблица 1

Значения коэффициента $k_3, \mu_{b13}, \mu_{b12}, \nu_b, \mu_{b13}, \mu_{b12}, \hat{\nu}_b$ для ПТБ с трубами из полипропилена

Класс бетона	B15
Коэффициент k_{13}	1,15
Коэффициент μ_{b13}	0,5
Коэффициент μ_{b12}	0,5
Коэффициент $\hat{\nu}_b$	0,181

Для верификации полученных уравнений выполним расчет несущей способности по материалу ПТБ стойки диаметром 110 мм, внутренним диаметром стенки 5 мм, из бетона класса B15 ($R_b = 8,5$ МПа, $E_b = 24 \cdot 10^3$ МПа). Материал трубы — полипропилен со следующими физико-механическими характеристиками: $R_f = 4,0$ МПа, $R_{fc} = 4,0$ МПа, $E_p = 300$ МПа; $\mu_f = 0,42$, $\nu_f = 0,5$.

$$k_1 = \frac{(\mu_{b13} + 2\mu_{b12}\mu_f - 1)\alpha_f \frac{t}{R} + \frac{k_3 \hat{\nu}_b}{\alpha_f \nu_f} (\mu_f^2 - 1)}{\mu_f - \mu_{b13}} =$$

$$= \frac{(0,5 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,5 - 1) \cdot 0,0417 \frac{5}{55} + \frac{1,15 \cdot 0,181}{0,0417 \cdot 1,0} (0,42^2 - 1)}{0,42 - 0,5} = 51,389$$

$$k_2 = \frac{[(2\mu_{b12} + 1)\mu_{b13} - 1] \frac{\alpha_f \nu_f t}{k_3 \hat{\nu}_b R} + \mu_{b13} \mu_f - 1}{\mu_f - \mu_{b13}} =$$

$$= \frac{[(2 \cdot 0,5 + 1) \cdot 0,5 - 1] \frac{0,0417 \cdot 1,0}{1,15 \cdot 0,181} \frac{5}{55} + 0,5 \cdot 0,42 - 1}{0,42 - 0,5} = 9,875$$

Предельная несущая способность бетонного ядра составит:

$$N_{ult} \leq (9503 + \frac{9,875}{51,839} 1806) \cdot 1,15 \cdot (-8,5) = -9,6254 \cdot 10^4 \text{ Н} = -96,25 \text{ кН}.$$

Напряжения в трубе в момент разрушения по бетону:

$$-\frac{N_{ult}}{k_1 A_b + k_2 A_f} = -\frac{-96254}{51,389 \cdot 9503 + 9,875 \cdot 1806} = 0,19 \text{ МПа} \leq R_f = 4,0 \text{ МПа},$$

$$\frac{N_{ult}}{\frac{k_1}{k_2} A_b + A_f} = \frac{96254}{\frac{51,389}{9,875} 9503 + 1806} = 1,88 \text{ МПа} \leq R_{fc} = 4,0 \text{ МПа}.$$

Прочность трубы обеспечена.

В качестве альтернативной математической модели будем использовать метод конечных элементов (МКЭ).

Оценим работу трубобетона при совместной работе бетонного ядра и пластиковой оболочки (т.е. перемещения оболочки и бетона на контакте одинаковы). Материалы ядра и оболочки работают в упругой стадии.

Рассчитываемая цилиндрическая оболочка имеет высоту 400 мм, внутренний диаметр $2R=100$ мм, толщину стенки $t=5$ мм. Материал – полипропилен с модулем упругости $E=300$ МПа и коэффициентом Пуассона $\mu_f = 0,42$. Материал ядра примем из бетона с начальным модулем упругости $E_b = 24000$ МПа, и коэффициентом Пуассона $\mu_b = 0,2$.

Вертикальная нагрузка 20 кН.

Расчет производим в программном комплексе ЛИРА (рис. 3). Элементы оболочки моде-

$$u(400) = \frac{1}{\nu_f E_f} \left(\frac{q}{t} - \frac{\mu_f R p}{t} \right) L = \frac{1}{1 \cdot 1190} (-1,00 - 0,42 \cdot 10,00) \cdot 400 = -1,75 \text{ мм.}$$

Площадь бетона

$$A_b = \pi R^2 = 3,1416 \cdot 50^2 = 7854 \text{ мм}^2.$$

Площадь поперечного сечения оболочки

$$A_f = \pi((R+t)^2 - R^2) = 3,142 \cdot (55^2 - 50) = 1650 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент приведения $\alpha_f = \frac{E_f}{E_b} = \frac{1190}{24000} = 0,04958$.

Коэффициенты k_1, k_2 в упругой стадии работы материалов находим по формулам:

$$k_1 = \frac{[(1 + \mu_f)\mu_b - 1] \frac{t}{R} + \frac{1}{\alpha_f} (\mu_f^2 - 1)}{\mu_f - \mu_b} = \frac{[(1 + 0,20) \cdot 0,42 - 1] \frac{5}{50} + \frac{1}{0,04958} (0,20^2 - 1)}{0,20 - 0,42} = 88,23,$$

$$k_2 = \frac{[\mu_b(2\mu_b + 1) - 1] \alpha_f \frac{t}{R} + \mu_b \mu_f - 1}{\mu_f - \mu_b} = \frac{[0,42 \cdot (2 \cdot 0,42 + 1) - 1] \cdot 0,04958 \frac{5}{50} + 0,42 \cdot 0,20 - 1}{0,20 - 0,42} = 4,169.$$

Кольцевые и продольные напряжения в оболочке соответственно равны

$$\sigma_{f1} = -\frac{N}{k_1 A_b + k_2 A_f} = -\frac{-20000}{88,23 \cdot 7854 + 4,169 \cdot 1650} = 0,029 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{f2} = \frac{N}{\frac{k_1}{k_2} A_b + A_f} = \frac{-20000}{\frac{88,23}{4,169} 7854 + 1650} = -0,119 \text{ МПа.}$$

Главные напряжения в бетонном ядре будут иметь значения:

$$\sigma_{b3} = \frac{N}{A_b + \frac{k_2}{k_1} A_f} = \frac{-20000}{7854 + \frac{4,169}{88,23} 1650} = -2,521 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_{b1} = \sigma_{b2} = -\sigma_{f1} \frac{t}{R} = -(0,029) \frac{5}{50} = -0,0029 \text{ МПа.}$$

лируем универсальным четырехугольным конечным элементом оболочки КЭ 44. Элементы бетонного ядра моделируем универсальным пространственным шестиузловым изопараметрическим конечным элементом КЭ 34.

Согласно вышеприведенного расчета численные решения по безмоментной теории будут иметь следующие значения:

– для продольных напряжений,

$$\sigma_{f2} = \frac{N}{A} = \frac{-1650}{1650} = -1,00 \text{ МПа,}$$

– для кольцевых напряжений,

$$\sigma_{f1} = \frac{pR}{t} = \frac{1 \div 50}{5} = 10,00 \text{ МПа}$$

где

$$A = \pi((R+t)^2 - R^2) = 3,142 \cdot (55^2 - 50) = 1650 \text{ мм}^2$$

– площадь поперечного сечения оболочки, продольные перемещения равны

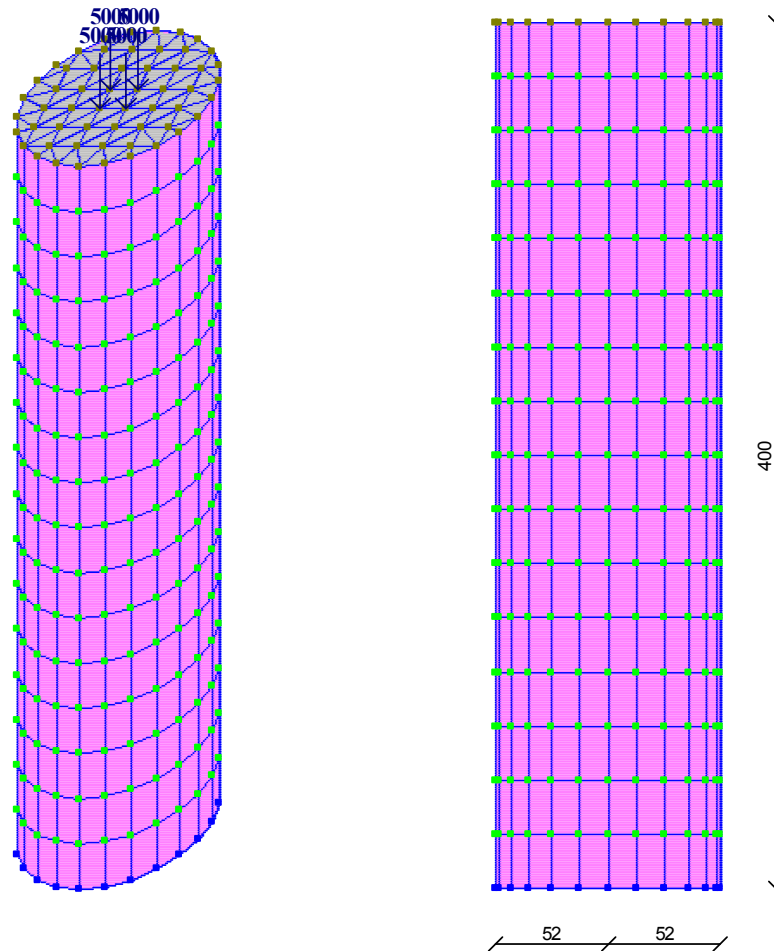


Рис. 3. Конечноэлементная модель короткой ПТБ стойки

Результаты сравнительного анализа НДС ПТБ стойки по безмоментной теории и МКЭ, показавшие близкую сходимость аналитического и численного решений задачи даны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты численных исследований

№ п/п	Наименование показателя	Численные значения, полученные расчетом по:		Сходимость аналитического и численного решений задачи, %
		безмоментной теории	МКЭ	
1	Продольные перемещения, мм	-1,75	-1,77	1,1 %
2	Главные напряжения в бетоне σ_{b3} , МПа	-2,517	-2,356	6,8 %
3	Главные напряжения в бетоне σ_{b2} , МПа	0,0033	0,0031	6,5 %
4	Продольные напряжения σ_{f2} , МПа	-0,139	-0,130	6,9 %
5	Кольцевые напряжения σ_{f1} , МПа	-0,033	-0,031	6,5 %
6	Главные напряжения в бетоне σ_{b3} , МПа	-2,521	-2,360	6,8 %
7	Главные напряжения в бетоне σ_{b2} , МПа	-0,0029	-0,0028	3,6 %
8	Продольные напряжения σ_{f2} , МПа	0,029	0,027	7,4 %
9	Кольцевые напряжения σ_{f1} , МПа	-0,119	-0,111	7,2 %

На основании проведенных конечноэлементных и аналитических исследований НДС короткой ПТБ стойки можно сделать вывод о том, что предложенное авторами аналитическое решение задачи совместного рассмотрения условий работы элементов конструкции по безмоментной теории вместе с опорой на экспериментально получаемые деформативные показатели материалов конструкции с инженерной точностью тождественно численному, получаемому методом конечных элементов. Аналитическое решение, позволяющее в широком диапазоне варьировать фактическими свойствами материалов конструкции и гибко учитывать факторы ее действительной работы, позволяет достаточно для проектной практики достоверно определять расчетные перемещения и напряжения коротких ПТБ стоек, что открывает большие возможности для рационального проектирования основанных на ПТБ стойках стеновых элементов зданий и сооружений [10], индивидуализируя их проектные параметры с учетом положения в здании и стадии жизненного цикла объекта, параметризовать стеновые элементы основанных на ПТБ типовых проектов зданий и сооружений в современных BIM-приложениях и существенно сокращать трудоемкость и стоимость не только проектных, но и строительных работ на объекте.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шевченко А.В., Наумов А.Е., Долженко А.В. Эффективные трубобетонные конструкции для индивидуального жилищного строительства // Экономика, наука, производство: Сборник научных трудов №28. М.: Изд-во «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)», 2015. С. 40–42.
2. Шевченко А.В., Долженко А.В., Наумов А.Е. Исследование прочности трубобетона в пластмассовых трубах на центральное сжатие // Актуальные вопросы образования и науки: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. Часть 4. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания ЮКОМ», 2015, С. 172–175.
3. Dolzhenko A., Naumov A., Shevchenko A., Kara K. Experimental Study of Actual Operation of Plastic Tube Concrete Constructions // Advances in Engineering Research. 2017. 133. Pp.175–180.
4. 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.
5. Вольмир А.С. Устойчивость упругих систем, М., 1963. 984 с.
6. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
7. Филин А.П. Элементы теории оболочек. Изд. 2-е, доп. и перераб. Л.: Стройиздат, 1975. 256 с.
8. Уманский А.А. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Издание второе, в двух книгах, т. 1. Москва, 1972 г.
9. Уманский А.А. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Издание второе, в двух книгах, т. 2. М.: Стройиздат, 1973. 416 с.
10. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.

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 Медведова 20.

Поступила в августе 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.*

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*

NUMERICAL RESEARCHES OF THE STRESSED-STRAINED STATE OF PLASTIC TUBED CONCRETE PIER UNDER CENTRAL COMPRESSION LOAD

Abstract. *Plastic tubed concrete (PTC) piers are considered by modern science as a progressive constructive innovation. It is established that the strength and stiffness of the PTC piers is increased compared to the caseless structures of similar volume and concrete. This makes the design of building structures using the method rational. The increasing of PTC structures' strength under compression may be qualitatively explained by its loading under three-axis compression, but analytical methods and models to calculate the SSS parameters of the structure are not represented in the existing Russian national standards. The lack of theoretical and numerical studies of this type of structural elements is the main reason for further, mathematical modeling and engineering of PTC piers. Generally it could be done based on the considering of the joint work of the cylindrical shell and the concrete core as a main parts of PTC. In the paper the quantitative parameters of SSS during vertical loads for PTC pier were determined using FEM and analytical method according to equivalent stress in Mohr theory of failure. It was figure out the bearing capacity of a short PTC pier under central compression is 25 % higher in resistibility and 15 % higher in rigidity than those of the caseless concrete pier equal in volume. The authors propose the mathematical model of a short PTC pier, have shown applicability of the model for different calculation process.*

Keywords: *plastic tubed concrete, tubed concrete, triaxial compression, civil structures, strength calculation.*

REFERENCES

1. Shevchenko A.V., Naumov A.E., Dolzhenko A.V. Effective tube-concrete constructions for individual housing. Economy, Science, Production: Collection of scientific articles No. 28 - Moscow: Moscow State University of Engineering (MAMI) Publishing House, 2015, pp. 40–42.

2. Shevchenko A.V., Dolzhenko A.V., Naumov A.E., Investigation of the strength of tube concrete in plastic tubes for central compression. Actual problems of education and science: a collection of scientific articles based on international scientific and practical conference. Part 4. Tambov: Ltd Consulting Company YUKOM, 2015, pp. 172–175.

3. Dolzhenko A., Naumov A., Shevchenko A., Kara K. Experimental Study of Actual Operation of Plastic Tube Concrete Constructions. *Advances in Engineering Research*, 133, 2017. pp. 175–180.

4. 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.

5. Volmir A.S. Stability of elastic systems, M., 1963, 984 p.

6. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. M.: Stroyizdat, 1996, 416 p.

7. Filin A.P. Elements of the theory of shells. L.: Stroyizdat, 1975, 256 p.

8. Umansky A.A. Reference book for designer of industrial, residential and public buildings and structures. Second edition, in two books, vol. 1., Moscow, 1972.

9. Umansky A. A. Reference book for designer of industrial, residential and public buildings and structures. Second edition, in two books, vol. 2, M.: Stroyizdat, 1973, 416p.

10. Rzhanitsyn A.R. The theory of calculation of building structures for reliability. M.: Stroiizdat, 1978, 239 p.

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 August 2018

Для цитирования:

Долженко А.В., Наумов А.Е., Шевченко А.В., Стойкович Н. Численные исследования напряженно-деформированного состояния пластикотрубобетонного центрально-сжатого короткого стержня // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №10. С. 23–32. DOI: 10.12737/article_5bd95a716cf0c5.55926144

For citation:

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. DOI: 10.12737/article_5bd95a716cf0c5.55926144