СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.04
DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-184-190

CC BY 4.0

Оригинальная статья /Original article

Ползучесть замкнутого цилиндрического резервуара при гидростатическом давлении

М.Ш. Гатиев[1], Б.М. Язьев[2], Ю.П. Иванова[3], С.В. Клюев[4]
[1]Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН,
[1]364051, г. Грозный, В. Алиева (Старопромысловское шоссе), 21, Россия,
[2]Донской государственный технический университет,
[2]344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, Россия,
[3]Волгоградский государственный технический университет,
[3]400005, Волгоград, пр. им. Ленина, д.28, Россия,
[4]Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
[4]308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, Россия

Резюме. Цель. При построении разрешающих соотношений теории оболочек предполагается справедливость основных допущений о материале рассматриваемой конструкции, который считается однородным, изотропным и вязкоупругим, т.е. подчиняющимся закону Максвелла-Гуревича. Исследованию подлежит полимерная цилиндрическая оболочка, жестко защемленная у основания, подверженная внутреннему гидростатическому давлению. **Метод.** Задача сводится к неоднородному дифференциальному уравнению четвертой степени относительно перемещения срединной поверхности w вдоль оси z. Так как в замкнутом виде представление решения данного уравнения крайне затруднено, то поиск его представлен численно, в частности, методом сеток. Составляющие деформации ползучести $\varepsilon_x^*, \varepsilon_\theta^*, \gamma_{x\theta}^*$ определялись как линейная аппроксимация скорости методом Рунге-Кутта. **Результат.** В процессе расчета оболочки по моментной теории, было обнаружено, что в результате ползучести оболочки тангенциальные напряжения выросли более чем на 12 процентов. **Вывод.** Предложенная методика позволяет моделировать изменение механических свойств оболочки (например, косвенная неоднородность) вызванной воздействием физических полей.

Ключевые слова: замкнутая цилиндрическая оболочка, гидростатическое давление, метод сеток, разрешающее уравнение, метод Рунге-Кутты

Для цитирования: М.Ш. Гатиев, Б.М. Язьев, Ю.П. Иванова, С.В. Клюев. Ползучесть замкнутого цилиндрического резервуара при гидростатическом давлении. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4): 184-190. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-184-190

Creep of a closed cylindrical tank at hydrostatic pressure

M.Sh. Gatiev[1], B.M. Yazyev[2], Yu.P. Ivanova[3], S.V. Klyuev[4]
[1] Kh.I. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
[1]21 V. Alieva (Staropromyslovskoe highway), Grozny 364051, Russia,
[2]Don State Technical University,
[2] Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russia,
[3]Volgograd State Technical University,
[3] 28 Lenina Ave., Volgograd 400005, Russia,
[4] V.G. Shukhova Belgorod State Technological University,
[4] 46 Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia

Abstract. Objective. When constructing the resolving relations of the theory of shells, the validity of the basic assumptions about the material of the structure under consideration is assumed, which is considered homogeneous, isotropic and viscoelastic, i.e. obeying the Maxwell-Gurevich law. The subject to study is a polymer cylindrical shell, rigidly clamped at the base and subject to internal hydrostatic pressure. **Method.** The problem is reduced to an inhomogeneous differential equation of the fourth degree with respect to the displacement of the middle surface w along the z axis. Since the closed form representation of the solution to this equation is extremely difficult, the search for it is presented numerically, in particular, using the grid method. The creep strain components $\varepsilon_x^*, \varepsilon_\theta^*, \gamma_{x\theta}^*$ were determined as a linear approximation of the velocity by the Runge-Kutta method. **Result.** In the process of calculating the shell using moment theory, it was found that as a result of shell creep, tangential stresses increased by more than 12 percent. **Conclusion.** The proposed technique makes it possible to simulate changes in the mechanical properties of the shell (for example, indirect heterogeneity) caused by the influence of physical fields.

Key words: closed cylindrical shell, hydrostatic pressure, grid method, resolving equation, Runge-Kutta method

For citation: M.Sh. Gatiev, B.M. Yazyev, Yu.P. Ivanova, S.V. Klyuev. Creep of a closed cylindrical tank at hydrostatic pressure. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4): 184-190. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-184-190

Введение. Оболочечные конструкции в виде полых тонкостенных цилиндров из стали, полимеров, керамики используются в различных отраслях народного хозяйства. При этом отметим, что они могут подвергаться длительным механическим нагрузкам, которые как следствие вызывают деформации ползучести или если это полимеры – высокоэластические деформации. Поэтому расчеты оболочек с учетом вышеуказанных явлений необходимо вести с учетом возможности развития деформации ползучести. Если речь идет о конструкций или их элементов из композита, то температурные воздействия приводят к косвенной неоднородности и вызывает высокоэластические деформации.

Очевидно, что использование конструкционных полимеров это будущее, но есть основной недостаток – это ограничение по температуре и реология связующего. Поэтому попытки расчетов таких полимерных конструкций с учетом ползучести интересны и с точки зрения прогнозирования остаточного ресурса рассматриваемой конструкции.

Постановка задачи. На (рис.1) приведена расчетная схема рассматриваемой задачи. Граничные условия можно описать следующим образом: верхний торец свободен от нагрузок (момент и поперечная сила равны нулю), а нижний торец защемлен (перемещения срединной поверхности и угол поворота равны нулю).

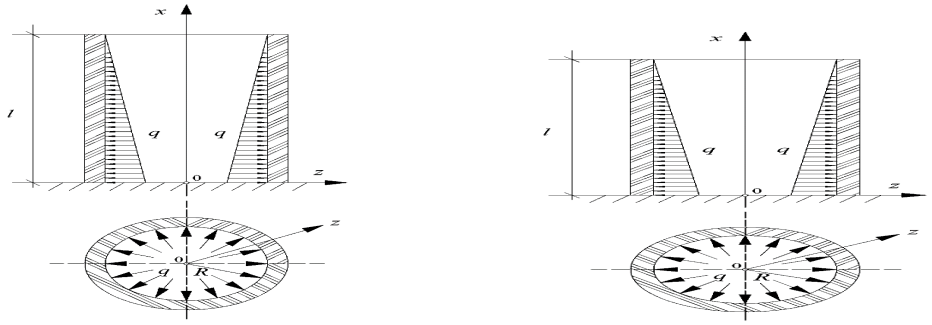

Рис.1. Расчетная схема замкнутой цилиндрической оболочки
Fig.1. Design diagram of a closed cylindrical shell

Задача осесимметричная и соответственно не зависят от полярного угла θ и как следствие, все производные по данному параметру в статических, геометрических и физических уравнениях равны нулю. Сдвигающие усилия S и крутящий момент H в оболочке также обращаются в нуль. Гидростатическое давление на стенку резервуара меняется по линейному закону:

$$z_{,} = \gamma(l - z);$$

здесь γ – удельный вес жидкости, l – высота резервуара.

Методы исследования. Для вывода разрешающего уравнения приведем основные соотношения:

1. Статические уравнения [2]

$$\frac{1}{R}\cdot\begin{Bmatrix} R\frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial\theta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial\theta} & R\frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial\theta} & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & -1 & 0 & R\frac{\partial^2}{\partial x^2} & \frac{1}{R}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2} & 2\frac{\partial^2}{\partial x\partial\theta} \end{Bmatrix}\begin{Bmatrix} N_x \\ N_\theta \\ S \\ M_x \\ M_\theta \\ H \end{Bmatrix}+\begin{Bmatrix} X_\nu \\ Y_\nu \\ Z_\nu \end{Bmatrix}=0 \tag{1}$$

Здесь N_x, N_θ и S – продольные и сдвигающая силы соответственно; M_x, M_θ и H – изгибающие и крутящий моменты соответственно. X_ν, Y_ν, Z_ν – компоненты поверхностной нагрузки.

Геометрические соотношения Коши (связь деформаций и перемещений) можно представить, как [2]:

$$\begin{cases} \varepsilon_x=\dfrac{\partial u_0}{\partial x}-z\dfrac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \varepsilon_y=\left(\dfrac{1}{R}\dfrac{\partial v_0}{\partial\theta}+\dfrac{w}{R}\right)+\dfrac{z}{R^2}\left(\dfrac{\partial v_0}{\partial\theta}-\dfrac{\partial^2 w}{\partial\theta^2}\right) \\ \gamma_{x\theta}=\left(\dfrac{1}{R}\dfrac{\partial u_0}{\partial\theta}+\dfrac{\partial v_0}{\partial x}\right)+\dfrac{z}{R}\left(\dfrac{\partial v_0}{\partial x}-2\dfrac{\partial^2 w}{\partial\theta\partial x}\right) \end{cases} \tag{2}$$

Перемещения с индексом «0» - деформации точек срединной поверхности, а деформации w связаны с изгибом и кручением срединной поверхности в соответствующих направлениях.

Что касается физических соотношений, то с учетом вынужденных деформаций они имеют вид [3-5]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{x\theta} \end{Bmatrix}=\frac{1}{E}\begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_\theta \\ \tau_{x\theta} \end{Bmatrix}+\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^* \\ \varepsilon_\theta^* \\ \gamma_{x\theta}^* \end{Bmatrix} \tag{3}$$

здесь $\varepsilon_x^*, \varepsilon_\theta^*, \gamma_{x\theta}^*$ – деформации ползучести;

Напряжения через деформации запишем так:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_\theta \\ \tau_{x\theta} \end{Bmatrix}=\frac{E}{1-\nu^2}\left(\begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \gamma_{x\theta}^0 \end{Bmatrix}+z\begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \chi_x \\ \chi_\theta \\ \chi_{x\theta} \end{Bmatrix}-\begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^* \\ \varepsilon_\theta^* \\ \gamma_{x\theta}^* \end{Bmatrix}\right) \tag{4}$$

Здесь изменения кривизн:

$$\begin{Bmatrix} \chi_x \\ \chi_\theta \\ \chi_{x\theta} \end{Bmatrix}=\frac{1}{R^2}\begin{bmatrix} -R^2\dfrac{\partial^2}{\partial x^2} & 0 \\ -\dfrac{\partial^2}{\partial\theta^2} & \dfrac{\partial}{\partial\theta} \\ -\dfrac{\partial^2}{\partial x\partial\theta} & \dfrac{R}{2}\dfrac{\partial}{\partial\theta} \end{bmatrix}\{w \quad v_0\};$$

Продольные и перерезывающие усилия представляют собой:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_\theta \\ S \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_\theta dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{x\theta} dz \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \gamma_{x\theta}^0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} N_x^* \\ N_\theta^* \\ S^* \end{Bmatrix}; \quad (5)$$

где

$$\begin{Bmatrix} N_x^* \\ N_\theta^* \\ S^* \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^* \\ \varepsilon_\theta^* \\ \gamma_{x\theta}^* \end{Bmatrix} dz \right\};$$

Что касается крутящего и изгибающего момента, то здесь они представлены как:

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_\theta \\ H \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_\theta dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{x\theta} dz \end{Bmatrix} = D \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \chi_x \\ \chi_\theta \\ \chi_{x\theta} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} M_x^* \\ M_\theta^* \\ H^* \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Здесь $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость.

$$\begin{Bmatrix} M_x^* \\ M_\theta^* \\ H^* \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^* \\ \varepsilon_\theta^* \\ \gamma_{x\theta}^* \end{Bmatrix} z dz \right\};$$

Обсуждение результатов. Рассматривая осесимметричную постановку задачи, все уравнения становятся более простыми (сдвигающее усилие и крутящий момент обращаются в нуль), в частности, из статических уравнений останутся:

$$\begin{cases} \frac{\partial N_x}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} - \frac{N_\theta}{R} + q = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Продольные силы и изгибающий момент будут иметь вид:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_\theta \\ M_x \end{Bmatrix} = \frac{Eh}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} \frac{d}{dx} & \frac{\nu}{R} \\ \nu\frac{d}{dx} & \frac{1}{R} \\ 0 & \frac{h^2}{12}\frac{d^2}{dx^2} \end{bmatrix} \{u_0 \quad w\} - \begin{Bmatrix} N_x^* \\ N_\theta^* \\ M_x^* \end{Bmatrix}; \tag{8}$$

Первое слагаемое из выражения (8) выразим как:

$$\frac{du_0}{dx} = -\frac{\nu w}{R} + \frac{(1-\nu^2)}{Eh} N_x^* \tag{9}$$

Используя из (8) второе соотношение, получим:

$$N_\theta = \frac{Ehw}{R} + \nu N_x^* - N_\theta^* \tag{10}$$

И окончательно, поставляя третье уравнение (8) и (10) во второе уравнение (7) получим основное дифференциальное уравнение IV порядка:

$$\frac{d^4w}{dx^4} + \frac{Ehw}{DR^2} = \frac{1}{D}\left[q - \frac{d^2M_x^*}{dx^2} + \frac{1}{R}(N_\theta^* - \nu N_x^*)\right];$$

Для определения неизвестных констант после интегрирования, добавим граничные условия на торцах оболочки:

$$\begin{cases} x = 0;\ \dfrac{dw}{dx} = 0;\ w = 0; \\ x = h;\ \ M_x = -D\dfrac{d^2w}{dx^2} - M_x^* = 0, \qquad Q_x = \dfrac{dM_x}{dx} = -D\dfrac{d^3w}{dx^3} - \dfrac{dM_x^*}{dx}. \end{cases}$$

Решение будем искать численно, методом сеток [6-10]. Подобную задачу рассматривали проф. Чепурненко А.С. и соискатель А.А. Савченко для ПЭВП методом конечных элементов. Для сравнения нами выполнен расчет с такими же исходными данными [3]. Деформации ползучести $\varepsilon_x^*, \varepsilon_\theta^*, \gamma_{x\theta}^*$ определялись по методике, приведенной в работе [4,7-12]. Исходные данные сведены в табл.1.

Таблица 1. Исходные параметры
Table 1. Initial parameters

	Упругие константы/ Elastic constants		Реологические параметры/Rheological parameters		
	$E = 148\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$	$\nu = 0.3$	$E_\infty = 599\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$	$m^* = 1.3\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$	$\eta_0^* = 0{,}91 \cdot 10^5\ \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \cdot \text{мин}$
	$h = 3$ см, $l = 300$ см, $R = 200$ см, $\gamma = 10$ кН/м^3.				

На рис. 2 представлены график изменения во времени максимальной величины прогиба w. С течением 10 часов, в процессе ползучести, произошло увеличение максимального прогиба на 24%.

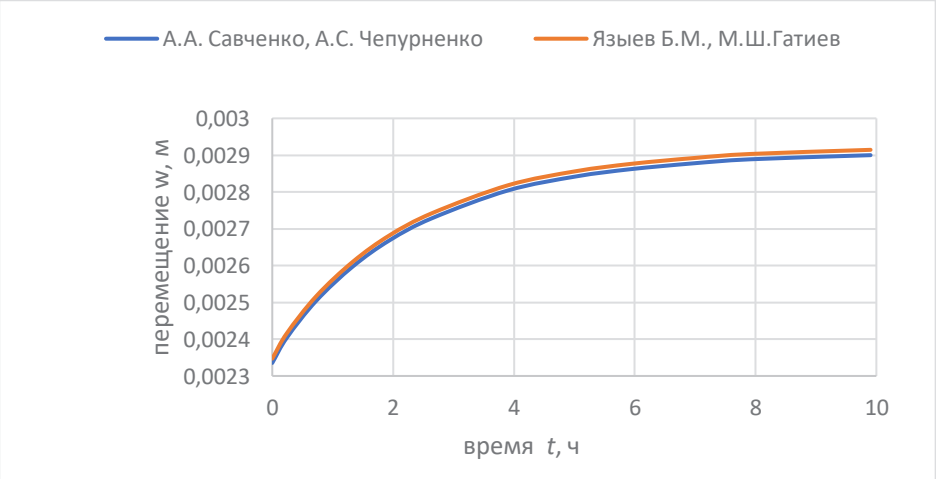

Рис. 2. Изменение максимального прогиба во времени
Fig. 2. Change in maximum deflection over time

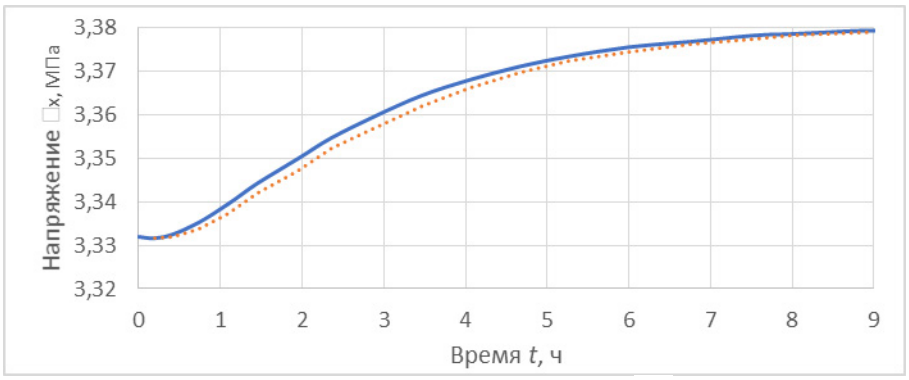

Рис. 3. График роста напряжений σ_x во времени
Fig. 3. Graph of stress growth σ_x over time

На рис. 3-4 приведено соответственно изменение напряжений σ_x и σ_θ в основании при $z = -h/2$. Анализ результатов показал, что напряжения σ_x остаются практически постоянными, а напряжения σ_θ выросли чуть более чем на 12%.

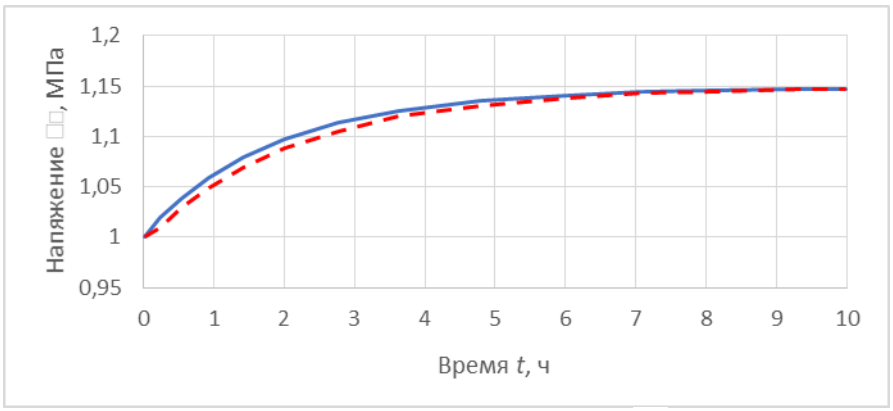

Рис. 4. Эволюционный рост напряжений σ_θ во времени
Fig. 4. Evolutionary growth of stresses σ_θ over time

Вывод. Разработанная методика позволяет моделировать работу цилиндрической оболочки под действием гидростатического давления из любого материала в условиях ползучести. Результаты могут быть использованы при расчете напряженно-деформированного состояния указанных конструкций для любых граничных условий и внешних воздействий.

Библиографический список:

1. Рабинович, А.Л. Введение в механику армированных полимеров [Текст]/ А. Л. Рабинович. – М.: Наука, 1970. – 483 с.
2. Петров В. В. Расчет неоднородных по толщине оболочек с учётом физической и геометрической нелинейностей //Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – №. 1. – С. 112-117.
3. Yazyev B. M., Chepurnenko A. S., Saibel A. V. Modeling of stress-strain state of thick concrete slabs taking the creep of concrete into account //International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – Т. 13. – №. 4. – С. 140-148.
4. Дудник А.Е., Чепурненко А.С., Никора Н.И., Денего А.С. Плоское деформированное состояние полимерного цилиндра в условиях термовязкоупругости // Инженерный вестник Дона, 2015, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3063.
5. Andreev V.I., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S. On the bending of a thin polymer plate at nonlinear creep // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 900. pp. 707-710.
6. Andreev V.I., Chepurnenko A.S., Yazyev B.M. Energy method in the calculation stability of compressed polymer rods considering creep // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1004-1005. pp. 257-260.
7. Язьев Б.М., Чепурненко А.С., Литвинов С.В., Козельская М.Ю. Напряженно-деформированное состояние предварительно напряженного железобетонного цилиндра с учетом ползучести бетона // Научное обозрение. 2014. № 11. С. 759-763.
8. Козельская М.Ю., Чепурненко А.С., Литвинов С.В. Применение метода Галёркина при расчете на устойчивость сжатых стержней с учетом ползучести // Инженерный вестник Дона, 2013, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1714.

9. Юхнов И.В., Язьев Б.М., Чепурненко А.С., Литвинов С.В. Продольный изгиб гибкой железобетонной стойки при нелинейной ползучести //Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 182.
10. Чепурненко А.С., Юхнов И.В., Аваков А.А., Никора Н.И. Устойчивость дюралюминиевой арки при высокотемпературной ползучести//Научное обозрение. 2014. №10-2. С. 406-410.
11. Chepurnenko A.S., Yazyev B.M., Savchenko A.A. Calculation for the circular plate on creep considering geometric nonlinearity. Procedia Engineering. 2016, Vol. 150. pp. 1680–1685.
12. Chepurnenko A.S., Andreev V.I., Beskopylny A.N., Jazyev B.M. Determination of Rheological Parameters of Polyvinylchloride at Different Temperatures//MATEC Web of Conferences. 2016. URL: matecconferences.org/articles/matecconf/pdf/2016/30/matecconf_smae2016_06059.pdf.

References

1. Rabinovich, A.L. Introduction to the mechanics of reinforced polymers [Text] M.: Nauka, 1970; 483 (In Russ).
2. Petrov V.V. Calculation of shells of non-uniform thickness taking into account physical and geometric nonlinearities. *Academia. Architecture and construction*. 2016; 1: 112-117. (In Russ).
3. Yazyev B. M., Chepurnenko A. S., Saibel A. V. Modeling of stress-strain state of thick concrete slabs taking the creep of concrete into account. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering.* 2017; 13(4): 140-148.
4. Dudnik A.E., Chepurnenko A.S., Nikora N.I., Denego A.S. Flat deformed state of a polymer cylinder under thermoviscoelastic conditions. *Engineering Bulletin of the Don,* 2015;2 URL: vdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3063. (In Russ).
5. Andreev V.I., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S. On the bending of a thin polymer plate at nonlinear creep. *Advanced Materials Research.* 2014; 900: 707-710.
6. Andreev V.I., Chepurnenko A.S., Yazyev B.M. Energy method in the calculation stability of compressed polymer rods considering creep. *Advanced Materials Research*. 2014; 1004-1005: 257-260.
7. Yazyev B.M., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V., Kozelskaya M.Yu. Stress-strain state of a prestressed reinforced concrete cylinder taking into account concrete creep. *Scientific review.* 2014;11:759-763. (In Russ).
8. Kozelskaya M.Yu., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V. Application of the method Galerkin when calculating the stability of compressed rods taking into account creep. *Engineering Bulletin of the Don*, 2013; 2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1714. (In Russ).
9. Yukhnov I.V., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V. Longitudinal bending of a flexible reinforced concrete pillar under nonlinear creep. Modern problems of science and education. 2014; 5:182. (In Russ).
10. Chepurnenko A.S., Yukhnov I.V., Avakov A.A., Nikora N.I. Stability of a duralumin arch under high-temperature creep. *Scientific Review*. 2014;10-2:406-410. (In Russ).
11. Chepurnenko A.S., Yazyev B.M., Savchenko A.A. Calculation for the circular plate on creep considering geometric nonlinearity. *Procedia Engineering.* 2016; 150: 1680–1685.
12. Chepurnenko A.S., Andreev V.I., Beskopylny A.N., Jazyev B.M. Determination of Rheological Parameters of Polyvinylchloride at Different Temperatures// MATEC Web of Conferences. 2016. URL:matecconferences.org/articles/matecconf/pdf/2016/30.

Сведения об авторах:

Гатиев Магомед Шамильевич, аспирант, ORCID: 0000-0002-4773-1420, guvho@mail.ru

Язьев Батыр Меретович, доктор технических наук, профессор профессор кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; ps62@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-5205-1446

Иванова Юля Павловна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений»; Ypi26@ mail.ru; ORCID: 0009-0009-8082-0191

Клюев Сергей Васильевич, доктор технических наук, доцент профессор кафедры «Теоретической механики и сопротивления материалов»; klyuev@yandex.ru; ORCID:0000-0002-1995-6139

Information about authors:

Magomed Sh. Gatiev, Graduate Student, ORCID: 0000-0002-4773-1420, guvho@mail.ru

Batyr M. Yazyev, Dr. Sci. (Eng), Prof., Prof. of the Department of "Structural Mechanics and Theory of Structures"; ps62@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-5205-1446

Yulya P. Ivanova, Cand. Sci. (Eng), Senior Lecturer of the Department of Construction and Operation of Transport Facilities; Ypi26@ mail.ru; ORCID: 0009-0009-8082-0191

Sergey V. Klyuev, Dr. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Prof. of the Department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials; klyuev@yandex.ru; ORCID:0000-0002-1995-6139

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 09.11.2023.

Одобрена после рецензирования / Reviced 20.11.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 20.11.2023.