

6. Гераськина И.Н. Инвестиционно-строительный комплекс России-синергетическая система. // Экономический анализ: теория и практика. 2017 г. т.16, вып. 2, С.328-339.
7. Герасимов К.Б. Методология развития управления, экономики и образования. 2022 г. С. 32-41.
8. Почему растут цены на недвижимость. URL: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/248666230>.
9. <https://astrahan.restate.ru/graph/>.
10. Мобилизационные период. URL: <https://helpiks.org/5-87219.html>.
11. Мобилизация в строительстве – это ускорение процессов. URL: <http://www.csinvestroy.ru/stroyka/mobilizatsiya-v-stroitelstve-eto-uskorenie-protsessov.html>.
12. Гордонова Н.В. Взаимодействие государства и инвестиционно-строительного комплекса: проблемы и решения. 2015 г.
13. Россия переходит на мобилизационную экономику URL: <https://ruinform.com/page/rossija-perehodit-na-mobilizacionnuju-ekonomiku>.
14. Мобилизационная экономика России. URL: <https://aurora.network/articles/6-jekonomika/80426-mobilizatsionnaja-jekonomika-rossii-ch-2>.
15. «Мобилизация в строительстве. URL: <https://likinvestroy.ru/articles/Mobilizatsiya-v-stroitelstve/>.

© В. К. Лихобабин, М. Н. Емельянова, А. И. Самойличенко, Е. В. Солякова, К. В. Терноскова

Ссылка для цитирования:

Лихобабин В. К., Емельянова М. Н., Самойличенко А. И., Солякова Е. В., Терноскова К. В. Особенности современного развития инвестиционного строительного комплекса // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 2 (40). С. 78–83.

УДК 539.41, 69.07

DOI 10.52684/2312-3702-2022-40-2-83-87

РЕАЛИЗАЦИЯ ИНКРЕМЕНТАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ТЕКУЧЕСТИ В СФЕРИЧЕСКОМ РЕЗЕРВУАРЕ

С. Ю. Калашников, Е. В. Гурова

Калашников Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экспертиза и эксплуатация объектов недвижимости», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация, тел.: +7(8442)96-99-28; e-mail: kalashnikov@vstu.ru;

Гурова Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Экспертиза и эксплуатация объектов недвижимости», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация, тел.: +7(8442)96-99-28; e-mail: eeon@vgasu.ru

Проведено развитие ранее предложенных теоретических методов инкрементальной модели деформирования материала. Рассмотрено применение модифицированных инкрементальных условий пластичности в осесимметричной задаче о сферическом резервуаре, нагруженном внутренним и наружным давлением. Неоднородное распределение напряжений характеризуется градиентами напряжений вдоль радиусов и стеснением деформаций сдвига по площадкам скольжения. Это приводит к повышенным предельным градиентным напряжениям, которые зависят от размера внутренней полости. Используемые условия пластичности носят аналитический характер, а не сравнительный как классические критерии текучести, что позволяет вычислять предельное упругое градиентное напряжение. Для резервуаров реальных размеров установлены границы увеличения при различных законах аппроксимации градиентного эффекта стеснения деформаций. Уточненная оценка диапазона упругой работы материала может привести к снижению материалоемкости.

Ключевые слова: условие пластичности, сферический резервуар, градиент напряжений, стеснение деформаций, концентрация напряжений.

IMPLEMENTATION OF INCREMENTAL YIELD CONDITIONS IN SPHERICAL COORDINATES

S. Yu. Kalashnikov, Ye. V. Gurova

Kalashnikov Sergey Yuryevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Expertise and Operation of Real Estate", Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, тел.: +7(8442)96-99-28; e-mail: kalashnikov@vstu.ru;

Gurova Yelena Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Expertise and Operation of Real Estate Objects, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, тел.: +7(8442)96-99-28; e-mail: eeon@vgasu.ru

The development of the previously proposed theoretical methods of the incremental model of material deformation is carried out. The application of modified incremental plasticity conditions in the axisymmetric problem of a spherical tank loaded with internal and external pressure is considered. The inhomogeneous stress distribution is characterized by stress gradients along the radii and tightness of shear deformations along the slip sites. This leads to increased limiting gradient stresses, which depend on the size of the internal cavity. The plasticity conditions used are analytical in nature, and not comparative as classical yield criteria, which makes it possible to calculate the ultimate elastic gradient stress. For tanks of real sizes, the limits of magnification have been established for various laws of approximation of the gradient effect of constraint of deformations. A refined estimate of the elastic range of the material can lead to a decrease in material consumption.

Keywords: plasticity condition, spherical reservoir, stress gradient, strain constraint, stress concentration.

Любая теория прочности при расчете конструкций направлена на решение задачи обеспечения параметров безотказной эксплуатации и одновременном снижении материалоемкости. Обеспечение безопасной эксплуатации на всех стадиях жизненного цикла сооружения достигается оценкой допустимого предельного состояния. Например, для конструкций из пластичных материалов таким состоянием является наступление пластических деформаций в опасном сечении, где достигнуты наибольшие значения напряжений. При этом вычисляемое напряженное состояние конструкции сравнивается с расчетным сопротивлением материала. Предельный этап деформирования нормируется достижением максимальным напряжением величины, меньшей расчетного сопротивления материала, что является по сути практической реализацией условия пластичности. Подобные расчетные модели основаны на физических законах деформирования, полученных путем стандартного испытания образцов на одноосное растяжение. В области упругих деформаций эта модель удовлетворяет критерий практики и дает простейшую линейную математическую аппроксимацию. Однако анализ экспериментальных данных [1–5] показывает, что предел текучести материала, определенный из подобных опытов, не позволяет достоверно решать задачи прочности при неоднородном распределении напряжений, когда имеет место стеснение деформаций сдвига по площадкам скольжения в областях с градиентами напряжений, что приводит к эффекту повышения предельных упругих напряжений. В настоящей работе применяются инкрементальные условия пластичности для однородного изотропного материала, обладающего площадкой текучести [6–9]. В них используется форма критерия Мизеса, но начало текучести определяется достижением максимальным напряжением в опасной точке некоторого повышенного градиентного значения, большего предела текучести материала. Это увеличение будет иметь тем большую степень, чем более неоднородным является распределение напряжений в окрестностях рассматриваемой точки и для его аппроксимации предлагается асимптотическая зависимость:

$$T_{gr} = T_0 + (T_m - T_0) \frac{g}{\lambda_{T,g} + g}, \quad (1)$$

записанная в интенсивностях касательных напряжений. В (1) $g = grad T / T$ представляет собой меру неоднородности напряженного состояния; T_m – наибольшее из напряжений, возможных при неоднородном напряженном состоянии, которое принимается равным $1,5T_0$; $\lambda_{T,g}$ – упругая характеристика материала с размерно-

стью, обратной длине. В [9, 10] из экспериментальных данных [2] для изгибаемых стальных балочек получено $\lambda_{T,g} = 20,1587 \text{ м}^{-1}$.

Предложенный градиентный подход реализован в решении задач прочности стержневых элементов при изгибе [9–13] и внецентренном сжатии [14]. Отличительной особенностью применения этого условия является получение в качестве решения либо разрешающего уравнения, либо алгебраического выражения, имеющих однозначную трактовку: в зависимости от геометрических параметров и расчетной схемы наступлению пластических деформаций в опасных сечениях соответствует единственно возможное значение повышенного градиентного напряжения.

Сферический резервуар наружным радиусом b и внутренним радиусом a в общем случае нагружен внутренним p и наружным q давлениями (рис. 1). Используем сферическую систему координат с началом в центре [15, 16]. Напряженное состояние в стенках сосуда является неоднородным и при действии внутреннего давления согласно известному решению Ламе определяется выражениями [17, 18]:

$$\sigma_r = C \cdot \frac{b^3 - r^3}{r^3}; \quad \sigma_\varphi = \sigma_\theta = -C \cdot \frac{2r^3 + b^3}{2r^3}, \quad (2)$$

где

$$C = \frac{pa^3}{a^3 - b^3}.$$

Вследствие симметрии

$$\sigma_\varphi = \sigma_\theta, \tau_{r\varphi} = \tau_{r\theta} = \tau_{\varphi\theta} = 0$$

интенсивность касательных напряжений для любой точки:

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\varphi)^2},$$

или с учетом (2):

$$T = \sqrt{3C^2 b^3} / 2r^3. \quad (3)$$

В рассматриваемом случае:

$$grad T = \left| \frac{\partial T}{\partial r} \right| = \frac{3\sqrt{3C^2 b^3}}{2r^4},$$

что определяет функцию меры неоднородности напряженного состояния \wedge

$$\frac{grad T}{T} = 3/r.$$

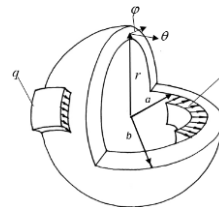


Рис. 1. Расчетная схема сферического резервуара

Подставляя этот результат в зависимость (1) для условия пластичности и, учитывая, что первые пластические деформации появятся на внутренней поверхности резервуара при $r = a$, где значение T максимально, получим аналитическую зависимость:

$$T_{gr} = T_0 \left(1 + \frac{3}{2\lambda_{r,g} a + 6} \right), \quad (4)$$

которую можно истолковать следующим образом: каждому резервуару с радиусом внутренней полости a будет соответствовать определенное значение интенсивности касательных напряжений T_{gr} , при котором начинаются пластические деформации. Величину соответствующего внутреннего давления определим, приравняв правые части (3) и (4). Обозначив через $k = a/b$ относительную толщину стенки, и, перейдя к нормальным напряжениям, окончательно получим:

$$p_{gr} = \frac{2}{3} \sigma_0 (1 - k^3) \frac{2a\lambda_{r,g} + 9}{2a\lambda_{r,g} + 6}. \quad (5)$$

При этом из граничных условий имеем на внутренней грани $\sigma_r^{gr} = -p_{gr}$, тогда из (2) и (3) следует:

$$\sigma_\phi^{gr} = \sigma_\theta^{gr} = \frac{1}{3} \sigma_0 (1 + 2k^3) \frac{2a\lambda_{r,g} + 9}{2a\lambda_{r,g} + 6}.$$

При использовании классического условия Мизеса $T|_{r=a} = T_0$, что определяет соответствующее давление:

$$p_0 = \frac{2}{3} \sigma_0 (1 - k^3). \quad (6)$$

При этом на внутренней грани $\sigma_r = -p_0$, а

$$\sigma_\phi = \sigma_\theta = \frac{1}{3} \sigma_0 (1 + 2k^3).$$

Сравнивая (5) и (6), убеждаемся, что область упругой работы материала вследствие стеснения деформаций увеличивается независимо от относительной толщины стенок. При этом увеличение предельного напряжения никак не зависит от толщины стенки, что принципиально отличает резервуар от изгибаемых брусьев [6–13], где высота поперечного сечения доминантно определяет степень стеснения деформаций.

Кроме (1) для описания эффекта стеснения могут использоваться другие функции для аппроксимации, которая по определению позволяет исследовать качественные свойства описываемого объекта, ориентируясь на числовые характеристики, сводя задачу к изучению более простых или удобных объектов [19]. Достоверно известно из экспериментальных данных по изгибу брусьев [2] единственное значение повышенного напряжения σ_{gr} , которое в предлагаемой нами модели должно находиться в пределах $0 \leq \sigma_{gr} \leq 1,5\sigma_0$. В этих границах необходимо подобрать для технической аппроксимации достаточно простые в математическом смысле алгебраические зависимости, содержащие не более одного коэффициента аппроксимации, связанного с экспериментальными данными.

В наиболее общем виде для рассматриваемой задачи это можно записать как

$$T_{gr} = T_0 [1 + \lambda f(r)], \quad (7)$$

где λ – коэффициент аппроксимации, а $f(r)$ – некоторая алгебраическая функция радиуса. Тогда в обобщенном случае (5) приобретает вид:

$$p_{gr} = \frac{2}{3} \sigma_0 (1 - k^3) [1 + \lambda f(r)], \quad (8)$$

а

$$p_{gr} / p_0 = 1 + \lambda f(r). \quad (9)$$

В [20–21] предложены некоторые функции, которые применительно к рассматриваемой задаче приводят (9) к следующим зависимостям, в которых функция $f(r)$ приведена к конкретному значению радиуса внутренней полости, а коэффициенты аппроксимации выражены в численной форме:

- дробно-линейная

$$p_{gr} / p_0 = \frac{20,1587 \cdot 2a + 9}{20,1587 \cdot 2a + 6}; \quad (10)$$

- иррациональная

$$p_{gr} / p_0 = 1 + \frac{0,1706}{\sqrt[4]{a}}; \quad (11)$$

- степенная

$$p_{gr} / p_0 = \frac{3\sqrt[4]{1,093} - 1}{2\sqrt[4]{1,093}}; \quad (12)$$

- логарифмическая

$$p_{gr} / p_0 = 1 + 0,21 \lg \frac{0,9297a + 3}{0,9297a}; \quad (13)$$

или

$$p_{gr} / p_0 = 1 + 0,1 \ln \frac{1,5191a + 3}{1,5191a}; \quad (14)$$

- тригонометрическая

$$\frac{p_{gr}}{p_0} = 1,5 - 0,5tg \frac{27,8565a}{27,8565a + 3} \cdot \frac{\pi}{4}. \quad (15)$$

При использовании любой из этих зависимостей независимо от толщины стенки при $a \rightarrow 0$; $p_{gr} / p_0 \rightarrow 1,5$; при больших значениях a $p_{gr} / p_0 \rightarrow 1$. Задание как самой аппроксимирующей зависимости, так и коэффициентов связано с требуемой точностью получения результата. В этом смысле вычислительная модель, ее сложность и получаемый результат должны находиться в удовлетворительной согласованности. В самом деле, корректные результаты в обозначенном диапазоне превышения нагрузок получаются для (11) – при $a \geq 0,005$ м; для (12) – при $a \geq 0,014$ м; для (13) – при $a \geq 0,013$ м; для (14) – при $a \geq 0,014$ м. Неактуальность этого компромисса очевидна: резервуаров с таким размером внутренней полости не существует.

Численные значения превышений по (10)–(15) для резервуаров с реальными значениями внутренней полости сведены в таблицу. В нижних строках таблицы приведены результаты математической обработки массива значений по аналогии с набором прямых экспериментальных данных. Среднее арифметическое значение для числа функций $n = 6$ определяет абсолютную

случайную погрешность между аппроксимирующими функциями. Заданная надежность попадания составляет $p = 0,95$, коэффициент Стьюдента $t = 2,4$. Окончательный результат в последней строке с учетом округления означает, что вариации искомого нами превышения несущей способности лежит в доверительном интервале с вероятностью, большей 95 %.

На рисунке 2 по окончательным результатам последней строки таблицы для резервуаров из материала с $\sigma_0 = 260 \text{ МПа}$, $\lambda_{r,g} = 20,1587 \text{ м}^{-1}$ построены кривые, которые показывают, что при

реальных размерах $a = 0,5 \div 5 \text{ м}$ превышение составляет соответственно 14 ÷ 4 %.

Численные значения параметра материала (или коэффициента аппроксимации) для (11)–(15) соответственно составляют:

$$\begin{aligned} \lambda_{up} &= 0,1706 \left[\text{м}^{1/4} \right]; & \lambda_{cm} &= 1,093 \left[\text{м}^{1/a} \right]; \\ \lambda_{log} &= 0,9297 \left[\text{м}^{-1} \right]; & \lambda_{in} &= 1,5191 \left[\text{м}^{-1} \right]; \\ \lambda_g &= 27,8565 \left[\text{м}^{-1} \right]. \end{aligned}$$

Таблица

Значения увеличения p_{gr} / p_0 для различных аппроксимаций по (10)–(15)

p_{gr} / p_0	Внутренний радиус a , м					
	5,0	1,0	0,5	0,25	0,1	0,01
по (10)	1,015	1,065	1,115	1,187	1,299	1,469
по (11)	1,114	1,171	1,203	1,241	1,303	1,5
по (12)	1,009	1,043	1,081	1,15	1,295	1,499
по (13)	1,043	1,125	1,174	1,299	1,304	1,5
по (14)	1,033	1,109	1,16	1,218	1,303	1,5
по (15)	1,016	1,071	1,123	1,194	1,301	1,467
среднее	1,038	1,097	1,143	1,203	1,301	1,489
абсолютная случайная погрешность	0,038	0,046	0,043	0,033	0,002	0,014
окончательный результат	1,04±0,04	1,1±0,05	1,14±0,04	1,2±0,03	1,3±0	1,49±0,01

Под действием наружного давления q напряженное состояние [15]:

$$\sigma_r = B \frac{r^3 - a^3}{r^3}; \quad \sigma_\phi = \sigma_\theta = B \frac{2r^3 + a^3}{2r^3} \quad (16)$$

даёт:

$$T = \sqrt{3B^2 a^3} / 2r^3,$$

где

$$B = \frac{qb^3}{a^3 - b^3},$$

тогда

$$\text{grad}T = \left| \frac{\partial T}{\partial r} \right| = 3\sqrt{3B^2 a^3} / 2r^4,$$

но, как и в предыдущем случае при внутреннем давлении,

$$\frac{\text{grad}T}{T} = \frac{3}{r}.$$

Так как $T|_{r=a} > T|_{r=b}$, текучесть все равно наступает на внутренней грани резервуара, и подстановка последнего выражения в (1) вновь приводит к соотношению (4) с той же трактовкой. Величина теперь уже наружного давления q_{gr} выражается аналогично и совпадает с правой частью (5), но при этом внутри на поверхности полости $\sigma_r^{gr} = 0$, а из (16) следует:

$$\sigma_\phi^{gr} = -\sigma_0 \frac{2a\lambda_{T,g} + 9}{2a\lambda_{T,g} + 6}. \quad (17)$$

При обычном подходе $T|_{r=a} = T_0$, что определяет q_0 аналогично выражению (6) и даёт $\sigma_r = 0$, а $\sigma_\phi = -\sigma_0$.

Последние результаты можно использовать для оценки эффекта концентрации напряжений у сферической полости в шаре достаточно больших размеров при $a \rightarrow 0$. В этом случае $k \rightarrow 0$ и решение не связано с размером внешнего контура. Тогда из (16) приходим к известному решению $\sigma_\phi = -1,5q$. В силу этого соображения и (5) из (17) следует, что сжимающие окружные напряжения по долготе и полярному расстоянию для достижения начала пластического течения, в отличие от классического решения, должны превосходить величину предела текучести, а именно: $\sigma_\phi = \sigma_\theta|_{r=a \rightarrow 0} \rightarrow -1,5\sigma_0$. Подобный результат получается также при концентрации напряжений вблизи круглого отверстия в прямоугольной полубесконечной пластине, растянутой равномерно-распределенной по ширине нагрузкой [22]. В качестве критерия предельного состояния использовалась дробно-линейная зависимость (1).

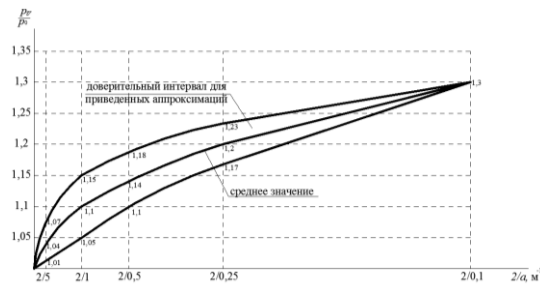


Рис. 2. График увеличения несущей способности сферического резервуара в зависимости от радиуса внутренней полости

Выводы

1. Установлено, что использование инкрементального условия текучести в задаче со сферической симметрией демонстрирует увеличение области упругой работы материала. При этом, градиентные эффекты определяются не толщиной стенки резервуара, а лишь размером внутренней полости.

2. Использование различных алгебраических функций для аппроксимации зависимости эффекта стеснения деформаций дает не более 5%-й разницы между ними при оценке предельного

состояния, и отражает лишь удобство математических преобразований в применении.

3. Оценка концентрации напряжений вокруг сферической полости малого размера приводит к результату о начале локального течения при значительно больших напряжениях, чем при классическом решении.

Работа выполнена по заказу ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» по теме 7.41.21 «Плана фундаментальных научных исследований РААСН и Министрства строительства и ЖКХ РФ» на 2020 г.

Список литературы

1. Балдин В.А. Об учете пластических деформаций при неравномерном распределении напряжений по сечению // Строительная механика и расчет сооружений. 1977. №1. С. 29-31.
2. Балдин В.А., Потапов В.Н., Фадеев А.А. О сопротивлении тали деформированию при неравномерном распределении напряжений // Строительная механика и расчет сооружений. 1977. №1. С.29-31.
3. Фадеев А.А. о переходе малоуглеродистой стали в упруго-пластическое состояние при неравномерном распределении напряжений (при чистом изгибе) // Исследование прочности элементов строительных металлических конструкций: Труды ин-та/ ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., 1982. С. 85-91.
4. Campus F. Plastification de l'acier doux en flexion plane simple // Bull. de la classe des Sciences de l'Academie R. de Belgique. 1963. Serie 5, 49, 4. P.303-314.
5. Dehousse N.M. Note relative a un phenomene de superelastisite en flexion constate lors d'essais d'un barreau en acier doux // Bull. de la classe des Sciences de l'Academie R. de Belgique. 1962. Serie 5, 48. P.329-334.
6. Гениев Г.А., Калашников С.Ю. Влияние градиентов напряжений, геометрии и масштабов сечений на переход изгибаемых элементов в пластическое состояние // Исследования по строительной механике: Труды ин-та/ ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., 1985. С. 5-12.
7. Гениев Г.А., Калашников С.Ю. Об учете влияния неоднородности напряженного состояния на переход материала в пластическое состояние // строительная механика и расчет сооружений. 1988. №6. С.12-15.
8. Гениев Г.А., Калашников С.Ю. О построении инкрементальных условий пластичности / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., 1984. 14 с. Деп. во ВНИИИС 16.02.84. №4817.
9. Калашников С.Ю. Критерии пластичности, учитывающие влияние неоднородности напряженного состояния // Труды НГАСУ. Новосибирск, 2003. Т.6. №6(27). С. 142-148.
10. Калашников С.Ю., Левин А.В. О решении задач плоского поперечного изгиба с использованием инкрементального условия пластичности / Волгоградский инж.-строит. ин-т. Волгоград, 1988. 10 с. Деп. во ВНИИИС 13.06.88. №8382.
11. Калашников С.Ю. О решении некоторых двумерных задач с использованием инкрементального условия пластичности / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., 1984. 16 с. Деп. во ВНИИИС 10.05.84. №5015.
12. Практические способы реализации инкрементальных условий пластичности в стержневых элементах строительных конструкций / С.Ю. Калашников, Е.В. Гурова, С.А. Калиновский // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Вып. 4(81) 2020. С.4-12.
13. Калашников С.Ю., Гурова Е.В., Калиновский. Учет формы поперечного сечения изгибаемого бруса в инкрементальном условии пластичности // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2020. № 4 (34). 8 с.
14. Калашников С.Ю., Гурова Е.В. Упругое деформирование брусьев при учете вида напряженного состояния в окрестности рассматриваемой точки // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. № 4 (38). – с. 5-10
15. Калашников С.Ю. Реализация инкрементальных условий пластичности в сферических и цилиндрических координатах // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2003. С.44-48.
16. Калашников, С.Ю. Implementation of incremental yield conditions in spherical coordinates / С.Ю. Калашников, Е.В. Гурова // E3S Web of Conferences. Vol. 281. IV International Scientific Conference "Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development" (CATPID-2021 Part 1), Nalchik, Russian Federation, July 1-5, 2021 / ed. B. Yazzev. - EDP Sciences, 2021. - 8 p. - URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/57/e3sconf_catpid2021_01002/e3sconf_catpid2021_01002.html.
17. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости / Пер. с англ. М.И. Рейтмана. М.: Наука, 1979. 560 с.
18. G. Lame/ Lecons sur la Theorie de l'Elasticite, Paris, 1852.
19. Голубинский А.Н. Методы аппроксимации экспериментальных данных и построения моделей // Вестник Воронежского института МВД России. 2007. №2. С. 138-143.
20. Калашников, С.Ю. Альтернативные аппроксимирующие функции инкрементальной теории нелинейного деформирования тел / С.Ю. Калашников, В.П. Ватанский // Материалы ежегодной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава и студентов ВолгГАСУ, 24-27 апреля 2007 г. : в 3 ч. Ч. 2 : Естественные науки. Технология строительного производства. Тепло-, газо- и водоснабжение / ВолгГАСУ. - Волгоград, 2008. - С. 270-272.
21. Калашников, С.Ю. Экспериментальная проверка модели деформирования материала в условиях неоднородного напряжённого состояния: монография / С.Ю. Калашников; ВолгГТУ. - Волгоград, 2017. - 80 с.
22. Influence of stress gradients on the limit state of the plate weakened by a circular hole [Электронный ресурс] / С.Ю. Калашников, Е.В. Гурова, Р.Х. Курамшин, А.В. Старов // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 456 : VII International Symposium Actual Problems of Computational Simulation in Civil Engineering (Novosibirsk, Russian Federation, 1-8 July, 2018) / Russian Academy of Architecture and Civil Engineering Sciences (RAACS). – [IOP Publishing], 2018. – 7 p. - URL : <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/456/1/012111/pdf>.

© С. Ю. Калашников, Е. В. Гурова

Ссылка для цитирования:

Калашников С. Ю., Гурова Е. В. Реализация инкрементальных условий текучести в сферическом резервуаре // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 2 (40). С. 83–87.