ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ / NATURAL SCIENCES

УДК 517.9+621.1:539 https://doi.org/10.33619/2414-2948/108/01

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕННОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ АРМАТУРЫ В РАЗЛИЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ

*©**Ташполотов Ы.**, ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN-код: 2425-6716, д-р физ.-мат. наук, Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан, itashpolotov@mail.ru*
*©**Маматов Э. У.**, ORCID: 0000-0003-4744-7611, SPIN-код: 5186-5359, Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан, mamatov.elbek@list.ru*

MATHEMATICAL MODELING OF CYLINDRICAL REINFORCEMENT LOADED WITH DISTRIBUTED LOAD IN VARIOUS DIRECTIONS

*©**Tashpolotov Y.**, ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN-code: 2425-6716, Dr. habil., Osh State University, Osh, Kyrgyzstan, itashpolotov@mail.ru*
*©**Mamatov E.**, ORCID: 0000-0003-4744-7611, SPIN-code: 5186-5359, Osh State University, Osh, Kyrgyzstan, mamatov.elbek@list.ru*

Аннотация. Рассматривается математическое моделирование напряженно-деформированного состояния цилиндрической арматуры, нагруженной распределенной нагрузкой в различных направлениях. Основное внимание уделяется определению внутреннего напряжения и закона его распределения для арматуры, созданной на основе базальтовых горных пород. Построена математическая модель, включающая уравнения движения, условия прочности, а также связь между напряжением и деформацией.

Abstract. Discusses the mathematical modeling of the stress-strain state of cylindrical fittings loaded with a distributed load in various directions. The main attention is paid to the determination of internal stress and the law of its distribution for fittings created on the basis of basalt rocks. A mathematical model is constructed that includes equations of motion, strength conditions, and the relationship between stress and deformation.

Ключевые слова: математическое моделирование, базальтовая арматура, напряженно-деформированное состояние, нагрузка, уравнения движения, условия прочности.

Keywords: mathematical modeling, basalt reinforcement, stress-strain state, load, equations of motion, strength conditions.

В современных строительных технологиях арматура на основе базальтовых горных пород приобретает все большее значение из-за высокой прочности и коррозионной устойчивости. Однако для эффективного использования таких материалов необходимо создание математическое моделирование их поведения под действием нагрузок. Данная работа направлена на разработку математической модели напряженно-деформированного состояния цилиндрической арматуры, нагруженной распределенной нагрузкой в различных направлениях. Поскольку разработка арматурных материалов на основе базальтовых горных пород и их применение в строительстве и инженерных конструкциях стали предметом активных исследований в последние десятилетия. Базальтовая арматура, благодаря своим уникальным свойствам — высокой прочности, устойчивости к коррозии и долговечности, становится все более популярной альтернативой традиционной стальной арматуре. Однако широкое применение данного материала требует глубокого понимания его поведения под различными видами нагрузок. Разработка и применение базальтовой арматуры в строительных конструкциях представляет собой актуальную научную проблему, связанную с необходимостью моделирования поведения материала под различными нагрузками. Существующие исследования сосредоточены на различных аспектах моделирования, прочностных характеристиках, критериях разрушения и методах неразрушающего контроля композитных материалов, что закладывает основу для математического моделирования напряженно-деформированного состояния базальтовой арматуры. Для решения этих задач необходимы эффективные математические модели, которые могут описать напряженно-деформированное состояние арматуры при воздействии различных сил.

В существующей литературе представлены различные подходы к моделированию поведения армирующих материалов под воздействием нагрузок.

P. K. Karsh, T.Mukhopadhyay, S. Dey провели пространственный анализ уязвимости композитных слоев на предмет их разрушения при первичной нагрузке, включая эффект расслоения [1]. Авторы используют современные подходы к моделированию и анализу напряженного состояния композитных материалов, что может быть адаптировано для цилиндрической базальтовой арматуры. В их работе подчеркивается важность учета эффектов расслоения в моделировании прочности композитов, что является ключевым фактором при анализе поведения базальтовой арматуры под нагрузкой.

S. Gholizadeh в своем обзоре методов неразрушающего контроля композитных материалов рассматривает такие подходы, как ультразвуковой, термографический, рентгенографический и другие [2]. Данный обзор указывает на важность использования методов неразрушающего контроля для анализа структурных характеристик арматуры. Этот аспект важен при оценке напряженно-деформированного состояния базальтовой арматуры, поскольку определение состояния материала при различных видах нагрузок позволяет создать более точные математические модели.

ГОСТ Р 51372-99 определяет методы ускоренных испытаний материалов при воздействии различных агрессивных сред [3]. Данный стандарт актуален при анализе долговечности базальтовой арматуры, поскольку она подвергается воздействию агрессивных сред в процессе эксплуатации. Использование стандартных методов испытаний, предусмотренных ГОСТом, позволяет получать экспериментальные данные для проверки и уточнения математических моделей, описывающих напряженно-деформированное состояние арматуры.

J. Zheng, C. Maharaj, J. Liu, H. Chai, H. Liu, J. P. Dear провели сравнительный анализ критериев разрушения для волокнистых композитов [4]. Авторы показали, что различные критерии разрушения приводят к отличающимся прогнозам относительно начала повреждений. Эти различия обусловлены комплексным характером взаимодействий в армированных материалах, что требует более детального моделирования и учета различных факторов при создании моделей напряженно-деформированного состояния. Для базальтовой арматуры выбор правильного критерия разрушения, предложенного в данной работе, может способствовать более точному определению нагрузочных характеристик.

Важным элементом анализа напряженно-деформированного состояния является использование компьютерных методов расчета. В. И. Егоров описывает применение ЭВМ для решения задач теплопроводности [5]. Несмотря на то, что данная работа посвящена теплопроводности, методы численного моделирования, представленные автором, применимы и для задач прочности материалов, включая базальтовую арматуру. Численные методы, такие как метод конечных элементов, позволяют проводить глубокий анализ распределения напряжений и деформаций в композитных материалах.

Исследования Д. В. Гриневич, Н. О. Яковлева, А. В. Славина касаются критериев разрушения полимерных композитов, включая армированные волокнами материалы [6]. В их работе описаны различные подходы к оценке критического состояния композитных материалов, а также рассматриваются методы прогнозирования разрушения. Данный обзор актуален для базальтовой арматуры, поскольку правильное определение критерия разрушения позволяет более точно описать напряженно-деформированное состояние арматуры при распределенной нагрузке.

Важный аспект использования базальтовых волокон — это их стойкость в различных средах. В. Н. Деревянко, Л. В. Саламаха, Е. Г. Кушнир, Е. С. Щудро, А. Г. Смоглий исследовали стойкость базальтового волокна в различных условиях и средах [7]. Авторы отмечают высокую химическую и температурную стойкость базальтовых волокон, что повышает надежность и долговечность арматуры на их основе. Анализ стойкости волокна позволяет учитывать долговечность арматуры при моделировании ее напряженно-деформированного состояния.

Работа С. А. Милованова, В. Б. Маркин посвящена применению базальтовых волокон для создания соединений «металл-композит» [8]. Авторы рассматривают особенности базальтовых волокон, их механические свойства и способы применения в различных конструкциях. Исследование этих свойств важно при моделировании напряжений и деформаций базальтовой арматуры, особенно при воздействии комбинированных нагрузок.

Однако, несмотря на множество исследований в этой области, остаются нерешенные вопросы, связанные с оптимизацией параметров арматуры и более точным описанием ее поведения под комбинированными видами нагрузок. Существующие математические модели зачастую ориентированы на частные случаи и не учитывают всей сложности реальных условий эксплуатации арматуры. Например, распределенная нагрузка в различных направлениях, возникающая в процессе эксплуатации арматуры, требует более детального анализа и разработки универсальных математических моделей.

Целью настоящего исследования является создание математической модели напряженно-деформированного состояния цилиндрической арматуры, изготовленной на основе базальтовых горных пород, при воздействии распределенной нагрузки в различных направлениях. Предлагаемая модель будет учитывать основные механические свойства материала и особенности его поведения под комбинированным нагружением, что позволит повысить точность расчетов и эффективность применения базальтовой арматуры в строительстве.

Основные уравнения

Для исследования напряженно-деформированного состояния арматуры рассмотрим цилиндрический элемент длиной dx, находящийся под действием распределенной нагрузки q(x,t). При этом касательные напряжения на внешних поверхностях цилиндра отсутствуют, а уравнения движения можно записать в виде:

$$\frac{\partial \mathrm{M}}{\partial x} + J\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} = \mathrm{N} \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \mathrm{N}}{\partial x} + Rq = \rho F \frac{\partial \upsilon}{\partial t}$$

где M — изгибающий момент, J — момент инерции поперечного сечения, p — удельная плотность массы системы, ω — угловая скорость вращения элемента частиц от действия изгибающего момента, N — поперечная (перерезывающая) сила, R — радиус цилиндра, q — внешняя нагрузка, F — площадь поперечного сечения, υ — составляющая скорости.

Условие прочности при изгибе

При изгибе арматуры в интегральном виде условие прочности можно записать:

$$\mathrm{M} = 2\pi R \int_{o}^{R} \sigma_x z dz \quad (2)$$

$$\mathrm{N} = 2\pi R \int_{o}^{R} \tau_{xz} dz, \quad (3)$$

где σ_x — нормальное напряжение, τ_{xz} — касательное напряжение в поперечном сечение. В арматуре, испытывающем деформацию кручения, в поперечных сечениях возникают касательные напряжения τ_{xz}.

Связь между напряжением и деформацией

Связь между напряжением и деформацией можно представить в виде:

$$-\mathrm{E}z\frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\partial \sigma_x}{\partial t} + \frac{2}{3}\kappa(1+\nu)\sigma_x \quad 2zdz \quad (4)$$

$$G(\frac{\partial \upsilon}{\partial x} - \omega) = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial t} + \kappa\tau_{xz} \quad 2dz, \quad (5)$$

где E — модуль Юнга, G — модуль сдвига, V — коэффициент Пуассона, K — физическая константа материала.

Перепишем уравнения с учетом условий прочности: формулы (4) и (5) с учетом условии прочности (2) и (3) перепишем в виде:

$$-2\mathrm{E}z^2 dz\frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t}(2\sigma_x z dz) + \frac{4}{3}\kappa(1+\nu)\sigma_z z dz$$

$$G(\frac{\partial \upsilon}{\partial x} - \omega)2dz = \frac{\partial}{\partial t}(2\tau_{xz}dz) + 2\kappa\tau_{xz}dz$$

или

$$-E\frac{2R^3}{3}\frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{1}{\pi R}\frac{\partial \mathrm{M}}{\partial t} + \frac{2}{3}\kappa(1+\nu)\frac{\mathrm{M}}{\pi R}$$

$$G(\frac{\partial \upsilon}{\partial x} - \omega)2R = \frac{1}{\pi R}\frac{\partial \mathrm{N}}{\partial t} + \kappa\frac{\mathrm{N}}{\pi R}$$

$$-\frac{2\pi R^4\mathrm{E}}{3}\frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\partial \mathrm{M}}{\partial t} + \frac{2}{3}\kappa(1+\nu)\mathrm{M}$$

$$2\pi G R^2(\frac{\partial \upsilon}{\partial x} - \omega) = \frac{\partial \mathrm{N}}{\partial t} + \kappa\mathrm{N}$$

$$-D\frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{\partial \mathrm{M}}{\partial t} + \frac{2}{3}\kappa(1+\nu)\mathrm{M}, \text{ где } D\frac{2\pi R^4\mathrm{E}}{3}$$

$$B(\frac{\partial \upsilon}{\partial x} - \omega) = \frac{\partial \mathrm{N}}{\partial t} + \kappa\mathrm{N}, \text{ здесь } B = 2\pi G R^2$$

Таким образом, $\frac{\partial M}{\partial x}+J\rho\frac{\partial\omega}{\partial t}=N$

$$\frac{\partial N}{\partial x}+Rq=F\rho\frac{\partial\upsilon}{\partial t} \tag{6}$$

$$-D\frac{\partial\omega}{\partial x}=\frac{\partial M}{\partial t}+\frac{2}{3}\kappa(1+\nu)M$$

$$B(\frac{\partial\upsilon}{\partial x}-\omega)=\frac{\partial N}{\partial t}+\kappa N$$

Их этих уравнений имеем:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial\omega}{\partial t}=-\alpha\frac{\partial M}{\partial x}+\alpha N\\
&\frac{\partial\upsilon}{\partial t}=\beta\frac{\partial N}{\partial x}+\gamma(x,t)\\
&\frac{\partial M}{\partial t}=-D\frac{\partial\omega}{\partial x}-\chi M\\
&\frac{\partial N}{\partial t}=B\frac{\partial\upsilon}{\partial x}-B\omega-\kappa N
\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

где, $\alpha=\frac{1}{J\rho}$ $\beta=\frac{1}{F\rho}$: $\gamma=\frac{Rq}{F\rho}$ $\chi=\frac{2}{3}\kappa(1+\nu)$ $D=\frac{2\pi ER^4}{3}$ $B=2\pi GR^2$

Решение задачи

Для решения системы уравнений (7) установим начальные и граничные условия для данной задачи:

Начальные условия: при t=0 $\omega=\upsilon=N=M=0$

Граничные условия, при z=0 $\omega=0$ $x=b$ $\omega=0$

$\upsilon=0$ $\upsilon=0$

$M=M_0(t)$ $M=M_1(t)$

$N=N_0(t)$ $N=N1(t)$

Здесь: $\varpi(x)=\lambda\int_0^\infty\omega(x,t)e^{-\lambda t}dt$

$$\bar{\upsilon}(x)=\lambda\int_0^\infty\upsilon(x,t)e^{-\lambda t}dt\ \ \bar{M}(\chi)=\lambda\int_0^\infty M(x,t)e^{-\lambda t}dt\ \ \bar{N}(x)=\lambda\int_0^\infty N(x,t)e^{-\lambda t}dt\ \ \gamma(x)=\lambda\int_0^\infty\gamma(x,t)e^{-\lambda t}dt$$

Формулировка решения

Используя подходы решения линейных дифференциальных уравнений, решение уравнения (7) имеет вид: $\int_0^\infty e^{-\lambda t}(\frac{\partial\omega}{\partial t}+\alpha\frac{\partial M}{\partial x}-\alpha N)dt=0$ $\int_0^\infty e^{-\lambda t}(\frac{\partial\upsilon}{\partial t}-\beta\frac{\partial N}{\partial x}-\gamma)dt=0$

$$\int_0^\infty e^{-\lambda t}(\frac{\partial M}{\partial t}+D\frac{\partial\omega}{\partial x}+\chi M)dt=0\quad \int_0^\infty e^{-\lambda t}(\frac{\partial N}{\partial t}-B\frac{\partial\upsilon}{\partial x}+B\omega+\kappa N)dt=0$$

Отсюда получим: $\int_0^\infty e^{-\lambda t}\frac{\partial\omega}{\partial t}dt=\left[\omega(x,t)e^{-\lambda t}\right]_0^\infty-\int_0^\infty\omega(x,t)de^{-\lambda t}=\omega(x,0)+\lambda\int_0^\infty\omega(x,t)e^{-\lambda t}dt=\varpi(x)$

Так как $\omega(x,0)=0$ и $\lambda\int_0^\infty \omega(x,t)e^{-\lambda t}dt=\varpi(x)$, то получим

$$\int_0^\infty \frac{\partial\omega(x,t)}{\partial x}e^{-\lambda t}dt=\frac{\partial}{\partial x}\int_0^\infty \omega(x,t)e^{-\lambda t}dt=\frac{1}{\lambda}\frac{d\varpi}{dx}$$

$$\begin{cases}\int_0^\infty \frac{\partial\upsilon}{\partial t}e^{-\lambda t}dt=\bar{\upsilon}(x)\\ \int_0^\infty \frac{\partial\bar{\upsilon}}{\partial x}e^{-\lambda t}dt=\frac{1}{\lambda}\frac{\partial\bar{\upsilon}}{\partial x}\end{cases}$$

$$\int_0^\infty \frac{\partial \mathrm{M}}{\partial t}e^{-\lambda t}dt=\overline{\mathrm{M}}(x)\ \Rightarrow\ \int_0^\infty \frac{\partial \mathrm{M}}{\partial x}e^{-\lambda t}dt=\frac{1}{\lambda}\frac{\partial\overline{\mathrm{M}}}{\partial x}$$

$$\int_0^\infty \frac{\partial \mathrm{N}}{\partial t}e^{-\lambda t}dt=\overline{\mathrm{N}}(x)\ \Rightarrow\ \int_0^\infty \frac{\partial \mathrm{N}}{\partial x}e^{-\lambda t}dt=\frac{1}{\lambda}\frac{\partial\overline{\mathrm{N}}}{\partial x}$$

Таким образом, имеем

$$\begin{cases}\varpi+\frac{\alpha}{\lambda}\frac{\partial\overline{\mathrm{M}}}{\partial x}-\alpha\overline{\mathrm{N}}=0\\ \bar{\upsilon}-\frac{\beta}{\lambda}\frac{\partial\overline{\mathrm{N}}}{\partial x}-\frac{\bar{\gamma}}{\lambda}=0\\ \overline{\mathrm{M}}+\frac{D}{\lambda}\frac{\partial\varpi}{\partial x}+\chi\overline{\mathrm{M}}=0\\ \overline{\mathrm{N}}-\frac{B}{\lambda}\frac{d\bar{\upsilon}}{dx}+\frac{B}{\lambda}\varpi+\frac{\kappa}{\lambda}\overline{\mathrm{N}}=0\end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases}\frac{\partial\overline{\mathrm{M}}}{\partial x}+\frac{\lambda}{\alpha}\varpi-\lambda\overline{\mathrm{N}}=0\\ \frac{\partial\overline{\mathrm{N}}}{\partial x}-\frac{\lambda}{\beta}\bar{\upsilon}=0\\ \frac{\partial\varpi}{\partial x}+\frac{(1+\chi)}{D}\lambda\overline{\mathrm{M}}=0\\ \frac{d\bar{\upsilon}}{dx}-\varpi-\frac{\lambda+\kappa}{B}\overline{\mathrm{N}}=0\end{cases}$$

Представление изгибающих моментов и сил.

Величины M, N, ϖ, $\bar{\upsilon}$ и $\bar{\gamma}$ могут быть выражены через решение (6) и условия нагружения арматуры. Таким образом, система уравнений, описывающая напряженно-деформированное состояние цилиндрической арматуры под нагрузкой, принимает следующий вид: $\overline{\mathrm{M}}=A_1e^{px}$

$\overline{\mathrm{N}}=A_2e^{px}$ $\bar{\gamma}=A_5e^{px}$ $\varpi=A_3e^{px}$ $\bar{\upsilon}=A_4e^{px}$

Тогда из системы уравнений (7) получим:

Т. 10. №11 2024
https://doi.org/10.33619/2414-2948/108

$$\begin{cases} PA_1 + \dfrac{\lambda}{\alpha}A_3 - \lambda A_2 = 0 \\ PA_2 - \dfrac{\lambda}{\beta}A_4 = 0 \\ PA_3 + \dfrac{1+\chi}{D}\lambda A_1 = 0 \\ PA_4 - A_3 - \dfrac{\lambda+\kappa}{B}A_2 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Построение матрицы решения

Для дальнейшего анализа задачи составим матрицу коэффициентов и найдем собственные значения системы:

$$\begin{vmatrix} P & -\lambda & \dfrac{\lambda}{\alpha} & 0 \\ 0 & P & 0 & -\dfrac{\lambda}{\beta} \\ \dfrac{1+\chi}{D}\lambda & 0 & P & 0 \\ 0 & -\dfrac{\lambda+\kappa}{B} & -1 & P \end{vmatrix} = 0 \quad (10)$$

$$P\begin{vmatrix} P & 0 & -\dfrac{\lambda}{\beta} \\ 0 & P & 0 \\ -\dfrac{\lambda+\kappa}{B} & -1 & P \end{vmatrix} + \lambda\begin{vmatrix} 0 & 0 & -\dfrac{\lambda}{\beta} \\ \dfrac{1+\chi}{D}\lambda & P & 0 \\ 0 & -1 & P \end{vmatrix} + + \frac{\lambda}{\alpha}\begin{vmatrix} 0 & p & -\dfrac{\lambda}{\beta} \\ \dfrac{1+\chi}{D}\lambda & 0 & 0 \\ 0 & -\dfrac{\lambda+\kappa}{B} & P \end{vmatrix} =$$

$$= P(P^3 - \frac{\lambda}{\beta}\frac{\lambda+\kappa}{B}P) + \frac{\lambda^3}{\beta}\frac{1+\chi}{D} + \frac{\lambda}{\alpha}\left(\frac{\lambda^2}{\beta}\frac{1+\chi}{D}\frac{\lambda+\kappa}{B} - P^2\frac{1+\chi}{D}\lambda\right) =$$

$$= P^4 - P^2\frac{\lambda(\lambda+\kappa)}{B\beta} + \frac{\lambda^3(1+\chi)}{D\beta} + \frac{\lambda^3(1+\chi)(\lambda+\kappa)}{\alpha\beta DB} - P^2\frac{\lambda^2(1+\chi)}{\alpha D} = 0$$

$$P^4 - \underbrace{\left(\frac{\lambda(\lambda+\kappa)}{B\beta} + \frac{\lambda^2(1+\chi)}{\alpha D}\right)}_{\mathrm{h}_1}P^2 + \underbrace{\frac{\lambda^3(1+\chi)(\alpha B+\lambda+\kappa)}{\alpha\beta DB}}_{\mathrm{h}_2} = 0$$

Тогда получим:

$$\boxed{P^4 - \mathrm{h}_1 P^2 + \mathrm{h}_2 = 0} \quad (11)$$

Решение данного уравнения будет иметь вид:

$$P_1 = \sqrt{\frac{1}{2}\left[\mathrm{h}_1 + \sqrt{\mathrm{h}_1^2 - 4\mathrm{h}_2}\right]} \quad (12)$$

$$P_2 = -\sqrt{\frac{1}{2}\left[\mathrm{h}_1 + \sqrt{\mathrm{h}_1^2 - 4\mathrm{h}_2}\right]} \quad (13)$$

$$P_3 = \sqrt{\frac{1}{2}\left[\mathrm{h}_1 - \sqrt{\mathrm{h}_1^2 - 4\mathrm{h}_2}\right]} \tag{14}$$

$$P_4 = -\sqrt{\frac{1}{2}\left[\mathrm{h}_1 - \sqrt{\mathrm{h}_1^2 - 4\mathrm{h}_2}\right]} \tag{15}$$

где $\mathrm{h}_1 = \frac{\lambda^2(1+\chi)}{\alpha D} - \frac{\lambda(\lambda+\kappa)}{B\mu}$ $\mathrm{h}_2 = \frac{\lambda^3(1+\chi)(\alpha B+\lambda+\kappa)}{\alpha\beta DB}$ здесь $\alpha = \frac{1}{\mathrm{J}\rho}$; $\beta = \frac{1}{\mathrm{F}\rho}$;
$\chi = \frac{2}{3}\kappa(1+\upsilon)$; $D = \frac{2\pi ER^4}{3}$; $B = 2\pi GR^2$, κ = физическая константа материала

Выводы

Предложенная математическая модель позволяет анализировать распределение напряжений и деформаций в цилиндрической арматуре из базальтовых горных пород под действием распределенной нагрузки. Уравнения движения и условия прочности, представленные в данной статье, могут быть использованы для численного моделирования оптимальных параметров арматуры и оценки ее надежности.

Список литературы:

1. Karsh P. K., Mukhopadhyay T., Dey S. Spatial vulnerability analysis for the first ply failure strength of composite laminates including effect of delamination // Composite Structures. 2018. V. 184. P. 554-567. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.078

2. Gholizadeh S. A review of non-destructive testing methods of composite materials // Procedia structural integrity. 2016. V. 1. P. 50-57. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.008

3. ГОСТ Р 51372-99. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов. ГОСстандарт России. ИПК Издательство стандартов, М., 2000. 63 с.

4. Zheng J., Maharaj C., Liu J., Chai H., Liu H., Dear J. P.A comparative study on the failure criteria for predicting the damage initiation in fiber-reinforced composites // Mechanics of Composite Materials. 2022. V. 58. №1. P. 125-140. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.008

5. Егоров В. И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности. СПб, 2006.

6. Гриневич Д. В., Яковлев Н. О., Славин А. В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. №7 (79). С. 92-111. https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111

7. Деревянко В. Н., Саламаха Л. В., Кушнир Е. Г., Щудро Е. С., Смоглий А. Г. Стойкость базальтовых волокон в различных средах // Вiсник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2010. №2-3. С. 33-38.

8. Милованов С. А., Маркин В. Б. Применение базальтовых волокон для созданиясоединений "металл-композит" // Ползуновский вестник. 2018. №2. С. 135-139. https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2018.02.025

References:

1. Karsh, P. K., Mukhopadhyay, T., & Dey, S. (2018). Spatial vulnerability analysis for the first ply failure strength of composite laminates including effect of delamination. *Composite Structures, 184,* 554-567. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.078

2. Gholizadeh, S. (2016). A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Procedia structural integrity*, *1*, 50-57. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.008

3. ГОСТ Р 51372-99. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов. ГОСстандарт России. ИПК Издательство стандартов, М., 2000. 63 с.

4. Zheng, J., Maharaj, C., Liu, J., Chai, H., Liu, H., & Dear, J. P. (2022). A comparative study on the failure criteria for predicting the damage initiation in fiber-reinforced composites. *Mechanics of Composite Materials*, *58*(1), 125-140. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.008

5. Egorov, V. I. The use of computers for solving problems of thermal conductivity. A study guide. St. Petersburg State University of ITMO, 2006, 77c. https://books.ifmo.ru/file/pdf/107.pdf

6. Гриневич, Д. В., Яковлев, Н. О., & Славин, А. В. (2019). Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор). *Труды ВИАМ*, (7 (79)), 92-111. https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111

7. Деревянко, В. Н., Саламаха, Л. В., Кушнир, Е. Г., Щудро, Е. С., & Смоглий, А. Г. (2010). Стойкость базальтовых волокон в различных средах. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, (2-3), 33-38.

8. Милованов, С. А., & Маркин, В. Б. (2018). Применение базальтовых волокон для созданиясоединений "металл-композит". *Ползуновский вестник*, (2), 135-139. https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2018.02.025

Работа поступила
в редакцию 08.10.2024 г.

Принята к публикации
12.10.2024 г.

Ссылка для цитирования:

Ташполотов Ы., Маматов Э. У. Математическое моделирование нагруженной распределенной нагрузкой цилиндрической арматуры в различных направлениях // Бюллетень науки и практики. 2024. Т. 10. №11. С. 12-20. https://doi.org/10.33619/2414-2948/108/01

Cite as (APA):

Tashpolotov, Y. & Mamatov, E. (2024). Mathematical Modeling of Cylindrical Reinforcement Loaded with Distributed Load in Various Directions. *Bulletin of Science and Practice*, *10*(11), 12-20. (in Russian). https://doi.org/10.33619/2414-2948/108/01