

УДК: 621.833.2

<https://doi.org/10.47533/2020.1606-146X.113>

**С. М. АХМЕТОВ<sup>1\*</sup>, М. Т. УСЕРБАЕВ<sup>2</sup>, А. Б. БОЛАТОВА<sup>2</sup>, Ж. У. ИКЛАСОВА<sup>3</sup>**

*<sup>1</sup>Казахстанское отделение по г. Нур-Султан Международной научной школы устойчивого развития им. акад. П.Г. Кузнецова*

*<sup>2</sup>Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина*

*<sup>3</sup>Атырауский университет нефти и газа им. С. Утебаева*

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕРЖНЯ С НЕОДНОРОДНОЙ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРОЙ**

*Рассмотрено напряженно-деформированное состояние (НДС) стержня с неоднородно-слоистой структурой. На основе краткого обзора и анализа современного состояния исследований стержневых систем обосновывается актуальность исследования НДС слоисто-неоднородных деревянных конструкций с учётом наличия различной сопротивляемости слоев на растяжение и сжатие. На этом основании авторами решается задача определения НДС слоисто-неоднородных деревянных стержней в условиях ползучести, где учитываются такие факторы, как влажность и температура, а также разность сопротивляемости слоев древесины растяжению и сжатию. При решении задачи учтены также механо-сорбционная ползучесть древесины.*

*Установлена последовательность расчета НДС для каждого узла поперечного сечения слоев стержня.*

**Ключевые слова:** *математическая модель, напряженно-деформированное состояние, стержень с неоднородной слоистой структурой, растяжение, сжатие, ползучесть.*

Вопросы исследования напряжённо-деформированного состояния (НДС) элементов конструкции с неоднородными слоистыми структурами являются одним их актуальных задач современной механики упругого деформируемого тела. Хорошими научными основами при таких исследований являются энергетические методы исследования, в которых на основании применения закона сохранения энергии разработаны методики численного НДС стержней с учетом температурных расширений [1 - 5].

В работе [1] показан расширенный метод изменения энергии поперечной деформации для оценки повреждений, связанных с ограниченными модальными данными в балочно-подобных конструкциях, где учитывается корреляция между аналитическими модальными данными и измеренными неполными модальными данными. Пред-

---

\* E-mail корреспондирующего автора: [axmetov\\_aing@mail.ru](mailto:axmetov_aing@mail.ru)

ложенный авторами метод успешно применяется для оценки серьезности единичных повреждений в балочно-подобной конструкции и может быть полезен в технологии технического обслуживания и в системе мониторинга состояния конструкций.

В работах [2, 3] рассматриваются методы исследования термонапряженно-деформированного состояния стержня ограниченной длины при одновременном наличии локальных тепловых потоков, теплообмена и теплоизоляции, которые основаны на законе сохранения энергии. Методы позволяют определять поле распределения температуры и три составляющие деформаций и напряжений, а также величину удлинения стержня переменного сечения по длине и результирующую осевую силу с точностью, удовлетворяющей законам сохранения энергии. С такими же успешными результатами исследованы также и стержни с постоянными сечениями по ограниченной их длине при различных условиях температурных расширений [4, 5].

Приведенные выше методики исследования НДС стержневых систем рассчитаны для случаев, когда рассматриваемый элемент преимущественно моделирует металлические конструкции.

Однако в технике, особенно при создании уникальных конструкций, чаще используются конструктивные элементы с неоднородными слоистыми структурами. В качестве примера можно привести деревянные конструкции со слоистыми элементами, в частности клефанерные элементы.

В работах [6, 7] достаточно подробно освещена методика исследования влияния упруго-пластических свойств древесины на длительные процессы деформирования изгибаемых деревянных и клефанерных элементов покрытий зданий. Изучены характеристики ползучести от времени ползучести древесины при воздействии природных нагрузок.

Однако в практике проектирования несущих элементов конструкций встречаются случаи, когда при малых напряжениях и деформациях необходимо достаточно точно описать изменения их НДС, а также прочностные характеристики материала на основе применения теории ползучести.

Учёт возможности расчёта разной сопротивляемости древесины растяжению и сжатию при ползучести слоисто-неоднородных конструкций даст большие возможности для оптимизации, а также рационального использования различных пород древесины.

Современные методы решения задач расчёта конструкций с учётом ползучести представлены в обзорах [8 - 10].

Анализ указанных выше работ показал, что в них недостаточно полно рассмотрены задачи определения НДС слоисто-неоднородных деревянных конструкций с учётом наличия различной сопротивляемости слоёв на растяжение и сжатие.

Схема бруса в трехмерной декартовой прямоугольной системе координат представляет собой стержень, состоящий из нескольких слоёв. Слои могут быть выполнены из различных материалов и могут располагаться как горизонтально, так и вертикально (рис. 1). Общее число слоёв принципиально не ограничено. Условия контакта слоёв считаются совершенными – отсутствуют взаимные смещения любого направления в плоскости контакта.

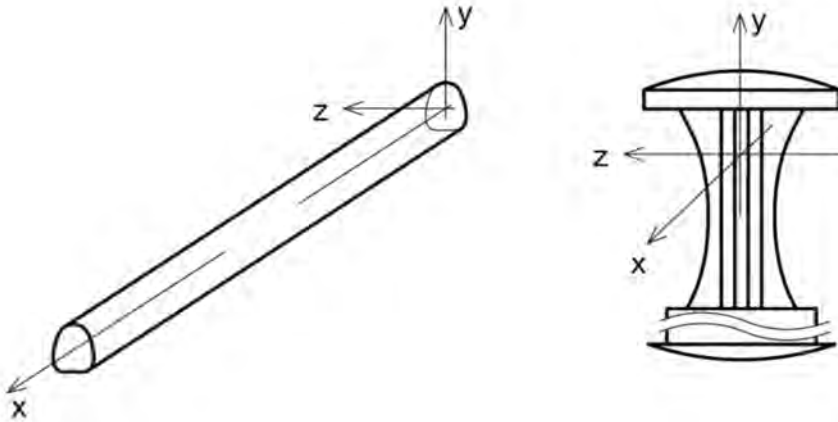


Рисунок 1 – Общий вид и форма поперечного сечения слоистого стержня

Начало системы координат  $xuz$  помещаем в левый конец стержня. Ось  $x$  совпадает с продольной осью стержня и имеет определённую геометрическую привязку к поперечному сечению.

Для упрощения получающихся в дальнейшем решений будем считать, что структуры гибридных стержней и распределений внешних нагрузок согласованы так, что они в процессе нагружения либо вовсе не вызывают эффектов закручивания, либо они столь незначительны, что ими можно пренебречь. В общем случае стержень испытывает изгиб в плоскостях  $xu$  и  $xz$  с растяжением-сжатием. Все нагрузки приведены к продольной оси стержня – оси  $x$ .

Деформации и перемещения будем считать малыми. Это позволит записывать уравнения равновесия для недеформированного состояния:

$$\frac{d^2 M_z}{dx^2} = q_y - \frac{dm_z}{dx}, \quad \frac{d^2 M_y}{dx^2} = q_z - \frac{dm_y}{dx}, \quad \frac{dN}{dx} = -qx. \quad (1)$$

Здесь  $N$  – проекция вектора внутреннего усилия на ось  $x$ ,  $M_z, M_y$  – проекции вектора внутреннего момента на оси  $z$  и  $y$ . Точка приложения вектора внутренних усилий лежит на оси стержня. Величины  $q_x, d_y, q_z$  – проекции вектора распределённой нагрузки, приложенной к оси стержня,  $m_z, m_y$  – проекции вектора распределённого момента на оси  $z$  и  $y$ .

Интегрируя уравнения (1), получим выражения для внутренних усилий:

$$N(x) = N(0) - \int_0^x q_x dx,$$

$$M_z(x) = M_z(0) - Q_y(0)x - \int_0^x m_z dx + \int_0^x \left( \int_0^x q_y dx \right) dx, \quad (2)$$

$$M_y(x) = M_y(0) - Q_z(0)x - \int_0^x m_y dx + \int_0^x \left( \int_0^x q_z dx \right) dx,$$

В случае, если стержень статически определимый, то значения внутренних усилий в начале координат определяем из условий равновесия узлов. Иначе необходимо составлять дополнительные условия совместности деформаций.

Принимается справедливой теория плоских сечений Бернулли и упрощённое выражение кривизны плоской кривой. В соответствии с данными ограничениями связь между деформациями и перемещениями стержня выражается следующими известными соотношениями:

$$\begin{aligned} \varepsilon(x, y, z) &= \varepsilon_0 - y \cdot k_z - z \cdot k_y, \\ \varepsilon_0(x) &= \frac{du_0}{dx}, \quad k_y = \frac{d^2 v_0}{dx^2}, \quad k_z = \frac{d^2 w_0}{dx^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\varepsilon_0, k_z, k_y$  – продольная деформация на уровне оси стержня и изменение кривизны оси стержня в проекции на оси  $z$  и  $y$ ,  $u_0(x), v_0(x), w_0(x)$  – компоненты перемещений точек на выбранной осевой линии. Интегрируя соотношения (3), получим:

$$\begin{aligned} u_0(x) &= u_0(0) + \int_0^x \varepsilon_0 dx, \\ v_0(x) &= v_0(0) + \varphi_y(0) \cdot x + \int_0^x \left( \int_0^x k_y dx \right) dx, \\ \varphi_y(x) &= \varphi_y(0) + \int_0^x k_y dx, \\ w_0(x) &= w_0(0) + \varphi_z(0) \cdot x + \int_0^x \left( \int_0^x k_z dx \right) dx, \\ \varphi_z(x) &= \varphi_z(0) + \int_0^x k_z dx, \end{aligned} \quad (4)$$

Величины  $u_0(0), v_0(0), w_0(0), \varphi_y(0)$  и  $\varphi_z(0)$  находим из условий закрепления стержня.

Связь между нормальными напряжениями и деформациями опишем следующим образом. Деформации древесины состоят из следующих частей:  $\varepsilon_{el}$  – упругие деформации,  $\varepsilon_{pl}$  – пластические деформации,  $\varepsilon_{visk}$  – деформации ползучести,  $\varepsilon_{ms}$  – деформации механо-сорбционной ползучести и деформации усадки/набухания  $\varepsilon_u$ .

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{visk} + \varepsilon_{ms} + \varepsilon_u. \quad (5)$$

Соответственно приращение деформаций на соответствующем шаге по времени состоит из следующих компонент:

$$\Delta\varepsilon(t) = \Delta\varepsilon_{el} + \Delta\varepsilon_{pl} + \Delta\varepsilon_{visk} + \Delta\varepsilon_{ms} + \Delta\varepsilon_u. \quad (6)$$

где  $\Delta\varepsilon_{el}$  – приращение упругих деформаций,  $\Delta\varepsilon_{pl}$  – приращение пластических деформаций,  $\Delta\varepsilon_{visk}$  – приращение деформаций ползучести,  $\Delta\varepsilon_m$  – приращение деформаций механо-сорбционной ползучести,  $\Delta\varepsilon_u$  – приращение деформаций усадки/набухания.

Связь между нормальными напряжениями и деформациями  $\varepsilon_{el}$  и  $\varepsilon_{pl}$  выражается степенным многочленом вида:

$$\sigma = E_1(\varepsilon_{el} + p_{pl}) + E_2(\varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl})^2 + E_3(\varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl})^3 \quad (7)$$

где  $E_i$  – константы, зависящие от механических свойств материала, а также температуры ( $T$ ) и относительной влажности ( $u$ ).

$$E_i = E_{iref} [1 + a_{i1}(T - T_{ref}) + b_{i1}(u - u_{ref})] \quad (8)$$

Коэффициенты  $E_{iref}$ ,  $a_{i1}$  и  $b_{i1}$  должны определяться экспериментально на предмет растяжение-сжатие при различных значениях температуры и влажности древесины. Константы  $T_{ref}$  и  $u_{ref}$  выбираются в процессе планирования испытаний.

Деформации ползучести задаются шестью элементами Кельвина:

$$e_{visk}(t) = J_0(u_{ref}) \int_0^t \left\{ \sum J_n^\pm \left( 1 - e^{-\frac{t-t'}{\phi_n^\pm}} \right) \frac{\partial a}{\partial t'} \right\} dt' \quad (9)$$

Численные значения  $J_n^\pm$  и  $\phi_n^\pm$  определяются также на основе экспериментов отдельно для растяжения и отдельно для сжатия древесины. Приращение деформаций ползучести можно вычислить, используя правило трапеций:

$$\Delta e_{visk} = J_0(u_{ref}) \sum J_n^\pm \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\phi_n^\pm}} \right) \left( \frac{\Delta a}{2} + y_n^{hist} \right) \quad (10)$$

где  $y_n^{hist}$  обновляется после каждой итерации

$$a_n^{hist} = \left( a_{n-1}^{hist} + \frac{\Delta a}{2} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\phi_n^\pm}} + \frac{\Delta a}{2} \quad (11)$$

Модель механо-сорбционной ползучести:

– для деформаций растяжения:

$$e_{ms}(t) = J^\infty \int_0^t \left\{ 1 - e^{-c(\sum_0^t |\Delta u| - \sum_0^{t'} |\Delta u|)} \right\} da(t') \quad (12)$$

– для деформаций сжатия:

$$e_{ms}(t) = J^\infty \int_0^t \left\{ 1 - e^{-c(\sum_0^t |\Delta u| - \sum_0^{t'} |\Delta u|)} \right\} da(t') + J_0(u_{ref}) e \int_0^t a(t') |du(t')| \quad (13)$$

где  $J^\infty = 0.7J_0(u_{ref})$ . При сжатии добавляется линейная часть деформаций, отвечающая за потерю устойчивости микрофибрил и, следовательно, считается полностью не восстанавливаемой. Оставшаяся часть механо-сорбционных деформаций может полностью восстанавливаться при изменении влажности и разгрузке.

Для механо-сорбционных деформаций также используем при интегрировании правило трапеций. Приращение деформаций определяется выражением для отрицательных напряжений:

$$\Delta \varepsilon_{ms} = J^\infty (1 - \varepsilon^{-c|\Delta u|}) \left( \frac{\Delta a}{2} + a_{hist} \right) + aJ_0(u_{ref}) \varepsilon |\Delta u| \quad (14)$$

$$a_n^{hist} = \left( a_{n-1}^{hist} + \frac{\Delta a}{2} \right) \varepsilon^{-c|\Delta u|} + \frac{\Delta a}{2} \quad (15)$$

Если в (13) напряжения растягивающие, то последнее слагаемое удаляется. Как для ползучести, так и для механо-сорбционной ползучести считается применимым принцип суперпозиций Больцмана за тем исключением, что последний член в (13) является невосстанавливаемым.

Деформации усадки/набухания древесины, параллельные волокнам, подразумеваются зависящими от деформации, которая определяется по формуле:

$$\varepsilon_u = (a - b\varepsilon(t))\Delta u \quad (16)$$

где  $b = 1,3$ ,  $a$  – коэффициент усушки параллельно волокнам,  $\Delta u$  – приращение относительной влажности древесины.

Рассмотрим систему разрешающих уравнений.

Упругие и пластические деформации находим из уравнения (7) по известной методике, где, преобразуем данное кубическое уравнение к стандартному виду (17).

$$\varepsilon_0^3 + a\varepsilon_0^2 + b\varepsilon_0 + c = 0 \quad (17)$$

$$a = \frac{E_2}{E_3}, \quad b = \frac{E_1}{E_3}, \quad c = \frac{-a}{E_3}, \quad E_3 \neq 0. \quad (18)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$$

Делаем замену переменной

$$\varepsilon_0 = y - a/3, \quad (19)$$

и приводим (17) к «неполному» виду:

$$y^3 + py + q = 0, \quad (20)$$

$$p = -\frac{a^2}{3} + b, \quad q = 2\left(\frac{a}{3}\right)^3 - \frac{ab}{3} + c, \quad Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{3}\right)^2. \quad (21)$$

В зависимости от знака  $Q$  и  $p$  получим следующие значения корней «неполного» кубического уравнения (20), т.е. если:

–  $Q < 0$ , то  $p < 0$

$$y_1 = 2\sqrt{-\frac{p}{3}} \cos \frac{a}{3}, \quad y_{2,3} = -2\sqrt{-\frac{p}{3}} \cos \left( \frac{a}{3} \pm \frac{2\pi}{3} \right), \quad \cos a = -\frac{q}{2\sqrt{-(p/3)^3}} \quad (22)$$

–  $Q \geq 0$ , то  $p > 0$

$$y_1 = -2\sqrt{\frac{p}{3}} \operatorname{ctg}(2a), \quad y_{2,3} = \sqrt{\frac{p}{3}} (\operatorname{ctg}(2a) \pm i\sqrt{3} \operatorname{cosec}(2a)). \quad (23)$$

$$\operatorname{tga} = \sqrt[3]{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} \left(|a| \leq \frac{\pi}{4}\right), \quad \operatorname{tg}\beta = \frac{2}{q} \sqrt{\left(\frac{p}{3}\right)^3} \left(|\beta| \leq \frac{\pi}{2}\right).$$

–  $Q \geq 0$ , то  $p < 0$

$$y_1 = -2\sqrt{-\frac{p}{3}} \operatorname{cosec}(2a), \quad y_{2,3} = \sqrt{-\frac{p}{3}} (\operatorname{cosec}(2a) \pm i\sqrt{3} \operatorname{ctg}(2a)). \quad (24)$$

$$\operatorname{tga} = \sqrt[3]{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} \left(|a| \leq \frac{\pi}{4}\right), \quad \sin\beta = \frac{2}{q} \sqrt{\left(-\frac{p}{3}\right)^3} \left(|\beta| \leq \frac{\pi}{2}\right).$$

Во всех случаях берётся действительное значение кубического корня и расчет НДС происходит для каждого узла поперечного сечения в следующей последовательности:

1. Определяем относительное содержание влаги в древесине – принимаем равным относительной влажности воздуха;
2. Обновляем свойства материала относительно данной влажности и температуры;
3. Вычисляем распределение напряжений. Начальное распределение напряжений определяется из технической теории изгиба стержней;
4. Вычисляем приращение деформаций на данном шаге по времени, используя распределение напряжений в начальный момент шага;
5. Определяем приращение напряжений в каждом узле. Возвращаемся к шагу 3 и обновляем значение приращений деформаций. Шаги 3-5 повторяются до тех пор, пока не произойдет сходимости по напряжениям и деформациям;
6. Вычисляем внутренние усилия в поперечных сечениях путем интегрирования по площади функции нормальных напряжений. Сравниваем полученные значения с вычисленными из уравнений равновесия. Если критерий сходимости не выполняется, возвращаемся к пункту 3 и изменяем распределение деформаций.
7. Выводим значения деформаций, напряжений и перемещений для данного момента времени  $t$ .
8. Продолжить расчеты для следующего шага по времени и вернуться к пункту 1.

Для расчета различных примеров деревянных стержней нами составлена программа в пакете прикладных программ *Matlab*.

**Выводы.** Решена задача определения НДС слоисто-неоднородных деревянных стержней в условиях ползучести. При этом учтены такие факторы, как влияние влажности и температуры, разной сопротивляемости древесины растяжению и сжатию. Учтены также механо-сорбционная ползучесть древесины.

## ЛИТЕРАТУРА

1 N. Mellela, M. Oualib, M. Dougdaga and B. Mohammedia. Non destructive damage severity estimation in beam using change in extended cross modal strain energy // J. Comput. Appl. Res. Mech. Eng. Vol. 11. No. 1, pp. 57-65, 2021. DOI: 10.22061/JCARME.2020.6854.1881

2 A. Kudaykulov, E. Arinov, N. Ispulov, A. Qadir, and K. Begaliyeva. Numerical Study of a Thermally Stressed State Of a Rod // Advances in Mathematical Physics. Vol 2019. Article ID 8986010, p. 9.

<https://doi.org/10.1155/2019/8986010>

3 S. Akhmetov, A. Kudaykulov, D. Bizhanov Determination of thermally stressed state of rod elements of variable cross section under the impact of a lateral heat flow, heat exchange and surface thermal insulation. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2020) // E3S Web Conferences. Vol. 216, 2020.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601073>

4 S. Akhmetov, A. Kudaykulov Methodology of Accounting for the Local Surface Heat Exchanges for Investigation of Non-stationary Thermomechanical Processes in the Structure Elements of the Construction. - International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS), ISSN: 2394-3661, 2017, Vol. 4, No. 7, pp. 94-98.

<https://www.ijeas.org/vol/Volume-4-Issue-7>

5 S. Akhmetov, A. Kudaykulov On the Method of Construction of the Dependence of the Heat Extension Coefficient on Temperature in Heat-resistant Alloys. - International Journal of Engineering Research & Science (IJOER), ISSN: 2395-6992, 2017, Vol. 3, No. 8, pp. 20-29. <http://ijoer.com/issue-august-2017.php>

6 Житушкин В.Г., Рябухин А.К. Расчет элементов деревянных и клее-фанерных конструкций. Краснодар. Изд-во: КубГАУ им. Трубилина. 2019. 134 с. [Zhytushkin V.G. Ryabukhin A.K. Raschet elementov derevyanyh i klee-fanernyh konstrukcyi. Krasnodar. Izd-vo: KubGAU im. Trubilina. 2019. 134 s.]

7 Житушкин В.Г. Расчет прогибов деревянных и клеефанерных элементов покрытий зданий // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: сб. ст. по матер. XXVII междунар. науч.-практ. конф. №5 (21). – Новосибирск: СибАК, 2020. – С.: 44-54. [Zhytushkin V.G. Raschet progibov derevyannyh i klee-fanernyh elementov pokrytyi zdaniy // Voprosy tekhnicheskikh i fiziko-matematicheskikh nauk v svete sovremennyh issledovaniy: sb. st. po mater. XXVII mezhdunar. nauchn.-prakt. conf. №5 (21). – Novosybirsk: SibAK, 2020. – S.: 44-54.]

8 Иванов А.М., Алгазинов К.И., Мартинец Д.В. и др. Строительные конструкции с применением пластмасс. Примеры проектирования и расчета. М.: Высшая школа. 1988. 21 с. [Ivanov A.M., Algazinov K.I., Martinec D.V. i dr. Stroyitel'nye konstrukcyi s primeneniem plastmas. Primery proektirovaniya i rascheta. M.: Vysshaya shkola. 1988. 21 s.]

9 Райзер В.Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. М.: Стройиздат. 1995. С.: 98-114. [Raizer V.D. Raschet i normirovanie nadejnosti stroyitel'nyh konstrukcyi. M.: Stoyizdat. 1995. S.: 98-114]

10 Болтаев А.И. Моделирование ползучести слоисто-неоднородных деревянных стержней // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: сб. ст. по матер. XXV-XXVI междунар. науч. - практ. конф. №3-4 (20). – Новосибирск: СибАК, 2020. – С.: 64-74. [Boltaev A.I. modelirovanie polzuchesti sloyisto-neodnorodnyh derevyannyh sterznej // Voprosy tekhnicheskikh i fiziko-matematicheskikh nauk v svete sovremennyh issledovaniy: sb. st. po mater. XXVII mezhdunar. nauchn.-prakt. conf. №3-4 (20). – Novosybirsk: SibAK, 2020. – S.: 64-74]



**С. М. АХМЕТОВ<sup>1</sup>, М. Т. ӨСЕРБАЕВ<sup>2</sup>, Ж. У. ИКЛАСОВА<sup>2</sup>, А. Б. БОЛАТОВА<sup>3</sup>**

- <sup>1</sup>Нұр-Сұлтан қаласындағы Қазақстан филиалы Академик П.  
г. Кузнецов атындағы Тұрақты даму мектебі  
<sup>2</sup>С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті  
<sup>3</sup>С. Өтебаев атындағы Атырау Мұнай және газ университеті

### **БІРТЕКТІ ЕМЕС ҚАБАТТЫ ҚҰРЫЛЫМЫ БАР ӨЗЕКТІҢ КЕРНЕУЛІ-ДЕФОРМАЦИЯЛАНҒАН КҮЙІНІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІ**

Мақалада біртекті емес қабатты құрылымы бар өзектің кернеулі-деформацияланған күйі (КДК) қарастырылған. Өзекті жүйелерді зерттеудің қазіргі жай-күйін қысқаша шолу және талдау негізінде қабаттардың созылуға және сығылуға әртүрлі қарсыласуының болуын ескере отырып, қабатты-біртекті емес ағаш конструкцияларының КДК зерттеуінің өзектілігі негізделеді. Осы негізде авторлар ылғалдылық пен температура сияқты факторларды, сондай-ақ ағаш қабаттарының созылу мен сығылуға төзімділігінің айырмашылығын ескеретін сырғанау жағдайында қабатты біртекті емес ағаш өзектердің КДК анықтау мәселесін шешеді. Мәселені шешу кезінде ағаштың механикалық сорбциясы да ескеріледі. Өзек қабаттарының көлденең қимасының әр түйіні үшін КДК есептеу реті анықталған.

**Түйін сөздер:** математикалық модель, кернеулі-деформацияланған күй, біртекті емес қабатты құрылымы бар өзектер, созылу, қысу, сырғанау.

**S. M. AKHMETOV<sup>1</sup>, M. T. USERBAYEV<sup>2</sup>, ZH. U. IKLASOVA<sup>2</sup>, A. B. BOLATOVA<sup>3</sup>**

- <sup>1</sup>Kazakhstan Branch for the city of Nursultan of the International Scientific School of Sustainable Development named after academician P.G. Kuznetsova  
<sup>2</sup> Kazakh Agrotechnical University named after S. Seifullin  
<sup>3</sup>Atyrau University of Oil and Gas named after S. Utebayev

### **MATHEMATICAL MODEL OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A ROD WITH AN INHOMOGENEOUS LAYERED STRUCTURE**

The stress-strain state (SSS) of a rod with an inhomogeneous layered structure is considered. On the basis of a brief review and analysis of the current state of research of rod systems, the relevance of the study of the SSS of layered-heterogeneous wooden structures is substantiated, taking into account the presence of different resistance of layers to tension and compression. On this basis, the authors solve the problem of determining the SSS of layered-heterogeneous wooden rods in creep conditions, where factors such as humidity and temperature, as well as the difference in the resistance of wood layers to stretching and compression are taken into account. When solving the problem, the mechanical-sorption creep of wood is also taken into account.

The sequence of SSS calculation for each node of the cross-section of the rod layers is established.

**Keywords:** mathematical model, stress-strain state, rods with inhomogeneous layered structure, stretching, compression, creep.