

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-7-17-26

*\*Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Лукаш А.А., Швачко С.Н., Красный В.С.  
Брянский государственный инженерно-технологический университет  
\*E-mail: natluk58@mail.ru*

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ СТРУКТУРНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГИПСОДРЕВЕСНОГО КОМПОЗИТА ОТ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА

**Аннотация.** Получение цементно-древесных композитов (ЦДК) затруднено из-за наличия в древесном наполнителе экстрагируемых веществ, которые оказывают негативное влияние на гидратацию цемента, форму и размеры образующихся кристаллогидратов, сроки схватывания, что приводит к снижению прочностных показателей ЦДК. Гипсодревесные композиты (ГДК), в отличие от ЦДК, менее чувствительны к воздействию экстрагируемых веществ, однако они характеризуются пониженной прочностью и предельной относительной сжимаемостью при кратковременном нагружении. С целью улучшения структурных и деформационно-прочностных свойств ГДК в статье выполнено математическое моделирование влияния компонентного состава на среднюю плотность, открытую пористость, прочность на сжатие и модуль упругости гипсодревесного композита для устройства перегородок и ограждающих конструкций в зданиях различного назначения. Представлены математические модели зависимости свойств ГДК от количества строительного гипса, карбамидоформальдегидной смолы и наполнителя из отходов деревообработки лиственных пород. По критериям Стьюдента и Фишера проведена оценка статистической значимости и адекватности полученных математических моделей, позволяющих определять рациональные значения рецептурных факторов при изготовлении и эксплуатации ГДК со средней плотностью  $1370 \text{ кг/м}^3$ , открытой пористостью 36 %, прочностью на сжатие 30 МПа, модулем упругости 1780 МПа, предельной относительной сжимаемостью 4 %.

**Ключевые слова:** гипсодревесный композит, карбамидоформальдегидная смола, математические модели, структурные и деформационно-прочностные свойства, микроструктура, предельная относительная сжимаемость.

**Введение.** Одним из определяющих факторов развития современной строительной индустрии является разработка новых ресурсосберегающих технологий получения композиционных материалов с использованием природного экологически чистого сырья, в том числе древесных отходов.

В настоящее время в промышленность строительных материалов, изделий и конструкций все больше вовлекаются лиственные породы древесины, в связи с сокращением лесозаготовок хвойных пород более чем на 8 млрд. м<sup>3</sup>. При этом актуальным является изучение возможности использования отходов от их переработки в качестве наполнителя композиционных материалов с матрицей на основе минерального вяжущего (цементного, гипсового и др.) [1–3].

Основную опасность для цементно-древесных композитов (ЦДК) представляют экстрагируемые вещества (ЭВ), которые, диффундируя через стенки клеток древесины и вымываясь водой, оказывают негативное влияние на гидратацию цемента, форму и размеры образующихся кристаллогидратов, сроки схватывания, и, соответственно, снижают прочностные показатели ЦДК [4, 5].

Для нейтрализации ЭВ в древесном наполнителе (ДЗ) применяются специальные технологические приемы, такие как введение кольматирующих добавок, выдерживание ДЗ в воде или растворе извести, ультразвуковая обработка ДЗ [6, 7].

Гипсодревесные композиты (ГДК), в отличие от ЦДК, менее чувствительны к воздействию ЭВ, поэтому при их получении допускается использование древесных отходов из лиственных пород.

Известно, что ГДК отличаются хорошими адгезионными свойствами, при этом строительный гипс создает монолитную структуру композита с формированием изделия в объеме, передает напряжения, обеспечивает равномерность нагрузки, а в случае разрушения отдельных волокон – производит перераспределение ее по объему. Кроме того, гипсовое вяжущее может нивелировать негативные характеристики древесины – ее гигроскопичность, горючесть, склонность к загниванию в условиях повышенной влажности, поражение микробиологическими агентами.

Возможность рационального использования повсеместно имеющихся древесных отходов и гипсовых вяжущих открывает перспективы расширения сырьевой базы производства строитель-

ных материалов, изделий и конструкций при одновременном решении проблемы загрязнения окружающей среды. Тем не менее ГДК характеризуются пониженной прочностью и предельной относительной сжимаемостью при кратковременном нагружении.

Одним из эффективных способов улучшения свойств ГДК является модифицирование гипсовой матрицы водорастворимыми полимерными добавками, в частности карбамидоформальдегидными смолами (КФС) [8–12].

Введение в состав ГДК данных смол приводит к тому, что они, затвердевая по механизму поликонденсации с образованием макромолекулярных пространственных сеток, коагулируют поры между кристаллами дигидрата сульфата кальция ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), образуясь при гидратации строительного гипса. В результате снижается водопроницаемость композита.

На стадии приготовления формовочных смесей КФС играет пластифицирующую роль, увеличивая растекаемость гипсового теста. В свою очередь, гипсовое вяжущее можно расценивать как активный наполнитель, способный связывать побочный продукт поликонденсации КФС.

В процессе структурообразования в контактной зоне между полимерминеральной матрицей и древесным наполнителем избыточная вода поглощается частицами древесины, при этом уплотняется адгезионный контакт. Во время сушки вода мигрирует к поверхности и испаряется, а дальнейшая гидратация композиционного вяжущего происходит преимущественно за счет выделения воды при поликонденсации КФС. Формирование гипсового каркаса наряду с полимерным стекловидным соединением способствует улучшению деформативных свойств и прочности композита [13–17].

*Целью работы* является рационализация состава гипсодревесного композита (ГДК) для устройства перегородок и ограждающих конструкций в зданиях различного назначения путем математического моделирования влияния сырьевых компонентов на структурные и деформационно-прочностные свойства ГДК.

**Материалы и методы.** Для изготовления образцов ГДК применялись:

- строительный гипс (СГ) марки Г-5 В II по ГОСТ 125-2018;

- карбамидоформальдегидная смола (КФС) холодного отверждения марки КФ 120-65 по ТУ 2311-001-00252569-94, представляющая собой однородную водную суспензию белого цвета олигомерных продуктов совместной поликонденсации карбамида ( $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ ) с формальдегидом ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) с массовой долей сухих веществ

65 %, содержанием свободного  $\text{CH}_2\text{O}$  не более 0,13 %;

- отвердитель КФС – 10 %-й водный раствор щавелевой кислоты  $(\text{COOH})_2$ , вводимый в расчете 0,05 м.ч. на 1 м.ч. смолы;

- древесный наполнитель (ДЗ) из отходов деревообработки лиственных пород в виде абсолютно сухих березовых опилок игольчатой формы с размером частиц 1-5 мм, высушенных до постоянной массы в вентилируемой камере при температуре  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ ;

- питьевая вода затворения, объем которой в составах смесей определялся по водогипсовому отношению, соответствующему водопотребности используемого строительного гипса (60 %), с учетом количества воды в КФС и отвердителе.

Приготовление гипсодревесных смесей осуществлялось в лабораторном смесителе принудительного действия при следующей последовательности загрузки компонентов (в массовых частях – м.ч.): карбамидоформальдегидная смола, отвердитель, вода – строительный гипс – древесный наполнитель.

Структурные (средняя плотность, открытая пористость) и деформационно-прочностные (прочность на сжатие, модуль упругости, предельная относительная сжимаемость) свойства ГДК исследовались у образцов размерами  $20 \times 20 \times 20$  мм, изготовленным уплотнением гипсодревесных смесей в шестисекционных кубических формах типа 6ФК20 на стандартной виброплощадке. Через 1 сутки твердения в воздушно-сухих условиях образцы извлекались из форм и подвергались сушке при температуре  $45-55^\circ\text{C}$  до постоянной массы.

Определение прочности, модуля упругости и предельной относительной сжимаемости ГДК выполнялось методом осевого кратковременного статического сжатия образцов на испытательной машине МИ-20УМ с максимальным усилием 20 кН, обеспечивающей построение диаграмм деформирования композита на ПЭВМ.

Построение математических моделей зависимостей средней плотности ( $y_1 - \rho_0$ ,  $\text{кг/м}^3$ ), открытой пористости ( $y_2 - P_o$ , %), прочности на сжатие ( $y_3 - R_b$ , МПа) и модуля упругости ( $y_4 - E$ , МПа) от количества строительного гипса ( $x_1 - \text{СГ}$ : 8-12 м.ч.), карбамидоформальдегидной смолы ( $x_2 - \text{КФС}$ : 0-10 м.ч.) и древесного наполнителя ( $x_3 - \text{ДЗ}$ : 1-4 м.ч.) проводилось по матрице композиционного плана эксперимента (КПЭ) второго порядка (табл. 1), составленной с помощью компьютерной программы PlanExp B-D13 [18], и заключалось в получении уравнений регрессии вида:

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (1)$$

где  $y_i$  – значение  $i$ -го свойства ГДК;  $x_1, x_2, x_3$  – СГ, КФС, ДЗ (м.ч.);  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$  – коэффициенты регрессии.

Выбор факторов и интервалов их варьирования обусловлен поиском рациональных значений, обеспечивающих получение ГДК с улучшенными структурными и деформационно-прочностными свойствами.

вания обусловлен поиском рациональных значений, обеспечивающих получение ГДК с улучшенными структурными и деформационно-прочностными свойствами.

Таблица 1

**Матрица КПЭ второго порядка для рационализации состава гипсодревесного композита**

Номер опыта (u)	Значения варьируемых факторов						Выходное свойство ( $y_i$ ) ГДК
	кодированные			натуральные			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	СГ, м.ч.	КФС, м.ч.	ДЗ, м.ч.	
1	-1	-1	-1	8	0	1	$y_i(u_1)$
2	+1	-1	-1	12	0	1	$y_i(u_2)$
3	-1	+1	-1	8	10	1	$y_i(u_3)$
4	-1	-1	+1	8	0	4	$y_i(u_4)$
5	-1	+0,19	+0,19	8	5,95	2,79	$y_i(u_5)$
6	+0,19	-1	+0,19	10,38	0	2,79	$y_i(u_6)$
7	+0,19	+0,19	-1	10,38	5,95	1	$y_i(u_7)$
8	-0,29	+1	+1	9,42	10	4	$y_i(u_8)$
9	+1	-0,29	+1	12	3,55	4	$y_i(u_9)$
10	+1	+1	-0,29	12	10	2,07	$y_i(u_{10})$

Значимость коэффициентов уравнения (1) оценивалась по критерию Стьюдента ( $t_i$ ):

$$t_i = |b_i| / S \{b_i\}, \quad (2)$$

где  $b_i$  –  $i$ -й коэффициент регрессии;  $S \{b_i\}$  – среднеквадратическое отклонение в определении  $b_i$ .

Для выбранного уровня значимости (5 %) и данного числа степеней свободы расчетное значение  $t_i$  сравнивалось с табличным  $t_{табл.}$ . Коэффициент модели  $b_i$  считается незначимым, если  $t_i$  менее  $t_{табл.}$ .

Адекватность уравнения (1) анализировалась по критерию Фишера (F):

$$F = S_{ад}^2 / S_{в}^2, \quad (3)$$

где  $S_{ад}^2$  – дисперсия адекватности;  $S_{в}^2$  – дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах.

Значения  $S_{ад}^2$  и  $S_{в}^2$  рассчитывались по формулам:

$$S_{ад}^2 = \frac{m}{N - n_3} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2, \quad (4)$$

$$S_{в}^2 = \frac{1}{N(m-1)} \sum_{u=1}^N \sum_{j=1}^m (y_{uj} - \bar{y}_u)^2, \quad (5)$$

где  $N$  – количество опытов в плане эксперимента;  $m$  – число параллельных измерений в каждом опыте ( $m = 3$ );  $n_3$  – количество значимых коэффициентов;  $\bar{y}_u$  – среднее значение свойства

ГДК в  $u$ -м опыте;  $\hat{y}_u$  – свойство ГДК, предсказанное по уравнению регрессии;  $y_{uj}$  – свойство ГДК в  $u$ -м опыте,  $j$ -м параллельном измерении.

Расчетное значение  $F$  сопоставлялось с табличным ( $F_T$ ) при значимых коэффициентах. При  $F$  менее  $F_T$  уравнение является адекватным.

**Основная часть.** Целью КПЭ является построение математической модели, работающей по принципу «черного ящика», в котором известны входные факторы, влияющие на значения выходных свойств, и включает в себя следующие этапы: выбор факторов, уровней и интервалов их варьирования; составление матрицы композиционного плана эксперимента; проведение опытов и испытаний; расчет коэффициентов регрессии и оценка их статистической значимости по критерию Стьюдента; получение уравнения зависимости свойства материала от варьируемых факторов и оценка его адекватности по критерию Фишера; графическая интерпретация и анализ модели [19].

Установлено, что зависимости средней плотности ( $\rho_0$ ), открытой пористости ( $\Pi_0$ ), прочности на сжатие ( $R_b$ ) и модуля упругости ( $E$ ) гипсодревесного композита от количества строительного гипса, карбамидоформальдегидной смолы и древесного наполнителя представлены математическими моделями в виде адекватных уравнений регрессии со значимыми коэффициентами (табл. 1):

$$y_1(\rho_0) = 1112,5 + 93,3x_1 + 105,5x_2 - 189,6x_3 - 60,2x_1^2 + 51,1x_2^2 - 83,9x_3^2 - 29,3x_1x_2 + 22,6x_2x_3, \quad (6)$$

$$y_2(\Pi_0) = 21,3 + 4,1x_1 - 6,9x_2 + 2,1x_3 + 3,9x_1^2 + 2,2x_3^2 - 1,9x_1x_2 + 1,9x_1x_3 - 1,8x_2x_3, \quad (7)$$

$$y_3(R_b) = 23,5 - 1,9x_1 + 8,2x_2 - 2,3x_3 - 3,1x_2^2 - 3,9x_3^2 + 1,7x_1x_3 + 1,9x_2x_3, \quad (8)$$

$$y_4 (E) = 597,6 + 73,2x_1 + 297,6x_2 - 43,5x_3 + 249,8x_1^2 + 107,4x_2^2 + 118,2x_3^2 + 220,7x_1x_3 + 156,8x_2x_3. \quad (9)$$

Из уравнений (6–9) и поверхностей отклика (рис. 1) следует, что для получения ГДК с повышенной прочностью в рамках варьируемых фак-

торов наиболее рациональным является компонентный состав, включающий, м.ч.: СГ – 12, КФС – 10, ДЗ – 4.

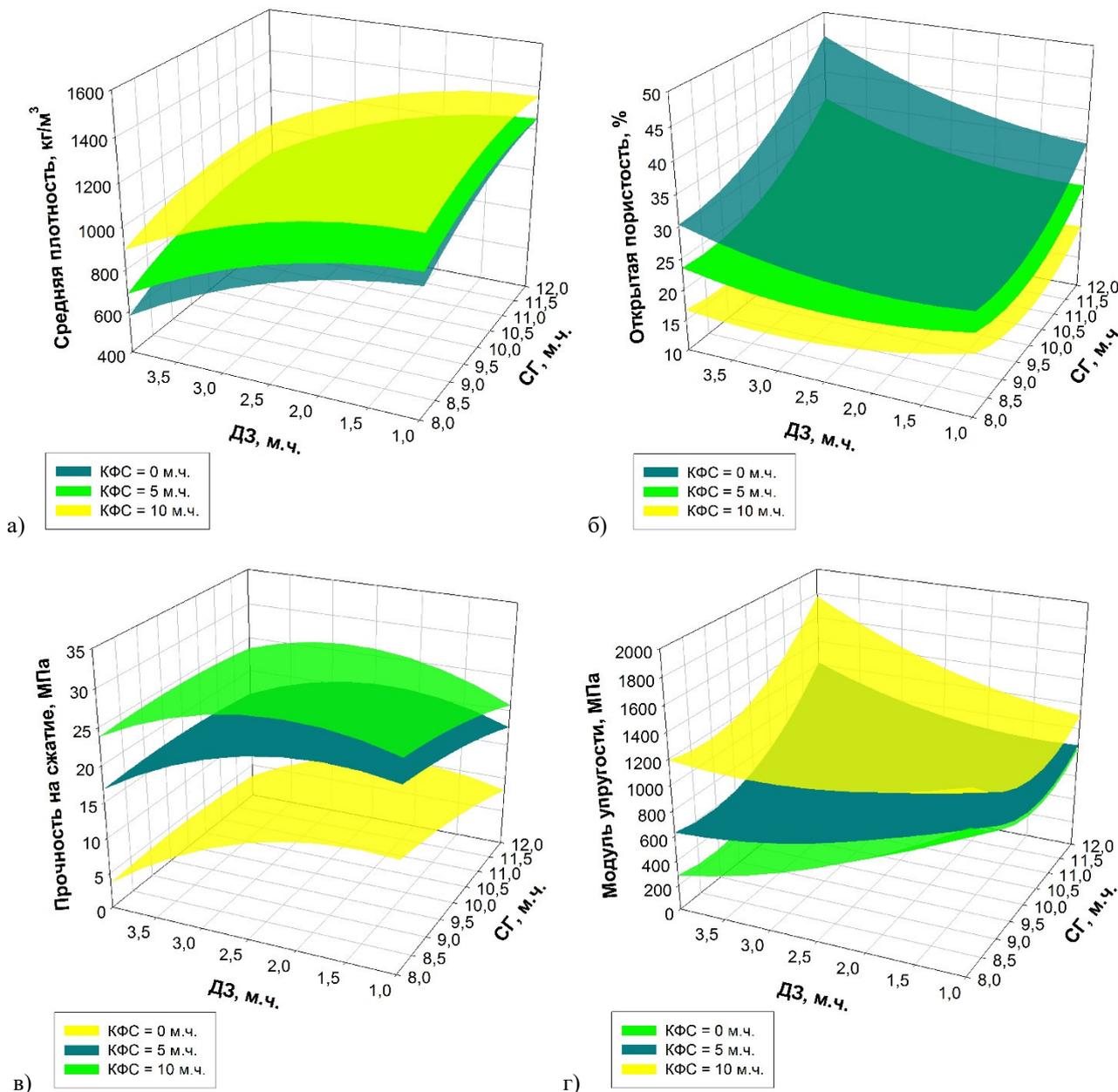


Рис. 1. Поверхности отклика зависимости средней плотности (а), открытой пористости (б), прочности на сжатие (в), модуля упругости (г) гипсодревесного композита от количества строительного гипса, карбамидоформальдегидной смолы и древесного заполнителя

Установлено, что при введении карбамидоформальдегидной смолы в количестве от 0 до 10 м.ч. средняя плотность ГДК повышается от 1248 до 1370 кг/м³, прочность на сжатие от 15,6 до 30 МПа (в 1,9 раза), модуль упругости от 1120 до 1780 МПа (в 1,6 раза), а открытая пористость снижается от 46 до 25 % (в 1,8 раза) (табл. 2).

Повышение прочности гипсодревесного композита обусловлено тем, что карбамидофор-

мальдегидная смола приводит к уплотнению пространства между кристаллогидратами CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O и улучшению адгезионных связей в системе «гипсовая матрица – древесный наполнитель», что подтверждает анализ микроструктуры ГДК методом электронной микроскопии на микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU (рис. 2).

Таблица 2

## Рациональный компонентный состав и свойства гипсодревесного композита

Состав, м.ч.			Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Открытая пористость, %	Прочность на сжатие, МПа	Модуль упругости, МПа
СГ	КФС	ДЗ				
12	10	4	1370	25	30	1780

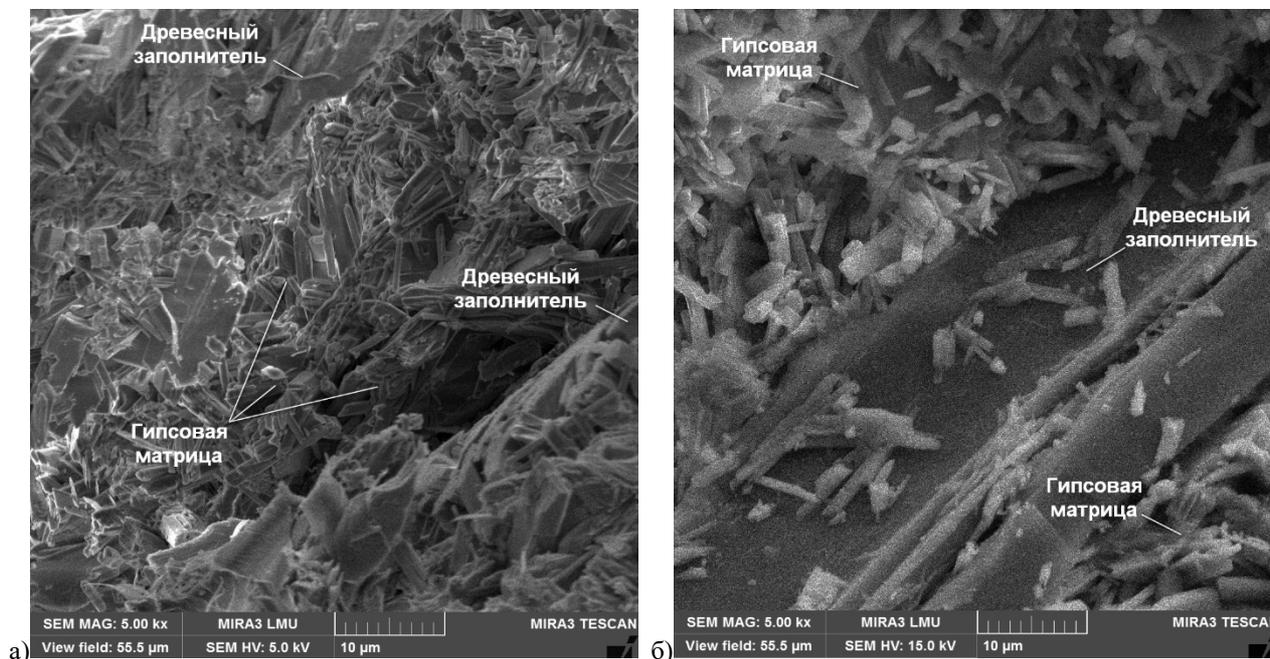


Рис. 2. Микроструктура гипсодревесного композита (5000×): а – состав без КФС; б – состав с 10 м.ч. КФС

Современный подход к определению прочности упругопластических композиционных материалов не ограничивается определением момента физического разрушения, поскольку надежность работы конструкций из них обеспечивается прогнозированием их напряженно-деформированного состояния при нагружении и эксплуатации.

Одной из характеристик, дающих информацию о процессах деформирования и разрушения композитов при осевом кратковременном статическом сжатии, является диаграмма «напряжение ( $\sigma$ ) – относительная деформация ( $\varepsilon$ )», на которой можно выделить три основные стадии:

1) упругая стадия деформирования – уплотнение композита (линейная восходящая ветвь диаграммы);

2) упругопластическая стадия деформирования – разуплотнение композита (нелинейная восходящая ветвь диаграммы);

3) пластическая стадия деформирования композита до его разрушения (нелинейная нисходящая ветвь диаграммы).

В первой стадии упрочнения возникают упругие деформации и линейная ползучесть, при этом сплошность образца не нарушается, его структура уплотняется. Далее в материале наступает начало необратимых пластических деформаций. При возрастании напряжений на второй

стадии деформирования происходит микротрещинообразование, начинается процесс разуплотнения и интенсивного развития пластических деформаций, связанных с процессами микроразрушений структуры [20, 21].

После достижения деформациями значений, соответствующих максимальным напряжениям, процесс деформирования на третьей стадии перерастает в неустойчивый, сопровождающийся объединением микротрещин в макротрещины до полного разрушения образца.

Угол наклона участка линейной восходящей ветви диаграммы, соответствующий упругой работе материала, связан с его модулем упругости выражением  $E = \operatorname{tg} \alpha$ .

Вершина нисходящей ветви диаграммы представлена предельной относительной сжимаемостью ( $\varepsilon_{bR}$ ), соответствующей достижению материалом максимального значения прочности на сжатие ( $R_b$ ).

Диаграммы деформирования гипсодревесного композита при осевом кратковременном статическом сжатии (рис. 3) показывают, что переход из упругой в пластическую стадию деформации ГДК без КФС происходит при напряжении более 12 МПа ( $\varepsilon_{bR} = 2,75\%$ ), а с содержанием КФС в количестве 10 м.ч. – при напряжении свыше 15 МПа ( $\varepsilon_{bR} = 4\%$ ).

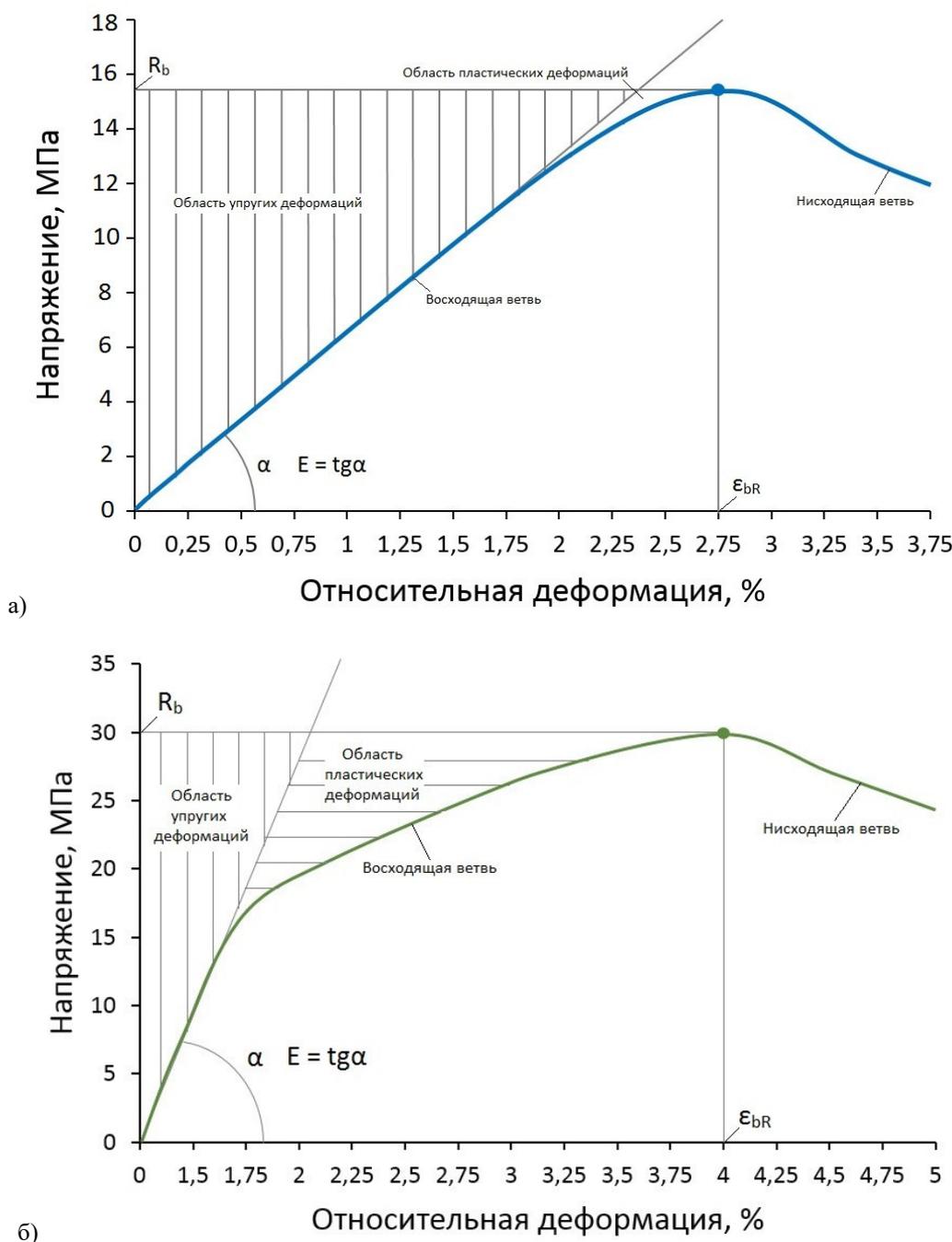


Рис. 3. Диаграммы деформирования гипсодревесного композита при осевом кратковременном статическом сжатии: а – состав без КФС; б – состав с 10 м.ч. КФС

Представленная диаграмма деформирования гипсодревесного композита с добавкой карбамидоформальдегидной смолы при кратковременном сжатии позволяет прогнозировать критерии работоспособности ГДК (длительную прочность, жесткость, трещиностойкость) в строительных изделиях в процессе эксплуатации и возникновения аварийных ситуаций.

#### Выводы

1. В результате математического моделирования влияния количества строительного гипса, карбамидоформальдегидной смолы и березовых опилок на структурные и деформационно-прочностные свойства гипсодревесного композита

для устройства перегородок и ограждающих конструкций в зданиях различного назначения установлено, что разработанные модели в виде адекватных уравнений регрессии со значимыми коэффициентами позволяют выполнять рецептурно-технологические задачи по ресурсосберегающему получению ГДК со средней плотностью  $1370 \text{ кг/м}^3$ , открытой пористостью 36 %, прочностью на сжатие 30 МПа, модулем упругости 1780 МПа, предельной относительной сжимаемостью при кратковременном нагружении 4 %.

2. Рационализация состава композита на основе гипсового вяжущего, модифицированного

карбамидоформальдегидной смолой и наполненного березовыми опилками, обусловлена необходимостью поиска новых путей снижения материалоемкости, в том числе расхода строительного гипса, и стоимости гипсосодержащих конструкционных материалов и изделий с сохранением их эксплуатационных свойств и экологичности, а также утилизации отходов деревообработки лиственных пород при одновременном решении проблемы загрязнения окружающей среды.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Storodubtseva T.N. Up-to-date solution of the resource saving problem – use of forestry sector waste in composite materials // *International Journal of Control and Automation*. 2020. Vol. 13 (1). Pp. 250–258.
2. Safin R.G., Sattarova Z.G., Khairullina E.R. Technology of Wood Waste Processing to Obtain Construction Material // *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 265. Pp. 245–249.
3. Rodríguez-Liñán Carmen, Morales-Conde María J., Rubio-De-Hita P., Pérez-Gálvez F., Pedreño-Rojas Manuel A. The Influence of Natural and Synthetic Fibre Reinforcement on Wood-Gypsum Composites // *The Open Construction and Building Technology Journal*. 2017. Vol. 11. Pp. 350–362.
4. Пат. 2732164, Российская Федерация, МПК C04B 18/26, C04B 20/10. Способ подготовки древесного заполнителя для арболита / Н.П. Лукутцова, Е.В. Чивикова, С.Н. Головин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО БГИТУ. № 2019139557; заявл. 04.12.2019; опубл. 14.09.2020, Бюл. № 26. 4 с.
5. Лукаш А.А., Лукутцова Н.П. Гипсодревесные композиты из отходов переработки мягколиственной древесины // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Сер.: *Материалы. Конструкции. Технологии*. 2017. № 4. С. 25–32.
6. Руденко Б.Д., Кулак В.В. Формирование структуры гипсоцементнодревесного композита на основе кавитированных древесных частиц // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2019. № 55. С. 177–180.
7. Pykin A.A., Gornostaeva E.Y., Lukutsova N.P. Lightweight Concrete Based on Gypseous Binding Materials, Modified with Microcrystalline Cellulose, and Cavitatively Processed Sawdust // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. Pp. 188–192.
8. Mirski R., Kawalerczyk J., Dziurka D., Siuda J., Wieruszewski M. The Application of Oak Bark Powder as a Filler for Melamine-Urea-Formaldehyde Adhesive in Plywood Manufacturing // *Forests*. 2020. Vol. 11. Pp. 1–13.
9. Баулина Н.С., Шишлов О.Ф., Глухих В.В. Получение и свойства плит OSB с фенолкарданолформальдегидными связующими // *Системы. Методы. Технологии*. 2018. № 1 (37). С. 100–104.
10. Kawalerczyk J., Dziurka D., Mirski R., Szentner K. Properties of Plywood Produced with Urea-Formaldehyde Adhesive Modified with Nanocellulose and Microcellulose // *Drvna Industrija*. 2020. Vol. 71 (1). Pp. 61–67.
11. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Горбунова Э.А. Гипсосодержащие модифицированные материалы // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 18–26.
12. Анисимова С.В., Коршунов А.Е., Емельянов Д.Н. Свойства гипсовых суспензий в присутствии водорастворимых акриловых полимеров // *Строительные материалы*. 2016. № 7. С. 25–29.
13. Аниканова Л.А. Стеновые материалы на композиционном полимерминеральном вяжущем // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. № 6 (65). С. 127–133.
14. Пыкин А.А., Лукутцова Н.П., Лукаш А.А., Ласман И.А., Головин С.Н., Тугай Т.С. Свойства и структура строительного гипса с микрокристаллической целлюлозой // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 12. С. 55–61.
15. Utegenova G., Asamatdinov M., Kalbaev B., Medvedev A., Zhukov A. Modified gypsum binder for interior systems // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 247. Pp. 891–898.
16. Жуков А.Д., Бессонов И.В., Боброва Е.Ю., Горбунова Э.А., Демисси Б.А. Материалы на основе модифицированного гипса для фасадных систем // *Нанотехнологии в строительстве*. 2021. № 13 (3). С. 144–149.
17. Гордина А.Ф., Яковлев Г.И., Полянских И.С., Керене Я, Фишер Х.-Б., Рахимова Н.Р., Бурьянов А.Ф. Гипсовые композиции с комплексными модификаторами структуры // *Строительные материалы*. 2016. № 1-2. С. 90–95.
18. Белов В.В., Образцов И.В., Иванов В.К., Коноплев В.Н. Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2015. 108 с.
19. Горохов Т.И., Ерофеев А.В., Бондарев Б.А., Корнеева А.О. Математическое планирование эксперимента при подборе оптимального состава композитного материала на основе гипсового вяжущего, наполненного древесными опилками // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2022. № 3 (67). С. 53–60.
20. Жданова Т.В., Мацевич Т.А., Аскадский А.А. Оценка модулей упругости смесей древесно-полимерных композитов с минеральным

наполнителем // Строительные материалы. 2023. № 1-2. С. 106–111.

21. Рахманов В.А., Сафонов А.А. Разработка экспериментальных методов оценки диаграмм

деформирования бетона при сжатии // Academia. Архитектура и строительство. 2017. № 3. С. 120–125.

*Информация об авторах*

**Лукутцова Наталья Петровна**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных конструкций. E-mail: natluk58@mail.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, пр. Станке Дмитрова, д. 3.

**Пыкин Алексей Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных конструкций. E-mail: alexem87@yandex.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, пр. Станке Дмитрова, д. 3.

**Лукаш Александр Андреевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии деревообработки. E-mail: mr.luckasch@yandex.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, пр. Станке Дмитрова, д. 3.

**Швачко Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин и физики. E-mail: sshvachko@mail.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, пр. Станке Дмитрова, д. 3.

**Красный Владислав Сергеевич**, магистрант кафедры производства строительных конструкций. E-mail: vlad.krasnyu.00@mail.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, пр. Станке Дмитрова, д. 3.

Поступила 14.06.2023 г.

© Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Лукаш А.А., Швачко С.Н., Красный В.С., 2023

*\*Lukuttsova N.P., Pykin A.A., Lukash A.A., Shvachko S.N., Krasnyy V.S.*

*Bryansk State Engineering Technological University*

*\*E-mail: natluk58@mail.ru*

## MATHEMATICAL MODELS OF THE DEPENDENCE OF THE STRUCTURAL AND DEFORMATION-STRENGTH PROPERTIES OF THE GYPSUM-WOOD COMPOSITE ON THE COMPONENT COMPOSITION

**Abstract.** *The production of cement-wood composites (CWC) is difficult due to the presence of extractable substances in the wood filler, which have a negative effect on the hydration of cement, the shape and size of the resulting crystalline hydrates, and the setting time, which leads to a decrease in the strength characteristics of the CWC. Gypsum-wood composites (GWC), in contrast to CWC, are less sensitive to the effects of extractable substances, but they are characterized by reduced strength and ultimate relative compressibility under short-term loading. In order to improve the structural and deformation-strength properties of the GWC, the article presents a mathematical modeling of the effect of the component composition on the average density, open porosity, compressive strength and modulus of elasticity of a gypsum-wood composite for the installation of partitions and enclosing structures in buildings for various purposes. Mathematical models of the dependence of GWC properties on the amount of building gypsum, urea-formaldehyde resin and filler from hardwood waste woodworking waste are presented. According to Student's and Fisher's criteria, an assessment was made of the statistical significance and adequacy of the obtained mathematical models, which make it possible to determine the rational values of recipe factors in the manufacture and operation of GWC with an average density of 1370 kg/m<sup>3</sup>, an open porosity of 36 %, a compressive strength of 30 MPa, an elastic modulus of 1780 MPa, limiting relative compressibility of 4 %.*

**Keywords:** *gypsum-wood composite, urea-formaldehyde resin, mathematical models, structural and deformation-strength properties, microstructure, limiting relative compressibility.*

### REFERENCES

1. Storodubtseva T.N. Up-to-date solution of the resource saving problem – use of forestry sector waste in composite materials. International Journal of Control and Automation. 2020. Vol. 13 (1). Pp. 250–258.
2. Safin R.G., Sattarova Z.G., Khairullina E.R. Technology of Wood Waste Processing to Obtain

Construction Material. Solid State Phenomena. 2017. Vol. 265. Pp. 245–249.

3. Rodríguez-Liñán Carmen, Morales-Conde María J., Rubio-De-Hita P., Pérez-Gálvez F., Pedreño-Rojas Manuel A. The Influence of Natural and Synthetic Fibre Reinforcement on Wood-Gypsum Composites. The Open Construction and Building Technology Journal. 2017. Vol. 11. Pp. 350–362.

4. Lukutsova N.P., Chivikova E.V., Golovin S.N. Method for preparation of wood filler for wood concrete. Patent RF, no. 2732164, 2020.

5. Lukash A.A., Lukutsova N.P. Gypsum-chip composites obtained from waste processed softwood timber [Gipsodrevesnye kompozity iz otkhodov pererabotki myagkolistvennoy drevesiny]. Vestnik of volga state university of technology. Series: Materials. Constructions. Technologies. 2017. No. 4. Pp. 25–32. (rus)

6. Rudenko B.D., Kulak V.V. Structure formation gypsum-cement-wood composite based on cavitated wood particles [Formirovanie struktury gipsocementnodrevesnogo kompozita na osnove kavitirovannyh drevesnyh chastic]. Actual problems of the forest complex. 2019. No. 55. Pp. 177–180. (rus)

7. Pykin A.A., Gornostaeva E.Y., Lukutsova N.P. Lightweight Concrete Based on Gypseous Binding Materials, Modified with Microcrystalline Cellulose, and Cavitationally Processed Sawdust. Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 188–192.

8. Mirski R., Kawalerczyk J., Dziurka D., Siuda J., Wieruszewski M. The Application of Oak Bark Powder as a Filler for Melamine-Urea-Formaldehyde Adhesive in Plywood Manufacturing. Forests. 2020. Vol. 11. Pp. 1–13.

9. Baulina N.S., Shishlov O.F., Glukhikh V.V. Production and properties of osb with phenolcardanolformaldehyde rezins [Poluchenie i svoystva plit OSB s fenolkardanolformal'degidnymi svyazuyushchimi]. Systems. Methods. Technologies. 2018. No 1 (37). Pp. 100–104. (rus)

10. Kawalerczyk J., Dziurka D., Mirski R., Szentner K. Properties of Plywood Produced with Urea-Formaldehyde Adhesive Modified with Nanocellulose and Microcellulose. Drvna Industrija. 2020. Vol. 71 (1). Pp. 61–67.

11. Bessonov I.V., Zhukov A.D., Gorbunova E.A. Gypsum-containing modified materials [Gipsosoderzhashchie modifitsirovannye materialy]. Construction Materials. 2021. No. 8. Pp. 18–26. (rus)

12. Anisimova S.V., Korshunov A.Ye., Yemel'yanov D.N. Properties of Gypsum Suspensions in the Presence of Water Soluble Acrylic Polymers [Svoystva gipsovyyh suspenzij v prisutstvii vodorastvorimyyh akrilovykh polimerov]. Construction Materials. 2016. No. 7. Pp. 25–29. (rus)

13. Anikanova L.A. Wall materials based on mineral-polymer composite binder [Stenovye materialy na kompozitsionnom polimermineral'nom vyazhushchem]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2017. No. 6 (65). Pp. 127–133. (rus)

14. Pykin A.A., Lukutsova N.P., Lukash A.A., Lasman I.A., Golovin S.N., Tugay T.S. Properties and structure of the building gypsum with microcrystal-line cellulose [Svoystva i struktura stroitel'nogo gipsa s mikrokristallicheskoj cellyulozoy]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. Pp. 55–61. (rus)

15. Utegenova G., Asamatdinov M., Kalbaev B., Medvedev A., Zhukov A. Modified gypsum binder for interior systems. Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 247. Pp. 891–898.

16. Zhukov A.D., Bessonov I.V., Bobrova E.Yu., Gorbunova E.A., Demissie B.A. Materials based on modified gypsum for facade systems [Materialy na osnove modifitsirovannogo gipsa dlya fasadnyh sistem]. Nanotechnologies in Construction. 2021. No. 13 (3). Pp. 144–149. (rus)

17. Belov V.V., Obraztsov I.V., Ivanov V.K., Konoplev V.N. Computer implementation of the solution of scientific, technical and educational problems. Tver: Tver State Technical University, 2015. 108 p. (rus)

18. Gordina A.F., Yakovlev G.I., Polyanskikh I.S., Kerene Ya, Fisher H.-B., Rakhimova N.R., Buryanov A.F. Gypsum Compositions with Complex Modifiers of Structure [Gipsovye kompozitsii s kompleksnymi modifikatorami struktury]. Construction Materials. 2016. No. 1-2. Pp. 90–95. (rus)

19. Gorohov T.I., Erofeev A.V., Bondarev B.A., Korneeva A.O. Implementation of the mathematical planning of an experiment method in selecting optimal composite material based on gypsum binder filled with wood filings [Matematicheskoe planirovanie eksperimenta pri podbore optimal'nogo sostava kompozitnogo materiala na osnove gipsovogo vyazhushchego, napolnennogo drevesnymi opilkami]. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2022. No. 3 (67). Pp. 53–60. (rus)

20. Zhdanova T.V., Maceevich T.A., Askadskij A.A. Evaluation of elastic modulus of mixtures of wood-polymer composites with mineral filler [Ocenka modulej uprugosti smesej drevesno-polimernyyh kompozitov s mineral'nym napolnitelem]. Construction Materials. 2023. No 1-2. Pp. 106–111. (rus)

21. Rakhmanov V.A., Safonov A.A. Development of experimental evaluation methods for stress-strain diagrams of concrete under compression [Razrabotka eksperimental'nykh metodov ocenki diagramm deformirovaniya betona pri szhatii]. Academia. Architecture and Construction. 2017. No 3. Pp. 120–125. (rus)

*Information about the authors*

**Lukuttsova, Natal'ya P.** DSc, Professor. E-mail: natluk58@mail.ru. Bryansk State Engineering Technological University. Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Avenue, 3.

**Pykin, Aleksey A.** PhD. E-mail: alexem87@yandex.ru. Bryansk State Engineering Technological University. Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Avenue, 3.

**Lukash, Aleksandr A.** DSc, Professor. E-mail: mr.lukasch@yandex.ru. Bryansk State Engineering Technological University. Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Avenue, 3.

**Shvachko, Sergey N.** PhD. E-mail: sshvachko@mail.ru. Bryansk State Engineering Technological University. Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Avenue, 3.

**Krasnyy, Vladislav S.** Undergraduate. E-mail: vlad.krasnyy.00@mail.ru. Bryansk State Engineering Technological University. Russia, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Avenue, 3.

---

*Received 14.06.2023*

**Для цитирования:**

Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Лукаш А.А., Швачко С.Н., Красный В.С. Математические модели зависимости структурных и деформационно-прочностных свойств гипсодревесного композита от компонентного состава // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 7. С. 17–26. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-7-17-0

**For citation:**

Lukuttsova N.P., Pykin A.A., Lukash A.A., Shvachko S.N., Krasnyy V.S. Mathematical models of the dependence of the structural and deformation-strength properties of the gypsum-wood composite on the component composition. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 7. Pp. 17–26. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-7-17-26