

## ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСНО-ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.И. Запруднов<sup>1✉</sup>, В.В. Никитин<sup>1</sup>, С.П. Карпачев<sup>1</sup>, Г.А. Махнин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1  
<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

zaprudnov@mgul.ac.ru

Приведены результаты исследований деформаций древесно-цементных материалов, возникающих под действием кратковременных нагрузок. Определены значения начального модуля упругости (335...495 МПа) и коэффициента Пуассона древесно-цементных материалов (0,154...0,101), изменяющиеся в зависимости от класса древесно-цементного материала по прочности на сжатие В0,35...В1. Установлено возрастание значений начального модуля упругости и модуля сдвига древесно-цементного материала с увеличением относительного объемного содержания цемента  $c_2$  от 0,50 до 0,58 и уменьшение коэффициента Пуассона. Выявлена возможность повышения значений начального модуля упругости и модуля сдвига с помощью увеличения относительного объемного содержания наполнителя (золы)  $c_4$  от 0 до 0,1 при постоянном расходе вяжущего и органического наполнителя. Указано согласование полученных значений начального модуля упругости и коэффициентов Пуассона древесно-цементных материалов с данными, полученными ранее, однако они, как и прочность древесно-цементных материалов, оказались на 20...25 % ниже теоретических. Показано влияние конгломератной структуры древесно-цементного материала на его упругие и пластические свойства, что связано с образованием и накоплением микротрещин и пластическими свойствами гелевой составляющей цементного камня. Сделан вывод, что для прогнозирования деформаций ползучести и усадки древесно-цементных материалов, в зависимости от возраста загрузки, можно использовать ранее полученные аналитические зависимости.

**Ключевые слова:** древесно-цементные материалы, деформации ползучести и усадки, модуль упругости, коэффициент Пуассона

**Ссылка для цитирования:** Запруднов В.И., Никитин В.В., Карпачев С.П., Махнин Г.А. Деформационные свойства древесно-цементных материалов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 96–104. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-96-104

Деформации древесно-цементных материалов представляют собой интегральные характеристики, которые зависят от свойств его компонентов, состава, условий приготовления и твердения древесно-цементной смеси, условий эксплуатации [1–7, 16–19, 22, 24].

Деформации в древесно-цементном материале возникают в процессе твердения, изготовления конструкций из него, и их эксплуатации вследствие изменений объема. Их размеры зависят от структуры древесно-цементного материала, свойств составляющих его компонентов, особенностей технологии и некоторых других факторов. При проектировании конструкций из древесно-цементного материала, учитывают его деформационные свойства, оказывающие большое влияние на качество и долговечность этих конструкций [11–15].

Деформации древесно-цементного материала условно можно подразделить на следующие виды:

– собственные деформации древесно-цементной смеси (первоначальная усадка) и древесно-цементного материала (усадка и расширение),

возникающие под действием протекающих в них физико-химических процессов;

– деформации, формирующейся под действием механических нагрузок [8–10, 20, 21].

При этом различают деформации древесно-цементного материала, возникающие вследствие как кратковременного, так и длительного действия нагрузок — ползучести и температурных деформаций.

### Цель работы

Цель работы — исследование деформаций древесно-цементных материалов, возникающих под действием кратковременных нагрузок и зависимости модуля упругости, модуля сдвига, коэффициента Пуассона от относительного объемного содержания цемента и золы в древесно-цементном композите.

### Объекты и методы исследования

Значения модуля упругости и коэффициента Пуассона древесно-цементных материалов определены в 28-суточном возрасте по ГОСТ 24452–80 «Бетоны. Методы определения призмной

прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона» на образцах — призмах квадратного сечения и при одновременном установлении их призмной прочности [1, 2, 5].

Для измерения продольных деформаций применяли индикаторы часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм на базе измерения 40 см. Для измерения поперечных деформаций использовали механические тензометры с базой измерения 100 мм и ценой деления 0,001 мм. Тензометры крепились с помощью струбцин перпендикулярно к исследуемой поверхности.

Определение начального модуля упругости при сжатии и растяжении проводилось при напряжении не более 0,3 предела прочности, принятом для всех бетонов условия.

Приращение относительных продольных  $\varepsilon_1$  и поперечных  $\varepsilon_2$  деформаций вычисляли как среднее арифметическое показаний приборов по четырем граням призмы.

Для каждой ступени нагрузки подсчитывали упругую часть деформации  $\varepsilon_{1y}$  ( $\varepsilon_{2y}$ ) как разность между величиной полной деформации  $\varepsilon_1$  ( $\varepsilon_2$ ) и суммой приращений деформаций ползучести  $\sum \varepsilon_{1n}$  ( $\sum \varepsilon_{2n}$ ), полученные при выдержке нагрузки на всех предыдущих ступенях по формулам

$$\varepsilon_{1y} = \varepsilon_1 - \sum \varepsilon_{1n}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{2y} = \varepsilon_2 - \sum \varepsilon_{2n}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{1y}$  и  $\varepsilon_{2y}$  — приращения упруго-мгновенных относительных продольных и поперечных деформаций образца, соответствующих уровню нагрузки  $P_1 = 0,3P_p$ , и замеренные в начале каждой ступени ее приложения;

$\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  — приращения полных относительных продольных и поперечных деформаций образца, соответствующих уровню нагрузки  $P_1 = 0,3P_p$ , замеренные в конце ступени ее приложения;

$\sum \varepsilon_{1n}$  и  $\sum \varepsilon_{2n}$  — приращения относительных продольных и поперечных деформаций быстро натекающей ползучести, полученные при выдержке нагрузки ступенями до уровня нагрузки  $P_1 = 0,3P_p$ ;

$P_p$  — нагрузка разрушения образца древесно-цементного материала, кН.

Модуль упругости вычисляли для каждого образца по формуле

$$E = \frac{\sigma_{30}}{\varepsilon_{30}}, \quad (3)$$

где  $E$  — модуль упругости, МПа;

$\sigma_{30}$  — приращение напряжения от условного нуля до уровня нагрузки  $0,3P_p$ ;

$\varepsilon_{30}$  — приращение относительной продольной деформации образца, соответствующей нагрузке  $P_1 = 0,3P_p$ , замеренное в начале каждой ступени ее приложения.

Коэффициент Пуассона  $\nu$  вычисляли для каждого образца по формуле

$$\nu = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}. \quad (4)$$

Одновременно исследовали предельную сжимаемость древесно-цементного материала, определяли коэффициенты упругости и пластичности. Замеренную сжимаемость древесно-цементного материала при нагрузке, равной  $0,9P_p$ , экстраполировали на разрушающее усилие, используя при этом график зависимости величины продольных деформаций в древесно-цементном материале от напряжений. При оценке предельной сжимаемости древесно-цементного материала учитывали полную сжимаемость  $\varepsilon_1$  с учетом пластических  $\varepsilon_{1n}$  и упругих деформаций  $\varepsilon_{1y}$ . Предельную сжимаемость вычисляли по формуле

$$\varepsilon_{сж} = \frac{\varepsilon_{1y} + \varepsilon_{1n}}{l_1} = \frac{\varepsilon_1}{l_1}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{сж}$  — предельная сжимаемость;

$l_1$  — фиксированная база изменения продольной деформации образца.

Коэффициенты упругости и пластичности определяли по формулам

$$k_y = \frac{\varepsilon_{1y}}{\varepsilon_1}; \quad (6)$$

$$k_n = \frac{\varepsilon_{1n}}{\varepsilon_1}. \quad (7)$$

## Результаты исследования

Результаты исследований представлены в табл. 1, на рис. 1 и 2. На рис. 1 и 2 приведена зависимость модуля упругости ( $E$ ), модуля сдвига ( $\mu$ ) и коэффициента Пуассона ( $\nu$ ) от относительного объемного содержания цемента  $c_2$  и золы  $c_4$  в древесно-цементном материале при расходе органического заполнителя 150 и 170 кг/м<sup>3</sup>.

Относительные объемные содержания компонентов  $c_2$  и  $c_4$  определены следующим образом

$$c_1 = \frac{v_1}{v_1 + v_2 + v_3 + v_4}; \quad c_2 = \frac{v_2}{v_1 + v_2 + v_3 + v_4}; \quad (8)$$

$$c_3 = \frac{v_3}{v_1 + v_2 + v_3 + v_4}; \quad c_4 = \frac{v_4}{v_1 + v_2 + v_3 + v_4},$$

где  $c_1, c_2, c_3, c_4, v_1, v_2, v_3, v_4$  — соответственно относительные и абсолютные объемные содержания компонентов из органического заполнителя, цемента, воды и золы для составов древесно-цементных материалов, приведенных в табл. 2 и 3.

Т а б л и ц а 1

## Начальный модуль упругости и коэффициент Пуассона для древесно-цементных материалов

## Initial modulus of elasticity and Poisson's ratio for wood-cement materials

Класс по прочности на сжатие	Нагрузка, % от $P_p$	Напряжения, $\sigma$ , МПа	Деформации, мм/м		Модуль упругости $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\nu$	Модуль сдвига $\mu$ , МПа
			продольные, $\varepsilon_{1y}$	поперечные, $\varepsilon_{2y}$			
В0,35	10	0,05	0,146	0,015	347	0,105	157
	20	0,10	0,296	0,033	341	0,112	153
	30	0,15	0,454	0,070	335	0,154	145
	40	0,20	0,631	0,107	320	0,170	137
	50	0,26	0,823	0,145	316	0,176	134
В0,75	10	0,13	0,296	0,018	424	0,062	200
	20	0,26	0,591	0,058	436	0,098	198
	30	0,38	0,926	0,125	415	0,135	183
	40	0,48	1,210	0,172	398	0,142	168
	50	0,55	1,459	0,232	377	0,159	165
В1	10	0,19	0,356	0,015	542	0,042	260
	20	0,38	0,716	0,049	525	0,069	245
	30	0,56	1,130	0,114	495	0,101	235
	40	0,68	1,425	0,152	478	0,107	216
	50	0,75	1,586	0,239	473	0,113	212

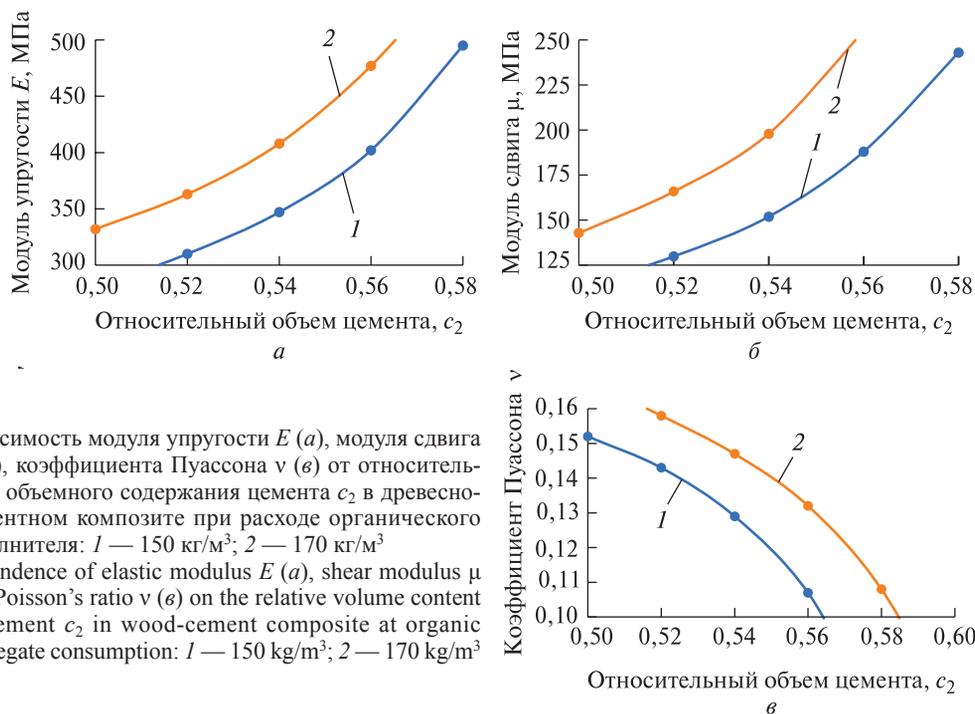


Рис. 1. Зависимость модуля упругости  $E$  (а), модуля сдвига  $\mu$  (б), коэффициента Пуассона  $\nu$  (в) от относительного объемного содержания цемента  $c_2$  в древесно-цементном композите при расходе органического заполнителя: 1 — 150 кг/м<sup>3</sup>; 2 — 170 кг/м<sup>3</sup>

Fig. 1. Dependence of elastic modulus  $E$  (a), shear modulus  $\mu$  (b), Poisson's ratio  $\nu$  (v) on the relative volume content of cement  $c_2$  in wood-cement composite at organic aggregate consumption: 1 — 150 kg/m<sup>3</sup>; 2 — 170 kg/m<sup>3</sup>

Анализ результатов исследований показал, что значение начального модуля упругости изменяется в пределах 335...495 МПа в зависимости от класса древесно-цементного материала по прочности на сжатие В0,35...В1, а коэффициент Пуассона — в пределах 0,154...0,101.

С увеличением относительного объемного содержания цемента  $c_2$  от 0,50 до 0,58 возрастают значения начального модуля упругости и модуля сдвига древесно-цементного материала, а коэффициент Пуассона уменьшается.

Установлено, что для теплоизоляционного древесно-цементного материала увеличение относи-

тельного объемного содержания наполнителя (зола)  $c_4$  от 0 до 0,1, при постоянном расходе вяжущего и органического заполнителя, также позволяет увеличить значение начального модуля упругости и модуля сдвига.

Для древесно-цементного материала с наполнителем из древесной стружки (шерсти) величина начального модуля упругости составила 134 МПа, а коэффициента Пуассона 0,062.

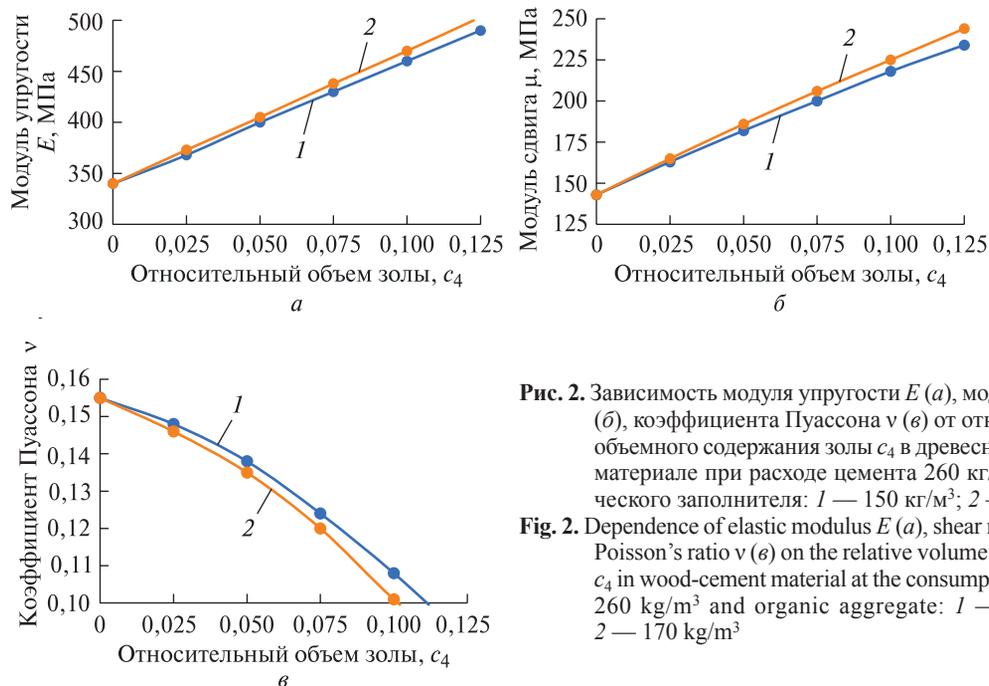
Коэффициент упругости древесно-цементного материала в зависимости от класса колеблется от 0,60 до 0,75, а коэффициент пластичности от 0,26 до 0,36.

## Результаты испытаний на сжатие древесно-цементных материалов

## Compression test results of wood-cement materials

Наименование заполнителя	Расход и соотношения компонентов			Средняя прочность $\bar{R}_{сж}^{28}$ , МПа		Средняя плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Класс по прочности на сжатие
	заполнитель, кг/м <sup>3</sup>	цемент : заполнитель (Ц/З)	вода : заполни- тель (В/З)	экспертные значения	теоретические значения		
Древесная дробленка	150	1,73	1,38	0,52	0,50	410	B0,35
	150	2,03	1,53	1,08	1,06	455	B0,75
	150	2,33	1,63	1,41	1,42	500	B1
	170	1,53	1,07	0,50	0,50	430	B0,35
	170	1,79	1,53	1,09	1,06	475	B0,75B1
	170	1,92	1,64	1,48	1,42	497	B0,75B1
Костра конопли	160	1,90	1,71	0,48	0,50	464	B0,35
	180	1,69	1,52	0,52	0,50	484	B0,35
Древесная шерсть	70	2,29	2,06	0,23	–	230	–
	75	2,13	1,92	0,24	–	235	–
	80	2,0	1,80	0,25	–	240	–

*Примечание.* Теоретическое значение средней прочности ( $\bar{R}$ ) древесно-цементного материала каждого класса определено при нормативном коэффициенте вариации, равном  $v = 18\%$  по формуле  $\bar{R} = \frac{B}{(1-1,64v)}$ .



**Рис. 2.** Зависимость модуля упругости  $E$  (а), модуля сдвига  $\mu$  (б), коэффициента Пуассона  $\nu$  (в) от относительного объемного содержания золы  $c_4$  в древесно-цементном материале при расходе цемента 260 кг/м<sup>3</sup> и органического заполнителя: 1 — 150 кг/м<sup>3</sup>; 2 — 170 кг/м<sup>3</sup>

**Fig. 2.** Dependence of elastic modulus  $E$  (a), shear modulus  $\mu$  (б), Poisson's ratio  $\nu$  (в) on the relative volume content of ash  $c_4$  in wood-cement material at the consumption of cement 260 kg/m<sup>3</sup> and organic aggregate: 1 — 150 kg/m<sup>3</sup>; 2 — 170 kg/m<sup>3</sup>

Предельная сжимаемость древесно-цементного материала в среднем для класса древесно-цементного материала по прочности на сжатие B0,35, B0,75 и B1 составляет 2,55 мм/м.

Полученные величины начальных модулей упругости и коэффициентов Пуассона теплоизоляционных древесно-цементных материалов хорошо согласуются с данными работ [12], однако они, как и прочность древесно-цементных материалов, оказались на 20...25 % ниже теоретических.

В настоящее время описания деформационных свойств многих древесно-цементных материалов ограничиваются результатами экспериментов по определению механических показателей без теоретического обобщения. Численные показатели деформации древесно-цементных материалов, выпускаемых промышленными предприятиями, варьируют в зависимости от качества исходных сырьевых материалов, технологии их изготовления, климатических и других факторов [11–20].

**Результаты испытаний на сжатие древесно-цементных материалов с заполнителем из древесной дробленки и минеральным наполнителем (зола)**

**Compression test results of wood-cement materials with wood crushed aggregate and mineral filler (ash)**

Коэффициент уплотнения, $K_{упл}$	Расход и соотношения компонентов				Средняя прочность $\bar{R}_{сж}^{28}$ МПа		Средняя плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Класс по прочности на сжатие
	заполнитель, кг/м <sup>3</sup>	зола, кг/м <sup>3</sup>	цемент : заполнитель, Ц/З	вода : заполнитель, В/З	экспертные значения	теоретические значения		
1,1	150	0	1,73	1,21	0,55	0,50	410	B0,35
	150	30	1,73	1,39	1,10	1,06	440	B0,75
	150	30	2,13	1,81	1,47	1,42	470	B1
1,2	170	0	1,53	1,22	0,57	0,50	430	B0,35
	170	30	1,53	1,26	1,04	1,06	460	B0,75B1
	170	60	1,53	1,42	1,49	1,42	490	
1,3	190	30	1,53	1,17	1,50	1,42	480	B1

*Примечание.* Теоретическое значение средней прочности ( $\bar{R}$ ) древесно-цементного теплоизоляционного материала каждого класса определяется при нормативном коэффициенте вариации, равном  $v = 18\%$  по формуле  $\bar{R} = \frac{B}{(1-1,64v)}$

К числу наиболее изученных деформационных характеристик следует отнести модуль упругости, коэффициент Пуассона, набухание и усадку. Недостаточно изучены такие упругие постоянные древесно-цементных материалов, как, например, модуль сдвига, численные значения которого необходимы для проектирования и расчета конструкций.

Влажностные деформации древесно-цементных материалов в процессе эксплуатации конструкций оказывают существенное влияние на их качество. Данные отечественных исследователей об этих свойствах древесно-цементных материалов получены лишь по предельным величинам усадки и набухания.

Анализ литературных данных свидетельствует о необходимости дальнейших более детальных исследований влияния различных факторов на прочностные и деформационные свойства древесно-цементных материалов. По нашему мнению, при разработке теории прочности и деформации древесно-цементных материалов подход должен быть несколько другим и основываться на исследовании зависимости между основными механическими характеристиками материалов и свойствами составляющих их компонентов. Эта задача может быть решена методами механики композиционных материалов.

## Выводы

По результатам проведенных исследований установлено наличие для древесно-цементных материалов двух областей деформирования: неполной упругости и интенсивного развития деформаций. В первой области упругая деформация линейно зависит от напряжений, а во второй — эта зависимость нелинейная. Остаточная дефор-

мация появляется с самого начала загрузки и непропорциональна напряжениям на всем протяжении деформирования. Границе между областями соответствует напряжение, которое, независимо от возраста материала к моменту загрузки, составляет 65 % призмочной прочности.

Для аналитического описания деформаций ползучести  $\epsilon_n(\tau, \tau_1)$  древесно-цементных материалов бетонов в области линейного деформирования можно использовать зависимость  $\epsilon_n(\tau, \tau_1) = \sigma(\tau_1)C(\tau, \tau_1)$ , где  $C(\tau, \tau_1)$  — некоторая удельная по отношению к абсолютным значениям напряжений относительная деформация ползучести.

Для прогнозирования значений относительных деформаций усадки древесно-цементных материалов в области линейного деформирования, накопленных от момента времени  $\tau_1$ , можно использовать аналитическую зависимость  $\epsilon_w(\tau, \tau_1) = \epsilon_w(\infty, 0)(e^{-\gamma_w \tau_1} - e^{-\gamma_w \tau})$ , в которой значения предельной деформации усадки  $\epsilon_w(\infty, 0)$  и показателя степени  $\gamma_w$  определяются математической обработкой опытных данных для каждого из рассматриваемых материалов.

Модуль деформаций древесно-цементных материалов является случайной величиной, значения которой зависят от прочности и плотности материалов. Поэтому при его определении необходимо учитывать вероятностный характер распределения этих величин и вид функции распределения.

## Список литературы

- [1] Гончарова М.А., Бочарников А.С., Комаричев А.В. Композиционные материалы на основе цементно-водных активированных систем для инъекционного уплотнения бетона ограждающих конструкций // Строительные материалы, 2015. № 5. С. 31–35.

- [2] Васильков С.Н. Технологии производства и применения экологически чистых и энергоэффективных строительных материалов на основе древесного сырья // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*, 2004. № 11. С. 50.
- [3] Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: АСВ, 2006. 368 с.
- [4] Галебуй С. Механизм формирования прочности и разрушения поризованного арболита на стеблях хлопчатника // *Механизация строительства*, 2011. № 10. С. 23–24.
- [5] Андреев А.А., Колесников Г.Н., Чалкин А.А. Древесно-цементный композит с добавкой стеатита как конструкционный и деформирующий материал // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. Серия: «Естественные и технические науки», 2014. № 6 (143). С. 75–78.
- [6] Аракелян А.А. Прочностные и деформативные свойства легких бетонов в зависимости от свойств заполнителей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1986. 24 с.
- [7] Гончарова М.А., Чернышевы М.А. Формирование систем твердения композитов на основе техногенного сырья // *Строительные материалы*, 2013. № 5. С. 60–63.
- [8] Запруднов В.И. Создание качественных древесно-цементных материалов // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2017. Т. 21. № 6. С. 54–60. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-54-60
- [9] Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушений. М.: Стройиздат, 1982. 196 с.
- [10] Король Е.А. Трехслойные ограждающие железобетонные конструкции из легких бетонов и особенности их расчета. М.: АСВ, 2001. С. 52–69.
- [11] Новикова Н.О., Ярцев В.П. Применение арболита и его аналогов в разных странах // *Синергия наук*, 2018. № 19. С. 524–537.
- [12] Мельникова Л.В. Технология композиционных материалов из древесины. М.: МГУЛ, 2004. 234 с.
- [13] Наназашвили И.Х. Арболит — эффективный строительный материал. М.: Стройиздат, 1984. 125 с.
- [14] Подчуфаров В.С., Чемлева Т.А., Щербаков А.С. Об оптимальном составе арболита повышенного качества // *Научные труды МГУЛ*, 1976. Вып. 93. С. 68–88.
- [15] Рыбьев И.А. Две важнейшие закономерности в свойствах материалов с конгломератным типом структуры // *Строительные материалы*, 1965. № 1. С. 17–20.
- [16] Цепяев В.А. Длительная прочность и деформативность конструкционных древесно-цементных материалов и несущих элементов на их основе: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Нижний Новгород: Изд-во НГАСУ, 2001. 46 с.
- [17] Хорошун Л.П., Щербаков А.С. Прочность и деформативность арболита. Киев: Наукова думка, 1979. 192 с.
- [18] Савин В.И., Колосов Г.Е., Соколов Б.А. Стеновые панели из поризованного арболита // *Легкие бетоны на основе отходов промышленности и конструкции из них*. М.: Изд-во НИИЖБ, 1983. С. 8–14.
- [19] Савин В.И., Давидюк А.Н. Технология и основные физико-механические свойства поризованного арболита на полимерном вяжущем // *Научные труды МГУЛ*, 1986. Вып. 180. С. 30–43.
- [20] Jayanudin J., Fahrurrozi M., Wirawan S.K., Rochmadi R. Mathematical modeling of the red ginger oleoresin release from chitosan-based microcapsules using emulsion crosslinking method // *Engineering Science and Technology*, 2019, v. 22, iss. 2, pp. 458–467.
- [21] Щибря А.Ю. Эффективный теплоизоляционный материал из поризованного арболита на рисовой лузге: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2000. С. 21.
- [22] Boadu K.B., Antwi-Boasiako C., Ofosuhene L. Solvent extraction of inhibitory substances from three hardwoods of different densities and their compatibility with cement in composite production // *J. of the Indian Academy of Wood Science*, 2018, v. 15, pp. 140–148.
- [23] Berkenkamp R. Wood fiber-cement product, process and properties. Ed. A.A.Moslemi, *Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials*. Madison, WI. Forest Products Society, 2017, pp. 8–13.
- [24] Cheumani Y.A.M., Ndikontar M., De Jéso B, Sèbe G. Probing of wood-cement interactions during hydration of wood-cement composites by proton low-field NMR relaxomet // *J. Mater. Sci.*, 2011, v. 46, pp. 1167–1175.
- [25] Fan M., Ndikontar M.K., Zhou X., Ngamveng J.N. Cement-bonded composites made from tropical woods // *Compatibility of wood and cement*. Construction and Building Materials, 2012, v. 36, pp. 135–140.
- [26] Frybort S., Mauritz R., Teischinger A., Muller U. Cement bonded composites – a mechanical review // *BioResources*, 2008, v. 3(2), pp. 602–626.
- [27] Jorge F.C., Pereira C., Ferreira J.M.F. Wood-cement composites: a review // *Holz als Roh-und Werkstoff*, 2004, v. 62(5), pp. 370–377.
- [28] Parchen C.F.A., Iwakiri, S., Zeller, F. Vibro-dynamic compression processing of low-density wood-cement composites // *Eur. J. Wood Prod.*, 2016, v. 74, pp. 75–81. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0982-1>
- [29] Ronquim R.M., Ferro F.S., Icimoto F.H., Campos C.I., Bertolini M.S., Christoforo A.L., Rocco Lahr F.A. Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composite with Lignocellulosic Grading Waste Variation // *International J. of Composite Materials*, 2014, v. 4(2), pp. 69–72.
- [30] Sá V.A., Bufalino L., Albino V.C.S., Corrêa A.A., Mendes L.M., Almeida N.A. Mixture of three reforestation species on the cement-wood panels production // *Revista Árvore*, 2012, v. 36, no. 3, pp. 549–557.
- [31] Sanaev V.G., Zaprudnov V.I., Gorbacheva G.A., Oblivin A.N. Factors affecting the quality of wood-cement composites // *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 2016, t. 9, no. 2, pp. 63–71.
- [32] Sahin H.T., Kaya A.I., Yaçın O.U., Kılınçarslan Ş., Şimşek Y., Mantanis G.I. A study on the production process and properties of cement-based wood composite materials // *J. Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University*, 2019, v. 10(2), pp. 219–228.
- [33] Ronquim R.M., Ferro F.S., Icimoto F.H., Campos C.I., Bertolini M.S., Christoforo A.L., Rocco Lahr F.A. Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composite with Lignocellulosic Grading Waste Variation // *International J. of Composite Materials*, 2014, v. 4(2), pp. 69–72.
- [34] Torkaman J., Ashori A., Momtazi A.S. Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks // *Construction and Building Materials*, 2014, v. 50, pp. 432–436.
- [35] Zaprudnov V.I., Sanaev V.G., Gorbacheva G.A., Karpachev S.P., Levushkin D.M. The influence of chemical additives on strength of wood-cement composite // *Materials Science Forum*, 2019, t. 972, pp. 69–76.
- [36] Zhou Y., Kamdem D.P. Effect of cement/wood ratio on the properties of cement-bonded particleboard using CCA-treated wood // *Forest Products J.*, 2002, v. 52 (2), pp. 73–81.

## Сведения об авторах

**Запруднов Вячеслав Ильич**<sup>✉</sup> — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), zaprudnov@mgul.ac.ru

**Никитин Владимир Валентинович** — д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), nikitinvv@bmstu.ru

**Карпачев Сергей Петрович** — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), karpachevs@mail.ru

**Махнин Георгий Александрович** — студент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», makhninga@student.bmstu.ru

Поступила в редакцию 12.12.2023.

Одобрено после рецензирования 16.12.2023.

Принята к публикации 10.04.2024.

## DEFORMATION PROPERTIES OF WOOD-CEMENT MATERIALS

V.I. Zaprudnov<sup>1✉</sup>, V.V. Nikitin<sup>1</sup>, S.P. Karpachev<sup>1</sup>, G.A. Makhnin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

<sup>2</sup>BMSTU, 5, Block 1, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

zaprudnov@mgul.ac.ru

The results of studies of deformations of wood-cement materials arising under the action of short-term loads are presented. For this purpose, the initial modulus of elasticity and the Poisson's ratio of wood-cement materials were determined. It is established that the value of the initial modulus of elasticity ranges from 335...495 MPa, depending on the class of wood-cement material in compressive strength B0,35...B1, and the Poisson's ratio is within 0,154...0,101. It is established that with an increase in the relative volume content of cement  $c_2$  from 0,50 to 0,58, the value of the initial modulus of elasticity increases and the shear modulus of the wood-cement material, and the Poisson's ratio decreases. It was found that for heat-insulating wood-cement material, an increase in the relative volume content of filler (ash)  $c_4$  from 0 to 0,1, with constant consumption of binder and organic filler, also allows increasing the value of the initial modulus of elasticity and shear modulus. For wood-cement material with a filler made of wood chips (wool), the value of the initial modulus of elasticity was 134 MPa, and the Poisson's ratio was 0,062. The coefficient of elasticity of wood-cement material, depending on the class, ranges from 0,60 to 0,75, and the coefficient of plasticity from 0,26 to 0,36. The obtained value of the ultimate compressibility of wood-cement material on average for the class of wood-cement material in terms of compressive strength B0,35, B0,75 and B1 is 2,55 mm/m. It is noted that the obtained values of the initial elastic modulus and Poisson coefficients of wood-cement materials are in good agreement with the data of previously performed work, however, they, as well as the strength of wood-cement materials, turned out to be 20...25 % lower than theoretical ones. It has been established that the conglomerate structure of wood-cement material determines the manifestation of both elastic and plastic properties associated with the formation and accumulation of microcracks, with the plastic properties of the gel component of cement stone. It is concluded that previously obtained analytical dependences can be used to predict creep deformations and shrinkage of wood-cement materials depending on the age of loading.

**Keywords:** wood-cement materials, creep and shrinkage deformations, modulus of elasticity, Poisson's ratio

**Suggested citation:** Zaprudnov V.I., Nikitin V.V., Karpachev S.P., Makhnin G.A. *Deformatsionnye svoystva drevesno-tsementnykh materialov* [Deformation properties of wood-cement materials]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 96–104. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-96-104

## References

- [1] Goncharova M.A., Bocharnikov A.S., Komarichev A.V. *Kompozitsionnye materialy na osnove tsementno-vodnykh aktivirovannykh sistem dlya in'ektsionnogo uplotneniya betona ograzhdayushchikh konstruksiy* [Composite materials based on cement-water activated systems for injection compaction of concrete enclosing structures]. *Stroitel'nye materialy* [Building Materials], 2015, no. 5, pp. 31–35.
- [2] Vasil'kov S.N. *Tekhnologii proizvodstva i primeniya ekologicheskikh i energoeffektivnykh stroymaterialov na osnove drevesnogo syr'ya* [Technologies of production and application of environmentally friendly and energy-efficient building materials based on wood raw materials]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka* [Building materials, equipment, technologies of the XXI century]. 2004, no. 11, p. 50.

- [3] Bazhenov Yu.M., Dem'yanova B.C., Kalashnikov V.I. *Modifitsirovannye vysokokachestvennye betony* [Modified high-quality concretes]. Moscow: DIA, 2006, 368 p.
- [4] Galebuy S. *Mekhanizm formirovaniya prochnosti i razrusheniya porizovannogo arbolita na steblyakh khlopchatnika* [The mechanism of strength formation and destruction of porous arbolite on cotton stems]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva* [Mechanization of construction], 2011, no. 10, pp. 23–24.
- [5] Andreev A.A., Kolesnikov G.N., Chalkin A.A. *Drevesno-tsementnyy kompozit s dobavkoy steatita kak konstruksionnyy i deformiruyushchiy material* [Wood-cement composite with the addition of steatite as a structural and deforming material]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: «Estestvennye i tekhnicheskie nauki»* [Scientific notes of Petrozavodsk State University. Ser.: «Natural and technical sciences»], 2014, no. 6 (143), pp. 75–78.
- [6] Arakelyan A.A. *Prochnostnye i deformativnye svoystva legkikh betonov v zavisimosti ot svoystv zapolniteley* [Strength and deformative properties of light concretes depending on the properties of aggregates]. *Dis. Cand. Sci. (Tech.)*. Moscow, 1986, 24 p.
- [7] Goncharova M.A., Chernyshev M.A. *Formirovanie sistem tverdeniya kompozitov na osnove tekhnogennoy syr'ya* [Formation of composite hardening systems based on technogenic raw materials]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials], 2013, no. 5, pp. 60–63.
- [8] Zaprudnov V.I. *Sozdanie kachestvennykh drevesno-tsementnykh materialov* [Creation of quality wood-cement materials]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 54–60. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-54-60
- [9] Zaytsev Yu.V. *Modelirovanie deformatsiy i prochnosti betona metodami mekhaniki razrusheniya* [Modeling of deformations and strength of concrete by methods of fracture mechanics]. Moscow: Stroyizdat, 1982, 196 p.
- [10] Korol' E.A. *Trekhsloynnye ograzhdayushchie zhelezobetonnye konstruksii iz legkikh betonov i osobennosti ikh rascheta* [Three-layer enclosing reinforced concrete structures made of light concrete and features of their calculation]. Moscow: DIA, 2001, pp. 52–69.
- [11] Novikova N.O., Yartsev V.P. *Primenenie arbolita i ego analogov v raznykh stranakh* [The use of arbolite and its analogues in different countries]. *Sinergiya nauk* [Synergy of Sciences], 2018, no. 19, pp. 524–537.
- [12] Mel'nikova L.V. *Tekhnologiya kompozitsionnykh materialov iz drevesiny* [Technology of composite materials made of wood]. Moscow: MSFU, 2004, 234 p.
- [13] Nanazashvili I.Kh. *Arbolit — effektivnyy stroitel'nyy material* [Arbolite is an effective building material]. Moscow: Stroyizdat, 1984, 125 p.
- [14] Podchufarov V.S., Chemleva T.A., Shcherbakov A.S. *Ob optimal'nom sostave arbolita povyshennogo kachestva* [On the optimal composition of high-quality arbolite]. *Nauchnye trudy MGUL* [Scientific works of MGUL], 1976, iss. 93, pp. 68–88.
- [15] Ryb'ev I.A. *Dve vazhneyshie zakonomernosti v svoystvakh materialov s konglomeratnym tipom struktury* [Two important patterns in the properties of materials with a conglomerate type of structure]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials], 1965, no. 1, pp. 17–20.
- [16] Tsepaev V.A. *Dlitel'naya prochnost' i deformativnost' konstruksionnykh drevesno-tsementnykh materialov i nesushchikh elementov na ikh osnove* [Long-term strength and deformability of structural wood-cement materials and bearing elements based on them]. *Dis. Dr. Sci. (Tech.)*. Nizhny Novgorod: NGASU, 2001, 46 p.
- [17] Khoroshun L.P., Shcherbakov A.S. *Prochnost' i deformativnost' arbolita* [Strength and deformability of arbolite]. Kiev: Nauk. Dumka, 1979, 192 p.
- [18] Savin V.I., Kolosov G.E., Sokolov B.A. *Stenovye paneli iz porizovannogo arbolita* [Wall panels made of porous arbolite]. *Legkie betony na osnove otkhodov promyshlennosti i konstruksii iz nikh* [Book Light concretes based on industrial waste and structures made from them]. Moscow: NIIZHB, 1983, pp. 8–14.
- [19] Savin V.I., Davidyuk A.N. *Tekhnologiya i osnovnye fiziko-mekhanicheskie svoystva porizovannogo arbolita na polimernom vyazhushchem* [Technology and basic physico-mechanical properties of porous arbolite on a polymer binder]. *Nauchnye trudy MGUL* [Scientific works of MGUL], 1986, iss. 180, pp. 30–43.
- [20] Jayanudin J., Fahrurrozi M., Wirawan S.K., Rochmadi R. *Mathematical modeling of the red ginger oleoresin release from chitosan-based microcapsules using emulsion crosslinking method*. *Engineering Science and Technology*, 2019, v. 22, iss. 2, pp. 458–467.
- [21] Shchibrya A.Yu. *Effektivnyy teploizolyatsionnyy material iz porizovannogo arbolita na risovoy luzge* [Effective thermal insulation material from porous arbolite on rice husk]. *Dis. Cand. Sci. (Tech.)*. Rostov-on-Don, 2000, p. 21.
- [22] Boadu K.B., Antwi-Boasiako C., Ofosuhene L. *Solvent extraction of inhibitory substances from three hardwoods of different densities and their compatibility with cement in composite production*. *J. of the Indian Academy of Wood Science*, 2018, v. 15, pp. 140–148.
- [23] Berkenkamp R. *Wood fiber-cement product, process and properties*. Ed. A.A. Moslemi, *Inorganic-Bonded Wood and Fiber Composite Materials*. Madison, WI: Forest Products Society, 2017, pp. 8–13.
- [24] Cheumani Y.A.M., Ndikontar M., De Jéso B, Sèbe G. *Probing of wood-cement interactions during hydration of wood-cement composites by proton low-field NMR relaxomet*. *J. Mater. Sci.*, 2011, v. 46, pp. 1167–1175.
- [25] Fan M., Ndikontar M.K., Zhou X., Ngamveng J.N. *Cement-bonded composites made from tropical woods. Compatibility of wood and cement*. *Construction and Building Materials*, 2012, v. 36, pp. 135–140.
- [26] Frybort S., Mauritz R., Teischinger A., Muller U. *Cement bonded composites – a mechanical review*. *BioResources*, 2008, v. 3(2), pp. 602–626.
- [27] Jorge F.C., Pereira C., Ferreira J.M.F. *Wood-cement composites: a review*. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 2004, v. 62(5), pp. 370–377.
- [28] Parchen C.F.A., Iwakiri, S., Zeller, F. *Vibro-dynamic compression processing of low-density wood-cement composites*. *Eur. J. Wood Prod.*, 2016, v. 74, pp. 75–81. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0982-1>
- [29] Ronquim R.M., Ferro F.S., Icimoto F.H., Campos C.I., Bertolini M.S., Christoforo A.L., Rocco Lahr F.A. *Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composite with Lignocellulosic Grading Waste Variation*. *International J. of Composite Materials*, 2014, v. 4(2), pp. 69–72.
- [30] Sá V.A., Bufalino L., Albino V.C.S., Corrêa A.A., Mendes L.M., Almeida N.A. *Mixture of three reforestation species on the cement-wood panels production*. *Revista Árvore*, 2012, v. 36, no. 3, pp. 549–557.

- [31] Sanaev V.G., Zaprudnov V.I., Gorbacheva G.A., Oblivin A.N. Factors affecting the quality of wood-cement composites. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering, 2016, t. 9, no. 2, pp. 63–71.
- [32] Sahin H.T., Kaya A.I., Yalçın O.U., Kılınçarslan Ş., Şimşek Y., Mantanis G.I. A study on the production process and properties of cement-based wood composite materials. J. Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University, 2019, v. 10(2), pp. 219–228.
- [33] Ronquim R.M., Ferro F.S., Icimoto F.H., Campos C.I., Bertolini M.S., Christoforo A.L., Rocco Lahr F.A. Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composite with Lignocellulosic Grading Waste Variation. International J. of Composite Materials, 2014, v. 4(2), pp. 69–72.
- [34] Torkaman J., Ashori A., Momtazi A.S. Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. Construction and Building Materials, 2014, v. 50, pp. 432–436.
- [35] Zaprudnov V.I., Sanaev V.G., Gorbacheva G.A., Karpachev S.P., Levushkin D.M. The influence of chemical additives on strength of wood-cement composite. Materials Science Forum, 2019, t. 972, pp. 69–76.
- [36] Zhou Y., Kamdem D.P. Effect of cement/wood ratio on the properties of cement-bonded particleboard using CCA-treated wood. Forest Products J., 2002, v. 52 (2), pp. 73–81.

## Authors' information

**Zaprudnov Vyacheslav Il'ich**  — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), zaprudnov@mgul.ac.ru

**Nikitin Vladimir Valentinovich** — Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), nikitinvv@bmstu.ru

**Karpachev Sergey Petrovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), karpachevs@mail.ru

**Makhnin Georgiy Aleksandrovich** — Student of the BMSTU, makhninga@student.bmstu.ru

Received 12.12.2023.

Approved after review 26.12.2023.

Accepted for publication 10.04.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest