

Научная статья

УДК 674.816.2:674.038.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-201-215

## Водопоглощение термически модифицированного древесного наполнителя термодревесно-цементной композиции

**В.Ю. Чернов**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [X-4439-2019](https://orcid.org/0000-0001-9496-7340),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9496-7340>

**И.Г. Гайсин**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAH-8298-2020](https://orcid.org/0000-0002-3707-1342),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3707-1342>

**А.Н. Носова**<sup>1</sup>, аспирант; ResearcherID: [JQW-3871-2023](https://orcid.org/0009-0009-9788-9929),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9788-9929>

**Е.М. Мальцева**<sup>2</sup>, директор; ResearcherID: [JQW-0124-2023](https://orcid.org/0009-0004-4868-8294),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4868-8294>

<sup>1</sup>Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; [chernovvy@volgatech.net](mailto:chernovvy@volgatech.net)<sup>✉</sup>, [GaisinIG@volgatech.net](mailto:GaisinIG@volgatech.net), [NosovaAN79@mail.ru](mailto:NosovaAN79@mail.ru)

<sup>2</sup>ООО «КСМ «Амарант», ул. Димитрова, д. 75, г. Йошкар-Ола, Россия, 424039; [lenkamalek@mail.ru](mailto:lenkamalek@mail.ru)

Поступила в редакцию 14.09.23 / Одобрена после рецензирования 13.12.23 / Принята к печати 15.12.23

**Аннотация.** Рассматриваются технологические аспекты получения нового эффективного композиционного материала на основе термически модифицированного древесного наполнителя и цементных вяжущих веществ – термодревбетона. Исследовано влияние содержания воды в наполнителе из термически модифицированной древесины на качественные показатели древесно-цементной композиции. Для решения теоретических задач и прикладных вопросов прогнозирования технологических параметров производства термодревесно-цементной композиции разработаны математические модели влияния продолжительности вымачивания и температуры воды на относительное изменение массы (увлажнение) наполнителя. На начальном этапе были выполнены экспериментальные исследования по определению воздействия предварительного вымачивания наполнителя на процесс созревания термодревбетона и качество получаемого материала. Образцы изготавливались способом вибропрессования полусухой смеси с использованием сухого и предварительно вымоченного наполнителя из термически модифицированной древесины, а также способом вибролитья. Определены закономерности влагопереноса между наполнителем и цементно-песчаным раствором, а также установлено, что предварительное вымачивание наполнителя из термически модифицированной древесины оказывает положительное влияние на прочностные и качественные показатели термодревбетона. Наоборот, использование сухого наполнителя из термически модифицированной древесины при данном способе формирования оказывает существенное отрицательное влияние на качество готового материала. Отдельно был исследован процесс влагопоглощения наполнителем из термически модифицированной древесины путем вымачивания, установлены основные закономерности и особенности сорбции воды наполнителем с интервалами времени 30, 60, 120, 180 и 300 мин и при температуре воды 3–4, 16–18 и 75–85 °С. Также определено, что дополнительный прогрев воды значительно ускоряет интенсивность сорбции воды и степень увлажне-

ния заполнителей из термически модифицированной древесины, а размер их частиц не играет существенной роли в процессе. При этом рекомендуемая продолжительность вымачивания заполнителя из термически модифицированной древесины перед подготовкой смеси и формованием изделий из термодревбетона методом полусухого вибропрессования составляет 30 мин.

**Ключевые слова:** термически модифицированная древесина, ТМД, влажность термически модифицированной древесины, вымачивание заполнителя из термически модифицированной древесины, термодревесно-цементная композиция, вибропрессование полусухой термодревесно-цементной композиции, термодревбетон, ТДБ

**Благодарности:** Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00098, <https://rscf.ru/project/22-79-00098/>.

**Для цитирования:** Чернов В.Ю., Гайсин И.Г., Носова А.Н., Мальцева Е.М. Водопоглощение термически модифицированного древесного заполнителя термодревесно-цементной композиции // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 201–215. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-201-215>

Original article

## Water Absorption of Thermally Modified Wood Filler of Thermal Wood-Cement Composition

*Vasily Yu. Chernov*<sup>1✉</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [X-4439-2019](https://orcid.org/0000-0001-9496-7340), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9496-7340>

*I'shat G. Gaisin*<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAH-8298-2020](https://orcid.org/0000-0002-3707-1342), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3707-1342>

*Anzhelika N. Nosova*<sup>1</sup>, Postgraduate Student; ResearcherID: [JQW-3871-2023](https://orcid.org/0009-0009-9788-9929), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9788-9929>

*Elena M. Maltseva*<sup>2</sup>, Chief Executive Officer; ResearcherID: [JQW-0124-2023](https://orcid.org/0009-0004-4868-8294), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4868-8294>

<sup>1</sup>Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; [chernovvy@volgatech.net](mailto:chernovvy@volgatech.net)<sup>✉</sup>, [GaisinIG@volgatech.net](mailto:GaisinIG@volgatech.net), [NosovaAN79@mail.ru](mailto:NosovaAN79@mail.ru)

<sup>2</sup>LLC “СМР “AMARANT”, ul. Dimitrova, 75, Yoshkar-Ola, 424039, Russian Federation; [lenkamalek@mail.ru](mailto:lenkamalek@mail.ru)

Received on September 14, 2023 / Approved after reviewing on December 13, 2023 / Accepted on December 15, 2023

**Abstract.** In this article, the technological aspects of obtaining a new effective composite material based on thermally modified wood filler and cement binders – thermal wood concrete – are considered. The influence of water content in thermally modified wood filler on the qualitative characteristics of a wood-cement composition has been studied. To solve the theoretical problems and applied issues of forecasting the technological parameters for the production of thermal wood-cement composition, the mathematical models of the effect of soaking duration and water temperature on the relative change in the mass (dampening) of the filler have been developed. At the initial stage, experimental studies have been carried out to determine the effect of pre-soaking the filler on the curing of thermal wood concrete and the quality of the resulting material. The samples have been produced via vibrocompression of a semi-dry mixture using dry and pre-soaked filler made of thermally modified wood, as well as via vibratory casting. The regularities of moisture transfer between the filler and the



cement-sand mortar have been determined, and it has also been established that pre-soaking the thermally modified filler has a positive effect on the strength and quality characteristics of thermal wood concrete. On the contrary, the use of the dry filler made of thermally modified wood in this molding method has a significant negative impact on the quality of the finished material. The process of moisture absorption by the thermally modified wood filler by soaking has been studied separately. The main regularities and features of water sorption by the filler have been established at the time intervals of 30, 60, 120, 180 and 300 minutes and at the water temperatures of 3–4, 16–18 and 75–85 °C. It has also been determined that additional water heating significantly accelerates the intensity of water sorption and the degree of dampening of thermally modified wood fillers, and the size of their particles does not play a significant role in the process. In this case, the recommended duration of soaking the thermally modified wood filler before preparing the mixture and molding the products made of thermal wood concrete via semi-dry vibrocompression is 30 minutes.

**Keywords:** thermally modified wood, TMW, thermally modified wood moisture content, soaking the thermally modified filler, thermal wood-cement composition, vibrocompression of a semi-dry thermal wood-cement composition, thermal wood concrete, TWC

**Acknowledgements:** The research was supported by the Russian Science Foundation grant no. 22-79-00098, <https://rscf.ru/project/22-79-00098/>.

**For citation:** Chernov V.Yu., Gaisin I.G., Nosova A.N., Maltseva E.M. Water Absorption of Thermally Modified Wood Filler of Thermal Wood-Cement Composition. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 2, pp. 201–215. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-201-215>

### *Введение*

В настоящее время ведутся разработки по созданию нового эффективного термодревесно-цементного композитного строительного материала, сочетающего в себе преимущества древесины и искусственных камней (бетонов). Такие материалы, как арболит, фибролит, наряду с высокими теплоизоляционными свойствами имеют недостатки, присущие древесине: высокую степень водопоглощения и подверженность грибным поражениям [2, 4, 5, 20]. Водопоглощение отрицательно влияет на прочность, морозостойкость, теплопроводность и другие эксплуатационные свойства готового изделия [27]. Грибные поражения создают небезопасные для человека условия внутри помещений.

Применение в бетонах в качестве органического заполнителя термически модифицированной древесины (ТМД) позволило свести к минимуму риск образования грибка и водопоглощение материала [21]. Также к преимуществам термической модификации следует отнести снижение количества экстрактивных веществ и кислот в древесном заполнителе, являющихся «цементными ядами», уменьшение плотности и повышение теплопроводности [22], что в совокупности существенно улучшает эксплуатационные свойства древесно-цементной композиции [9, 26, 29]. Данный материал впервые был получен на базе научно-производственного объединения «МариТермоДревИндустрия» под авторским названием термодревбетон (ТДБ) [6, 11]. Основная часть поисковых исследований проводится в Поволжском государственном технологическом университете.

Наиболее близкие разработки древесно-цементных композиций с добавлением мелкодисперсных частиц из ТМД были выполнены за рубежом [18, 19, 23–25, 28], а также в России [8, 10]. К сожалению, в указанных источниках не представлены данные о свойствах таких композиций и влиянии на эти свойства различных факторов, о технологических и рецептурных параметрах, а также теоретические расчетные методики.

Для получения высококачественного строительного материала необходимо четкое соблюдение рецептурных требований и общих технологических принципов его получения. При изготовлении материалов на основе гидравлических вяжущих значительное влияние оказывают количественное содержание воды в бетонной смеси, химические добавки, наличие влаги при выдержке материала до набора им проектной прочности. Как нехватка количества воды, так и ее избыток негативно влияют на физико-механические, эксплуатационные и иные свойства готового материала. Это связано с особенностями процесса гидратации цементных вяжущих веществ [1, 15, 16].

В отличие от классических тяжелых бетонов, изготовленных на минеральных природных заполнителях, в древесно-цементных композициях у крупного заполнителя – древесины впитываемость влаги во много раз выше, что усложняет технологию их получения как вибропрессованием, так и вибролитьем. Отличительной особенностью процесса производства арболита и фибролита является подготовка древесного сырья, которая заключается в его выдержке не менее 2 мес. при положительной температуре в целях снижения негативного воздействия экстрактивных веществ. Для улучшения технологических и эксплуатационных свойств в арболитовую смесь вносят химические добавки, ускоряющие твердение, регулирующие пористость, повышающие защитные и бактерицидные свойства и т. д. [5]. Наиболее широкое применение при изготовлении арболита находят такие добавки, как хлорид и нитрат кальция, сернокислый глинозем, жидкое натриевое стекло и др. [13].

Несмотря на то, что ТДБ является древесно-цементной композицией, его ключевая особенность – заполнитель из ТМД, имеющей отличные от натуральной древесины свойства, в т. ч. и по водо- и влагопоглощению. У ТМД также более низкая равновесная влажность: при стандартных условиях среды (температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 65 %) влажность натуральной древесины составляет около 12 % [14], ТМД – примерно 2–4 % [17]. Это усредненные показатели, которые зависят от породы древесины, степени (класса) термической модификации и т. д.

Ранее нами проведены исследования адгезии цементно-песчаного раствора и ТМД [12], а также прочностных и теплопроводных свойств ТДБ. Установлены взаимно-противоположные закономерности влияния содержания воды в бетонной смеси и отдельно в заполнителе из ТМД на свойства композиции. Поверхностное очищение ТМД путем промывания от продуктов термической модификации, сопровождающееся ее увлажнением, а на практике и вымачиванием, негативно действует на прочность сцепления ТМД и цементно-песчаного раствора. Обнаруженные закономерности легли в основу способа изготовления ТДБ [6]. Однако на практике сухой заполнитель из ТМД

оказался непригодным для получения ТДБ методом вибропрессования полусухой смеси [3, 12].

Цель работы – исследование процесса увлажнения заполнителя из ТМД и влияния его влажности на качество ТДБ, полученного способом полусухого формования.

#### *Объекты и методы исследования*

*Полусухое формование ТДБ.* Несмотря на то, что ТМД обладает пониженным водопоглощением по сравнению с натуральной древесиной, применяемой в классических древесно-цементных композициях (арболит, фибролит и т. д.), для получения качественного материала, а именно бетонов, необходимо рассмотреть непосредственно процесс гидратации (созревания и набора прочности) термодревесно-цементной композиции. Как уже было отмечено, повышенное содержание влаги негативно влияет на адгезионные свойства ТМД и цементного камня. С другой стороны, недостаток влаги оказывает существенное воздействие на марочную прочность получаемого бетона. Поэтому в ходе исследования была разработана упрощенная методика, заключающаяся в визуальном анализе образцов, изготовленных по следующим рецептурам:

группа 1-1 – ТДБ, полученный вибропрессованием полусухой смеси с применением заполнителя из ТМД, предварительно вымоченного посредством обильной промывки;

группа 2-1 – ТДБ, спрессованный аналогично группе 1-1, только с использованием заполнителя из ТМД в сухом состоянии;

группа 3-1 – ТДБ, изготовленный способом вибролитья, заполнитель из ТМД также в сухом состоянии.

Третья группа образцов применялась для выявления сходства или различия между композициями, полученными методами вибропрессования и вибролитья.

Процесс созревания (выдержки) ТДБ осуществлялся при стандартных условиях среды без дополнительной тепловлажностной обработки. Образцы изготавливались в виде кубов размерами 100×100×100 мм. Наблюдение выполнялось до момента высыхания образца, что определялось по изменению его цвета от темного к светло-серому. В связи с тем, что после высыхания бетонных смесей на цементном вяжущем процесс гидратации существенно замедляется, этот период времени был принят в исследовании за время созревания ТДБ.

*Водопоглощение заполнителя из ТМД.* Были подготовлены частицы заполнителя из ТМД лиственных пород *Tilia europaea* и *Populus tremula* с классом (режимами) обработки КОЛОР+ по технологии AST (185 °С) [3]. Заполнитель имеет вид наклонного параллелепипеда с длиной 10–20 мм, шириной 5–20 мм и толщиной 2–5 мм (рис. 1). Измельчение до заданных размеров и форм термической модификации осуществлялось на специально разработанной установке [7]. Также рассчитана насыпная плотность, которая составила 180–190 кг/м<sup>3</sup>. Влажность заполнителя – 2–4 %.



Рис. 1. Заполнитель из ТМД для получения ТДБ  
Fig. 1. The TMW filler for producing TWC

Влажность заполнителя из ТМД определена весовым методом. Масса – с помощью лабораторных весов с точностью 0,001 г. В качестве варьируемых факторов были приняты продолжительность вымачивания в воде, ее температура и размер частиц заполнителя. По сравнению со стандартным методом установления влажности также изменены продолжительность насыщения образцов, периодичность измерений, размеры образцов и температура. Это обусловлено тем, что данные факторы на практике могут изменяться в широких пределах и оказывают существенное влияние на водопоглощение как обычной древесины, так и ТМД, что, в свою очередь, воздействует на набор прочности ТДБ после формования и на эксплуатационные свойства получаемых изделий. В исследовании использовалась техническая вода по ГОСТ 23732–2011.

Вымачивание заполнителя в виде щепы из ТМД выполнялось в воде при различных температурах (табл. 1). Для определения влияния размера щепы на водопоглощение отдельно подготовлена 4-я группа образцов, отличающихся более мелкими размерами частиц заполнителя.

Таблица 1

**Описание условий подготовки исследованных образцов по группам**  
**The description of the studied sample preparation conditions by groups**

Группа	Описание	Условия подготовки образцов	Обоснование
1-2	Измельченный заполнитель из ТМД со средними технологически установленными размерами:	Вымачивание в холодной воде температурой 3–4 °С	Температура воды, поступающей непосредственно из подземных источников (скважины, колодцы и т. д.), характерных для производственных процессов получения бетонов
2-2	длина – 15 мм;		
3-2	ширина – 12 мм; толщина – 3 мм		
4-2	Мелкий измельченный заполнитель из ТМД с размерами: длина – 10 мм; ширина – 5 мм; толщина – 2 мм	Вымачивание в горячей воде температурой 75–85 °С	Температура, полученная при дополнительном прогреве
		Аналогично группе 1-2	

Взвешивание щепы осуществлялось на 30, 60, 120, 180 и 300-й минутах вымачивания. Такой интервал времени выбран с учетом общей закономерности влагопоглощения древесины, которая характеризуется быстрой сорбцией воды в начале увлажнения от состояния, близкого к абсолютно сухому, и последующим снижением интенсивности увлажнения с повышением влажности древесины.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

*Влияние рецептуры и способа формования на качество ТДБ.* На рис. 2 и 3 представлены внешний вид поверхности и целостность ребер образцов из термодревесно-цементной композиции трех групп.

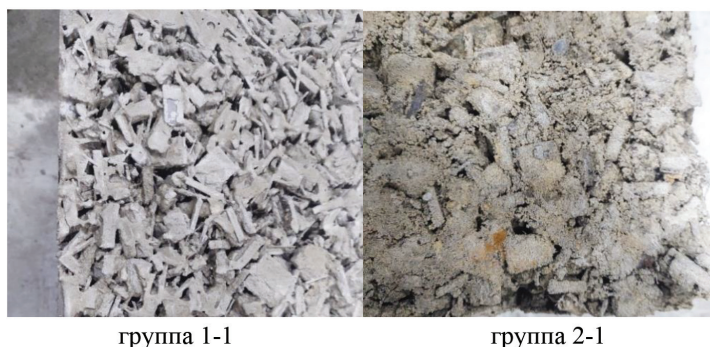


Рис. 2. Поверхности и ребра образцов ТДБ, полученных способом полусухого вибропрессования с использованием предварительно вымоченного (слева) и сухого (справа) заполнителя из ТМД

Fig. 2. The surfaces and edges of the TWC samples obtained via semi-dry vibrocompression using the pre-soaked (left) and dry (right) TMW fillers

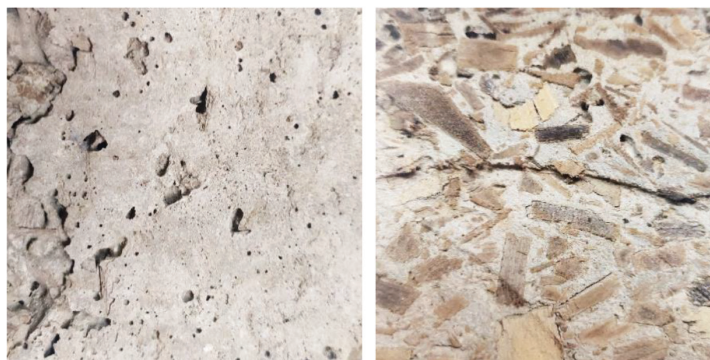


Рис. 3. Внешняя поверхность (слева) и поперечный срез (справа) образцов ТДБ, полученных способом вибролитья (группа 3-1)

Fig. 3. The outer surface (left) and cross-section (right) of the TWC samples obtained via vibratory casting

В результате исследования опытных образцов из ТДБ и процесса их гидратации было установлено следующее:

1) наихудшее качество имеют образцы ТДБ, полученные способом вибропрессования полусухой смеси с использованием сухого заполнителя из ТМД

(группа 2-1) – рис. 2, справа. Это выражается в сочетании кажущейся твердости с излишней хрупкостью материала, особенно на ребрах и углах образцов. Процесс созревания ТДБ до полного высыхания был коротким и при стандартных условиях среды составил 12–18 ч;

2) период созревания образцов ТДБ, полученных аналогичным (1) способом на вымоченном заполнителе из ТМД (группа 1-1), составил 110–120 ч. При этом качество образцов по прочности было существенно лучше (рис. 2, слева): углы и ребра не разрушались, расположенные на поверхности частицы заполнителя не отделялись при внешнем механическом воздействии, образец оставался целостным;

3) вибролитые образцы на сухом заполнителе из ТМД (группа 3-1) (рис. 3) созревали в течение 180–190 ч. В отличие от вибропресованных данные образцы имели более однородную, плотную и малопустотную структуру.

*Водопоглощение заполнителя из ТМД.* Результаты исследования водопоглощения заполнителя из ТМД в виде технологической щепы представлены в табл. 2. В ней отдельно показаны массы вымоченных образцов, измеренные через установленные интервалы времени, а также абсолютные (г) и относительные (%) изменения величины по сравнению с начальным состоянием. Поскольку исходное состояние щепы из ТМД было близко к абсолютно сухому, то относительное изменение массы (рис. 4) для приблизительной оценки на практике можно количественно приравнять к влажности древесины.

Таблица 2

**Результаты экспериментального исследования водопоглощения  
заполнителя из ТМД**

**The results of an experimental study of water absorption by the TMW fillers**

Показатель (средняя величина)	Продолжительность выдержки в воде (вымачивания), мин					
	0	30	60	120	180	300
<i>Группа 1-2</i>						
Масса, г	1,147	1,364	1,301	1,256	1,304	1,326
Абсолютное изменение массы, г	–	0,217	0,154	0,109	0,157	0,179
Относительное изменение массы, %	–	19	13	10	14	16
<i>Группа 2-2</i>						
Масса, г	1,501	1,819	1,798	1,854	1,921	2,003
Абсолютное изменение массы, г	–	0,318	0,297	0,353	0,420	0,502
Относительное изменение массы, %	–	21	21	24	28	33
<i>Группа 3-2</i>						
Масса, г	1,116	1,765	2,181	2,405	2,545	2,751
Абсолютное изменение массы, г	–	0,649	1,065	1,275	1,429	1,635
Относительное изменение массы, %	–	58	95	116	128	147
<i>Группа 4-2</i>						
Масса, г	0,693	0,802	0,796	0,820	0,850	0,872
Абсолютное изменение массы, г	–	0,109	0,103	0,127	0,157	0,179
Относительное изменение массы, %	–	16	15	18	23	26



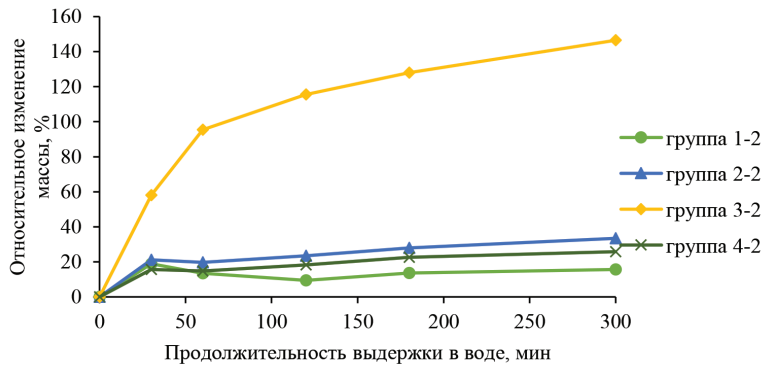


Рис. 4. Динамика относительного изменения средней массы заполнителей из ТМД при вымачивании в воде

Fig. 4. The dynamics of the relative change in the average mass of the TMW fillers when soaked in water

*Рецептура и способ формования ТДБ.* Исследование опытных образцов из ТДБ, полученных при разных рецептуре и способе формования, показало, что, несмотря на отрицательное влияние на прочность адгезии термодревесно-цементной композиции, увлажнение заполнителя из ТМД имеет более значимое положительное воздействие на прочность всей композиции. Это связано с необходимостью определенного количества воды для гидратации цементного вяжущего на протяжении всего периода созревания (выдержки) с учетом различных факторов потери влаги.

Равновесная влажность ТМД небольшая и составляет порядка 2–4 %, поэтому при замешивании полусухого цементно-песчаного раствора и последующих формовании и выдержке происходит естественный процесс переноса влаги от влагонасыщенного раствора к сухому заполнителю из ТМД. Это подтверждают и ранние исследования, в которых было установлено, что поверхностные слои ТМД, а именно 1–1,5 мм в радиальном и тангенциальном направлениях и до 4 мм вдоль волокон, имеют высокую степень сорбции воды, равную водопоглощению натуральной древесины [6, 11]. В связи с этим цементно-песчаный раствор после замешивания начинает быстро терять влагу, процесс гидратации замедляется и останавливается за более короткий промежуток времени. Как следствие, композиция затвердевает, но не набирает прочности и становится похожей на «песочное печенье», т. е. при ощутимой твердости имеет высокую хрупкость и поэтому не выдерживает даже малые ударные нагрузки.

Перенос влаги от раствора к заполнителю из ТМД подтверждает и тот факт, что образцы ТМД после высыхания разбухают на 1,5–2 мм на каждые 100 мм длины, или на 1,5–2 %, с образованием трещин на поверхности (рис. 5).

Обратный процесс наблюдается при предварительном вымачивании заполнителя из ТМД: излишняя влага переходит от заполнителя к цементно-песчаному раствору. Это предположение подтверждается заметным в 1-й час выдержки повышением влажности цементно-песчаного раствора относительно первоначального состояния, полученного для формования.



Рис. 5. Трещины от разбухания заполнителя из ТМД на поверхности перегородок пустотелого стенового блока из ТДБ

Fig. 5. The cracks due to swelling of the TMW filler on the surface of the partitions of the TWC hollow wall block

К положительной стороне предварительного вымачивания также следует отнести сохранение исходного размера образца, соответствующего форме и размерам самой матрицы. При этом на поверхности ТДБ не образовывались трещины от разбухания.

Как уже было сказано, структура ТДБ, полученного вибролитьем, однороднее и плотнее благодаря более жидкому и пластичному состоянию цементно-песчаного раствора. Следует предположить, что такая структура характеризуется более высокими прочностными и морозостойкими свойствами, однако вследствие меньшей пористости имеет худшие теплофизические свойства. Как показал эксперимент, на практике при вибролитье использование сухого или вымоченного заполнителя из ТМД не оказывает существенного влияния на получаемый материал, однако после замешивания смеси ТДБ в процессе формирования благодаря высокой интенсивности сорбции воды сухой ТМД возможно снижение пластичности смеси, что может негативно повлиять на однородность и плотность получаемого материала.

*Водопоглощение заполнителя из ТМД.* Полученные экспериментальные зависимости водопоглощения заполнителей из ТМД в виде щепы представляют научно-практический интерес. На основе диаграммы (см. рис. 4) следует выделить главные особенности процесса влагопоглощения:

наибольшая интенсивность естественного водопоглощения в воде без прогрева (группы 1-2, 2-2 и 4-2) наблюдается в течение первых 30 мин;

при вымачивании образцов с 30-й до 60-й минуты, наоборот, происходит стабилизация и приостановка сорбции влаги ТМД (группы 2-2 и 4-2) или незначительное снижение влажности (группа 1-2);

после 120 мин вымачивания отмечается небольшое стабильное повышение влажности заполнителя из ТМД;

наименьшая интенсивность сорбции воды установлена для образцов с одинаковой температурой воды для выдержки (группы 1-2 и 4-2), а с повышением температуры воды интенсивность влагопоглощения увеличивается.

Для прогнозирования изменения массы (водопоглощения) заполнителя из ТМД разработана математическая модель влияния продолжительности выдержки в воде и ее температуры на указанные параметры (рис. 6, а). Модель имеет вид

$$z = (a + bx + cx^2 + dy)/(1 + ey),$$

где  $z$  – выходной фактор;  $a, b, c, d, e$  – коэффициенты математической модели;  $x, y$  – варьируемые факторы.

Поскольку в технологических процессах получения ТДБ и изделий из него актуальна интенсификация подготовки сырья и производства готового материала, а также экспериментально установлена высокая интенсивность сорбции воды в начальный момент времени, на практике интерес может представлять разработка модели набора влаги наполнителем из ТМД в первые 30 мин при разных температурах воды (рис. 6, б). С точки зрения практического использования данную модель целесообразно представить в упрощенном виде, например в виде линейной зависимости:

$$z = a + bx + cy.$$

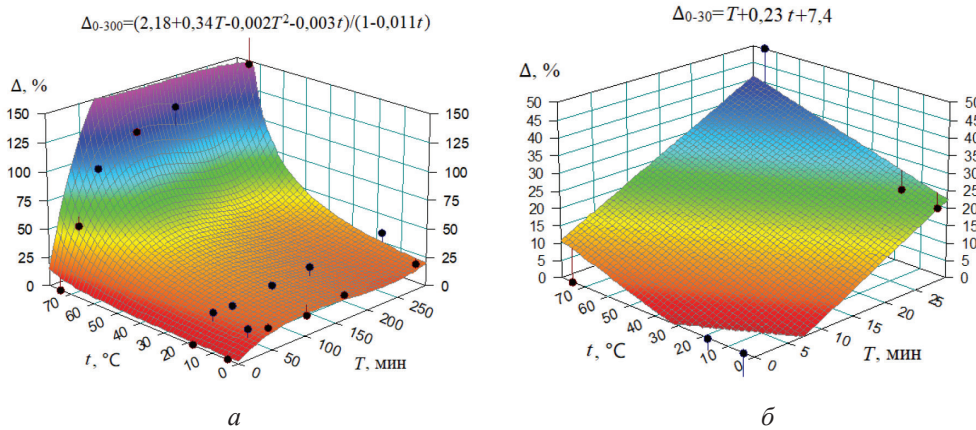


Рис. 6. Модели и поверхности отклика влияния продолжительности выдержки в воде и ее температуры на относительное изменение массы (увлажнения) наполнителя из ТМД для диапазона продолжительности выдержки: а – от 0 до 300 мин; б – от 0 до 30 мин ( $\Delta_{0-300}$  и  $\Delta_{0-30}$  – относительное изменение массы (увлажнение) наполнителя из ТМД, %;  $T$  – продолжительность выдержки в воде, мин;  $t$  – температура воды, °C)

Fig. 6. The models and response surfaces of the effect of soaking duration and water temperature on the relative change in the mass (dampening) of the TMW filler: а – from 0 to 300 min; б – from 0 to 30 min ( $\Delta_{0-300}$  и  $\Delta_{0-30}$  – relative change in the mass (dampening) of the TMW filler, %;  $T$  – soaking duration, min;  $t$  – water temperature, °C)

В табл. 3 представлены показатели регрессионного анализа для разработанных моделей (рис. 6).

Таблица 3

**Результаты регрессионного анализа для моделей влияния продолжительности выдержки в воде и ее температуры на свойства наполнителя из ТМД**  
**The results of regression analysis for the models of the effect of water-soaking duration and water temperature on the properties of the TMW filler**

Показатель	Диапазон времени, мин	
	0–300	0–30
$r^2$	0,96	0,84
Скорректированный $r^2$	0,94	0,61
Остаточная стандартная ошибка, %	11,30	10,10
F-значение	46,85	8,07

Примечание:  $r^2$  – коэффициент детерминации; F-значение – показатель критерия Фишера.

### Заключение

Установлено, что предварительное вымачивание заполнителя из термически модифицированной древесины положительно влияет на прочностные и качественные показатели термодревбетона, получаемого способом вибропрессования полусухой термодревесно-цементной композиции.

Разработана модель комплексного влияния температуры воды и продолжительности вымачивания на относительное изменение массы заполнителя из термически модифицированной древесины. В дальнейшем модель послужит основой теоретического определения конечной влажности или продолжительности выдержки в зависимости от температуры воды. Для практического использования результатов исследования предложена упрощенная линейная зависимость, которая позволяет прогнозировать те же показатели в диапазоне времени от 0 до 30 мин.

Рекомендуемая продолжительность вымачивания заполнителя из термически модифицированной древесины перед подготовкой смеси и формованием изделий из термодревбетона методом полусухого вибропрессования составляет 30 мин.

Температура воды оказывает влияние на интенсивность сорбции и степень увлажнения материала в первые 30 мин. Однако при последующем вымачивании при естественных условиях (при температуре воздуха от 0 до 20 °С) наблюдается лишь небольшое непрерывное плавное увеличение массы, объясняемое повышением влажности.

Дополнительный прогрев воды существенно ускоряет интенсивность сорбции воды и степень увлажнения заполнителя из термически модифицированной древесины. Однако данное мероприятие усложняет технологический процесс получения материала, снижает общую производительность и увеличивает затраты на энергию, а перенасыщение влагой может повлечь за собой ухудшение качества получаемых изделий.

Экспериментально установлено, что существенная взаимосвязь между размерными показателями заполнителя из термически модифицированной древесины и процессом его водопоглощения (интенсивностью сорбции и конечной степенью увлажнения) отсутствует.

Полученные результаты могут быть использованы для моделирования технологических параметров подготовки сырья и получения изделий из термодревбетона методом полусухого вибропрессования.

В дальнейшем планируется выполнить исследования во временном диапазоне вымачивания заполнителя из термически модифицированной древесины 0–30 мин, а также изучить влияние начальной влажности такой древесины на последующую сорбцию воды.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Горностаева Е.Ю., Ласман И.А., Федоренко Е.А., Камоза Е.В. Древесно-цементные композиции с модифицированной структурой на макро-, микро- и наноуровнях // Строит. материалы. 2015. № 11. С. 13–16.

Gornostaeva E.Yu., Lasman I.A., Fedorenko E.A., Kamoza E.V. Wood-Cement Compositions with Structures Modified at Macro-, Micro-, and Nano-Levels. *Stroitel'nye Materialy* = Construction Materials, 2015, no. 11, pp. 13–16. (In Russ.).

2. Крутов П.И., Склизков Н.И., Наназашвили И.Х., Сиrotкина Р.Б. и др. Использование отходов древесины для получения эффективных строительных материалов: обзор. М.: ОНТИ ЦНИИЭПсельстроя, 1978. 24 с.

Krutov P.I., Sklizkov N.I., Nanazashvili I.Kh., Sirotkina R.B. et al. *The Use of Wood Waste to Produce Efficient Building Materials: Review*. Moscow, Scientific and Technical Information Division of the Central Research Institute for Experimental Design of Rural Construction, 1978. 24 p. (In Russ.).

3. Мальцева Е.М. Разработка нормативно-технической основ на инновационный древесно-цементный композитный материал и на изделия из него: магистер. дис. (27.04.01). Йошкар-Ола, 2023. 120 с.

Mal'tseva E.M. *Development of Regulatory and Technical Framework for Innovative Wood-Cement Composite Material and Products Made of it*: Master's Thesis (27.04.01). Yoshkar-Ola, 2023. 120 p. (In Russ.).

4. Наназашвили И.Х. Быстровозводимые малоэтажные монолитные дома из арболита. Ч.1 // Строит. материалы, оборудование, технологии XXI в. 2009. № 11. С. 14–15.

Nanazashvili I.Kh. The "Quick-to-Erect" Low-Rise Monolith Buildings from the Arbolite: Part 1. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka* = Construction Materials, Equipment, Technologies of the XXI century, 2009, no. 11, pp. 14–15. (In Russ.).

5. Наназашвили И.Х., Марданов М.К. Производство арболита из древесных отходов: обзор. информ. / М-во пром. стр-ва СССР. М.: ЦБНТИ Минпромстроя СССР, 1974. 47 с.

Nanazashvili I.Kh., Mardanov M.K. *Production of Wood Concrete from Wood Waste: Overview*. Moscow, Ministry of Industrial Construction of the USSR, Central Office for Scientific and Technical Information, 1974. 47 p. (In Russ.).

6. Патент 2 790 390 С1 РФ, МПК С04В 18/26(2006.01), С04В 28/04(2006.01), С04В 40/00(2006.01), С04В 111/20(2006.01). Способ изготовления термодревбетона: № 2021139396: заявл. 27.12.2021: опубл. 17.02.2023 / В.Ю. Чернов, Ю.В. Чернов, А.С. Разинов, И.Г. Гайсин, Е.С. Шарапов, Е.М. Мальцева.

Chernov V.Yu., Chernov Yu.V., Razinov A.S., Gajsin I.G., Sharapov E.S., Mal'tseva E.M. *Method for Producing Thermo-Wood-Concrete*. Patent RF no. RU 2 790 390 C1, 2023. (In Russ.).

7. Патент 2804105 РФ, МПК В27Л 11/00(2006.01). Устройство для измельчения термически модифицированной древесины: № 2023116238: заявл. 21.06.2023: опубл. 26.09.2023 / В.Ю. Чернов, Ю.В. Чернов.

Chernov V.Yu., Chernov Yu.V. *Device for Grinding Thermally Modified Wood*. Patent RF no. RU (11) 2804105, 2023. (In Russ.).

8. Сафин Р.Г., Степанов В.В., Хайруллина Э.Р., Гайнуллина А.А., Степанова Т.О. Современные строительные композиционные материалы на основе древесных отходов // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2014. № 20. С. 123–128.

Safin R.G., Stepanov V.V., Khairullina E.R., Gainullina A.A., Stepanova T.O. Modern Construction Composite Materials Based on Wood Waste. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* = Herald of Technological University, 2014, no. 20, pp. 123–128. (In Russ.).

9. Хайруллина Э.Р., Сафин Р.Г., Тунцев Д.В. Эффективность применения предварительной обработки древесного наполнителя в производстве древесно-цементной композиции // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 3(51). С. 85–91.

Khairullina E.R., Safin R.G., Tuntsev D.V. The Effectiveness of the Use of Wood Filler Pretreatment in the Production of Wood-Cement Composition. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2021, no. 3(51), pp. 85–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2021-3-85-91>

10. Хасаншин Р.Р. Термическое модифицирование древесного наполнителя в производстве композиционных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2019. 424 с.  
Khasanshin R.R. *Thermal Modification of Wood Filler in the Production of Composite Materials*: Doc. Tech. Sci. Dis. Kazan, 2019. 424 p. (In Russ.).
11. Чернов В.Ю., Гайсин И.Г., Палкин А.А., Мальцева Е.М. Бетон на основе наполнителя из ТМД: особенности материала и перспективы использования // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Кострома, 8–11 сент. 2021 г. Кострома: Костром. гос. ун-т, 2021. С. 103–106.  
Chernov V.Yu., Gaisin I.G., Palkin A.A., Maltseva E.M. The Concrete Based on TMW Filler: Features of the Material and Prospects of Use. *Actual Problems and Prospects for the Development of the Timber Industry: Materials of the IV International Scientific-Practical Conference*. Kostroma, Kostroma State University, 2021, pp. 103–106. (In Russ.).
12. Чернов В.Ю., Шаранов Е.С., Мальцева Е.М., Пегушина Е.Н. Исследование влияния термической модификации древесины на адгезионные и прочностные свойства древесно-цементной композиции // Вестн. МГСУ. 2023. Т. 18, вып. 9. С. 1394–1407.  
Chernov V.Yu., Sharapov E.S., Mal'tseva E.M., Pegushina E.N. Effect of Thermal Modification of Wood on Adhesion and Strength Properties of Wood-Cement Composition. *Vestnik MGSU*, 2023, vol. 18, iss. 9, pp. 1394–1407. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.9.1394-1407>
13. Чижова М.А., Чижов А.П., Криворотова А.И. Технология композиционных материалов и изделий. Ч. 1. Технология композиционных материалов из древесных частиц и минеральных вяжущих. Красноярск: СибГТУ, 2012. 59 с.  
Chizhova M.A., Chizhov A.P., Krivorotova A.I. *Technology of Composite Materials and Products. Part 1: Technology of Composite Materials from Wood Particles and Mineral Binders*. Krasnoyarsk, SibSTU, 2012. 59 p. (In Russ.).
14. Чудинов Б.С. Вода в древесине. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984. 270 с.  
Chudinov B.S. *Water in Wood*. Novosibirsk, Nauka Publ. Sib. Department, 1984. 270 p. (In Russ.).
15. Al-Akhras N., Abu-Alfoul B. Effect of Wheat Straw Ash on Mechanical Properties of Autoclaved Mortar. *Cement and Concrete Research*, 2002, vol. 32, iss. 6, pp. 859–863. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00716-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00716-0)
16. Badilla P., Letelier V., Aros P., Careau F. Analysis of the Mechanical and Thermal Behaviour of Mortars Manufactured with Combined Use of Different Waste Products. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 503, art. no. 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012017>
17. Cai Ch., Heräjärvi H., Naapala A. Effects of Environmental Conditions on Physical and Mechanical Properties of Thermally Modified Wood. *Canadian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 49, no. 11, pp. 1434–1440. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0180>
18. Fu Q., Yan L., Thielker N.A., Kasal B. Effects of Concrete Type, Concrete Surface Conditions and Wood Species on Interfacial Properties of Adhesively-Bonded Timber – Concrete Composite Joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2021, vol. 107, art. no. 102859. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102859>
19. Guo A., Bu A., Aamiri O.B., Satyavolu J., Sun Zh. Impact of Thermally Modified Wood on Mechanical Properties of Mortar. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 208, pp. 413–420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.016>
20. Hakkou M., Pétrissans M., Gérardin P., Zoulalian A. Investigations of the Reasons for Fungal Durability of Heat-Treated Beech Wood. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, vol. 91, iss. 2, pp. 393–397. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.04.042>

21. Hill C., Altgen M., Rautkariauri L. Thermal Modification of Wood – a Review: Chemical Changes and Hygroscopicity. *Journal of Materials Science*, 2021, vol. 56, pp. 6581–6614. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z>
22. Hill C.A.S. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. John Wiley & Sons, Ltd., 2006. 264 p.
23. Kostic S., Merk V., Berg J.K., Hass P., Burgert I., Cabane E. Timber-Mortar Composites: The Effect of Sol-Gel Surface Modification on the Wood-Adhesive Interface. *Composite Structures*, 2018, vol. 201, pp. 828–833. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.108>
24. Liu Z., Han Ch., Li Q., Li X., Zhou H., Song X., Zu F. Study on Wood Chips Modification and its Application in Wood-Cement Composites. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, vol. 17, art. no. e01350. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01350>
25. Liu Z., Han Ch., Li X., Zhou H., Song X., Zu F. Study on Wood Chips Modification and its Effect on the Mechanical Properties of Wood-Cement Composite Material. *SSRN*, 2022. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4020085>
26. Ramdane R., Leila Kh., Abdelouahed A., Belachia M. Influence of Biomass Ash on the Performance and Durability of Mortar. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 2022, vol. 32, iss. 2, pp. 53–71. <https://doi.org/10.2478/ceer-2022-0019>
27. Sanaev V.G., Zaprudnov V.I., Gorbacheva G., Oblivin A.N. Factors Affecting the Quality of Wood-Cement Composites. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 2016, vol. 9(58), no. 2, pp. 63–70.
28. Song X., Liu Z., Li X., Zhou H., Han Ch. Surface Modification of Wood and its Effect on the Interfacial Bonding Properties of Cement-Based Wood Composites. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2023, vol. 81, pp. 897–909. <https://doi.org/10.1007/s00107-023-01926-7>
29. Verma Sh., Singh A., Gupta R., Sundriyal S. The Effect of Wood Ash on the Workability, Water Absorption, Compressive Strength in Cement Mortar. *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*, 2023, vol. 9, iss. 4, pp. 368–373. <https://doi.org/10.46501/IJMTST0904054>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest