



Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-142-151

## Древесно-композитные плиты с низким коэффициентом линейного теплового расширения

**В.Н. Ермолин**, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>

**М.А. Баяндин**<sup>✉</sup>, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [S-1990-2019](https://orcid.org/0000-0002-6228-2715),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>

**А.В. Намятов**, ст. преподаватель; *ResearcherID*: [AAE-8478-2019](https://orcid.org/0000-0002-5568-8725),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5568-8725>

**Н.В. Смертин**, аспирант; *ORCID*: <https://orcid.org/0009-0003-1566-669X>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; [vnermolin@yandex.ru](mailto:vnermolin@yandex.ru), [mihailbayandin@yandex.ru](mailto:mihailbayandin@yandex.ru)<sup>✉</sup>, [namyatov2010@yandex.ru](mailto:namyatov2010@yandex.ru), [kolya.smertin@mail.ru](mailto:kolya.smertin@mail.ru)

Поступила в редакцию 02.04.23 / Одобрена после рецензирования 01.07.23 / Принята к печати 02.07.23

**Аннотация.** В целом ряде отраслей промышленности требуются материалы с низким коэффициентом линейного теплового расширения, в частности при производстве спутниковых сферических антенн. Последние формируют из композитов, содержащих углеродные волокна и синтетические смолы. Отверждение композиции происходит за счет нагревания до 180 °С. Это приводит к тепловому расширению формы и изменению геометрических характеристик изделия, поэтому к материалам для изготовления форм предъявляются специфические требования. Высокая стоимость специальных материалов, используемых для форм, предопределяет необходимость поиска других материалов с низким коэффициентом линейного теплового расширения. Древесина является возможным решением данной проблемы. Ее коэффициент линейного теплового расширения вдоль волокон меньше, чем у подавляющего большинства материалов, и составляет примерно  $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , что сопоставимо со специальными материалами. Однако расширение древесины поперек волокон значительно выше продольного, что исключает применение массивной древесины. Анизотропию можно уменьшить за счет создания композита, волокна в котором равномерно ориентированы во всех структурных направлениях, что позволит снизить температурные деформации, приблизив значение расширения древесины поперек волокон к значению расширения вдоль волокон. При традиционном подходе к получению древесных композитов, основанном на использовании синтетических адгезивов, не удастся достичь заметного снижения теплового расширения из-за высокого коэффициента линейного теплового расширения клеев. Перспективным является применение плит из гидродинамически активированных древесных частиц без связующих веществ. Проведены 3 серии опытов: с варьированием плотности плит, предварительной термической модификацией исходной древесины

© Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Намятов А.В., Смертин Н.В., 2024



Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

и использованием щелочи при гидродинамической обработке. Исследование теплового расширения проводилось на индукционном dilatометре NETZSCH DIL-402 С в динамическом режиме со скоростью нагрева 2 К/мин. Установлено, что с увеличением плотности тепловое расширение возрастает. Средний коэффициент линейного теплового расширения при плотности 950 кг/м<sup>3</sup> составляет  $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , а при плотности 1100 кг/м<sup>3</sup> –  $17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . При сопоставимой плотности тепловое расширение плит без связующих веществ значительно ниже, чем у древесноволокнистых плит (МДФ). Предварительная термическая модификация древесины существенно не влияет на коэффициент линейного теплового расширения плит. Также не влияет и использование щелочи в процессе гидродинамической обработки.

**Ключевые слова:** механоактивация, коэффициент линейного теплового расширения, КЛТР, оснастка, древесные плиты без связующих веществ, гидродинамическая обработка, композит

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва по проекту «Исследование механизма структурообразования органоминеральных композитов с низким КЛТР».

**Для цитирования:** Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Намятов А.В., Смертин Н.В. Древесно-композитные плиты с низким коэффициентом линейного теплового расширения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 142–151. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-142-151>

Original article

## Wood-Composite Boards with a Low Coefficient of Linear Thermal Expansion

*Vladimir N. Ermolin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142)*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>*

*Mikhail A. Bayandin, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

*ResearcherID: [S-1990-2019](https://orcid.org/0000-0002-6228-2715), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>*

*Alexey V. Namyatov, Senior Lecturer; ResearcherID: [AAE-8478-2019](https://orcid.org/0000-0002-5568-8725),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5568-8725>*

*Nikolay V. Smertin, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1566-669X>*

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeny gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; [vnermolin@yandex.ru](mailto:vnermolin@yandex.ru), [mihailbayandin@yandex.ru](mailto:mihailbayandin@yandex.ru), [namyatov2010@yandex.ru](mailto:namyatov2010@yandex.ru), [kolya.smertin@mail.ru](mailto:kolya.smertin@mail.ru)*

*Received on April 2, 2023 / Approved after reviewing on July 1, 2023 / Accepted on July 2, 2023*

**Abstract.** A number of industries require materials with a low coefficient of linear thermal expansion (CLTE), in particular, in the production of satellite spherical antennas. The latter are formed from composites containing carbon fibers and synthetic resins. The composition is cured by heating up to 180 °C. This leads to a thermal expansion of the mold and a change in the geometric characteristics of the product. Therefore, specific requirements are imposed on the materials for making molds. The high cost of special materials used for molds determines the need to search for other materials with a low CLTE. Wood is a possible solution to this problem. Its CLTE along the fibers is less than that of the vast majority of materials, and is approximately  $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , which is comparable to special materials. However, the expansion

of wood across the fibers is much higher than the longitudinal one, which excludes the use of solid wood. Anisotropy can be reduced by creating a composite in which the fibers are uniformly oriented in all structural directions, bringing the value of wood expansion across the fibers closer to the value of expansion along the fibers. The traditional approach to producing wood composites, based on the use of synthetic adhesives, fails to achieve a noticeable reduction in thermal expansion due to the high CLTE of adhesives. The use of boards made of hydrodynamically activated wood particles without binders is promising. Three series of experiments have been carried out: with varying the density of the boards, preliminary thermal modification of the original wood and the use of alkali during hydrodynamic processing. The thermal expansion study has been carried out using the NETZSCH DIL-402 C induction dilatometer in dynamic mode with a heating rate of 2 K/min. It has been established that thermal expansion increases with increasing density. The average CLTE at a density of 950 kg/m<sup>3</sup> is  $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  and at a density of 1,100 kg/m<sup>3</sup> it is  $17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . At a comparable density, the thermal expansion of boards without binders is significantly lower than that of fiberboards (MDF). Preliminary thermal modification of wood does not significantly affect the CLTE of the boards. The use of alkali in the hydrodynamic treatment also has no effect.

**Keywords:** mechanical activation, coefficient of linear thermal expansion, CLTE, tooling, wood boards without binders, hydrodynamic processing, composite

**Acknowledgements:** The work was carried out with the financial support of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology on the project “The Study of the Mechanism of Structure Formation of Organomineral Composites with a Low CLTE”.

**For citation:** Ermolin V.N., Bayandin M.A., Namyatov A.V., Smertin N.V. Wood-Composite Boards with a Low Coefficient of Linear Thermal Expansion. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 2, pp. 142–151. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-142-151>

### Введение

Развитие различных отраслей промышленности предопределяет необходимость создания новых материалов с заданными свойствами. Одним из таких свойств является линейное тепловое расширение. В ряде отраслей, например микроэлектронике, приборостроении, космическом машиностроении, существует большой спрос на материалы с минимальным коэффициентом линейного теплового расширения (КЛТР). Это обусловлено необходимостью обеспечения требуемой точности изготовления изделий, т. к. иначе невозможно получить заданные технические характеристики. Точность изготовления важна и для сферических спутниковых антенн. Их производят методом формования из композитов, содержащих углеродные волокна и синтетические смолы. С целью отверждения композиции предусмотрено нагревание до 180 °С. Это приводит к тепловому расширению формы и, соответственно, изменению геометрических параметров изделия. Следовательно, материал формы должен иметь низкий КЛТР. У широко распространенных материалов КЛТР ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) составляет: алюминий – 22, сталь – 18, полимеры – >40. Поэтому они, как и подавляющее большинство других материалов, не могут использоваться для изготовления форм.

В настоящее время в подобных производствах применяются инварные и прецизионные сплавы, а также различные углеродсодержащие композиты в комбинации с синтетическими смолами [7]. Данные материалы характеризуются низким КЛТР ( $\geq 3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), но их высокая стоимость предопределяет необходимость поиска более доступных материалов.

Возможным решением данной проблемы является использование древесины. Изучение ее теплового расширения проводилось неоднократно. Одни из первых исследований по измерению КЛТР древесины хвойных и лиственных пород в тангенциальном и продольном направлениях проведены Е. Villari [20]. Однако ученым не учитывалось изменение влажности древесины (соответственно, влажностные деформации) при нагреве в воздушной среде. О. Hendershot [16] доказал, что влажностные деформации оказывают существенное влияние на КЛТР. В настоящее время получено достаточно большое количество данных по КЛТР для древесины [1, 8] при разной влажности – от абсолютно сухого состояния до влажности выше предела насыщения клеточных стенок. В работе [1] установлен КЛТР для пихты Дугласа в радиальном ( $\alpha_r = 27 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) и тангенциальном ( $\alpha_t = 45 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) направлениях. При этом выявлено, что тепловое расширение вдоль волокон значительно меньше, чем поперек. Также отмечено, что при влажности выше предела насыщения клеточных стенок  $\alpha_r$  и  $\alpha_t$  очень малы и имеют отрицательные значения (наблюдается уменьшение размеров материала) в температурном диапазоне  $0 \dots 65 \text{ }^\circ\text{C}$ . При температуре выше  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  КЛТР приобретает положительные значения. По мнению О.Р. Hendershot [16], изменение размеров древесины обусловлено достижением термодинамического равновесия между целлюлозой и водой, приводящего к миграции воды из целлюлозы в объемную фазу. КЛТР вдоль волокон древесины в сухом состоянии значительно меньше, чем поперек волокон, и равняется  $(3,1 \dots 4,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  независимо от плотности древесины [3]. Такое низкое значение, сопоставимое со значением для специализированных материалов, говорит о целесообразности применения древесины при решении обозначенной задачи. Однако высокая анизотропия характеристик вдоль и поперек волокон не позволяет использовать массивную древесину для изготовления форм.

Одним из возможных вариантов устранения этой проблемы является создание композита, волокна в котором равномерно ориентированы во всех структурных направлениях, что позволит снизить температурные деформации, приблизив значения КЛТР поперек волокон к значениям вдоль волокон.

Исследования КЛТР древесных плит проведены О.А. Киселевой [10]. Древесноволокнистые плиты (MDF) при плотности  $850 \text{ кг/м}^3$  имеют коэффициент термического расширения  $(1,5 \dots 1,8) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . У древесностружечных плит плотностью  $670 \text{ кг/м}^3$  данный показатель существенно выше и варьирует в пределах  $(11,1 \dots 11,7) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Как следует из полученных результатов, коэффициент у древесностружечных плит более чем в 2 раза превосходит коэффициент для массивной древесины поперек волокон. Вероятно, это обусловлено значительным количеством в древесных плитах полимерных связующих веществ, обладающих более высоким тепловым расширением, чем у древесины.

Таким образом, искомым композитом могут стать древесные плиты, структурообразование которых происходит без связующих веществ за счет аутогезионных взаимодействий между частицами [16]. Получение этих плит основано на предварительной гидродинамической активации древесины [15]. В результате данной обработки наблюдается фибриллирование древесных частиц и, соответственно, увеличение межфазных поверхностей, на которых присутствуют активные функциональные группы, ранее участвовавшие в образовании надмолекулярных структур. При удалении воды соседние частицы этих

групп взаимодействуют с последующим формированием связанной структуры. Плиты имеют достаточно высокие механические свойства и низкую анизотропию, что создает предпосылки для получения материала с малым тепловым расширением [9, 10].

Другим возможным направлением уменьшения теплового расширения является модифицирование древесинного вещества, представляющего собой армированную полимерную композицию [12, 14]. Авторами работ [2, 4, 11, 13, 17, 18] проведены измерения теплового расширения древесной целлюлозы методом рентгеновской дифрактометрии. Установлен КЛТР древесной целлюлозы при изменении температуры от 20 до 200 °С по трем основным направлениям: тангенциальному –  $13,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , радиальному –  $3,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  и вдоль волокон –  $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Как видим, закономерности теплового расширения такие же, как у массивной древесины. При этом у лигнина, как показано в работе M. Ramiah, D. Goring [19], КЛТР вне зависимости от структурного направления составляет  $1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , что значительно ниже, чем у древесины. Таким образом, направленное изменение древесинного вещества может повлиять на его тепловое расширение.

Цель работы – изучение КЛТР композитов на основе гидродинамически активированного древесного сырья.

#### *Объекты и методы исследования*

Исследование проводилось с использованием древесных плит из предварительно гидродинамически активированных древесных опилок хвойных пород, без связующих веществ. Были проведены 3 серии опытов. В 1-й изготавливались плиты плотностью 950 и 1100 кг/м<sup>3</sup> по методике, подробно описанной в работах [5, 6, 11]. Во 2-й серии опилки перед гидродинамической обработкой подвергались термической модификации в течение 5 ч при температуре 200 °С. Плотность плит, полученных в данной серии опытов, – 950 кг/м<sup>3</sup>. В 3-й серии экспериментов при гидродинамической обработке применялся 7,5%-й водный раствор NaOH. Плотность плит также составляла 950 кг/м<sup>3</sup>. Все экспериментальные запрессовки плит выполнялись на лабораторном гидравлическом прессе марки LabPro 1000. Полученные плиты выдерживались при нормальных условиях не менее 72 ч, затем обрезались по формату и раскраивались на образцы для испытаний.

Тепловое расширение образцов исследовалось в диапазоне температур 20...160 К на индукционном dilatометре NETZSCH DIL-402 С в динамическом режиме со скоростью нагрева 2 К/мин. Измерения проводились при продувке (50 мл/мин) сухим гелием (объемная концентрация O<sub>2</sub> – не более 0,05 %). Нагрузка штока на образец – 30 сН. Для калибровки и учета теплового расширения измерительной системы использовались эталоны из плавленого кварца.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Результаты исследования КЛТР плит плотностью 950 и 1100 кг/м<sup>3</sup> представлены на рис. 1.

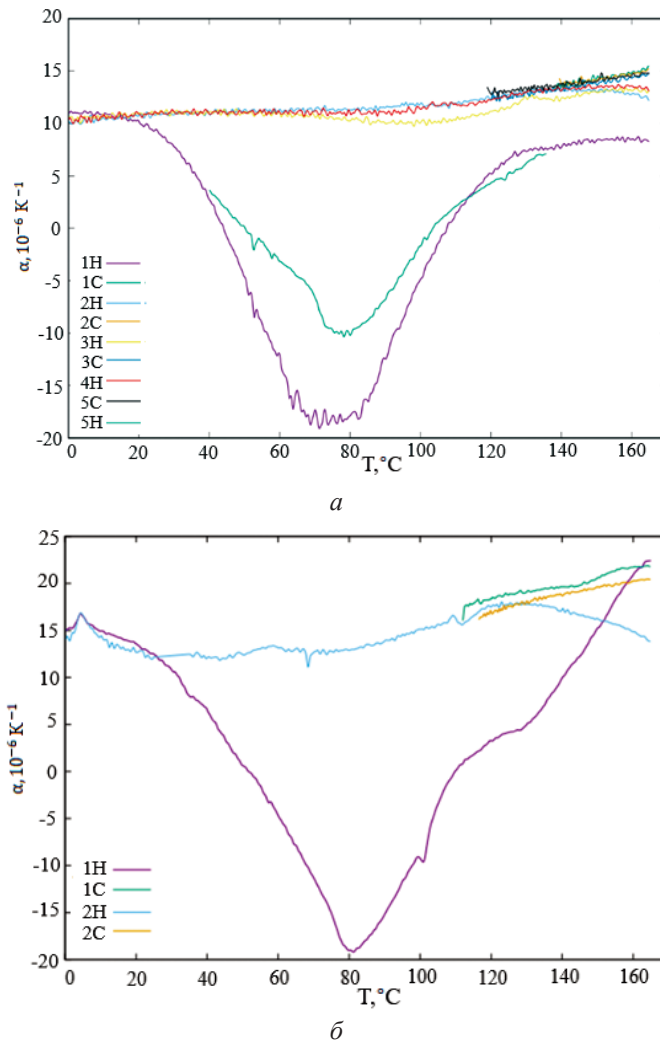


Рис. 1. Зависимость КЛТР древесных плит без связующих от температуры среды (Т): а – плиты плотностью 950 кг/м<sup>3</sup>; б – плиты плотностью 1100 кг/м<sup>3</sup> (Н – нагрев; С – охлаждение; 1–5 – номер операции по порядку)

Fig. 1. The dependence of the CLTE value of the wood boards without binders on the medium temperature (Т): а – the boards with a density of 950 kg/m<sup>3</sup>; б – the boards with a density of 1,100 kg/m<sup>3</sup> (Н – heating; С – cooling; 1–5 – the number of the operation in order)

Как видно из рис. 1, при 1-м нагреве плит до 80 °С вне зависимости от плотности образца КЛТР имеет отрицательные значения. При дальнейшем увеличении температуры наблюдается обратный эффект. Это во многом обусловлено влажностными деформациями (усушкой) материала на данном этапе. При последующих циклах нагревания и охлаждения КЛТР стабилизируется и существенно не изменяется. У плит плотностью 1100 кг/м<sup>3</sup> (рис. 1, б) его зна-

чения варьируют в интервале  $(12...22) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ; у плит плотностью  $950 \text{ кг/м}^3$  –  $(10...14) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (рис. 1, *a*). Следует отметить, что небольшое увеличение плотности приводит к повышению КЛТР более чем на 40 %. Но дальнейшее снижение плотности ограничено допустимой шероховатостью поверхностей, получаемых при фрезеровании плит в процессе изготовления форм. В целом КЛТР у плит без связующих при сопоставимой плотности существенно ниже, чем у плит MDF. По сравнению с древесностружечными плитами полученные плиты при значительно большей плотности имеют КЛТР на порядок меньше.

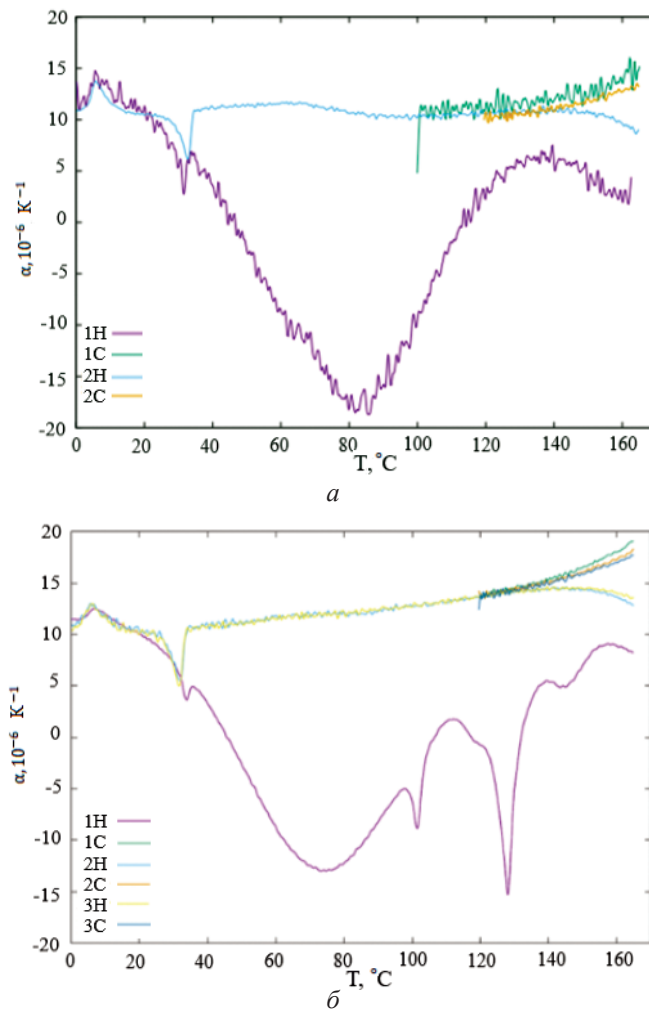


Рис. 2. Зависимость КЛТР от температуры ( $T$ ) среды для плит: *a* – из термообработанной древесной массы; *б* – из древесной массы, обработанной щелочью (обозначения – см. рис. 1)

Fig. 2. The dependence of the CLTE value on the medium temperature ( $T$ ) for the boards: *a* – made of the heat-treated wood mass; *б* – made of the wood mass treated with alkali (for the symbols see fig. 1)

Для плит из термически модифицированных опилок КЛТР варьирует в пределах  $(11...15) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (рис. 2, а, см. с. 148). При модификации древесной массы щелочью значения КЛТР лежат в большем диапазоне –  $(11...19) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (рис. 2, б, см. с. 148). Такие результаты говорят об отсутствии ощутимого эффекта снижения теплового расширения при использовании этих способов модификации древесной массы. Хотя следует отметить улучшение механических и технологических свойств плит, что является предметом дальнейших исследований.

### Выводы

1. Использование плит из гидродинамически активированных древесных частиц без связующих веществ является перспективным решением проблемы получения материалов с низким коэффициентом линейного теплового расширения.

2. Коэффициент линейного теплового расширения плит без связующих веществ значительно зависит от плотности плит. При ее увеличении коэффициент возрастает.

3. Средний коэффициент линейного теплового расширения исследуемых плит при большей плотности ( $950 \text{ кг/м}^3$ ) ниже, чем у древесноволокнистых плит MDF (плотность –  $850 \text{ кг/м}^3$ ), и составляет соответственно  $10 \cdot 10^{-6}$  и  $17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

4. Термообработка исходных древесных опилок, а также применение NaOH при гидродинамической обработке не оказывают существенного влияния на термическое расширение плит.

5. Полученные значения коэффициента линейного теплового расширения для плит без связующих плотностью  $950 \text{ кг/м}^3$  указывают на возможность использования таких плит в качестве основы форм для производства крупногабаритных изделий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины и синтетических полимеров. СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2010. 624 с.

Azarov V.I., Burov A.V., Obolenskaya A.V. *Chemistry of Wood and Synthetic Polymers*. St. Petersburg, Moscow, Krasnodar, Lan' Publ., 2010. 624 p. (In Russ.).

2. Алашкевич Ю.Д., Васютин В.Г., Емельянов С.В., Кадочкина И.А. Влияние кавитационных сил на размол волокон в безножевой установке // Переработка растительного сырья и утилизация отходов: сб. тр. Красноярск, 1995. Вып. 2. С. 158–161.

Alashkevich Yu.D., Vasyutin V.G., Emel'yanov S.V., Kadochkina I.A. The Influence of Cavitation Forces on Fiber Grinding in a Knifeless Plant. *Processing of Plant Materials and Waste Disposal: Collected Papers*. Krasnoyarsk, 1995, iss. 2, pp. 158–161. (In Russ.).

3. Баяндин М.А., Ермолин В.Н., Елисеев С.Г. Влияние механоактивации на аутогезионные свойства древесины // Хвойные бореал. зоны. 2013. Т. XXI, № 1–2. С. 159–163.

Bayandin M.A., Ermolin V.N., Eliseev S.G. The Influence of Mechanical Activation on the Autohesive Properties of Wood. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*, 2013, vol. XXI, no. 1–2, pp. 159–163. (In Russ.).

4. Белоглазов А.П., Габов А.В., Елистратов В.И. Перспективы конструирования оправок с малым КЛТР для изготовления рефлекторов // Решетнев. чтения. 2014. Ч. 1. С. 49–50.



Beloglazov A.P., Gabov A.V., Elistratov V.I. Prospects of Mandrels Designing with Small Thermal Expansion Coefficient for Manufacturing Reflectors. *Reshetnevskiy chetniya* = Reshetnev Readings, 2014, part 1, pp. 49–50. (In Russ.).

5. Биткин В.Е., Жидкова О.Г., Комаров В.А. Выбор материалов для изготовления размеростабильных несущих конструкций // Вестн. Самар. ун-та. Аэрокосм. техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 1. С. 100–117.

Bitkin V.E., Zhidkova O.G., Komarov V.A. Choice of Materials for Producing Dimensionally Stable Load-Carrying Structures. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye* = Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 100–117. (In Russ.). <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-1-100-117>

6. Бокщанин Ю.Р. Новое в лесопилении и использовании отходов за рубежом. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 122 с.

Bokshchanin Yu.R. *Novelties in Sawmilling and Waste Management Abroad*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1969. 122 p. (In Russ.).

7. Вараксин Ф.Д., Ступнев Г.К. Основные направления технического прогресса лесной и деревообрабатывающей промышленности. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 400 с.

Varaksin F.D., Stupnev G.K. *Forest and Woodworking Industries Main Progressive Development Trends*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1974. 400 p. (In Russ.).

8. Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Казизин С.Н., Намятов А.В. Формирование структуры плит малой плотности из гидродинамически активированных мягких отходов деревообработки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 148–157.

Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N., Namyatov A.V. Structure Formation of Low-Density Boards from Hydrodynamically Activated Softwood Waste. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 5, pp. 148–157. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.148>

9. Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Казизин С.Н., Намятов А.В., Острякова В.А. Водостойкость древесных плит, получаемых без использования связующих веществ // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 151–158.

Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N., Namyatov A.V., Ostryakova V.A. Water Resistance of Wood-Based Panels Made without Binders. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 3, pp. 151–158. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-151-158>

10. Киселева О.А., Ярцев В.П. Влияние плотности на термическое расширение древесных плит // Актуальные проблемы современного строительства: сб. тр. Пенза: ПГАСА, 2003. Ч. 2. С. 63–66.

Kiseleva O.A., Yartsev V.P. The Influence of Density on the Thermal Expansion of Wood-Based Panels. *Aktual'nye problemy sovremennogo stroitel'stva*: Collected Papers. Penza, Penza State Academy of Architecture and Civil Engineering Publ., 2003, part 2, pp. 63–66. (In Russ.).

11. Эриньш П.П. Строение и свойства древесины как многокомпонентной полимерной системы // Химия древесины. 1977. № 1. С. 8–25.

Erin'sh P.P. The Structure and Properties of Wood as a Multicomponent Polymer System. *Khimiya drevesiny*, 1977, no. 1, pp. 8–25. (In Russ.).

12. Эриньш П.П., Алксне И.М. Проникновение мономера в клеточные стенки древесины // Химия древесины. 1970. Вып. 6. С. 9–17.

Erin'sh P.P., Alksne I.M. Monomer Penetration into Wood Cell Walls. *Khimiya drevesiny*, 1970, iss. 6, pp. 9–17. (In Russ.).

13. Alemdar A., Sain M. Biocomposites from Wheat Straw Nanofibers: Morphology, Thermal and Mechanical Properties. *Composites Science and Technology*, 2008, vol. 68, iss. 2, pp. 557–565. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.05.044>

14. Badel E., Delisee C., Lux J. 3D Structural Characterisation, Deformation Measurements and Assessment of Low-Density Wood Fibreboard under Compression: The Use of X-Ray Microtomography. *Composites Science and Technology*, 2008, vol. 68, iss. 7–8, pp. 1654–1663. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.02.013>
15. Cervin N.T., Andersson L., Ng J.B.S., Olin P., Bergström L., Wågberg L. Lightweight and Strong Cellulose Materials Made from Aqueous Foams Stabilized by Nanofibrillated Cellulose. *Biomacromolecules*, 2013, vol. 14, iss. 2, pp. 503–511. <https://doi.org/10.1021/bm301755u>
16. Hendershot O.P. Thermal Expansion of Wood. *Science*, 1924, vol. 60, iss. 1559, pp. 456–457. <https://doi.org/10.1126/science.60.1559.456>
17. Hidaka H., Kim U.-J., Wada M. Synchrotron X-Ray Fiber Diffraction Study on the Thermal Expansion Behavior of Cellulose Crystals in Tension Wood of Japanese Poplar in the Low-Temperature Region. *Holzforschung*, 2010, vol. 64, iss. 2, pp. 167–171. <https://doi.org/10.1515/hf.2010.028>
18. Hori R., Wada M. The Thermal Expansion of Wood Cellulose Crystals. *Cellulose*, 2005, vol. 12, pp. 479–484. <https://doi.org/10.1007/s10570-005-5967-5>
19. Ramiah M.V., Goring D.A.I. The Thermal Expansion of Cellulose, Hemicellulose, and Lignin. *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia*, 1965, vol. 11, iss. 1, pp. 27–48. <https://doi.org/10.1002/polc.5070110105>
20. Villari E.M. Sur le Propriétés Physiques du Bois Conpé Parallèlement ou Transversalement aux Fibres. *Annales de Chimie et de Physique*, 1868, vol. 14, pp. 503–504. (In French).

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