

Научная статья / Original Article

УДК 691.11+691.178

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-232-241>

CC BY 4.0

## Композиционные материалы на основе модифицированных лигносульфонатов и целлюлозосодержащих отходов

Ирина Васильевна Степина<sup>1,2</sup> , Алексей Дмитриевич Жуков<sup>1,3</sup> , Валерия Валерьевна Строкова<sup>2</sup> ,  
Софья Ильдаровна Баженова<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

<sup>2</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46, Российская Федерация

<sup>3</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21, Российская Федерация

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: [bazhenovasi@mgsu.ru](mailto:bazhenovasi@mgsu.ru)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Отходы переработки древесины и сельскохозяйственной продукции могут использоваться как компоненты строительных материалов, как топливо в брикетах и пр. Активно развивающимся направлением использования этих отходов, равно как и отходов целлюлозно-бумажной промышленности, является их утилизация в качестве ресурсного источника для получения строительных материалов. **Целью** исследований является изучение возможности использования отходов деревообработки и производства бумаги, в том числе лигносульфонатов, в качестве связующих для создания композиционных материалов. **Методы и материалы.** Объектом исследования являются теплоизоляционные материалы на основе отходов деревообработки и модифицированного лигнин-содержащего связующего, а также способы модификации этого связующего. В качестве связующего изучалась возможность применения лигносульфоната натрия, активированного водным раствором боразотных соединений. Образцы изготавливались прессованием опилок хвойных пород с модифицированным лигнином и последующей тепловой обработкой формованного сырья. **Результаты.** Определены значения плотности и прочности образцов в зависимости от состава и режимов тепловой обработки. Установлено, что наилучшими показателями обладают образцы с модифицированным лигносульфонатом. Цифровая оптимизация параметров изготовления и рецептурных факторов проводилась именно для этого материала. Установлено, что наилучшие показатели получены при среднем размере опилок хвойных пород 8,0 мм, расход модификатора 7,5% и температуре тепловой обработки 103–104 °С. Прочность образцов оптимального состава при изгибе составляет 3,4–3,5 МПа. Прочность при сжатии при 10% деформации 4,7 МПа, средняя плотность – 683 кг/м<sup>3</sup>. Расхождение между расчетным и экспериментальными значениями величин по прочности при изгибе не превышает 7,0%. **Обсуждение.** Эксперименты, в том числе и проведенные на основе цифровых методик, подтвердили целесообразность применения боразотных соединений для модификации свойств лигнина, который может рассматриваться как природное вяжущее вещество. **Заключение.** Полученные изделия вполне соответствуют требованиям, предъявляемым к композиционным теплоизоляционным материалам, и использование в качестве модификатора боразотных соединений не только влияет на механические свойства изделий, но и позволяет повысить стойкость полученного материала по отношению к процессам гниения и другим биологическим воздействиям.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** отходы деревообработки, целлюлозосодержащие материалы, лигнин, лигносульфонат натрия, боразотные соединения, тепловая обработка

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2026-0005 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Степина И.В., Жуков А.Д., Строкова В.В., Баженова С.И. Композиционные материалы на основе модифицированных лигносульфонатов и целлюлозосодержащих отходов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):232–241. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-232-241>. – EDN: YPWZTB.

© Степина И.В., Жуков А.Д., Строкова В.В., Баженова С.И., 2026

## Composite materials based on modified lignosulfonates and cellulose-containing waste

Irina V. Stepina<sup>1,2</sup> , Alexey D. Zhukov<sup>1,3</sup> , Valeriya V. Strokovaya<sup>2</sup> , Sofya I. Bazhenova<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

<sup>2</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation

<sup>3</sup> Research Institute of Building Physics, 21 Lokomotivny Proezd, Moscow, 127238, Russian Federation

\* Corresponding author: e-mail: bazhenovasi@mgsu.ru

### ABSTRACT

**Introduction.** Waste from wood processing and agricultural products can be used as components of building materials, as fuel in briquettes, etc. A rapidly developing area for the utilization of this waste, as well as waste from the pulp and paper industry, is its use as a resource for producing building materials. **The aim** of the research is to study the possibility of using waste from wood processing and paper production, including lignosulfonates, as binders for the creation of composite materials. **Methods and Materials.** The object of the study is a heat-insulating material based on wood processing waste and a modified lignin-containing binder, as well as methods for modifying this binder. The possibility of using sodium lignosulfonate activated with an aqueous solution of boron-nitrogen compounds was studied as a binder. The samples were produced by pressing softwood sawdust with modified lignin, followed by heat treatment of the molded green product. **Results.** The values of density and strength of the samples were determined depending on the composition and heat treatment regimes. It was found that the samples with modified lignosulfonate exhibit the best properties. Digital optimization of the manufacturing parameters and formulation factors was carried out for this material. It was established that the best properties are achieved with an average softwood sawdust size of 8.0 mm, a modifier content of 7.5%, and a heat treatment temperature of 103–104 °C. The flexural strength of the samples with the optimal composition is 3.4–3.5 MPa, the compressive strength at 10% deformation is 4.7 MPa, and the average density is 683 kg/m<sup>3</sup>. The discrepancy between the calculated and experimental values for flexural strength does not exceed 7.0%. **Discussion.** The experiments, including those conducted using digital methods, confirmed the feasibility of using boron-nitrogen compounds to modify the properties of lignin, which can be considered as a natural binder. **Conclusion.** The obtained products fully comply with the requirements for composite heat-insulating materials, and the use of boron-nitrogen compounds as a modifier not only affects the mechanical properties of the products but also increases the resistance of the resulting material to decay processes and other biological impacts.

**KEYWORDS:** wood processing waste, cellulose-containing materials, lignin, sodium lignosulfonate, boron-nitrogen compounds, heat treatment

**ACKNOWLEDGMENTS:** The work was realized within the framework of the implementation of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FZWN-2026-0005 using equipment of High Technology Center at BSTU named after V.G. Shukhov.

### FOR CITATION:

Stepina I.V., Zhukov A.D., Strokovaya V.V., Bazhenova S.I. Composite materials based on modified lignosulfonates and cellulose-containing waste. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):232–241. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-232-241>. – EDN: YPWZTB.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные реалии строительства предопределяют интерес к разработке инновационных материалов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками и минимальным негативным воздействием на окружающую среду, а также к композиционным материалам, относящимся к группам природоподобных и энегоэффективных [1–3]. В этом отношении представляют интерес целлюлозо- и лигнинсодержащие побочные отходы других производств. Источником этих материалов являются отходы деревообработки, целлюлозно-бумажной

промышленности, сельскохозяйственные отходы [4–6].

Основным методом использования отходов деревообработки, целлюлозно-бумажной промышленности, равно как и сельскохозяйственных отходов, долгое время являлась их прямая утилизация как горючего материала и, в лучшем случае, в качестве топлива, а в основном просто сжигалась на золу [7–9]. Экономически оправданным является механическая переработка отходов с последующим использованием полуфабриката в качестве компонента для различных материалов, в том числе строитель-

ных. Положительный опыт накоплен при решении материаловедческих аспектов при получении фибролита, древесно-стружечных, древесноволокнистых и ориентировано-стружечных плит. Наиболее инновационным является глубокая переработка отходов, направленная на получение целлюлозного компонента с последующим их использованием в различных отраслях: от фармакологии до производства бумаги [10–12]. В строительстве подобные технологии опробованы при разработке фиброцементных изделий.

Многие из этих отходов и побочных продуктов содержат лигноцеллюлозу, а в основном они содержат целлюлозу, лигнин, гемицеллюлозу и экстрактивные вещества, такие как фенольные соединения и минеральный компонент (зольный остаток). Технически полезные вещества содержатся практически во всех сырьевых источниках данной группы и отличаются свойствами и выходом конечного продукта [13–15]. Композиционные материалы, созданные на основе отходов деревообработки и связующих на основе лигнина, являются перспективным инновационным направлением. С применением этих компонентов возможно получение широкой номенклатуры строительных материалов: отделочных и теплоизоляционных. Регулирование пористой структуры делает возможным также получение акустических материалов и, в частности, звукопоглощающих.

Лигнин является компонентом всех материалов рассматриваемой группы и может рассматриваться как экологически безопасное связующее: нетоксичное и биоразлагаемое. Применение лигнина минимизирует негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека [16]. В результате обработки древесины и варки целлюлозы получение лигнина как побочного продукта находится на уровне 70 млн тонн [17], что делает экономически целесообразным его утилизацию по сравнению с альтернативными связующими веществами [18].

Выделяют три основных вида лигнина как побочного продукта. Во-первых, это гидролизный лигнин. Гидролизный лигнин применяют в медицине и сельском хозяйстве. Основные возможности его использования: применение в качестве сорбентов, порообразователей, удобрений, а также в качестве добавки для структурирования почв и в качестве гербицидов. Во-вторых, этот сульфатный лигнин (крафт-лигнин) являющийся многотоннажным отходом целлюлозно-бумажной промышленности. Этот материал используется как топливо [19] или в основном размещают на полигонах захоронения отходов в огромном количестве [16, 20]. Проведенные ранее исследования показывают целесообразность модификации лигносодержащих материалов с использованием боразотных соединений [18–20].

Модификация боразотными соединениями направлена на изменение состава и свойств клеточных стенок растительного сырья, в составе которых происходит разделение лигнина и углеводного комплекса. Улучшение свойств лигнина происходит в процессе взаимодействия модификатора с гидроксильными группами лигнина, что приводит к образованию стабильных эфирных связей. Этот фактор также способствует увеличению способности лигнина соединяться с другими компонентами материала. Полученный таким образом модифицированный лигнин, возможно, может служить связующим при создании композиционных материалов [21–23].

Целью исследований является изучение возможности использования отходов деревообработки и производства бумаги, и в том числе лигносульфонатов, в качестве связующих для создания композиционных материалов.

В качестве объектов изучались образцы композиционных материалов, изготовленные путем прессования смеси опилок сосны с лигносульфонатом натрия. Активатором являлись вода (ЛСв) и модификатор, в качестве которого были приняты боразотные соединения (ЛСм). Также изучались свойства образцов, полученных путем прессования опилок сосны с нативным лигнином, модифицированным боразотными соединениями (НЛм).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве связующего использовался нативный лигнин, модифицированный боразотными соединениями (НЛм), в качестве наполнителя (и компонента, формирующего макроструктуру изделия) использовались древесные опилки. Образцы изготавливались следующим образом. Во-первых, осуществлялась варка опилок сосны фракции 5–10 мм в растворе боразотного соединения («Ксилостат») на водяной бане [16]. Температура варки 100 °С, продолжительность 1 час. Во-вторых, осуществлялось фильтрование продуктов варки. На третьем этапе осуществлялось формование сырцовых изделий и прессование модифицированных опилок. На этом этапе происходило выделение из опилок модифицированного лигнина. Этот модифицированный лигнин выполнял функцию естественного связующего. Отметим, что выделение лигнина из исходного сырья хвойных пород применяется в технологии твердых древесноволокнистых плит, свойства которых формируются при теплокомпрессионной обработке волокнистых листов с выделением и последующим отверждением лигнина.

На предварительном этапе испытаний серии образцов изготавливались в виде кубиков 50×50×50 мм. Варьируемыми факторами являлись параметры суш-

ки: при температуре 25 °С в стандартных условиях, а также в сушильном шкафу: тепловая обработка при 105; 125 и 150 °С до постоянной массы. После формования сырцовых образцов ЛСв и ЛСм в виде кубиков 50×50×50 мм осуществлялось их прессование под давлением 80 кПа. В качестве факторов отклика принимались прочности на сжатие при 10% относительной деформации и при изгибе, средняя плотность и теплопроводность. Испытания свойств проводились через 30 суток.

Образцы на основе связующего, в качестве которого был применен лигносульфонат натрия (ЛСв), изготавливались путем его смешивания с опилками хвойных пород фракции 5–10 мм и водой. Соотношение компонентов по массе: опилки/ лигносульфонат (ЛС)/вода в пропорции 1:1:0,5. Образцы на основе связующего, содержащего боразотные соединения (БАС) и ЛСм в качестве модификатора, изготавливались путем смешивания опилок хвойных пород фракции 5–10 мм с лигносульфонатом натрия, модифицированным раствором БАС. Соотношение компонентов по массе: опилки/лигносульфонат/модификатор в пропорции 1:1:1. Исследования на втором уровне испытания проводились с помощью цифровых методик.

Часть исследований проводилась на оборудовании Центра коллективного пользования (ЦКП) НИУ МГСУ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

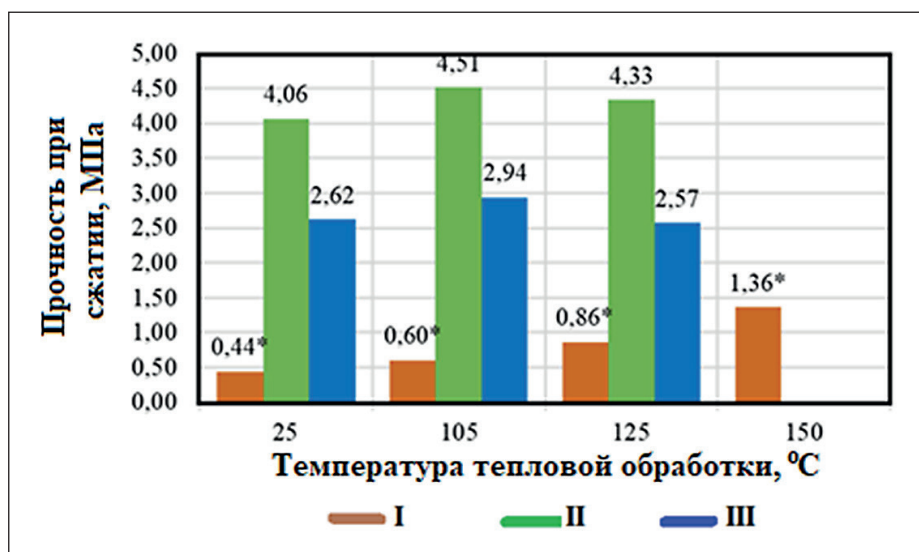
Испытания на предварительном уровне показали увеличение прочности с повышением температуры

сушки для образцов с модифицированным лигнином (НЛм) в качестве связующего. При сопоставимой плотности образцов прочность на сжатие при 10% относительной деформации составила 1,36 МПа у образцов, сушившихся при 150 °С, и 0,44 МПа у образцов, сужившихся при нормальных условиях и 25 °С. Прочность на сжатие при 10% деформации для образцов с ЛСв значительно выше, нежели с НЛм: 2,62; 2,94 и 2,57 МПа соответственно при сушке при 25 °С, 105 °С и 125 °С. Образцы на связующем модифицированным боразотным соединением обладают лучшими биоцидными свойствами, а прочность их (при 10% деформации) в 1,45–1,52 раза выше и составляет: 4,06; 4,51 и 4,33 МПа соответственно при сушке при 25 °С, а также при 105 °С и 125 °С.

Предварительный анализ экспериментальных данных позволил установить крайний предел температуры тепловой обработки, которая не должна превышать 105 °С на материале (и 125 °С в объеме сушильной камеры). При больших температурах возможно закипание воды в материале (как результат фазового перехода). Результаты прочностных испытаний при сжатии представлены на рис. 1.

Учитывая опыт, полученный на предварительном этапе эксперимента, план дальнейших исследований базировался на применении материалов с использованием в качестве связующего лигносульфоната, модифицированного боразотными соединениями (ЛСм). Исследования проводились на основе математического планирования и статистической обработки результатов эксперимента [24, 25].

В качестве варьируемых факторов были приняты средний размер опилок хвойных пород ( $X_1$ ), расход



**Рис. 1.** Результаты прочностных испытаний (прочность при сжатии при 10% деформации): I – образцы с НЛм, средней плотностью 560 кг/м<sup>3</sup>; II – образцы с ЛСм, средней плотностью 830 кг/м<sup>3</sup>; III – образцы с ЛСв, средней плотностью 690 кг/м<sup>3</sup>

## ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

модификатора к массе сухих опилок ( $X_2$ ) и температура среды в камере при тепловой обработке ( $X_3$ ). Размеры опилок хвойных пород имеют одномодальное распределение по размерам, близкое к нормальному. Поэтому за средний размер принимается величина математического ожидания распределения опилок по размерам (средний размер). При проведении эксперимента учитывалось, что на начальных стадиях тепловой обработки температура материала отстает от температуры среды в камере, но при дальнейшем тепловом воздействии разница температур становится минимальной.

Обработка результатов эксперимента и проверка статистических гипотез осуществлялась в программе Statistika. Обработка осуществлялась с применением методики «Аналитической оптимизации», разработанной в НИУ МГСУ и опробованной при решении рецептурных задач и выбора технологических параметров многих строительных материалов [26, 27]. Условия эксперимента приведены в таблице 1.

Функциями отклика рассматриваются прочность при сжатии при 10% деформации ( $Y_1$ ), прочность при изгибе ( $Y_2$ ), средняя плотность ( $Y_3$ ). В качестве параметра оптимизации принята прочность при изгибе.

Доверительный интервал для коэффициентов уравнений регрессии ( $\Delta b$ ) определялся по значениям критерия Стьюдента (выбранным для трех степеней свободы) и дисперсии параллельных опытов. Значимость коэффициентов уравнений регрессии оценивалась путем их сравнения (по абсолютной величине) с доверительным интервалом. Коэффициенты, меньшие доверительно интервала, принимались незначимыми и приравнивались к 0. Проверка адекватности полученных полиномов осуществлялась по критерию Фишера (сравнением расчетных и табличных значений). В результате получены следующие уравнения регрессии:

– для прочности при сжатии при 10% деформации ( $\Delta b_1 = 0,22$  МПа):

$$Y_1 = 4,1 + 0,4X_1 + 0,6X_2 + 0,3X_3 + 0,2X_1X_2 - 0,2X_3^2, \quad (1)$$

– для прочности при изгибе ( $\Delta b_2 = 0,16$  МПа):

$$Y_2 = 2,9 + 0,3X_1 + 0,4X_2 + 0,2X_3 + 0,2X_1X_2, \quad (2)$$

– для средней плотности ( $\Delta b_3 = 4$  МПа кг/м<sup>3</sup>):

$$Y_3 = 676 + 12X_1 + 8X_2 + 6X_1X_2. \quad (3)$$

Анализ коэффициентов уравнений регрессии (1, 2, 3) позволяет оценить влияние каждого фактора на результат в установленных для эксперимента интервалах (см. табл. 1). Увеличение размера опилок хвойных пород ( $X_1$ ) предопределяет как увеличение прочности при сжатии и при изгибе и приводит к некоторому увеличению средней плотности. Увеличение прочности связано с геометрическим фактором, обеспечивающим увеличение количества контактов между частицами древесины, омоноличиваемых связующим, а увеличение средней плотности связано с влагоемкостью опилок. Расход модификатора ( $X_2$ ) влияет на прочностные характеристики в наибольшей степени, что связано с повышением прочностных характеристик как модифицированного связующего, так и подвергающихся естественной пропитке частиц древесины. Повышение температуры тепловой обработки, которая проводилась в лабораторном эксперименте в сушильном шкафу, практически не влияет на среднюю плотность образцов (коэффициент оценки меньше доверительного интервала, а следовательно, меньше ошибки эксперимента), но оказывает значительное влияние на прочностные характеристики.

Анализ коэффициентов при  $X_1$  в уравнении (1) показывает, что зависимость прочности при сжатии от температуры носит ярко выраженный нелинейный характер: рост прочности при повышении температуры тепловой обработки сначала увеличивается (коэффициент при  $X_1$ , равный 0,3), а при превышении температурой определенного значения начинает снижаться (коэффициент при  $X_1^2$ , равный минус 0,2). Рост прочности обусловлен реакциями между модифицированным лигнином, модификатором, а также в поверхностном слое древесных частиц, а тенденция к снижению прочности связана с фазовым переходом воды в пар и разрыхлением структуры.

Таблица 1. Условия проведения эксперимента

| Наименование фактора                 | Символ $X_i$ | Среднее значение фактора, $\bar{X}_i$ | Интервал варьирования, $\Delta X_i$ | Значения фактора на уровнях |     |
|--------------------------------------|--------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----|
|                                      |              |                                       |                                     | -1                          | +1  |
| Размер опилок хвойных пород $l$ , мм | $X_1$        | 8                                     | 2                                   | 6                           | 10  |
| Расход модификатора $C_c$ , %        | $X_2$        | 6                                     | 2                                   | 4                           | 8   |
| Температура тепловой обработки, °C   | $X_3$        | 85                                    | 25                                  | 60                          | 110 |

## ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Определить величину допустимого порога температуры тепловой обработки возможно при использовании метода аналитической оптимизации. В это случае уравнения (1–3) рассматриваются как алгебраические полиномы: функции двух или трех переменных, к которым допустимо применение методов математического анализа для непрерывных функций. Порядок реализации метода следующий:

1) Определяем экстремум функции (1) по  $X_3$ :

$$\partial Y_1 / \partial X_3 = 0,3 - 0,4X_3 = 0 \rightarrow X_3 = 0,75.$$

2) Решаем уравнения (1–3) при  $X_3 = 0,75$ :

– для прочности при сжатии:

$$Y_1 = 4,2 + 0,4X_1 + 0,6X_2 + 0,2X_1X_2, \quad (4)$$

– для прочности при изгибе:

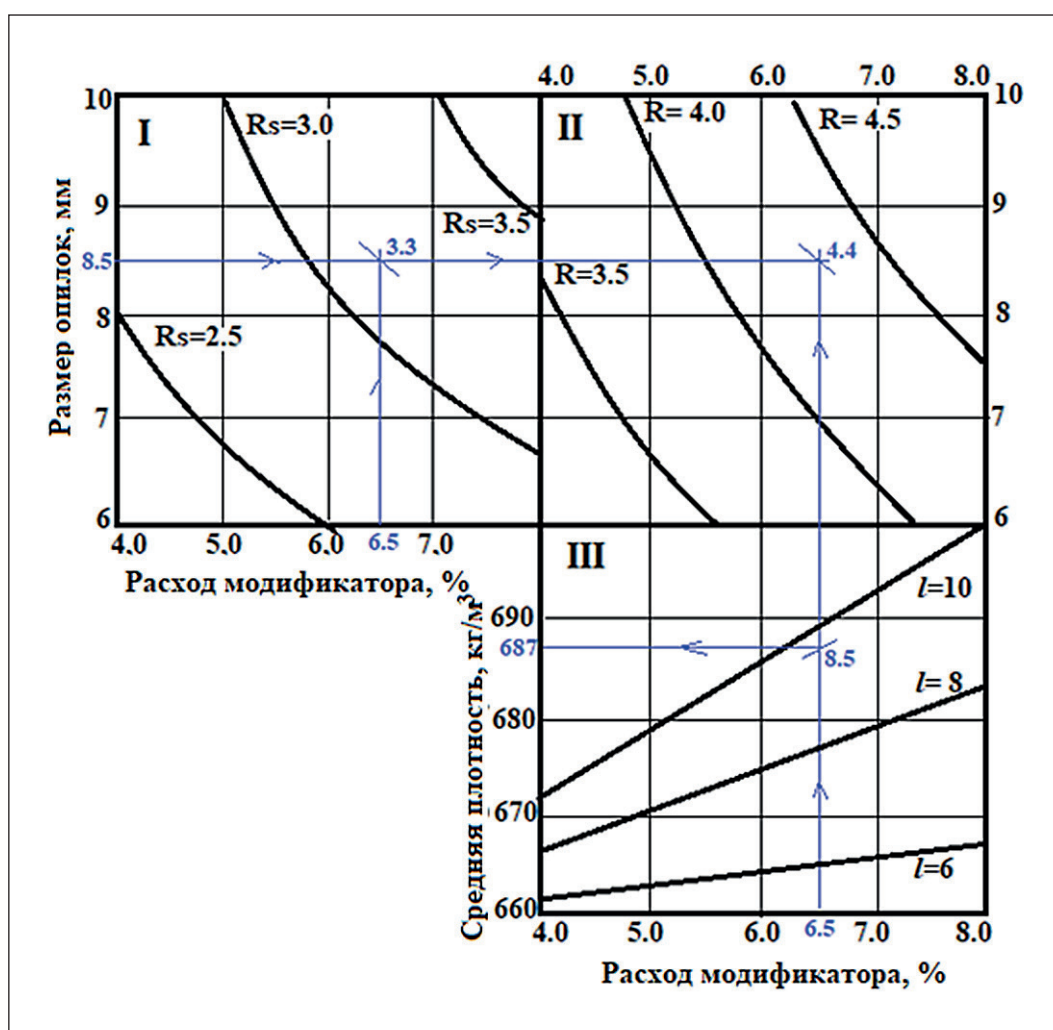
$$Y_2 = 3,0 + 0,3X_1 + 0,4X_2 + 0,2X_1X_2. \quad (5)$$

Для средней плотности ( $\Delta b_3 = 4$  МПа кг/м<sup>3</sup>) уравнение (3) не изменилось.

3) Определяем величину пороговой температуры тепловой обработки в натуральных единицах (с использованием данных табл. 1):

$$t_{\text{п}} = 85 + 25 \times 0,75 = 103\text{--}104 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4) Осуществляем графическую интерпретацию уравнений (3, 4, 5), результаты представлены в виде номограммы (рис. 2). Номограмма содержит три сектора: сектор I позволяет оценить прочность при изгибе  $R_s$ , МПа; сектор II – прочность при сжатии



**Рис. 2.** Номограмма для оценки свойств материала при оптимизированной температуре тепловой обработки 103–104 °C; сектора: I – прочность при изгибе  $R_s$ , МПа; II – прочность при сжатии при 10% деформации  $R$ , МПа; III – средняя плотность  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>

при 10% деформации  $R$ , МПа; сектор III — среднюю плотность образцов  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>.

Решение прогностической задачи графическим способом заключается в следующем. На осях координат отмечают точки значений варьируемых факторов (в натуральном измерении). В примере (рис. 2, синие линии) заданы средний размер опилок хвойных пород  $l$ , 8,5 мм и расход модификатора  $C_c$  6.5%. Отмечаем эти точки на осях координат. Из точки  $l = 8,5$  мм проводим через секторы I и II прямую, параллельную оси абсцисс. В секторах I и II из точек  $C_c = 6.5\%$  проводим прямые параллельные оси ординат. В секторе I на пересечении прямых определяем величину прочности при изгибе ( $R_s = 3.3$  МПа), а в секторе II — аналогично прочность при сжатии при 10% деформации ( $R = 4.4$  МПа). Далее в секторе III получаем значение средней плотности. Находим точку пересечения прямых «расхода модификатора» и «размеров опилок» и из этой точки проводим линию, параллельную оси абсцисс, и получаем значение средней плотности ( $\rho$ ), равной 687 кг/м<sup>3</sup>.

Прогностическая задача может быть также решена с помощью программы для ЭВМ с использованием оптимизированных алгебраических функций двух переменных (формулы 4–6) или базовых полиномов 1–3.

Алгоритм программы включает следующие блоки, реализуемые последовательно. Блок 1 предусматривает введение факторов в натуральных единицах и их кодирование, то есть приведение к интервалу  $[-1; +1]$ . Второй блок — расчетный и предполагает использование либо базовых полиномов, либо оптимизированных функций. Третий блок обеспечивает вывод результатов расчета на дисплей компьютера и на печать.

При использовании методик цифрового моделирования очень важным является подтверждение адекватности полученных математических (статистических) моделей реальным процессам. Проверка осуществляется на двух уровнях. Во-первых, при статистической обработке адекватность полиномов проверяют по критерию Фишера. Во-вторых, после получения расчетных результатов реализуется повторный активный эксперимент и проводится оценка расхождения между расчетными значениями и результатами эксперимента (табл. 2).

После получения расчетных результатов аналитическим путем (с помощью программы для ЭВМ или графического метода) осуществляется дополнительная проверка в повторных сериях активного эксперимента. В качестве оценочного критерия принимается прочность при изгибе (МПа). Результаты сравнительного анализа при оптимизированной температуре тепловой обработки 103–104 °С представлены в таблице 2.

Расхождение между расчетным и экспериментальными значениями величин по прочности при изгибе ( $\Delta$ ) не превышает 7,0%, что вполне соответствует принятому в строительном материаловедении уровню точности (до 10%). Наилучшие показатели соответствуют значениям варьируемых факторов в опыте № 4: средний размер опилок хвойных пород 8,0 мм и расход модификатора 7,5%. Этим условиям соответствуют расчетные значения прочности при сжатии при 10% деформации 4.7 МПа и средней плотности 683 кг/м<sup>3</sup>, полученные с использованием аналитических зависимостей 1 и 3.

Помимо возможности получать материалы с максимально высокими характеристиками прочности при средней плотности не более 700 кг/м<sup>3</sup>,

**Таблица 2.** Проверка адекватности второго уровня

| № | Варьируемые параметры           |                               | Прочность при изгибе (МПа) |            |              |
|---|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------|--------------|
|   | Размер опилок хвойных пород, мм | Расход модификатора $C_c$ , % | Расчетная                  | Реальная   | $\Delta$ , % |
| 1 | 9,5                             | 7,5                           | 3,9                        | 3,7        | 5,3          |
| 2 | 9,5                             | 4,5                           | 2,7                        | 2,9        | 6,8          |
| 3 | 8,0                             | 6,0                           | 3,0                        | 3,1        | 3,3          |
| 4 | <b>8,0</b>                      | <b>7,5</b>                    | <b>3,4</b>                 | <b>3,5</b> | 2,9          |
| 5 | 8,0                             | 4,5                           | 2,6                        | 2,7        | 3,6          |
| 6 | 9,5                             | 6,0                           | 3,3                        | 3,2        | 3,0          |
| 7 | 6,5                             | 6,0                           | 2,7                        | 2,6        | 3,7          |
| 8 | 6,5                             | 4,5                           | 2,5                        | 2,6        | 3,8          |
| 9 | 6,5                             | 7,5                           | 2,9                        | 2,7        | 6,9          |

использование лигносульфонатов предпочтительнее по экономическим соображениям. Использование модифицированных лигносульфонатов предполагает меньшую трудоемкость производства, а также безотходность технологии. После выделения модифицированного лигнина в водяной бане опилки процеживаются, и большая часть раствора утилизируется. К тому же полученный композиционный материал на основе опилок и модифицированного лигнина можно считать полностью изготовленным из вторичного сырья отходов деревообработки и побочных продуктов целлюлозно-бумажной промышленности.

## ВЫВОДЫ

Полученные изделия вполне соответствуют требованиям, предъявляемым к композиционным теплоизоляционным материалам, и использование в качестве модификатора боразотных соединений не только влияет на механические свойства изделий, но и позволяет повысить стойкость полученного материала по отношению к процессам гниения и другим биологическим воздействиям.

Использование лигносульфонатов также предпочтительнее в использовании по экономическим соображениям в связи с меньшей трудоемкостью производства, а также с безотходностью технологии. Полученный композиционный материал на основе

опилок и модифицированного лигнина можно считать полностью изготовленным из отходов древесной и целлюлозно-бумажной промышленности.

Использование лигносульфоната натрия в качестве модифицированного связующего в композиционных строительных материалах на основе древесных отходов является перспективным направлением. Доступность и низкая стоимость делают лигносульфонаты привлекательным вариантом для замены традиционных связующих веществ, например фенолформальдегидных смол и прочих фенолосодержащих соединений.

Целесообразным является применение боразотных соединений в качестве модификатора, введение которого как улучшает прочностные характеристики изделия, так и снижает опасность загнивания опилок хвойных пород, что способствует повышению эксплуатационной стойкости изделий.

Полное осуществление потенциала применения лигносульфонатов в качестве связующего и боразотных соединений в качестве модификатора предполагает дальнейшие исследования, разработки и испытания, направленные на оптимизацию его свойств. Применение цифровых методов позволяет получать достоверные результаты при минимальном количестве активных экспериментов, а также способствует оптимизации рецептур и параметров производства композиционных материалов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Косенко Е.А., Баурова Н.И., Зорин В.А. Природоподобные материалы и конструкции в машиностроении. *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2020;6:2-7. <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2020-06-2-7> – EDN: G1HEPB.
2. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медникова Е.А. *Энергетическая эффективность строительных систем*: ООО «Научно-издательский центр Инфра-М», 2022;329. (Научная мысль). ISBN 978-5-16-017479-2. <https://doi.org/10.12737/1856852> – EDN: OUWLAU.
3. Тер-Закарян К.А., Сабу Т., Жуков А.Д., Блесси Б., Бессонов И.В., Пережогин Ю.Д. Системы бесшовной изоляции для арктических условий. *Строительные материалы*. 2025;5:5-12. <https://doi.org/10.316559/0585-430X-2025-5-5-12> – EDN: YCCXDO.
4. Ter-Zakaryan K.A., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V., Mednikova E.A. Foam Polymers in Multifunctional Insulating Coatings. *Polymers*. 2021;13(21):3698; <https://doi.org/10.3390/polym13213698> – EDN: HHPQWN.
5. Лесовик В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее. *Вестник МГСУ*. 2017;1(100):9-16. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.1.9-16> – EDN: XRJBSV.
6. Sagar B.M., Islam Md.M., Habib Md.L., Ahmed S., Sahadat Hossain Md. Utilization of natural and waste sources for synthesis of cellulose, chitin, and chitosan for a suitable environment. *RSC Advances*. 2025;32(15):26276-26301. <https://doi.org/10.1039/d5ra02896e> – EDN: FSMGCW.
7. Mondal P., Mondal M., Chakraborty J., Sing N., Ghosh B., Roy S., Mahali K. Advances in upcycling waste cellulose into functional materials: strategies, challenges, and emerging applications – A comprehensive review. *Next Research*. 2025;4(2):100768. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100768> – EDN: VSNXHO.
8. Karmanov A.P., Kocheva L.S., Belyy V.A. Topological structure and antioxidant properties of macromolecules of lignin of hogweed *Heracleum sosnowskyi* Manden. *Polymer*. 2020;202:122756. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122756> – EDN: RUFFOH.

9. Hasheminya S.M., Dehghannya Ja. Chemical composition, antioxidant, antibacterial, and antifungal properties of essential oil from wild *Heracleum rawianum*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2021;31:101913. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.101913> – EDN: LBHDTB.
10. Gong Ch., Ju Zh., Lin Q., Lv X., Smith R.L., Xu L., Cao Ya., Shuai Li., Fang Zh. One-step valorization of cellulose acetate plastic waste into 5-hydroxymethylfurfural. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2026;381:125880. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2025.125880> – EDN: VFUVGZ.
11. Palaniappan M., Palanisamy S., Tadealli S. [et al.] Extraction and characterization of cellulose from *Anacardium occidentale* shells: A sustainable approach to industrial waste management. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;320:146120. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146120> – EDN: ICIAES.
12. Kassab Z., Abdellaoui Y., Salim M. H., El Achaby M. Cellulosic materials from pea (*Pisum Sativum*) and broad beans (*Vicia Faba*) pods agro-industrial residues. *Materials Letters*. 2020;280:128539. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128539> – EDN: FVVERX.
13. Mohamad Haafiz M.K., Eichhorn S.J., Hassan Azman, Jawaid M. Isolation and characterization of microcrystalline cellulose from oil palm biomass residue. *Carbohydrate Polymers*. 2013;2:628–634. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.01.035>
14. Hosseini S.S., Moradi A.M., Javid A.H., Mahvi A.H. From waste to water savior: Fe–Mn-boosted waste-derived cellulose for sustainable tetracycline treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;327:147286. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.147286> – EDN: HWOKBB.
15. Saha P., Ghosh S.K., Singh P. A holistic review on synthesis, properties, and multifunctional applications of cellulose aerogels from cellulose waste streams. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;321:146334. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146334> – EDN: LVBJUJ.
16. Кондрашов М.В., Степина И.В. Теоретические основы использования лигнина в качестве связующего для композитных строительных материалов. *Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2023: Сборник докладов IV Национальной научной конференции, Москва, 15 декабря 2023 года. – Москва: Московский государственный строительный университет (национальный исследовательский университет)*. 2024:185–189. – EDN: NCUAAD.
17. Тунцев Д.В., Хайруллина М.Р., Романчева И.С., Савельев А.С. Использование лигнина при получении современных материалов. *Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства : IV Международная научная экологическая конференция (с участием экологов Азербайджана, Армении, Беларуси, Германии, Грузии, Казахстана, Киргизии, Латвии, Ливана, Молдовы, Приднестровья, России, Словакии, Узбекистана и Украины)*, Краснодар, 24–25 марта 2015 года. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет. 2015:285–287. – EDN: UDPVTB.
18. Усова К.А., Захаров П.С., Шкуро А.Е. Перспективные направления применения лигнина в производстве полимерных и композиционных материалов. *Молодой ученый*. 2023;8(455):11–16. – EDN: HMZKHS.
19. Симикина А.А., Челышева И.Н., Плотников Н.П. Применение лигнина в производстве древесно-полимерных композитов. *Вестник КрасГАУ*. 2013;1(76):162–169. – EDN: PУXIHР.
20. Цветков М.В., Салганский Е.А. Лигнин: направления использования и способы утилизации (обзор). *Журнал прикладной химии*. 2018;91(7):988–997. <https://doi.org/10.1134/S0044461818070095> – EDN: XZIFIT.
21. Степина И.В., Содомон М., Кононов Г.Н., Петухов В.А. Компонентный состав модифицированного растительного сырья. *Инженерный вестник Дона*. 2022;9(93):223–231. – EDN: DNХAFP.
22. Stepina I., Sodomon M., Semenov V. [et al.] Modifying *Heracleum sosnowskyi* Stems with Monoethanolamine(N→B)-trihydroxyborate for Manufacturing Biopositive Building Materials. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022;170:45–52. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-79983-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-79983-0_5)
23. Патент на полезную модель № 217420 U1 Российская Федерация, МПК В27К 3/52. Биостойкий теплоизоляционный композит на основе растительного сырья Гераизол : № 2022121630 : заявл. 09.08.2022 : опубл. 31.03.2023 / И.В. Степина, М. Содомон.
24. Жуков А.Д., Артеменко С.О., Жук П.М., Боброва Е.Ю., Медведев А.А. Малоэнергоёмкое связующее для изделий на основе каменной ваты. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(4):377–388. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-4-377-388> – EDN: BORGVT.
25. Ter-Zakaryan K.A., Zhukov A.D., Bessonov I.V. [et al.] Modified Polyethylene Foam for Critical Environments. *Polymers*. 2022;14(21):4688. <https://doi.org/10.3390/polym14214688> – EDN: JPQEWQ.
26. Kozlov S., Efimov B., Zinovieva E. [et al.] Optimization of foamed plastic technology. *E3S Web of Conferences: 22<sup>nd</sup> International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019, Tashkent, 18–21 апреля 2019 года. Vol. 97. – Tashkent: EDP Sciences. 2019:06010. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/20199706010> – EDN: YSIYLI.*

27. Efimov B., Isachenko S., Kodzoev M.B. [et al.] Dispersed reinforcement in concrete technology. *E3S Web of Conferences*: 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018, St. Petersburg, 10–12 декабря 2018 года. Vol. 110. – St. Petersburg: EDP Sciences. 2019:01032. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001032> – EDN: HGSKBP.

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Степина Ирина Васильевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация; старший научный сотрудник Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра наноструктурированных композиционных материалов, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46, Российская Федерация, [sudeykina@mail.ru](mailto:sudeykina@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5358-2935>

**Жуков Алексей Дмитриевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, член-корреспондент Российской инженерной академии, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21, Российская Федерация, [lj211@yandex.ru](mailto:lj211@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0593-3259>

**Строкова Валерия Валерьевна** – доктор технических наук, заведующий кафедрой материаловедения и технологии материалов, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46, Российская Федерация, [vvstrokova@gmail.com](mailto:vvstrokova@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-6895-4511>

**Баженова Софья Ильдаровна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, [bazhenovasi@mgsu.ru](mailto:bazhenovasi@mgsu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6111-201X>

#### ВКЛАД АВТОРОВ

**Степина И.В.** – научное руководство, разработка концепции исследования, развитие методологии, итоговые выводы.

**Жуков А.Д.** – разработка концепции исследования, развитие методологии и её адаптация к задачам исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.

**Строкова В.В.** – научное консультирование, доработка текста, итоговые выводы.

**Баженова С.И.** – развитие методологии, доработка текста.

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.01.2026; одобрена после рецензирования 30.03.2026; принята к публикации 03.04.2026.