

## Зернистый строительный материал на основе органических отходов: технология и применение

С.А. Белых<sup>a</sup>, О.В. Скокова<sup>b</sup>, Н.П. Плотников<sup>c</sup>

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>a</sup> kafedra.smit@mail.ru, <sup>b</sup> olga-skokova@mail.ru, <sup>c</sup> n-plotnikov@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2818-6797>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0006-9540-1748>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9729-0806>

Статья поступила 20.08.2024, принята 12.09.2024

*Современные требования строительной отрасли диктуют необходимость разработки и совершенствования строительных материалов по теплофизическим показателям, эксплуатационным качествам, экономическим критериям. При наращивании производства теплоизоляционных материалов важным направлением является создание альтернативных материалов, основанных на использовании отходов перерабатывающих производств. Отходы лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств являются наиболее оптимальным сырьем для использования в качестве наполнителя теплоизоляционного материала как компонент с высокими теплоизоляционными показателями. В работе обобщены результаты исследований по оптимизации технологических параметров производства зернистых материалов на основе крупнотоннажных отходов органических производственных и бытовых отходов. За счет унифицирования технологических приемов предложены основы технологии зернистых материалов из древесных опилок и макулатуры. Зернистые материалы с малой насыпной плотностью традиционно используют для утепления ограждающих конструкций отапливаемых зданий. Разработанные материалы могут быть использованы как в виде самостоятельных материалов с определенными эксплуатационными свойствами, так и в качестве пористого ядра для зернистых материалов с минерализованной оболочкой, например, для производства облегченного безобжигового зольного гравия. Для получения легкого зернистого материала на основе опилок предложена технология грануляции опилок путем окатывания гранул из смеси опилок и вяжущего. В качестве вяжущего использовали малоэнергоемкое натриевое жидкое стекло из микрокремнезема. Получены математические модели, описывающие процесс производства зернистого строительного материала на основе использования органических отходов. Предложена схема технологического процесса изготовления строительного материала предлагаемого состава и назначения на основе использования органического сырья. Максимальное значение прочности на сжатие зернистого строительного материала предложенного состава, равное 3,3 МПа, наблюдается в случае, когда модуль жидкого стекла равен 2,5, а влажность опилок составляет 20 %.*

**Ключевые слова:** отходы древесины; опилки; макулатура; зернистый материал; зерна; гранулы; гранулирование; математические модели.

## Granular building material based on organic waste: technology and application

S.A. Belykh<sup>a</sup>, O.V. Skokova<sup>b</sup>, N.P. Plotnikov<sup>c</sup>

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>a</sup> kafedra.smit@mail.ru, <sup>b</sup> olga-skokova@mail.ru, <sup>c</sup> n-plotnikov@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2818-6797>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0006-9540-1748>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9729-0806>

Received 20.08.2024, accepted 12.09.2024

*Modern requirements of the construction industry dictate the need to develop and improve building materials in terms of thermo-physical parameters, operational qualities, and economic criteria. When increasing the production of thermal insulation materials, an important direction is the creation of alternative materials based on the use of waste from processing industries. Waste from logging and woodworking industries is the most optimal raw material for use as a filler of thermal insulation material as a component with high thermal insulation performance. The paper summarizes the results of research on optimizing the technological parameters of the production of granular materials based on large-tonnage waste of organic industrial and household waste. Due to the unification of technological techniques, the basics of the technology of granular materials from sawdust and waste paper are proposed. Granular materials with low bulk density are traditionally used to insulate the enclosing structures of heated buildings. The developed materials can be used both as independent materials with certain performance properties, and as a porous core for granular materials with a mineralized shell, for example, for the production of lightweight non-burnt ash gravel. To obtain a light granular material based on sawdust, the technology of granulation of sawdust by rolling granules from a mixture of sawdust and binder is proposed. A low-energy sodium liquid glass made of silica was used as a binder. Mathematical models describing the production process of granular building material based on the use of organic waste have been obtained. The scheme of the technological process of manufacturing the construction material of the proposed composition and purpose based on the use of organic raw materials is proposed. The maximum compressive strength of the granular building material of the proposed composition, equal to 3.3 MPa, is observed in the case when the modulus of liquid glass is 2.5, and the moisture content of sawdust is 20%.*

**Keywords:** wood waste; sawdust; waste paper; granular material; grains; granules; granulation; mathematical models.

**Введение.** Целевые установки концепции устойчивого развития, сформулированные обществом в начале нового тысячелетия, актуализировали необходимость формирования культуры потребления невозобновляемых и возобновляемых ресурсов планеты. За прошедший век активной индустриализации и промышленного производства накоплено большое количество отходов производства и потребления. Задача современного общества и ученых — это развитие технологий рециклинга имеющихся отходов, рассматриваемых в настоящее время как вторичные сырьевые ресурсы.

К текущему моменту в стране и мире накоплены большой опыт и практика использования крупнотоннажных промышленных отходов. К использованию бытовых отходов подошли в настоящее время. Прививается культура раздельного сбора мусора, устанавливаются заводы по его переработке, классификации, предварительной подготовке к повторному использованию. В категорию «полезного» бытового мусора попали пластик, тара из цветного металла, стекло, шины автомобилей и макулатура.

В Иркутской области, на территории которой скопилось большое количество отходов переработки древесины, остро стоят вопросы рециклинга опилок. Хотя известны примеры их использования, накопившиеся объемы остаются критичными, требуют полигонов для размещения, хранения, обеспечения их пожаробезопасности, затрат на рекультивацию полигонов. Опилки активно используют в производстве товаров народного потребления и при изготовлении строительных материалов, таких как опилкобетоны, арболит, фибролит, зернистые материалы для утепления конструкций в насыпном состоянии [1–4].

Макулатура активно используется для перевыпуска различной продукции, в том числе для изготовления теплоизоляционных строительных материалов (эковата и др.) [5–7].

*Целью научной работы* является оптимизация состава и технологии зернистых материалов для строительных целей на основе органического сырья.

В качестве органического сырья использовали два варианта отходов: древесные опилки предприятия лесопиления и бумажную макулатура.

В работах ученых Братского университета [8–11] изложены основы получения опилкобетона, облегченного безобжигового зольного гравия, арболита, для изготовления которых использованы различные отходы лесопиления и бумажные отходы.

Опилки — древесные частицы, образующиеся как отходы пиления, разновидность измельченной древесины. Размеры частиц опилок зависят от типа и технологических параметров режущего инструмента, в результате работы которого они образованы.

Опилки являются отходами деревообрабатывающей промышленности, однако они нашли широкое применение в качестве топлива как в сыпучем, так и гранулированном состоянии в виде пеллет; для изготовления прессованных промышленных изделий,

подстилки для животных (зачастую при смешивании с торфом или соломой), использовались как утеплитель для каркасных конструкций. Опилки на 70 % состоят из углеводов (целлюлоза и гемицеллюлоза) и содержат около 27 % лигнина. Химический состав представлен углеродом (50 %), водородом (6 %), кислородом (44 %) и около 0,1 % азота. Такой состав предполагает необходимость предотвращения биологической коррозии, пожарную безопасность. С ростом требований к качеству конструкций опилки в насыпном состоянии для их утепления практически перестали использовать.

На предприятиях Иркутской области лесопиление и деревообработка очень распространены, опилки по размерам частиц в большей степени одинаковы, однако на предприятии «Игирма-Тайрику», первом совместном предприятии СССР и Японии, образуются опилки очень тонкой фракции 0,3–1,5 мм. Такие опилки долгое время приходилось утилизировать на полигонах, что отягощало экономику предприятия из-за расходов на природоохранные мероприятия и штрафы. В настоящее время часть опилок активно утилизируется, но накопленные и образующиеся объемы требуют развития технологий их рециклинга. При модификации этого отхода и придании ему улучшенных эксплуатационных свойств можно получить качественный зернистый утеплитель.

**Методика исследования.** Для получения легкого зернистого материала на основе опилок предложена технология грануляции опилок путем окатывания гранул из смеси опилок и вяжущего. В качестве вяжущего использовали малоэнергоёмкое натриевое жидкое стекло из микрокремнезема по ТУ 2145-001-0029491.

Для управления размером и формой зернистых материалов приняли двухстадийное формообразование и оценивали форму гранул. Форму зерен оценивали по показателю коэффициента формы зерен, который рассчитывали как отношение наименьшего среднего размера гранулы к наибольшему. Из каждой партии гранул одинакового состава выбирали не менее 10 гранул. Основные характеристики опилок представлены в табл. 1. Технологическая схема получения гранулированных опилок представлена на рис. 1.

Особенностью формования, гранулирования опилок является двухстадийное придание формы.

В лабораторном экструдере готовую массу выдавливали через насадку диаметром 20 мм. В гранулятор сформированная масса поступает, распадаясь на отдельные гранулы, окатка которых завершается в грануляторе. Меняя диаметр насадок, можно регулировать размер гранул и, соответственно, фракционный состав зернистого материала. Полученные из опилок гранулы в процессе их формования (рис. 1) дополнительно обрабатываются фунгицидами и антипиренами. В таком виде гранулированные опилки можно использовать как засыпной утеплитель, а также для производства облегченного безобжигового гравия.

Таблица 1. Свойства древесных опилок

Опилки древесные	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Влажность, %	Характерные размеры, мм
Сухие	270–450	8–15	до 1,0
Влажные	350–580	более 15	1,5–1,8

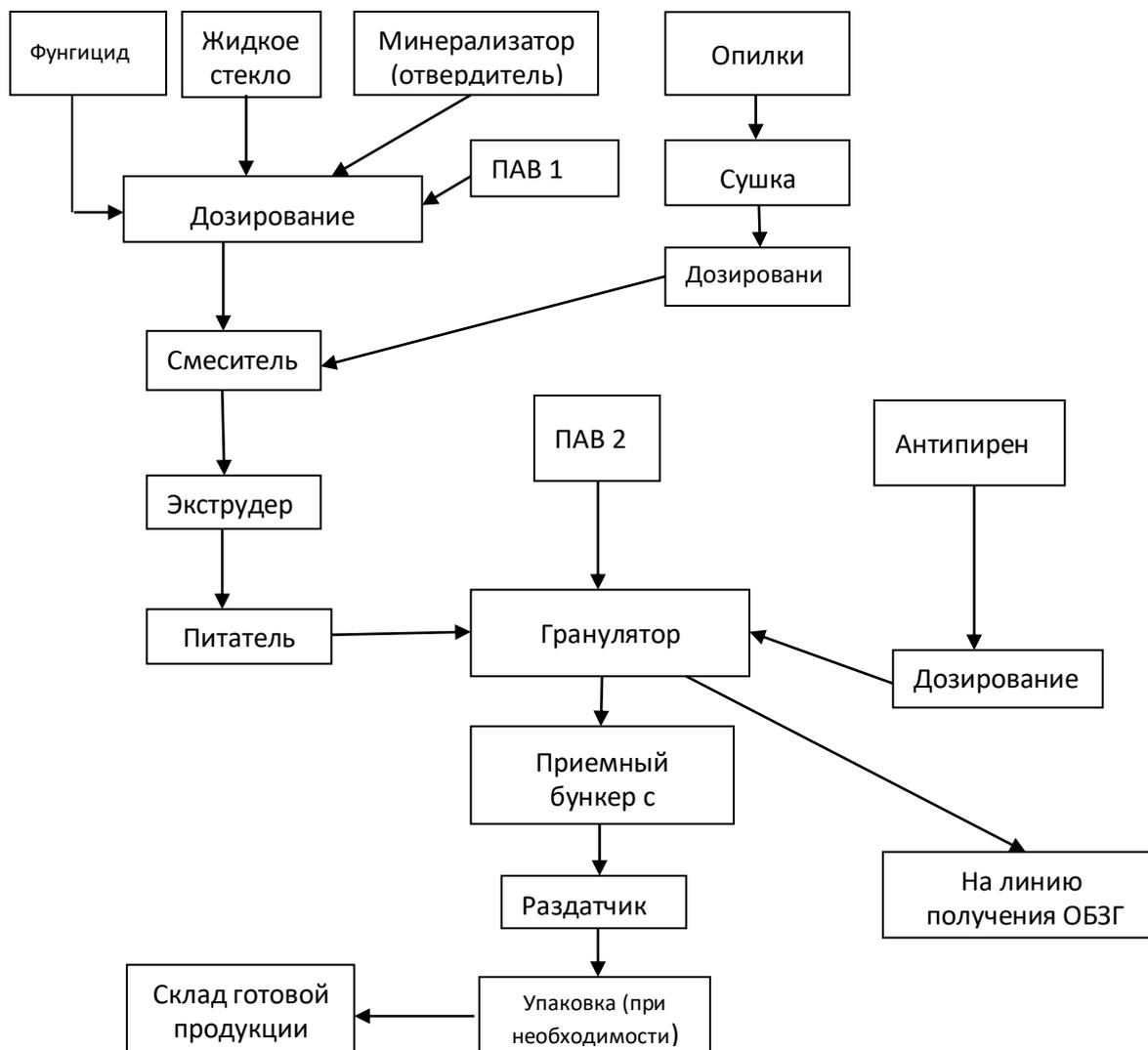


Рис. 1. Основные операции получения гранулированных опилок

Полученные результаты обрабатывались статистически с использованием программ *Microsoft Excel* и *Statistica 13.0*.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Для проведения эксперимента был составлен математический план, предусматривающий варьирование трех факторов на трех уровнях.

В качестве матрицы планирования используем план эксперимента, позволяющий строить нелинейные зависимости исследуемого отклика от трех факторов. В качестве выходных величин были приняты качественные показатели готовой продукции:

$Y_1$  — насыпная плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$Y_2$  — коэффициент формы зерна;

$Y_3$  — прочность на сжатие в цилиндре, МПа.

Варьируемые факторы эксперимента:

$X_1$  — количество вяжущего в диапазоне  $15 < X_1 < 25$  в % от массы опилок;

$X_2$  — силикатный модуль жидкого стекла в диапазоне  $2,0 < X_2 < 3,0$ ;

$X_3$  — влажность опилок  $0 < X_3 < 20$  в % от массы опилок, %.

В табл. 2 представлены варьируемые факторы в натуральном и кодовом обозначении, их уровни и интервалы варьирования при проведении трехфакторного эксперимента. На следующем этапе был проведен многофакторный эксперимент с целью получения адекватного математического описания технологического производства зернистого строительного материала предложенного состава. План эксперимента в кодированном и натуральном выражении представлен в табл. 3. Отклики эксперимента представлены в табл. 4.

**Таблица 2.** Основные факторы и уровни их варьирования

Наименование фактора	Обозначение	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень	Интервал варьирования
Количество вяжущего (от массы опилок), %	$X_1$	15	20	25	5
Силикатный модуль жидкого стекла	$X_2$	2,0	2,5	3,0	0,5
Влажность опилок, %	$X_3$	0	10	20	10

**Таблица 3.** План эксперимента в кодированном и натуральном выражении

№ опыта	Кодированные значения переменных			Натуральные значения переменных		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	+1	+1	+1	25	3,0	20
2	-1	+1	+1	15	3,0	20
3	+1	-1	+1	25	2,0	20
4	-1	-1	+1	15	2,0	20
5	+1	+1	-1	25	3,0	0
6	-1	+1	-1	15	3,0	0
7	+1	-1	-1	25	2,0	0
8	-1	-1	-1	15	2,0	0
9	0	0	-1	20	2,5	0
10	0	0	+1	20	2,5	20
11	0	-1	0	20	2,0	10
12	0	+1	0	20	3,0	10
13	+1	0	0	25	2,5	10
14	-1	0	0	15	2,5	10

**Таблица 4.** Отклики экспериментальных исследований по В-плану 2-го порядка

№ опыта	Среднее значение зернистого строительного материала после твердения в нормальных условиях в возрасте 28 суток		
	$\rho, \text{кг/м}^3$	К формы	R, МПа
1	190	0,84	3,2
2	218	0,86	3,0
3	195	0,85	3,1
4	352	0,86	1,8
5	191	0,96	3,0
6	205	0,88	2,56
7	336	0,86	1,95
8	323	0,88	1,2
9	209	0,97	2,4
10	200	0,97	3,3
11	222	0,88	1,9
12	215	0,87	2,3
13	203	0,88	3,1
14	360	0,96	1,7

После оценки значимости коэффициентов регрессии уравнения функций отклика примут следующий вид:

– плотность зернистого строительного материала:

$$Y_1 = 226,67 - 34,3 \cdot \bar{O}_1 - 40,9 \cdot \bar{O}_2 - 10,9 \cdot \bar{O}_3 - 108,4 \cdot \bar{O}_1 \cdot \bar{O}_2 - 143 \cdot \bar{O}_1 \cdot \bar{O}_3 - 104,5 \cdot \bar{O}_2 \cdot \bar{O}_3 + 54,9 \cdot X_1^2 - 22,1 \cdot \bar{O}_3^2$$

– коэффициент формы зерна при получении зернистого строительного материала:

$$Y_2 = 0,946 - 0,319 \cdot \bar{O}_1 \cdot \bar{O}_2 - 0,341 \cdot \bar{O}_1 \cdot \bar{O}_3 - 0,344 \cdot \bar{O}_2 \cdot \bar{O}_3$$

– прочность на сжатие зернистого строительного материала:

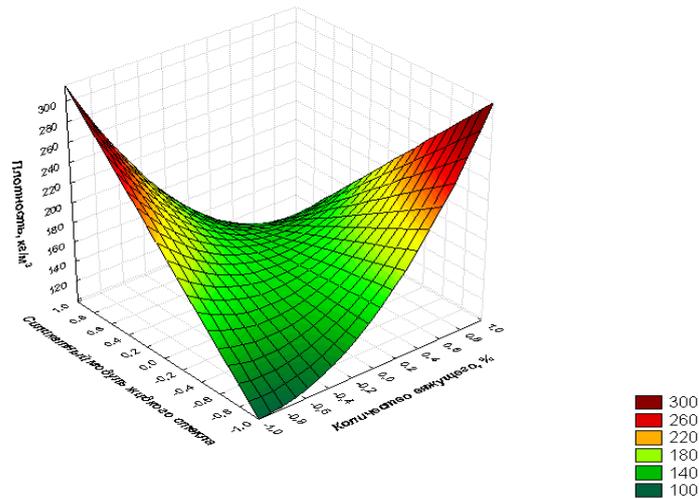
$$Y_3 = 2,44 + 0,409 \cdot \bar{O}_1 + 0,411 \cdot \bar{O}_2 + 0,329 \cdot \bar{O}_3 - 0,626 \cdot \bar{O}_1 \cdot \bar{O}_2 - 0,524 \cdot \bar{O}_1 \cdot \bar{O}_3 - 0,701 \cdot \bar{O}_2 \cdot \bar{O}_3 - 0,337 \cdot X_2^2 + 0,413 \cdot \bar{O}_3^2$$

**Таблица 5.** Проверка адекватности математической модели.

Величина	Обозначение параметров				Вывод
	$S^2_{ад}$	$S^2\{y\}$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	
Плотность	179,478	106,82	1,69	2,05	Модель адекватна
Коэффициент формы зерна	0,00706	0,0051	1,384	2,05	Модель адекватна
Прочность на сжатие	0,0454	0,032	1,41	2,05	Модель адекватна

Все полученные математические модели адекватны. По уравнениям регрессии были построены графические зависимости.

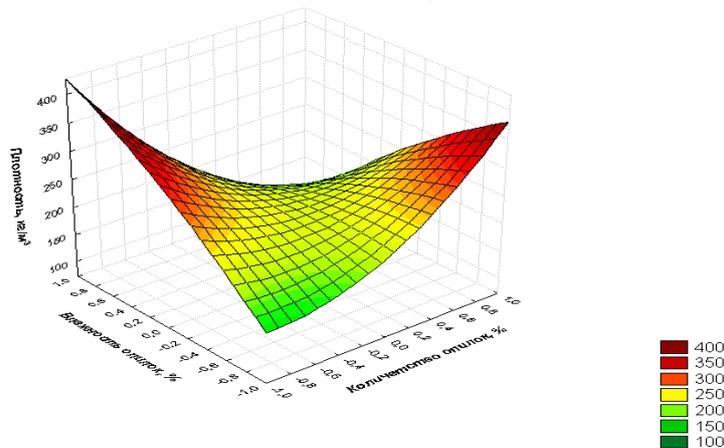
График зависимости плотности зернистого строительного материала от количества вяжущего и модуля жидкого стекла представлен на рис. 2.



**Рис. 2.** График зависимости плотности зернистого строительного материала от количества вяжущего и модуля жидкого стекла при влажности опилок 10 %

Минимальное значение плотности зернистого строительного материала предложенного состава, равное 203 кг/м³, наблюдается в случае, когда количество вяжущего (от массы опилок) составляет 25 %, а модуль жидкого стекла — 2,5. Максимальное значение плотности зернистого строительного

материала предложенного состава, равное 360 кг/м³, наблюдается в случае, когда количество вяжущего (от массы опилок) составляет 15 %, а модуль жидкого стекла — 2,5. График зависимости плотности зернистого строительного материала от количества вяжущего и влажности опилок представлен на рис. 3.



**Рис. 3.** График зависимости плотности зернистого строительного материала от количества вяжущего и влажности опилок при силикатном модуле жидкого стекла, равном 2,0

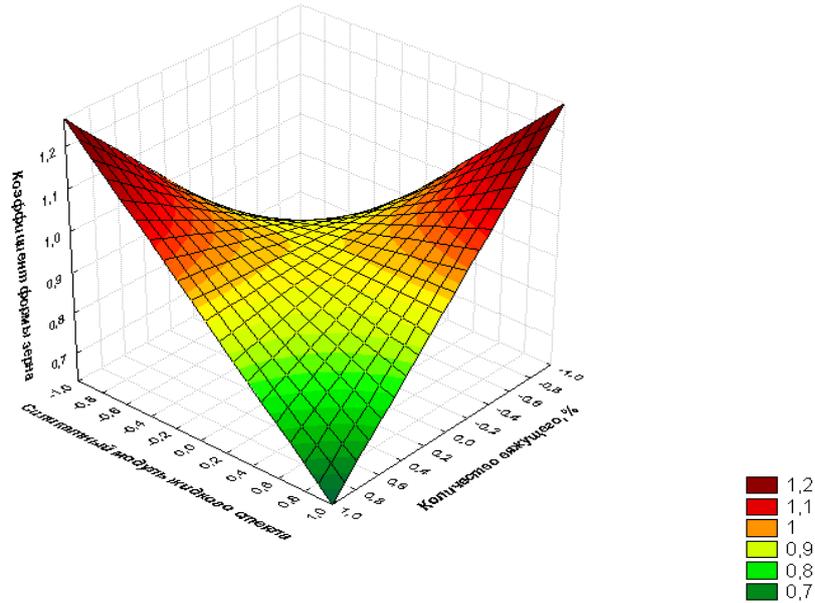
Минимальное значение плотности зернистого строительного материала предложенного состава,

равное 200 кг/м³, наблюдается в случае, когда количество вяжущего (от массы опилок) составляет 20

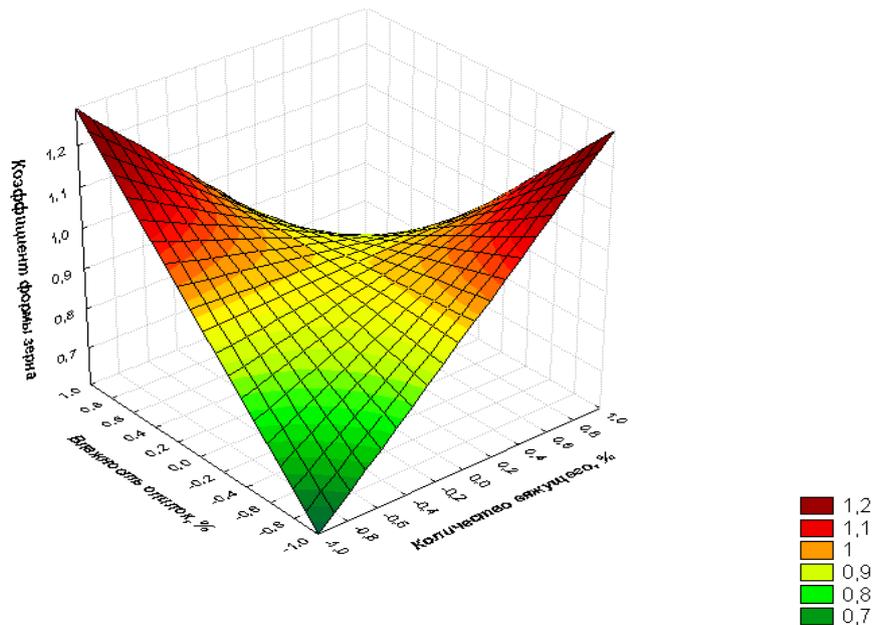
%, а влажность опилок — 20 %. Максимальное значение плотности зернистого строительного материала предложенного состава, равное  $360 \text{ кг/м}^3$ , наблюдается в случае, когда количество вяжущего (от массы опилок) составляет 15 %, а модуль жидкого стекла — 20 %. График зависимости коэффициента формы зерна при получении зернистого строительного материала от количества вяжущего и модуля жидкого стекла представлен на рис. 4.

Минимальное значение коэффициента формы зерна при получении зернистого строительного материала предложенного состава, равное 0,87, наблюдается в

случае, когда количество вяжущего (от массы опилок) составляет 20 %, а модуль жидкого стекла — 3,0. Максимальное значение коэффициента формы зерна при получении зернистого строительного материала предложенного состава, равное 0,96, наблюдается в случае, когда количество вяжущего (от массы опилок) составляет 15 %, а модуль жидкого стекла — 2,5. График зависимости коэффициента формы зерна при получении зернистого строительного материала от количества вяжущего и влажности опилок представлен на рис. 5.



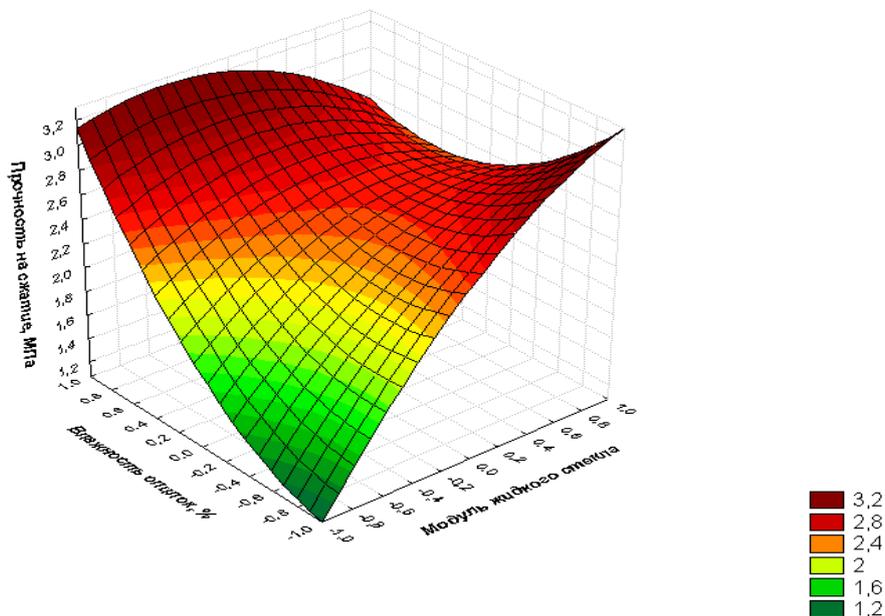
**Рис. 4.** График зависимости коэффициента формы зерна при получении зернистого строительного материала от количества вяжущего и модуля жидкого стекла при влажности опилок 10 %



**Рис. 5.** График зависимости коэффициента формы зерна при получении зернистого строительного материала от количества вяжущего и влажности опилок при силикатном модуле жидкого стекла, равном 2,0

Минимальное значение коэффициента формы зерна при получении зернистого строительного материала предложенного состава, равное 0,88, наблюдается в случае, когда количество вяжущего (от массы опилок) составляет 25 %, а влажность опилок — 10 %. Максимальное значение коэффициента формы зерна при получении зернистого строительного материала

предложенного состава, равное 0,97, наблюдается в случае, когда количество вяжущего (от массы опилок) составляет 20 %, а влажность опилок — 20 %. График зависимости прочности на сжатие зернистого строительного материала от модуля жидкого стекла и влажности опилок представлен на рис. 6.



**Рис. 6.** График зависимости прочности на сжатие зернистого строительного материала от модуля жидкого стекла и влажности опилок при количестве вяжущего (от массы опилок), равном 20 %

Минимальное значение прочности на сжатие зернистого строительного материала предложенного состава, равное 1,2 МПа, наблюдается в случае, когда модуль жидкого стекла равен 2,0, а влажность опилок составляет 0 %. Максимальное значение прочности на сжатие зернистого строительного материала предложенного состава, равное 3,3 МПа, наблюдается в случае, когда модуль жидкого стекла равен 2,5, а влажность опилок составляет 20 %.

**Заключение.** Получены математические модели, описывающие процесс производства зернистого строительного материала на основе использования органических отходов. Предложена схема

технологического процесса изготовления строительного материала предлагаемого состава и назначения. технологии зернистых материалов для строительных целей на основе органического сырья. Минимальное значение прочности на сжатие зернистого строительного материала предложенного состава, равное 1,2 МПа, наблюдается в случае, когда модуль жидкого стекла равен 2,0, а влажность опилок составляет 0 %. Максимальное значение прочности на сжатие зернистого строительного материала предложенного состава, равное 3,3 МПа, наблюдается в случае, когда модуль жидкого стекла равен 2,5, а влажность опилок составляет 20 %.

#### Литература

- Белых С.А., Буянова Э.Э., Чернигова М.Н., Брылякова О.А. Способ изготовления облегченного безобжигового зольного гравия: пат. РФ № 2011104324/03 RU 2490225 С1; заявл. 04.08.2011; опублик. 20.08.2013.
- Белых С.А., Буянова Э.Э., Чернигова М.Н., Брылякова О.А. Экспериментальное определение параметров технологических операций производства безобжигового зольного гравия // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 9. С. 98-102.
- Орентлихер Л.П., Соболева Г.Н. Безобжиговый композиционный пористый наполнитель из влажных асбестоцементных отходов и легкие бетоны на его основе // Строительные материалы. 2000. № 7. С. 18-19.
- Ярмаковский В.Н. Об инновационных технологиях переработки крупнотоннажных техногенных отходов в низкоэнергетические и экономически эффективные строительные материалы // Изв. высш. учеб. заведений. Технология текстильной пром-сти. 2017. № 2 (368). С. 107-113.
- Петров В.П., Токарева С.А. Пористые наполнители из отходов промышленности // Строительные материалы. 2011. № 12. С. 46-50.
- Ласман И.А., Мевлидинов З.А., Левкович Т.И., Токар Н.И., Ласман В.С., Музалёв Д.В. Безобжиговый гравий, модифицированный комплексными добавками на основе техногенных пуццолан и водоредуцирующего суперпластификатора // Вестн. Евразийской науки. 2021. № 1. URL: <https://esj.today/PDF/31SAVN121.pdf> (дата обращения: 13.09.2024).
- Торуш Э.Б. Перспективы строительства зданий из смеси цемента и опилок древесины: экологические и экономические аспекты // Молодой ученый. 2023. № 21 (468). С. 103-105.
- Plotnikov N., Burova O. Optimal parameters of physical and mechanical properties of sawdust concrete // E3S Web of

- Conferences: 22 (8-10 dec. 2020 year.). Voronezh, 2021. P. 04007.
9. Plotnikov N., Kochetkov I. Possibility of using sawdust in sawdust concrete // E3S Web of Conferences: 22 (8-10 dec. 2020 year.). Voronezh, 2021. P. 04011.
  10. Белых С.А., Плотников Н.П., Плотникова Г.П. Оптимизация состава теплоизоляционного бетона из вторичных ресурсов региона // Труды БрГУ. Сер. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 2. С. 133-137.
  11. Чельшева И.Н., Плотников Н.П., Афанасьева Н.А. Совершенствование технологии получения древесных композиционных материалов // Лесной вестн. Forestry bulletin. 2017. № 5. С. 75-82.
  12. Лукаш А.А., Лукутцова Н.П. Гофрокартонная плита - эффективный теплоизоляционный материал // Строительные материалы. 2014. № 10. С. 24-27.
  13. Копаница Н.О., Кудяков А.И., Ковалева М.А. Торфодревесные теплоизоляционные строительные материалы. Томск: STT, 2009. 183 с.
  14. Jae Kwan Kim, Hyun Dong Lee, Hyoung Suk Kim, Ho Young Park, Sung Chul Kim. Combustion possibility of low rank Russian peat as a blended fuel of pulverized coal fired power plant // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2014. № 20. P. 1752-1760.
  15. Радаев С.С., Кудоманов М.В., Юмина В.А., Ашуров М.А. К вопросу о применении торфа в производстве эффективных теплоизоляционных строительных материалов // Политехнический вестн. Сер. Инженерные исследования. 2018. № 4 (44). С. 83-85.
  16. Николаев В.И. Использование отходов и вторичных ресурсов в производстве строительных материалов // Строительные материалы. 1999. № 7. С. 7-9.
  17. Kudyakov A.I., Sarkisov Ju., Kopanitsa N.O., Kasatkina A.V., Prischepa I.A. Foam concrete of increased strength with the thermomodified peat additives // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2015. V. 71, № 1 (012012). 7 p.
  18. Cuffe Guillaume, Mindeguia Jean-Christophe, Dréan Virginie, Breyse Denys, Auguin Gildas. Experimental and numerical study of the thermomechanical behaviour of wood-based panels exposed to fire // Construction and Building Materials. 2018. V. 160. P. 668-678.
  19. Milan Gaff, František Kačík, Miroslav Gašparík, Luigi Todaro, Dennis Jones, Roberto Corleto, Linda Makovická Osvaldová, Hana Čekovská. The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak (*Tectona grandis* L. f.) wood // Construction and Building Materials. 2019. V. 200. P. 551-558.
  20. Carosio F., Cuttica F., Medina L., Berglund L.A. Clay nanopaper as multifunctional brick and mortar fire protection coating - Wood case study // Materials & Design. 2016. V. 93. P. 357-363.
  21. Olawoyin Richard. Nanotechnology: The future of fire safety // Safety Science. 2018. V. 110. P. 214-221.
  22. Kozłowski Ryszard, Muzyczek Małgorzata. Smart environmentally friendly composite coatings for wood protection // Smart Composite Coatings and Membranes Transport, Structural, Environmental and Energy Applications Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016. P. 293-325.
  23. Vakhitova L.N. Fire retardant nanocoating for wood protection // Nanotechnology in Eco-efficient Construction (Second Edition). Materials, Processes and Applications Woodhead Publishing Series in Civil and Structural London Concrete: Supplying high quality ready-mixed concrete in the Greater London area. URL: <http://www.aggregate.com/our-businesses/london-concrete/> (дата обращения: 11.08.2024).
  24. Ivanenko G.P., Vasilkov S.G. Production of Artificial Porous Aggregates from Fuel-Containing Industrial Wastes/SEDL // Journals Cement, Concrete and Aggregates (CCA). URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Production-of-Artificial-Porous-Aggregates-from-in-Ivanenko-Vasil%27kov/6ccaddf06d0baaef1c8272b035a3aea57c2bf8a7> (дата обращения: 11.08.2024).

#### References

1. Belyh S.A., Buyanova E.E., Chernigova M.N., Brylyakova O.A. Method for producing lightweight non-firing ash gravel: pat. RF № 2011104324/03 RU 2490225 S1; zayavl. 04.08.2011; opubl. 20.08.2013.
2. Belyh S.A., Buyanova E.E., Chernigova M.N., Brylyakova O.A. Experimental determination of the parameters of technological operations for the production of unfired ash gravel // Systems. Methods. Technologies. 2011. № 9. P. 98-102.
3. Orentliher L.P., Soboleva G.N. Non-firing composite porous aggregate from wet asbestos-cement waste and lightweight concrete based on it // Stroitel'nye materialy. 2000. № 7. P. 18-19.
4. Yarmakovskij V.N. On innovative technologies for processing large-scale industrial waste into low-energy-intensive and cost-effective building materials // Proceedings of higher education institutions. Textile industry technology. 2017. № 2 (368). P. 107-113.
5. Petrov V.P., Tokareva S.A. Porous aggregates from industrial waste // Stroitel'nye materialy. 2011. № 12. P. 46-50.
6. Lasman I.A., Mevlidinov Z.A., Levkovich T.I., Tokar N.I., Lasman V.S., Muzalyov D.V. Unfired gravel modified with complex additives based on technogenic pozzolans and water-reducing superplasticizer // The Eurasian Scientific Journal. 2021. № 1. URL: <https://esj.today/PDF/31SAVN121.pdf> (data obrashcheniya: 13.09.2024).
7. Torush E.B. Prospects for the construction of buildings from a mixture of cement and wood sawdust: environmental and economic aspects // Young Scientist. 2023. № 21 (468). P. 103-105.
8. Plotnikov N., Burova O. Optimal parameters of physical and mechanical properties of sawdust concrete // E3S Web of Conferences: 22 (8-10 dec. 2020 year.). Voronezh, 2021. P. 04007.
9. Plotnikov N., Kochetkov I. Possibility of using sawdust in sawdust concrete // E3S Web of Conferences: 22 (8-10 dec. 2020 year.). Voronezh, 2021. P. 04011.
10. Belyh S.A., Plotnikov N.P., Plotnikova G.P. Optimization of the composition of thermal insulating concrete from secondary resources of the region // Trudy BrGU. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2019. V. 2. P. 133-137.
11. Chelysheva I.N., Plotnikov N.P., Afanas'eva N.A. Improving the technology for producing wood composite materials // Lесnoy vestn. Forestry bulletin. 2017. № 5. P. 75-82.
12. Lukash A.A., Lukutcova N.P. Corrugated cardboard is an effective heat-insulating material // Stroitel'nye materialy. 2014. № 10. P. 24-27.
13. Kopanitsa N.O., Kudyakov A.I., Kovaleva M.A. Peat-wood heat-insulating building materials. Tomsk: STT, 2009. 183 p.
14. Jae Kwan Kim, Hyun Dong Lee, Hyoung Suk Kim, Ho Young Park, Sung Chul Kim. Combustion possibility of low rank Russian peat as a blended fuel of pulverized coal fired power plant // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2014. № 20. P. 1752-1760.
15. Radaev S.S., Kudomanov M.V., Yumina V.A., Ashurov M.A. On the issue of using peat in the production of effective heat-insulating building materials // Polytechnical bulletin. Series: Engineering Studies. 2018. № 4 (44). P. 83-85.
16. Nikolaeв V.I. Use of waste and secondary resources in the production of construction materials // Stroitel'nye materialy. 1999. № 7. P. 7-9.

17. Kudyakov A.I., Sarkisov Ju., Kopanitsa N.O., Kasatkina A.V., Prischepa I.A. Foam concrete of increased strength with the thermomodified peat additives // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2015. V. 71, № 1 (012012). 7 p.
18. Cuff Guillaume, Mindeguia Jean-Christophe, Dréan Virginie, Breyse Denys, Auguin Gildas. Experimental and numerical study of the thermomechanical behaviour of wood-based panels exposed to fire // Construction and Building Materials. 2018. V. 160. P. 668-678.
19. Milan Gaff, František Kačík, Miroslav Gašparík, Luigi Todaro, Dennis Jones, Roberto Corleto, Linda Makovická Osvaldová, Hana Čekovská. The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak (*Tectona grandis* L. f.) wood // Construction and Building Materials. 2019. V. 200. P. 551-558.
20. Carosio F., Cuttica F., Medina L., Berglund L.A. Clay nanopaper as multifunctional brick and mortar fire protection coating - Wood case study // Materials & Design. 2016. V. 93. P. 357-363.
21. Olawoyin Richard. Nanotechnology: The future of fire safety // Safety Science. 2018. V. 110. P. 214-221.
22. Kozłowski Ryszard, Muzyczek Małgorzata. Smart environmentally friendly composite coatings for wood protection // Smart Composite Coatings and Membranes Transport, Structural, Environmental and Energy Applications Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2016. P. 293-325.
23. Vakhitova L.N. Fire retardant nanocoating for wood protection // Nanotechnology in Eco-efficient Construction (Second Edition). Materials, Processes and Applications Woodhead Publishing Series in Civil and Structural London Concrete: Supplying high quality ready-mixed concrete in the Greater London area. URL: <http://www.aggregate.com/our-businesses/london-concrete/> (data obrashcheniya: 11.08.2024).
24. Ivanenko G.P., Vasilkov S.G. Production of Artificial Porous Aggregates from Fuel-Containing Industrial Wastes/SEDL // Journals Cement, Concrete and Aggregates (CCA). URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Production-of-Artificial-Porous-Aggregates-from-in-Ivanenko-Vasil%27kov/6ccaddf06d0baaef1c8272b035a3aea57c2bf8a7> (data obrashcheniya: 11.08.2024).