

## ОПИЛКОБЕТОН НА БЕСЦЕМЕНТНОМ КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ

*В.В. Белов*

*Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Белов В.В., 2020

**Аннотация.** Рассмотрены роль и преимущества изделий на основе бесцементного вяжущего с использованием отходов деревообработки и произведено сравнение с другими видами материалов и технологий. Цель данной работы – получение теплоизоляционного материала на основе отходов деревообработки и бесцементного вяжущего. Было выявлено, что материал на основе бесцементного вяжущего с применением опилок в качестве заполнителя эффективен в условиях реального производства.

**Ключевые слова:** бесцементное вяжущее, отходы деревообработки, теплоизоляционный материал, подбор состава, математическое планирование, эксперимент.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2020-3-6-16**

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в связи с резким подорожанием традиционных строительных материалов большое распространение получили изделия на основе отходов различных других производств. Количество отходов, например, в деревообрабатывающей промышленности, достаточно развитой в Тверском и соседних с ним регионах, в среднем составляет около 50 %. Естественно, встает вопрос об их эффективном использовании. Обычно утилизируют опилки и стружку. Степень их полезной утилизации в народном хозяйстве составляет от 9 до 20 % общего выхода, причем применяют их в основном в качестве топлива. В то же время при использовании отходов деревообработки в строительной индустрии можно получать широкую номенклатуру строительных материалов. Поэтому применение отходов деревообработки в производстве строительных материалов является перспективным, актуальным направлением [1, 2].

В настоящее время опилкобетон получают чаще всего с помощью бесцементного вяжущего, состоящего из известняковой муки и жидкого стекла (ЖС) [3, 4]. Кроме того, при определенных соотношениях бесцементного вяжущего и отходов деревообработки, а также их дополнительной обработке можно получать изделия без деструктивных процессов при твердении [5–7].

Физическая и химическая совместимость тонкомолотого известняка с другими реагентами при образовании вяжущей части бетона вытекают из свойств частиц известнякового порошка: способствовать лучшему и более равномерному распределению зерновых фракций внутри объема бетона; микроармировать минеральную структуру бетона; воздействовать на процесс гидратации через замедление процесса схватывания и снижение скорости быстрого непосредственного взаимодействия с щелочными активаторами [8].

Анализ литературы показывает, что перспективным компонентом бесцементного вяжущего может выступать, кроме тонкомолотого известняка, стеклобой, который при затворении водой не проявляет вяжущих свойств, но в щелочной среде гидратируется с образованием кремниевых кислот, которые при достижении определенных значений кислотности среды начинают превращаться в гель. А гель, уплотняясь, омоноличивает крупные и мелкие фракции заполнителя. В итоге получается плотный, прочный, долговечный силикатный конгломерат – стеклобетон [9].

Как показали исследования составов пенобетона [10], наилучший эффект при формировании связи в этом материале возникает при совместном применении жидкого стекла и боя стекла. Изменения в кинетике, положительно сказавшиеся на фазовых превращениях, обусловлены, как полагается, образованием более прочных химических связей.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель данной работы – получение теплоизоляционного материала на основе отходов деревообработки и бесцементного вяжущего.

Использованные сырьевые материалы:

известняковая мука с удельной поверхностью 300 м<sup>2</sup>/кг;

отходы деревообработки в виде опилок хвойных пород насыпной плотности 130 кг/м<sup>3</sup> и влажностью 22,5 %;

молотый стеклобой с удельной поверхностью 200 м<sup>2</sup>/кг;

натриевое ЖС.

Зерновой состав опилок, полученный путем просеивания через стандартный набор сит, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Зерновой состав опилок

Остатки на ситах, %	Размеры отверстий сит, мм					
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14
Частные	2	12	40	32	12	2
Полные	2	14	54	86	98	100

На первом этапе работы изучалось влияние соотношения между ЖС и известняковой мукой на физико-механические свойства композиционного вяжущего, состоящего из известняковой муки и ЖС.

Путем уплотнения на стандартной виброплощадке получали образцы в виде кубов размером 3х3х3 см. Вибрационное уплотнение проводилось с пригрузом 4 кПа. Испытания образцов-кубиков производились в возрасте 14 суток при твердении в сушильном шкафу при температуре 40–50 °С.

Постоянные контролируемые факторы:

количество воды, т. е. водовяжущее отношение (В/В), равное 0,2;

уплотнение на виброплощадке в течение трех минут.

Для получения зависимостей плотности и прочности композиционного вяжущего от состава был использован планированный эксперимент ПФЭ 3<sup>2</sup>.

Переменные факторы:

а) X<sub>1</sub> – соотношение по массе ЖС и муки (М): ЖС/М = 0,1–0,5 (среднее значение – 0,3);

б) X<sub>2</sub> – соотношение по массе молотого стекла (МС) и М: МС/М = 0–0,3 (среднее значение – 0,15).

На втором этапе было изучено влияние В/В на физико-механические свойства вяжущего. Уровнями варьирования данного переменного фактора выступали значения В/В, равные 0,2; 0,225; 0,25. Постоянными факторами являлись ЖС/М = 0,1; МС/М = 0,15; уплотнение на виброплощадке в течение 3 минут; твердение в сушильном шкафу при температуре 40–50 °С в течение 14 суток.

На третьем этапе было установлено влияние количества воды затворения и состава композиционного вяжущего (ЖС + известняковая мука + МС) на физико-механические свойства опилкобетона.

На технических весах производилась дозирование опилок, известняковой муки и МС. Объем воды и ЖС измерялся мерным цилиндром. Для приготовления сырьевой смеси сначала отдельно перемешивали сухую смесь из известняковой муки и МС, затем добавляли ЖС и предварительно высушенные в сушильном шкафу опилки. Затем эта масса перемешивалась в течение 2–3 минут и укладывалась в собранную и смазанную форму. Отформованные образцы выдерживались в форме до достижения ими распалубочной прочности. Для скорейшего набора прочности кубики твердели в сушильном шкафу при температуре 40–50 °С в течение 14 суток. Высушенные и охлажденные до комнатной температуры образцы-кубики испытывались на гидравлическом прессе ПС-100-0. Постоянными факторами были уплотнение на виброплощадке в течение 3 минут; твердение в сушильном шкафу при температуре 40–50 °С в течение 14 суток. Переменными факторами на данном этапе выступали соотношение между опилками и вяжущим (ОП/В) в составе известняковой муки и ЖС, между водой и вяжущим (В/В), а также между МС (выведенном на этой стадии подбора из состава вяжущего) и остальным вяжущим (МС/В). Уровни варьирования: ОП/В = 0,4–0,6; В/В = 1,0–1,2; МС/В = 0–0,2.

На третьем этапе применяли трехфакторный планированный эксперимент В–D<sub>13</sub>, который позволил получить нелинейные квадратичные модели и имел хорошие статистические характеристики.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Матрица планирования опытов и результаты экспериментов на первом этапе приведены в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования и результаты эксперимента

X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	ЖС/М	МС/М	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	Средний предел прочности на сжатие, МПа
1	2	3	4	5	6
–1	–1	0,1	0	2,004	1,054
+1	–1	0,5	0	2,16	1,774

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
–1	+1	0,1	0,3	1,69	1,6
+1	+1	0,5	0,3	1,714	0,862
–1	0	0,1	0,15	1,409	1,84
+1	0	0,5	0,15	1,855	1,29
0	–1	0,3	0	1,800	1,142
0	+1	0,3	0,3	1,798	1,406
0	0	0,3	0,15	1,596	1,44

Графики зависимостей предела прочности на сжатие образцов вяжущего от ЖС/М и МС/М (рис. 1 и 2) показывают неоднозначный характер влияния соотношения между ЖС и известняковой мукой на физико-механические свойства композиционного вяжущего.

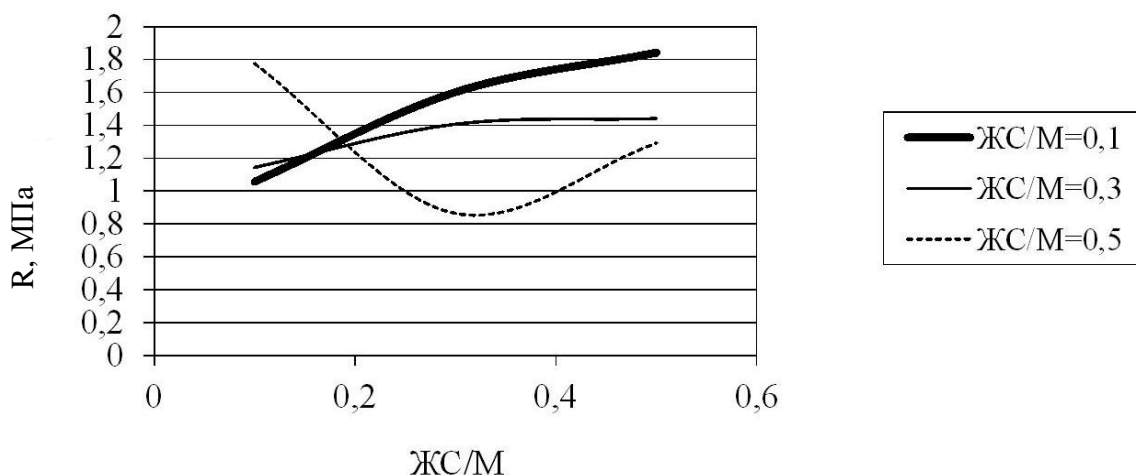


Рис. 1. Зависимости предела прочности на сжатие образцов вяжущего от ЖС/М

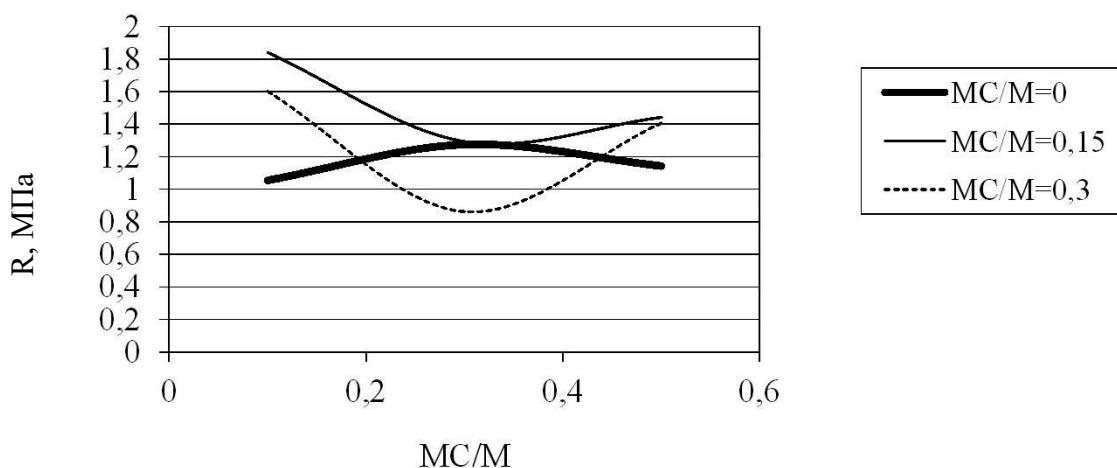


Рис. 2. Зависимости предела прочности на сжатие образцов вяжущего от МС/М

Лучший результат по прочности из приведенных графиков зависимостей предела прочности на сжатие образцов вяжущего отображен на кривой ЖС/М = 0,1 (см. рис. 1), где наибольший показатель по прочности составляет 1,84 МПа. При последующих соотношениях, таких, например, как ЖС/М = 0,3 и ЖС/М = 0,5, предел прочности на сжатие равен 1,44 и 1,77 МПа соответственно. Сравнивая полученные при испытаниях данные, выбираем оптимальные значения ЖС/М (0,1) и МС/М (0,15), соответствующие максимальному значению прочности (1,84 МПа).

Результаты эксперимента (второго этапа работы) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний образцов вяжущего при различных значениях В/В

Варьируемый фактор В/В	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	Средний предел прочности на сжатие, МПа
0,2	1,4	1,84
0,225	1,894	2,84
0,25	2,062	3,55

Зависимость предела прочности на сжатие образцов вяжущего от В/В (рис. 3) показывает, что с увеличением водовяжущего отношения в исследованных пределах прочность возрастает, что объясняется лучшими условиями уплотнения и повышением плотности образцов.

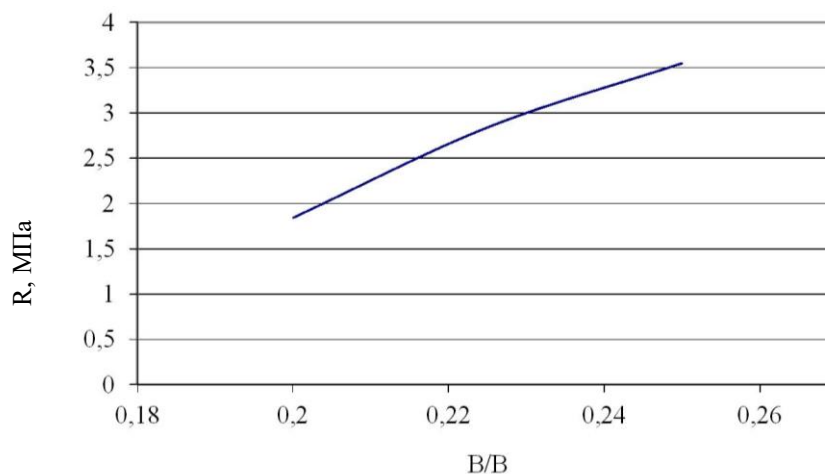


Рис. 3. Зависимость предела прочности на сжатие образцов вяжущего от В/В

Существенное увеличение прочности образцов наблюдается при  $V/V = 0,25$ . Наибольшее значение предела прочности на сжатие составляет 3,55 МПа. Следовательно, дальнейшие опыты следует проводить с этим значением В/В, так как его уменьшение повлечет за собой снижение этого важного показателя, что нежелательно. Поскольку опилки поглощают большую часть воды, то начальное значение В/В в опилкобетоне увеличиваем до 1–1,2, чтобы фактическое В/В в вяжущем оставалась равным примерно 0,25.

Матрица планирования опытов и результаты экспериментов на третьем этапе приведены в табл. 4.

Таблица 4

Планированный эксперимент типа В–D<sub>13</sub> и его результаты

Матрица планирования			О/В	В/В	ЖС/В	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Средний предел прочности на сжатие, МПа
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>					
-1	-1	-1	0,4	1	0	650	0,72
+1	-1	-1	0,6	1	0	545	0,50
-1	+1	-1	0,4	1,2	0	693	0,83
-1	-1	+1	0,4	1	0,2	680	0,85
-1	0,19	0,19	0,4	1,119	0,119	659	0,72
0,19	-1	0,19	0,519	1	0,119	539	0,53
0,19	0,19	-1	0,519	1,119	0	611	0,58
-0,29	+1	+1	0,471	1,2	0,2	607	0,68
+1	-0,29	+1	0,6	1,071	0,2	631	0,52
+1	+1	-0,29	0,6	1,2	0,071	660	0,46

Примечание. X<sub>3</sub> – соотношение по массе ЖС/В.

По результатам планированного эксперимента типа В–D<sub>13</sub> были получены математические модели зависимостей вида

$$y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_{11} \cdot X_1^2 + B_{22} \cdot X_2^2 + B_{33} \cdot X_3^2 + B_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + B_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + B_{23} \cdot X_2 \cdot X_3.$$

Расчет коэффициентов  $B_0, B_1, B_2, B_3, B_{11}, B_{22}, B_{33}, B_{12}, B_{13}, B_{23}$  производили с помощью программы RBKR и получили конкретные значения по прочности и плотности (табл. 5).

Таблица 5

Результаты расчета коэффициентов с помощью программы RBKR

Наименование параметра	Значение коэффициента									
	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_{11}$	$B_{22}$	$B_{33}$	$B_{12}$	$B_{13}$	$B_{23}$
Прочность	0,53	-0,14	0,01	0,02	0,04	0,02	0,08	-0,01	-0,02	-0,03
Плотность	583	-23,9	27,4	0,17	52,3	-14,1	21,9	24,6	3,9	-18,7

По математическим моделям строили графики зависимостей прочности и плотности от указанных выше факторов (рис. 4–9).

Анализ зависимостей предела прочности на сжатие и плотности опилкобетона от опилковязущего соотношения (рис. 4–5) показывает, что оптимальные значения прочности и плотности материала достигаются при  $O/B = 0,5$ . Оптимальное значение водовязущего отношения  $B/B$  составляет 1,0.

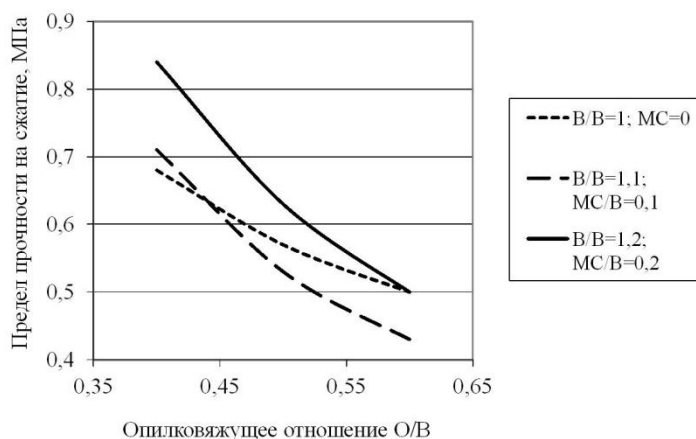


Рис. 4. Зависимости предела прочности на сжатие опилкобетона от  $O/B$

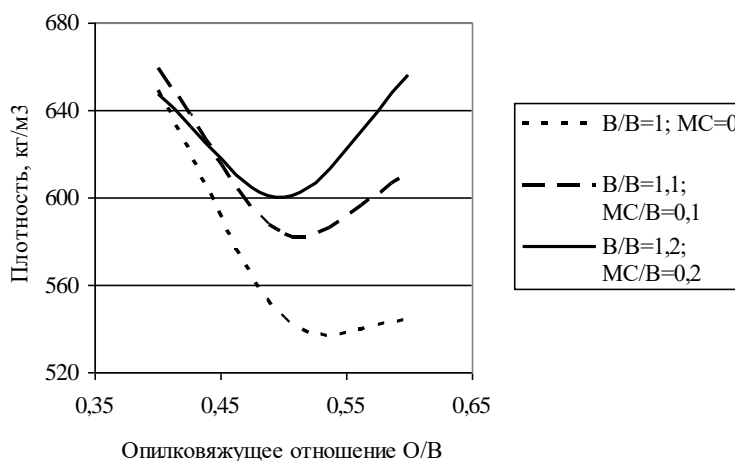


Рис. 5. Зависимости плотности опилкобетона от  $O/B$

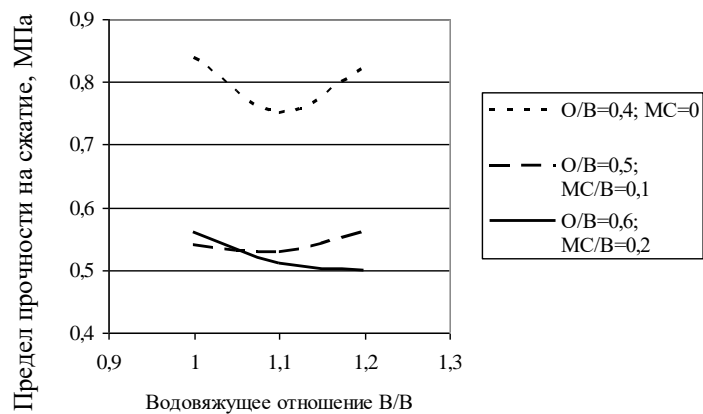


Рис. 6. Зависимости предела прочности на сжатие опилкобетона от В/В

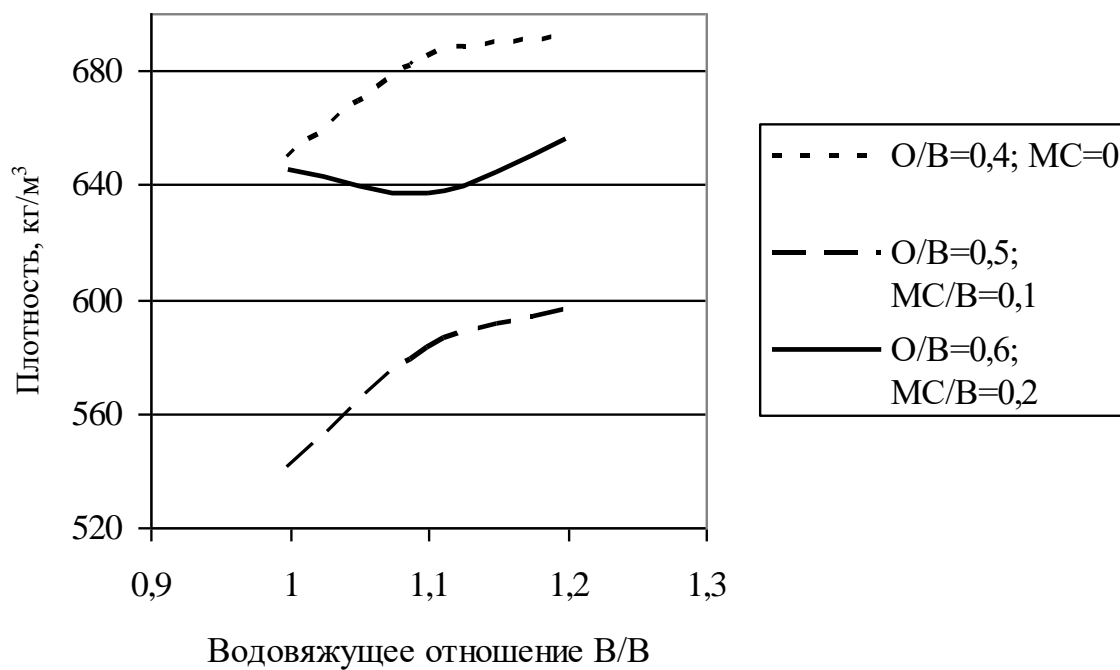


Рис. 7. Зависимости плотности опилкобетона от В/В

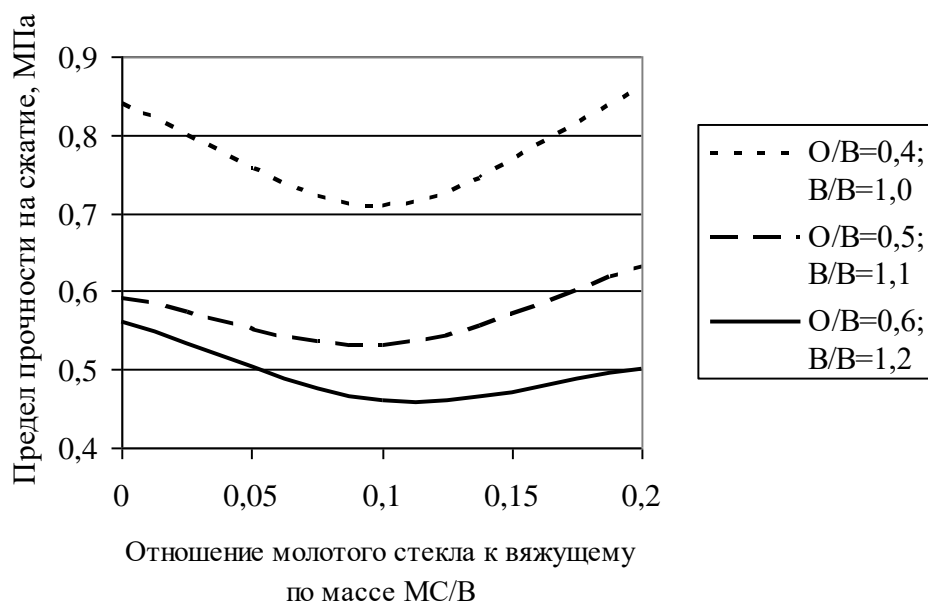


Рис. 8. Зависимости предела прочности на сжатие опилкобетона от МС/В

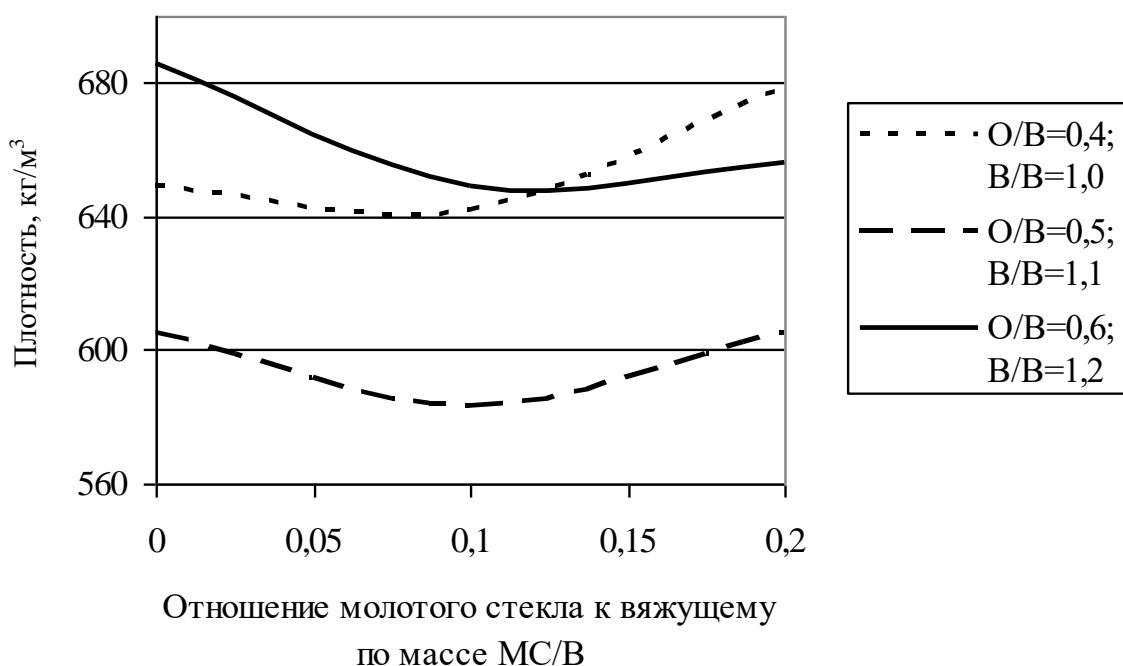


Рис. 9. Зависимости плотности опилкобетона от МС/В

Зависимости свойств опилкобетона от МС/В (см. рис. 8, 9) показывают, что в отдельности добавка молотого стеклобоя в исследованных пределах не оказывает существенного влияния и может быть исключена. Изменение свойств может объясняться армирующим влиянием опилок, которое заменяет упрочняющую роль МС как наполнителя в композиционном вяжущем.

Таким образом, были найдены достаточные для теплоизоляционного материала показатели, а именно предел прочности при сжатии 0,6 МПа и средняя плотность 540 кг/м<sup>3</sup>,



которые достигаются при следующем номинальном составе материала (на 1 м<sup>3</sup>): опилки – 180 кг; известняковая мука – 327 кг; ЖС – 33 кг.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Преимущества изделий на основе бесцементного вяжущего с использованием отходов деревообработки (по сравнению с другими видами материалов и технологий):

отказ от привозного дорогостоящего цемента;

упрощенная технология изготовления (не требуется какой-либо тепловой обработки, но для скорейшего набора прочности рекомендуется сушка изделий в течение одних суток при температуре 60–70 °С);

утилизация отходов деревообработки.

Материал на основе бесцементного вяжущего с использованием опилок в качестве заполнителя является эффективным в условиях реального производства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наназашвили И.Х. Арболит – эффективный строительный материал. М.: Стройиздат, 1984. 125 с.
2. Наназашвили И.Х. Строительные материалы, изделия и конструкции. М.: Высшая школа, 1990. 495 с.
3. Арболит. Производство и применение / сост. В.А. Арсенцев. М.: Стройиздат, 1977. 348 с.
4. Волков И.В. Опилкобетон: состояние и перспективы применения // *Промышленное и гражданское строительство*. № 9. 2002.
5. Куннос Г.А. Опилкобетон. Рига: Академия наук Латвийской ССР, 1960. 54 с.
6. Величко Б.П., Машкин Н.А., Петякшин И.А., Шегай Н.Ю. Технология атмосферостойкого арболита с автоматизированной обработкой древесного заполнителя // *Известия вузов. Строительство*. 1994. № 3. С. 53–56.
7. Савенков А.И. Экологический метод изготовления отделочных материалов // *Экологические системы и приборы*. 2001. № 3. С. 37–40.
8. Moser V., Pfeifer C. Microstructure and Durability of Ultra-High Performance Concrete. Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete Kassel, Germany March 05-07, 2008.
9. Дорохова Е.С., Изотова И.А. Эффективность использования стекольного боя // *Образование, наука, производство: сборник трудов конференции*. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. С. 345–349.
10. Федосов С.В., Акулова М.В., Потемкина О.В., Емелин В.Ю., Белякова Н.А. Исследование изменения фазового состава пенобетона с добавлением жидкого стекла и стеклобоя термическим методом // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2013. № 5. С. 14–20.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*БЕЛОВ Владимир Владимирович* – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В. Опилкобетон на бесцементном композиционном вяжущем // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 3 (7). С. 6–16.

---

## SAWMILCOBETONE ON NON-CEMENT COMPOSITE BINDER

**V.V. Belov**

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The role and advantages of products based on a non-cement binder using wood waste compared to other types of materials and technologies are considered. The purpose of this work was to obtain a heat insulation material based on wood processing waste and non-cement binder. The cement-free binder material using sawdust as an aggregate is effective under real-world production conditions.

**Keywords:** no-cement binder using woodworking wastes, heat insulation material, composition selection, mathematical experiment planning.

## REFERENCES

1. Nanazashvili I.H. Arbolit – effektivnyj stroitel'nyj material [Arbolit is an effective building material]. M.: Stroyizdat. 1984. 125 p.

2. Nanazashvili I.H. Construction materials, products and structures [Construction materials, products and structures]. M.: Vysshaya shkola, 1990. 495 p.
3. Wood concrete. Proizvodstvo i primenenie [Production and application] / dr. V.A. Arsentsev. M.: Stroyizdat. 1977. 348 p.
4. Volkov I.V. Pilkobeton: State and Prospects of Application. *Industrial and Civil Engineering*. 2002. No. 9. 35 p. (In Russian).
5. Kunnos G.A. Opilkobeton [Opilkobeton]. Riga: Academy of Sciences of the Latvian SSR, 1960. 54 p.
6. Velichko B.P., Mashkin N.A., Petyakshin I.A., SHegaj N.Y. Technology of weatherproof arbolite with automated processing of wood aggregate. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* No. 3. 1994. 150 p. (In Russian).
7. Savenkov A.I. Ecological method of making finishing materials. *Ecological systems and instruments*. 2001. No. 3, pp. 37–40. (In Russian).
8. Moser B., Pfeifer C. Microstructure and Durability of Ultra-High Performance Concrete. Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete Kassel, Germany March 05-07, 2008.
9. Dorohova E.S., Izotov I.A. Effectiveness of glass fighting. *Education, science, production: proceedings of the conference*. Belgorod: BGTU im. V.G. SHuhova. 2015, pp. 34–37. (In Russian).
10. Fedov S.V., Akulova M.V., Potemkin O.V., Emelin V.J., Belyakov N.A. Study of change of phase composition of foam concrete with addition of liquid glass and glass by thermal method. *News of South-West State University*. 2013. No. 5, pp. 14–20. (In Russian).

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*BELOV Vladimir Vladimirovich* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Head of Chair of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

#### **CITATION FOR AN ARTICLE**

Belov V.V. Sawmilcobetone on non-cement composite binder // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 3 (7), pp. 6–16.

