

NOVICHENKOVA Tatiana Borisovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tanovi.69@mail.ru

PETROPAVLOVSKII Kirill Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

ZAVADKO Maria Yurievna – Candidate of Technical Sciences, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Babaev D.D., Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Zavadko M.Yu. Overview: geopolymer binders based on TPP ash // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 3 (19), pp. 5–19.

УДК 691.11

БИОКОМПОЗИТЫ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБОТКИ. ЧАСТЬ 3 (ПОДБОР СОСТАВОВ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОГО ОПИЛКОБЕТОНА)

В.В. Белов

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Белов В.В., 2023

Аннотация. Изучены способы применения отходов деревообработки, перспективы их использования в качестве заполнителя для легких бетонов и других строительных материалов. С использованием математических моделей разработаны малоэнергоёмкие составы опилкобетона. Отмечено, что при этом достигается сокращение расхода цемента до 30 %, снижение материалоемкости строительных конструкций, энергозатрат на их производство и снижение себестоимости композитов на основе отходов деревообработки по сравнению с аналогичными материалами на 30–35 %. Указано, что в процессе использования в качестве основного сырья отходов деревообработки образуется дополнительный энергосберегающий и экологический эффект. Подчеркнуто, что благодаря эффективному использованию сырья ожидается снижение себестоимости продукции на 18–20 %.

Ключевые слова: отходы деревообработки, опилкобетон, древесный заполнитель, составы, свойства.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-3-19-33

ВВЕДЕНИЕ

Предварительные исследования по теме использования опилкобетона [1–5]¹ позволили установить возможность улучшения древесного заполнителя путем его биоферментации с помощью микроорганизмов, содержащихся в субстрате животного происхождения – отходе животноводства. Такая обработка древесного сырья может обеспечить получение строительных материалов, удовлетворяющих требованиям стандарта, даже на основе широко распространенных отходов деревообработки – опилок.

В части 1 настоящей работы [6] после изучения литературы было установлено, что технологии получения древесных композиционных материалов на основе химически и механически активированного древесного заполнителя достаточно сложны и не позволяют получить материалы с высокими строительно-техническими свойствами. Выход из сложившейся ситуации видится в применении новых методов предварительной обработки древесного и другого растительного сырья, дающих возможность экономить энергоноситель и исходное сырье, улучшать физико-механические и санитарно-гигиенические свойства материалов, избегать применения дефицитных и в некоторых случаях вредных химических веществ.

Показано, что с современных позиций наиболее перспективным методом предварительной обработки древесного сырья является обработка биологическая. Это связано с уникальной способностью биологических систем распознавать определенные химические соединения и осуществлять широкий спектр химических реакций в мягких условиях.

В части 2 настоящей работы [7] были изучены способы биоферментации древесного заполнителя с целью его использования в качестве заполнителя для легких бетонов и других строительных материалов. Такая обработка древесного сырья может привести к получению строительных материалов, удовлетворяющих требованиям стандарта, даже на основе широко распространенных отходов деревообработки – опилок. Биоремедиация опилок по разработанному способу значительно (в два раза и более) снижает содержание в них сахаров, что способствует получению образцов опилкобетона с плотностью, соответствующей плотности легких бетонов, и с достаточной прочностью на сжатие. Были получены опытные образцы биологически активированного древесного заполнителя и определены основные физико-химические свойства.

Целью данного исследования являлась разработка оптимальных составов биологически активированного опилкобетона с использованием математических моделей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве древесного заполнителя древесно-цементной композиции применялись опилки древесины хвойных пород, которые были подвергнуты биологической обработке субстратом животного происхождения (отходом животноводства) для снижения водорастворимых редуцирующих веществ – полисахаридов.

В настоящей работе использовали портландцемент марки по прочности 500 без добавок (ПЦ 500-Д0) и с минеральными добавками (ПЦ 500-Д20) по ГОСТ 10178-85.

¹ В экспериментах активное участие принимала Н.Н. Куделя (на тот момент заведующая лабораторией кафедры «Производство строительных изделий и конструкций» Тверского государственного технического университета).

Для ускорения твердения цемента и уменьшения отрицательного влияния полисахаридов, оставшихся после биологической обработки древесного заполнителя, в состав древесно-цементной композиции вводили хлорид кальция (ХК) в количестве 2 % от массы цемента.

В сырьевую смесь с целью изготовления опытных образцов биологически активированного опилкобетона вводили также добавки антисептика «Боранс» и антипирена «Диафос» (50%-й концентрации) производства ООО «Гексагон» (г. Тверь). Добавку антисептика «Боранс» брали в количестве 0,25 % от массы сухих опилок, а добавку антипирена «Диафос» – в количестве 0,5 % от массы сухих опилок.

Базовые два состава теплоизоляционного и теплоизоляционно-конструкционного биокомпозита были определены в исследованиях [1–5] и составили соответственно 62,5 % опилок в пересчете на сухое вещество и 37,5 % субстрата животного происхождения (I состав), 50 % опилок и 50 % субстрата (II состав).

Согласно плану эксперимента, после дозирования компонентов сырьевой смеси в расчете на опытный замес смесь перемешивалась в лабораторном смесителе в течение 3 мин.

При изготовлении сырьевой смеси с добавками антисептика и антипирена тщательно перемешивали цемент с песком, а затем с опилками. Добавляли часть воды затворения ($\approx 2/3$ от общего количества) с растворенным в ней хлористым кальцием и «Борансом» и перемешивали 3 мин. В оставшейся части воды ($\approx 1/3$ от общего количества) растворяли «Диафос», эту воду добавляли в смесь, после чего ее перемешивали в течение 1 мин.

Из сырьевой смеси в соответствии с ГОСТ 19222 путем трамбования формовали образцы для испытаний в стальных формах-кубах размером $10 \times 10 \times 10$ см. Для этого смесь укладывали в форму в два слоя и уплотняли 15–20 нажимами стальной болванкой по размеру формы с высоты 2–3 см.

Образцы твердели при комнатной температуре в течение 7 сут, после чего взвешивались, обмерялись и высушивались при температуре $80 \text{ }^\circ\text{C}$ до постоянной массы. В части экспериментов с целью ускорения твердения материала образцы обрабатывались 7 сут в сушильном шкафу при температуре $40\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$. Контрольные образцы опытных партий опилкобетона, выпущенных на действующем макете технологической установки, в соответствии с ГОСТ 19222-84 испытывали после 28 сут твердения в нормальных условиях.

Предел прочности на сжатие опилкобетона определяли в соответствии с ГОСТ 10180. Среднюю плотность образцов устанавливали по ГОСТ 12730.1. Влажность образцов определяли на кусках, оставшихся после их разрушения, по ГОСТ 12730.2. Морозостойкость устанавливали методом однократного замораживания по ГОСТ 10060.5-90 с помощью прибора «Бетон-Фрост» на образцах-кубах с размером ребра 100 мм в высушенном состоянии.

Теплопроводность опилкобетона определяли по ГОСТ 7076 с помощью прибора ИТП-МГ4 на образцах, высушенных до постоянной массы при температуре $105 \text{ }^\circ\text{C}$. Перед испытаниями образцы выдерживались не менее 1 ч при температуре помещения, в котором проводились испытания ($23 \text{ }^\circ\text{C}$). Образцы для определения теплопроводности изготавливали в виде пластин размером 100×100 мм и толщиной около 30 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для построения математических моделей вида «состав – свойства» для биокомпозита на активированном заполнителе использовался трехфакторный нелинейный планированный эксперимент типа В-D₁₃. На основе предварительных опытов были установлены границы изменения факторов: 1) отношения по массе опилок (по сухой навеске) и цемента (О/Ц) – от 0,65 до 0,85; 2) отношения массы воды затворения к суммарной массе сухого древесного заполнителя и цемента (В/М) – от 0,80 до 1,00; 3) содержание добавки ХК по отношению к суммарной массе сухого древесного заполнителя и цемента – от 1 до 3 %.

План эксперимента приведен в табл. 1.

Таблица 1

План эксперимента и результаты испытаний образцов опилкобетона

Номер серии	План			Уровни факторов			Средняя плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа
	X ₁	X ₂	X ₃	О/Ц	В/М	ХК		
1	-1	-1	-1	0,65	0,80	1	607	0,60
2	+1	-1	-1	0,85	0,80	1	585	0,60
3	-1	+1	-1	0,65	1,00	1	697	1,07
4	-1	-1	+1	0,65	0,80	3	710	2,05
5	-1	0,19	0,19	0,65	0,919	2,19	740	1,67
6	0,19	-1	0,19	0,769	0,80	2,19	710	1,47
7	0,19	0,19	-1	0,769	0,919	1	677	0,72
8	-0,29	+1	+1	0,721	1,00	3	770	1,47
9	+1	-0,29	+1	0,85	0,871	3	690	1,85
10	+1	+1	-0,29	0,85	1,00	1,71	645	1,25

После определения оптимального состава биокомпозита для сравнения и выявления эффекта биологического активирования древесного заполнителя в тех же условиях и с тем же составом были изготовлены образцы на исходных опилках. Испытания этих образцов производились параллельно с испытаниями опытных образцов.

По результатам планированного эксперимента (см. табл. 1) построены математические модели зависимостей плотности ρ_0 (кг/м³) и прочности на сжатие $R_{сж}$ (МПа) биокомпозита от его состава:

$$\rho_0 = 737,7 - 30,9x_1 + 18,1x_2 + 39,9x_3 - 42,4x_1^2 - 17,7x_1x_2 - 2,3x_1x_3 - 14,5x_2^2 - 9,2x_2x_3 - 18,0x_3^2;$$

$$R_{сж} = 1,37 - 0,06x_1 - 0,02x_2 + 0,5x_3 + 0,15x_1^2 - 0,05x_1x_2 - 0,02x_1x_3 - 0,05x_2^2 - 0,2x_2x_3 - 0,18x_3^2,$$

где $x_1 = \frac{О/Ц - 0,75}{0,1}$; $x_2 = \frac{В/М - 0,9}{0,1}$; $x_3 = \frac{ХК - 2}{1}$.

Число значимых коэффициентов в первой модели составило 5, а во второй – 7. Критерий Фишера для первой модели равен 0,92, для второй – 3,27. Таким образом,

модели зависимостей плотности и прочности от состава адекватны (табличное значение критерия Фишера $F_{\text{табл}} = 4,53$).

На рис. 1–3 приведены графики зависимостей прочности на сжатие и средней плотности опилкобетона на биологически активированном заполнителе соответственно от опилкоцементного отношения О/Ц, водотвердого отношения В/М и содержания ХК. Графики построены по математическим моделям соответствующих зависимостей.

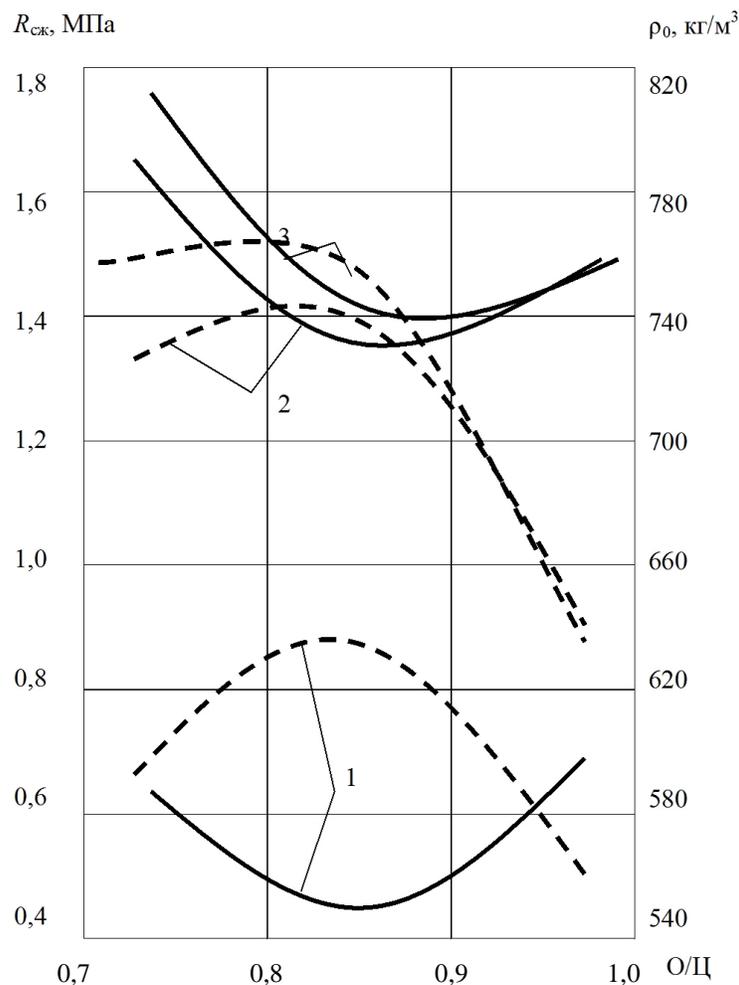


Рис. 1. Влияние О/Ц на прочность при сжатии $R_{сж}$ (сплошная линия) и среднюю плотность ρ_0 (пунктир) опилкобетона на биологически активированном заполнителе:
1 – В/М = 0,8; ХК = 1; 2 – В/М = 0,9; ХК = 2; 3 – В/М = 1,0; ХК = 3

Полученные зависимости позволяют выявить наиболее значимые факторы состава биокомпозита, характер их влияния на основные физико-механические свойства материала. Данные показывают, что наилучшее сочетание свойств (увеличение прочности и одновременное снижение средней плотности) достигается за счет увеличения добавки ХК в исследованных пределах при минимально допустимом (из технологических соображений) количестве воды затворения и максимально возможном содержании в смеси

опилок. В то же время максимальная прочность композита соответствует наибольшему в исследованном диапазоне количеству цемента в сырьевой смеси.

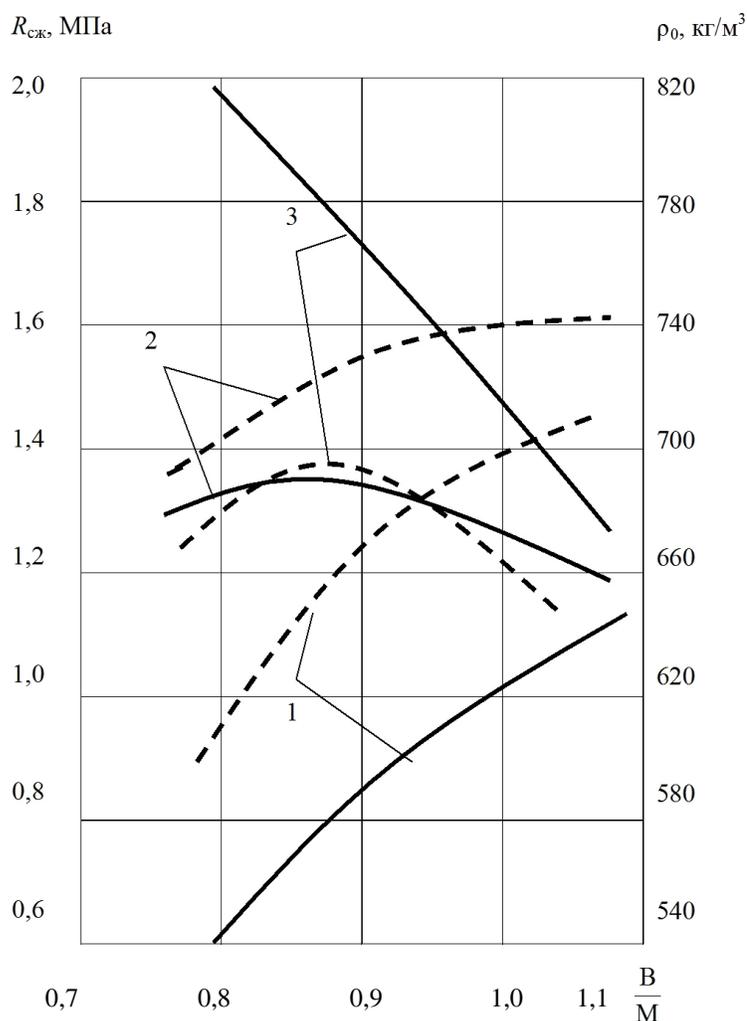


Рис. 2. Влияние В/М на прочность при сжатии $R_{сж}$ (сплошная линия) и среднюю плотность ρ_0 (пунктир) опилкобетона на биологически активированном заполнителе:
1 – О/Ц = 0,75; ХК = 1; 2 – О/Ц = 0,85; ХК = 2; 3 – О/Ц = 0,95; ХК = 3

Оптимальные составы опилкобетона различного назначения наиболее целесообразно определять путем оптимизации математических моделей по критериям значимых свойств. Оптимизация полученных квадратичных математических моделей производилась по минимуму средней плотности (первая модель) и максимуму прочности на сжатие (вторая модель) с помощью диссоциативно-шагового метода оптимизации [8]. Результаты оптимизации математических моделей приведены в табл. 2.

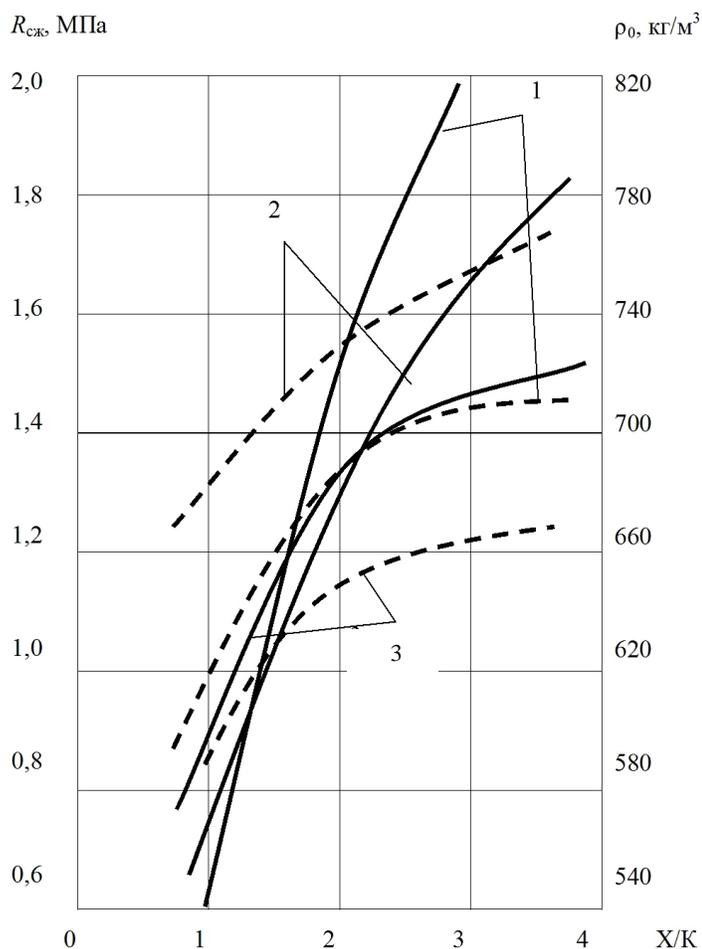


Рис. 3. Влияние содержания ХК на прочность при сжатии $R_{сж}$ (сплошная линия) и среднюю плотность ρ_0 (пунктир) опилкобетона на биологически активированном заполнителе:
1 – О/Ц = 0,75; В/М = 0,8; 2 – О/Ц = 0,85; В/М = 0,9; 3 – О/Ц = 0,95; В/М = 1,0

Таблица 2

Оптимальные значения факторов состава биокомпозита по различным критериям оптимальности

Критерий оптимальности	Расчетные значения		О/Ц	В/М	$\frac{XK - 2}{1}$
	Плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа			
Минимум плотности	584,7	0,62	1	-1	-1
Максимум прочности на сжатие	709	2,04	-1	-1	1

Сравнение расчетных показателей свойств биокompозита (см. табл. 2) с требованиями ГОСТ 19222 для арболита показывает, что состав, определенный по критерию минимальной плотности, соответствует требованиям к теплоизоляционному арболиту. Если учесть, что прочность арболита после 7-суточного твердения составляет 60–70 % от марочной прочности, то марка по прочности этого состава – М10, а класс по прочности на сжатие – В0,75.

Состав, определенный по критерию максимальной прочности на сжатие, соответствует требованиям ГОСТ 19222 по данному показателю к теплоизоляционно-конструкционному арболиту. Марка по прочности этого состава – М25, а класс по прочности на сжатие – В2.

Значительное влияние на содержание редуцирующих веществ в обработанных опилках и прочность опилкобетона оказывает соотношение субстрата животного происхождения и опилок в исходной смеси, а также содержание в ней воды. С целью выявления оптимальных значений этих параметров был поставлен планированный двухфакторный эксперимент типа В-D₂₃. Границы изменения факторов установили в следующих пределах: X_1 – отношение по массе субстрата животного происхождения и опилок (по сухой навеске) (Н/О) – от 0,60 до 1,0; X_2 – отношение массы воды затворения к суммарной массе сухого древесного заполнителя и субстрата животного происхождения (В/М) – от 0,50 до 0,70. Составы обрабатывались параллельно в одном биореакторе при температуре 42 °С в течение 5 сут.

План и результаты эксперимента приведены в табл. 3.

Таблица 3

План эксперимента и результаты испытаний образцов опилкобетона

Номер серии	План		Уровни факторов		Содержание редуцирующих веществ, %	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности на сжатие, МПа
	X_1	X_2	Н/О	В/М			
1	-1	-1	0,6	0,5	0,436	490	0,49
2	+1	-1	1,0	0,5	0,362	510	0,58
3	-1	+1	0,6	0,7	0,412	500	0,53
4	+1	+1	1,0	0,7	0,364	520	0,58
5	-1	0	0,6	0,6	0,336	530	0,60
6	+1	0	1,0	0,6	0,315	550	0,65
7	0	-1	0,8	0,5	0,418	500	0,55
8	0	+1	0,8	0,7	0,350	540	0,67
9	0	0	0,8	0,6	0,313	560	0,69

С уменьшением содержания редуцирующих веществ в обработанных опилках прочность опилкобетона закономерно увеличивается (рис. 4). При этом оптимальные значения отношения по массе субстрата животного происхождения и опилок (по сухой навеске) и отношения массы воды затворения к суммарной массе сухого древесного заполнителя и субстрата животного происхождения составляют соответственно Н/О = 0,8

и $V/M = 0,7$, а это оптимальные параметры данного процесса твердофазной биоферментации.

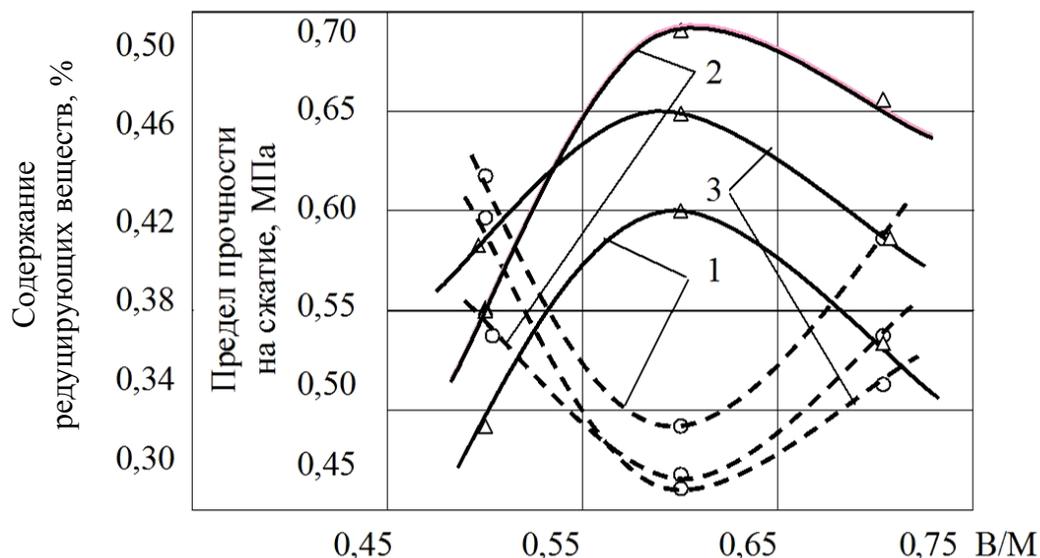


Рис. 4. Содержание редуцирующих веществ в обработанных опилках (пунктир) и предел прочности на сжатие (сплошная линия) в зависимости от отношения массы воды затворения к суммарной массе сухого древесного заполнителя и субстрата животного происхождения V/M при разном отношении по массе навоза и опилок: 1 – $H/O = 0,6$; 2 – $H/O = 0,8$; 3 – $H/O = 1,0$

Подобранный состав теплоизоляционно-конструкционного опилкобетона характеризуется высокими физико-механическими свойствами, соответствующими требованиям ГОСТ 19222 к теплоизоляционно-конструкционному арболиту. Марка по прочности этого состава – М25, а класс по прочности на сжатие – В2. В то же время сравнительно высокий расход цемента на 1 м^3 бетона (394 кг) обуславливает недостаточную экономическую эффективность такого материала. В связи с этим в данной работе была проведена оптимизация состава теплоизоляционно-конструкционного опилкобетона путем введения в него мелкого заполнителя – песка, который способен заменить часть цемента и создать жесткий каркас, повышающий упругие свойства материала, необходимые для осуществления конструкционной функции.

Исследователи поставили планированный двухфакторный эксперимент и получили зависимости насыпной плотности сухой опилкобетонной смеси от относительного содержания в смеси цемента, песка и опилок, с помощью которых по критерию максимальной плотности упаковки составляющих определили области возможных оптимальных составов. План и основные результаты эксперимента приведены в табл. 4 (X_1 – относительное содержание цемента в сухой смеси цемента, песка и опилок в кодированном виде; X_2 – относительное содержание песка в сухой смеси цемента, песка и опилок в кодированном виде). Диаграмма линий равного уровня насыпной плотности, построенная по полученной математической модели зависимости насыпной плотности сухой смеси от ее состава и представленная на рис. 5, позволяет обосновать оптимальное

соотношение между цементом и песком в сырьевой смеси (1 : 1), соответствующее ее максимальной насыпной плотности в сухом состоянии.

Таблица 4

План эксперимента и данные о зависимости насыпной плотности сухой опилкобетонной смеси от ее состава

№ п/п	План		Относительное содержание в смеси, %			Насыпная плотность сухой смеси, кг/м ³
	X ₁	X ₂	цемента	песка	сухих опилок	
1	-1	-1	35	35	30	423
2	+1	-1	45	35	20	565
3	-1	+1	35	45	20	570
4	+1	+1	45	45	10	868
5	-1	0	35	40	25	483
6	+1	0	45	40	15	695
7	0	-1	40	35	25	493
8	0	+1	40	45	15	703
9	0	0	40	40	20	580

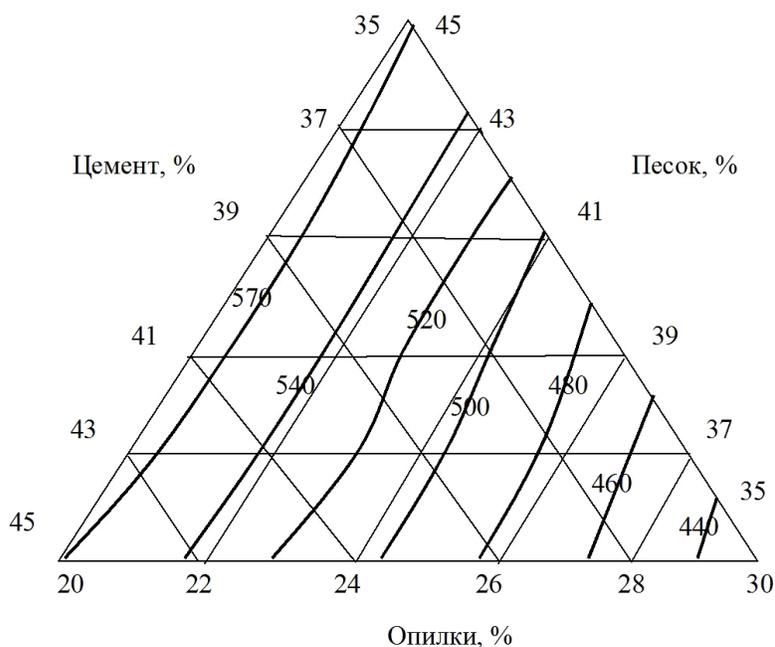


Рис. 5. Диаграмма линий равного уровня насыпной плотности смесей в сухом состоянии в зависимости от их состава

На следующем этапе оптимизации был поставлен планированный двухфакторный эксперимент по подбору состава теплоизоляционно-конструкционного опилкобетона. План эксперимента и результаты определения физико-механических свойств опилкобетона приведены в табл. 5 (X₁ – соотношение по массе биологически

обработанных опилок в пересчете на сухое вещество и смеси песка и цемента ($O/(П + Ц)$) в кодированном виде; X_2 – то же, песка и цемента ($П/Ц$)).

Были получены зависимости средней плотности, предела прочности на сжатие в возрасте 7 сут, коэффициента конструктивного качества и морозостойкости опилкобетона от отношения по массе биологически обработанных опилок к смеси песка и цемента при разных значениях отношения расходов песка и цемента (рис. 6), которые позволили обосновать оптимальный состав теплоизоляционно-конструкционного опилкобетона.

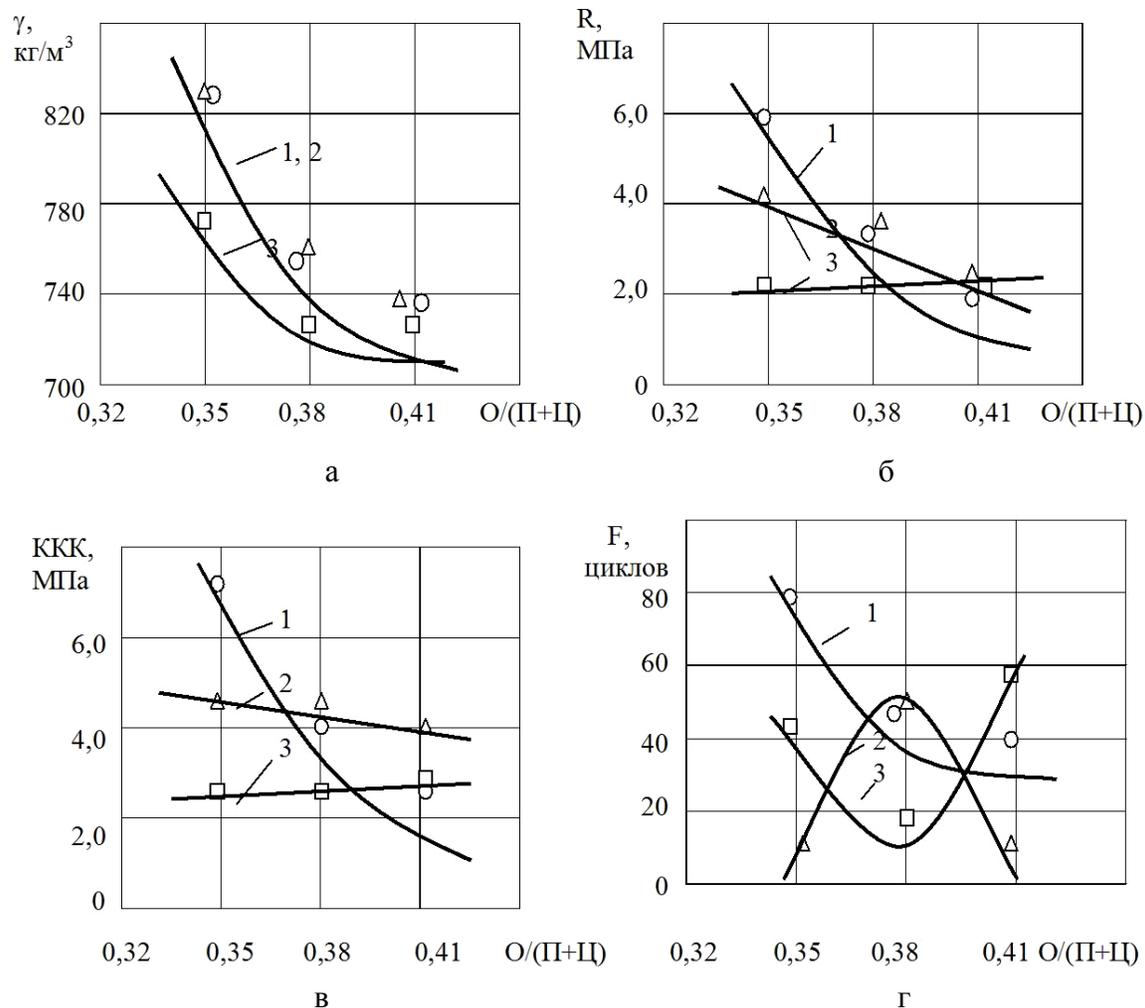


Рис. 6. Зависимости средней плотности γ (а); предела прочности на сжатие R (б); коэффициента конструктивного качества ККК (в) и морозостойкости F (г) опилкобетона от отношения по массе биологически обработанных опилок в пересчете на сухое вещество к смеси песка и цемента $O/(П + Ц)$ при разных значениях отношения расходов песка и цемента $П/Ц$: 1 – $П/Ц = 0,8$; 2 – $П/Ц = 1,0$; 3 – $П/Ц = 1,2$

Таблица 5

План эксперимента и данные о зависимости свойств
теплоизоляционно-конструкционного опилкобетона смеси от его состава

№ п/п	План		Значения факторов состава		Плотность в сухом состоянии, кг/м ³	Предел прочности на сжатие, МПа	Водо- погло- щение, %	Моро- зостой- кость, циклов
	X ₁	X ₂	O/(П + Ц)	П/Ц				
1	-1	-1	0,35	0,8	765	6,0	47,7	77
2	+1	-1	0,41	0,8	676	2,2	48,6	90,5
3	-1	+1	0,35	1,2	714	2,2	65,3	56,5
4	+1	+1	0,41	1,2	690	2,6	53,8	77
5	-1	0	0,35	1,0	741	4,1	51,8	13,8
6	+1	0	0,41	1,0	666	3,0	52,3	13
7	0	-1	0,38	0,8	685	3,4	59,2	49,4
8	0	+1	0,38	1,2	676	2,2	65,0	13
9	0	0	0,38	1,0	704	3,6	49,2	51,8

Оптимальный состав теплоизоляционно-конструкционного опилкобетона характеризуется факторами состава $O/(П + Ц) = 0,37$, $П/Ц = 1,0$, а также показателями основных физико-механических свойств: плотностью в сухом состоянии около 770 кг/м^3 ; пределом прочности на сжатие около $3,6 \text{ МПа}$; морозостойкостью более 50 циклов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исследований по данной теме была установлена возможность улучшения древесного заполнителя путем его биоферментации с помощью микроорганизмов, содержащихся в субстрате животного происхождения – отходе животноводства. Биоферментация древесного сырья микроорганизмами, обладающими высокой целлюлозолитической активностью, дает возможность получать продукты со сниженным (по сравнению с исходным сырьем) содержанием углеводов. Данная обработка древесного сырья позволила получить строительные материалы, удовлетворяющие требованиям стандарта, даже на основе таких распространенных отходов деревообработки, как опилки. Биоремедиация опилок по разработанному способу в два раза и более снижает содержание в них сахаров, а это способствует получению образцов опилкобетона с плотностью, соответствующей плотности легких бетонов, и с достаточной прочностью на сжатие.

Уточненные математические модели зависимостей типа «состав – свойства» биокомпозита позволили оптимизировать его состав и получить требуемые строительно-технические показатели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов В.В., Миронов В.А., Сухарев Ю.В. Биологически активный опилкобетон для сельскохозяйственного строительства // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика*. 2011. № 9. С. 76–82.
2. Белов В.В., Сухарев Ю.В. Использование биологически активированного опилкобетона для утепления эффективной металлодеревянной панели // *Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение*. 2006. № 3. С. 102–106.

3. Миронов В.А., Белов В.В., Сухарев Ю.В. Биологически активированный опилкобетон для утепления эффективной металлодеревянной панели // *Вестник центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук*. 2007. № 6. С. 112–120.
4. Патент РФ 2230049 С2. *Способ получения древесно-цементной композиции* / Миронов В.А., Белов В.В., Сухарев Ю.В.; Заявл. 05.08.2002. Опубл. 10.06.2004.
5. Миронов В.А., Белов В.В., Сухарев Ю.В. Актуальные вопросы биотехнологии в строительстве // *Строительство и архитектура: Сборник научных трудов инженерно-строительного факультета*. Тверь: ТГТУ. 2001. С. 173–175.
6. Белов В.В. Биокompозиты строительного назначения с использованием отходов деревообработки. Часть 1 (обзор) // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 1 (17). С. 14–26.
7. Белов В.В. Биокompозиты строительного назначения с использованием отходов деревообработки. Часть 2 (экспериментальные исследования биоферментации древесного заполнителя) // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 2 (18). С. 5–12.
8. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительного-технологических задач на ЭВМ. Киев: Выща школа. 1989. 324 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В. Биокompозиты строительного назначения с использованием отходов деревообработки. Часть 3 (подбор составов биологически активированного опилкобетона) // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 3 (19). С. 19–33.

CONSTRUCTION BIOCOMPOSITES USING WOODWORKING WASTE. PART 3 (SELECTION OF BIOLOGICALLY ACTIVATED SAWDUST CONCRETE COMPOSITIONS)

V.V. Belov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Ways of woodworking waste application, prospects of their use as aggregate for lightweight concrete and other building materials have been studied. Using mathematical models low-energy-intensive compositions of sawdust concrete have been developed. It is noted that it is achieved the reduction of cement consumption up to 30 %, reduction of material

intensity of building constructions, energy costs for their production and reduction of production cost of composites on the basis of woodworking waste in comparison with similar materials by 30–35 %. It is indicated that in the process of using woodworking waste as the main raw material an additional energy-saving and ecological effect is formed. It is emphasised that due to the effective use of raw materials it is expected to reduce the cost of production by 18–20 %.

Keywords: woodworking wastes, sawdust concrete, wood aggregate, compositions, properties.

REFERENCES

1. Belov V.V., Mironov V.A., Sukharev Yu.V. Biologically active sawdust concrete for agricultural construction. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika*. 2011. No. 9, pp. 76–82. (In Russian).
2. Belov V.V., Sukharev Yu.V. The use of biologically activated sawdust concrete for the insulation of an effective metal-wood panel. *Izvestiya OryolGTU. Mashinostroenie. Priborostroenie*. 2006. No. 3, pp. 102–106. (In Russian).
3. Mironov V.A., Belov V.V., Sukharev Yu.V. Biologically activated sawdust concrete for insulating an efficient metal-wood panel. *Vestnik central'nogo regional'nogo otdeleniya Rossijskoj akademii arhitektury i stroitel'nyh nauk*. 2007. No. 6, pp. 112–120. (In Russian).
4. Patent RF 2230049 C2. *Sposob polucheniya drevesno-cementnoj kompozicii* [Method for producing wood-cement composition]. Mironov V.A., Belov V.V., Sukharev Yu.V. Declared 05.08.2002. Published 10.06.2004. (In Russian).
5. Mironov V.A., Belov V.V., Sukharev Yu.V. Topical issues of biotechnology in construction. *Construction and architecture: Collection of scientific works of the Faculty of Civil Engineering*. Tver: TSTU. 2001, pp. 173–175. (In Russian).
6. Belov V.V. Biocomposites for construction purposes using waste wood processing. Part 1 (overview). *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2023. No. 1 (17), pp. 14–26. (In Russian).
7. Belov V.V. Construction biocomposites using woodworking waste. Part 2 (experimental studies biofermentation of wood aggregate). *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2023. No. 2 (18), pp. 5–12. (In Russian).
8. Voznesensky V.A., Lyashenko T.V., Ogarkov B.L. *Chislennye metody resheniya stroitel'no-tekhnologicheskikh zadach na EVM* [Numerical methods for solving construction and technological problems on a computer]. Kiev: Vyshcha shkola. 1989. 324 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V. Construction biocomposites using woodworking waste. Part 3 (selection of biologically activated sawdust concrete compositions) // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 3 (19), pp. 19–33.

УДК 691.32**МАТЕРИАЛ ДЛЯ РЕСТАВРАЦИОННЫХ РАБОТ
НА ОСНОВЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО ГИПСА
С ПОЛЫМИ СТЕКЛЯННЫМИ МИКРОСФЕРАМИ**

А.Ф. Бурьянов, Е.В. Ткач, Д.В. Стибунов

Московский государственный строительный университет (г. Москва)

© Бурьянов А.Ф., Ткач Е.В.,
Стибунов Д.В., 2023

Аннотация. В результате проведенных научных исследований установлено, что совместное введение в высокопрочный гипс полых стеклянных микросфер (ПСМС), гидрофобно-пластифицирующей добавки (суперпластификатора (СП) Peramin SMF-10 + гидрофобизатора (ГФ) Vinnapas 8031 Н) и метаксаолина приводит к возникновению синергетического эффекта. Полученный эффект проявляется в интенсивности процесса образования кристаллогидратов более крупных размеров, обеспечивающих уплотнение и упрочнение структуры матрицы гипсового камня пониженной средней плотности с улучшенными эксплуатационными свойствами композиционного материала по прочности при сжатии и изгибе, водостойкости, сорбционной влажности и водопоглощению. С помощью методов электронной микроскопии, рентгенофазового анализа и химического анализа выявлено совместное влияние ПСМС, гидрофобно-пластифицирующей добавки (СП + ГФ) и метаксаолина на процесс формирования в стесненных условиях плотной дендритоподобной структуры гипсового камня, образующейся из перекрещивающихся в разных плоскостях закономерных сростков кристаллов гипса, которые формируют более прочную контактную зону между микросферой и гипсовым камнем.

Ключевые слова: высокопрочный гипс, полые стеклянные микросферы, суперпластификатор, гидрофобизатор, синергетический эффект.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-3-33-43

ВВЕДЕНИЕ

Создание архитектурных элементов внутри исторических зданий производится с применением гипсовых материалов. В настоящее время многим памятникам архитектуры требуются реставрационные работы, при которых возникают проблемы, связанные с восстановлением деталей, штукатурки и лепнины [1–3]. Таким образом, гипс должен обеспечить высокое качество работ, долговечность при эксплуатации, экологическую безопасность для человека и окружающей среды, снижение средней плотности и