

УДК 691.12

DOI 10.52928/2070-1683-2024-39-4-63-73

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА СТЕНОВЫХ БЛОКОВ ИЗ ПШЕНИЧНОЙ СОЛОМЫ

А.Н. ЯГУБКИН, канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

В статье впервые в Республике Беларусь приводятся результаты исследований химических добавок, влияющих на физико-механические свойства блоков из пшеничной соломы. Предметом исследования являются физико-механические свойства цементной составляющей и стеновых блоков из пшеничной соломы. На основании проведенного эксперимента, выполненного анализа его результатов предложены и запатентованы составы для изготовления конструкционно-теплоизоляционных блоков из пшеничной соломы. Конструкционно-теплоизоляционные блоки на данных составах рекомендуется применять при кладке стен одно- и двухэтажных зданий. Результаты исследования могут использоваться для подбора составов при производстве строительных материалов и изделий из растительного сырья, в учебном процессе строительных специальностей ВУЗов.

Ключевые слова: растительное сырье, пшеничная солома, химическая добавка, сроки схватывания цементного теста, нормальная густота цементного теста, давление формования, стеновой материал, средняя плотность, коэффициент теплопроводности, прочность при сжатии.

Введение. Применение растительного сырья для производства строительных материалов и изделий известно давно. Один из первых патентов машины для прессования растительного сырья, встречающихся в патентной базе США, относится к 1841 году¹. В 1856 году запатентована машина для производства кирпича, которая могла прессовать глину с соломой, гравием, камнями². Материалы и изделия из соломы не утратили своей актуальности сегодня. Так, в северном Китае существует государственная программа строительства жилых домов из соломы [1]. Хорошие результаты по устойчивости показывают соломенные дома в сейсмоопасных районах Казахстана [2]. Научные исследования этих материалов проводятся в Республике Беларусь, Российской Федерации, Португалии, Венгрии, Бразилии [3–8].

Основными недостатками строительных материалов и изделий из прессованной соломы являются низкая атмосферостойкость и недолговечность. Устранить приведенные выше недостатки возможно с помощью цементного вяжущего. Однако при производстве необходимо снизить негативное влияние растительного сырья на процессы набора прочности цементным вяжущим. Большинство авторов отмечает, что на прочность материала отрицательно влияют вещества, содержащиеся в растительном сырье: гемицеллюлоза, крахмал и экстрактивные вещества (сахароза, глюкоза, фруктоза, таниды, органические кислоты, минеральные соли) [3; 7; 8].

Рассмотрим особенности формирования структуры строительного материала на основе растительного сырья по сравнению с обычными бетонами.

Первая особенность – достаточно высокое водоцементное отношение (0,8–1,1). Это связано с тем, что органическое сырье гигроскопично. Более половины воды затворения впитывается стенками клеток, насыщает волокна, заполняет поры и капилляры [9–12]. Насыщение растительного материала водой происходит в течение нескольких часов. Одновременно происходят процессы гидратации в цементном тесте. Наступает момент, когда цементу становится недостаточно воды затворения. Поэтому цемент начинает вытягивать воду из органического материала. Однако находясь в стенках клеток, волокнах, порах и капиллярах, вода вымывает из них экстрактивные вещества. Данные соединения, попадая в цемент до начала схватывания, замедляют процессы набора прочности (сроки схватывания увеличиваются до 3–4 суток, набор прочности – до 3–4 месяцев), ухудшают сцепление цементного камня с растительным материалом, т.к. создают пленки на поверхности алита, алюминатов и изолируют частицы цемента от воды [9–13]. Интенсивность поступления вместе с водой экстрактивных веществ снижается к моменту начала схватывания и останавливается к концу схватывания цемента. Большинство исследователей считает, что основным самым эффективным способом нейтрализации экстрактивных веществ является использование химических добавок [10–13]. Если за счет введения химической добавки ускорить процессы схватывания и твердения цемента, то экстрактивные вещества не смогут существенно повлиять на набор прочности цементного камня [12–14]. Для этих целей применяют ускорители твердения и добавки-пластификаторы, которые ускоряют твердение за счет снижения водоцементного отношения [10–16].

Вторая особенность – прессование смеси при формовке и выдержка в форме для предотвращения разуплотнения материала. Для этого необходимо подобрать величину пригруза, обеспечивающего получение нужной плотности, а также использовать формы с фиксирующими крышками. В этом случае также важны сроки схватывания и скорость набора прочности, а значит необходимо и использование химических добавок.

Исходя из вышесказанного, выбор вида, расхода химической добавки и определение ее влияния на свойства цементной составляющей в стеновых блоках из пшеничной соломы, а также подбор величины пригруза для формирования прочной структуры строительного материала являются актуальными задачами.

¹ US 0002026 A 1841. – Mode of access: <http://surl.li/orkdte>. – Date of access: 19.11.2024.

² US 0015329 A 1856. – Mode of access: <http://surl.li/evrlnw>. – Date of access: 19.11.2024.

В статье впервые в Республике Беларусь приводятся результаты исследований химических добавок, влияющих на физико-механические свойства стеновых блоков из пшеничной соломы^{3,4}.

Объект исследования – стеновые блоки из пшеничной соломы. Предмет исследования – физико-механические свойства стеновых блоков из пшеничной соломы.

Практическая значимость – результаты исследования могут использоваться для подбора составов при производстве строительных материалов и изделий из растительного сырья, в учебном процессе строительных специальностей ВУЗов.

Материалы и методы исследований. Для выполнения исследований использовали портландцемент марки 42,5Н ГОСТ 30108-2020, ПЦ500Д0 (производства ОАО «Белорусский цементный завод», г. Костюковичи, Республика Беларусь). Применяли следующие химические добавки: гиперпластификатор «Frem S-SB» на основе поликарбоксилата, суперпластификатор «Frem C-3 В» (производства ЗАО «Завод добавок и смазок «ФРЭЙМ», Республика Беларусь); ускоритель твердения – сульфат алюминия (производства ООО «Ксант-Инвест», Республика Беларусь); а также комплексную добавку, содержащую суперпластификатор «Frem C-3 В» и ускоритель твердения – сульфат алюминия. В качестве растительного структурообразующего материала исследовали резанную пшеничную солому (д. Черноручье-1, Республика Беларусь) в форме трубок различной фракции длиной от 10 до 50 мм, которую получали на барабанной соломорезке типа РСБ 0,1 (Российская Федерация). Цементное тесто и бетонную смесь затворяли водопроводной водой по СТБ 1114⁵.

Для подбора расхода химических добавок определяли нормальную густоту, сроки схватывания цементного теста по ГОСТ 310.3⁶ и прочность на сжатие цементного камня (ГОСТ 10180⁷). Для взвешивания химических добавок использовались весы лабораторные марки ВК-300 (Российская Федерация), для цемента и воды применялись весы лабораторные марки ВК-600 (Российская Федерация). Образец-кубик с размером ребра 20 мм изготавливали в формах 6ФК-20 ГОСТ 22685⁸. У цементного теста без добавок показатель нормальной густоты (НГЦТ) составил 32,5%, время начала схватывания равнялось 270 минут, конец схватывания наступил через 330 минут. Размеры образцов для расчета средней плотности и прочности на сжатие измеряли штангенциркулем цифровым ШЦЦ-I (Российская Федерация). Массу образцов для расчета средней плотности определяли на весах ВК-300. Значения прочности при сжатии образцов-кубиков получали на гидравлическом прессе ПГМ-500 МГ4А (Российская Федерация).

Для взвешивания химических добавок, цемента, воды, соломы при изготовлении бетонных образцов использовали весы марки МТ 15 В1ЖА (Российская Федерация). Давление формования во время подбора расхода структурообразующего материала и изготовления бетонных образцов-кубов с размером ребра 150 мм измеряли гидравлическим прессом П-125 (Российская Федерация) и ПГМ-500 МГ4А.

Размеры бетонных образцов для расчета средней плотности, коэффициента теплопроводности и прочности на сжатие измеряли штангенциркулем цифровым ШЦЦ-I. Массу бетонных образцов для расчета средней плотности, коэффициента теплопроводности определяли на МТ 15 В1ЖА.

Прочность при сжатии бетонных образцов исследовали на образцах-кубах с размером ребра 150 мм (ГОСТ 10180⁹) гидравлическим прессом ПГМ-500 МГ4А. Среднюю плотность образцов-кубов определяли по ГОСТ 12730.1¹⁰. Коэффициент теплопроводности изучали прибором ИТП-МГ4 «250» (Российская Федерация) в соответствии с СТБ 1618¹¹. Для этого предварительно образцы размером 250×250×40 мм высушивались до постоянной массы в сушильном шкафу SNOI 60/300 (Литва).

Ограничения исследования. Погрешности приборов: весы ВК-300 – ±0,015 г, весы ВК-600 – ±0,1 г, весы МТ 15 В1ЖА – ±2 г, штангенциркуль цифровой ШЦЦ-I – ±0,03 мм, гидравлический пресс П-125 – ±2%, гидравлический пресс ПГМ-500 МГ4А – ±1%, прибор для определения теплопроводности ИТП-МГ4 «250» – ±5%, стабильность температуры в установившемся тепловом режиме для сушильного шкафа SNOI 60/300 – ±1 °С. Статистические показатели: при испытаниях образцов из цементного камня коэффициент вариации – 10% (средняя плотность и прочность на сжатие); при испытаниях образцов из бетона коэффициент вариации – 10% (средняя плотность); коэффициент вариации – 15% (прочность на сжатие).

³ ТУ ВУ 300220696.063-2023. Блоки строительные конструкционно-теплоизоляционные на растительном заполнителе. Технические условия. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2023. – 11 с.

⁴ Евразийский патент № 047578. Строительный конструкционно-теплоизоляционный материал: опубл. 08.08.2024. – М.: Евраз. патент. орг., 2024. – 3 с.

⁵ СТБ 1114-98. Вода для бетонов и растворов. Технические условия. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь; Стройтехнорм, 1998. – 20 с.

⁶ ГОСТ 310.3-76. Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема. – М.: Стройиздат; М-во пром-сти строит. материалов СССР, 1977. – 9 с.

⁷ ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: НИИЖБ, 2012. – 36 с.

⁸ ГОСТ 22685-89. Формы для изготовления контрольных образцов бетона. Технические условия. – Введ. 01.01.1990. – М.: Стройиздат; М-во пром. строит. материалов СССР, 1990. – 11 с.

⁹ См. сноску 7.

¹⁰ ГОСТ 12730.1-78. Бетоны. Методы определения плотности. – М.: Изд-во стандартов СССР, 1980. – 5 с.

¹¹ СТБ 1618-2006. Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь; Стройтехнорм, 2006. – 12 с.

Основная часть. Целью исследований являлось определение влияния химических добавок на физико-механические свойства конструкционно-теплоизоляционного материала из пшеничной соломы, подбор составов и величины давления формования для изготовления стеновых блоков.

На первом этапе определяли влияние химических добавок на схватывание цементного теста нормальной густоты и прочность цементного камня. Граничные значения расходов добавок приняты на основании требований ГОСТ 30459¹² и рекомендаций производителей. Расходы комплексной добавки приняты на основании исследований [17–19].

Основная цель введения химических добавок – снизить влияние растительного сырья на сроки схватывания и твердения цемента, ускорить набор прочности для максимально быстрой распалубки образцов. В качестве критерия эффективности химических добавок по СТБ 1112 принимался критерий: повышение прочности бетона на 20% и более в возрасте 1 суток нормального твердения и на 30% и более в возрасте 2 суток¹³.

Составы для изготовления образцов на цементном тесте приведены в таблице 1. Влияние расхода химических добавок на схватывание цементного теста приведено в таблице 2 и на рисунке 1. Влияние расхода химических добавок на прочность цементного камня показано в таблице 3 и на рисунке 2.

Таблица 1. – Составы цементного теста с химическими добавками

Шифр состава	Расход цемента, г	Расход воды, мл	Вид химической добавки	Расход добавки, % от массы цемента
1.1	400	130	-	-
1.2	400	111	Frem S-SB	1,1
1.3	400	104	Frem S-SB	1,3
1.4	400	98	Frem S-SB	1,5
1.5	400	130	Al ₂ (SO ₄) ₃	2,0
1.6	400	130	Al ₂ (SO ₄) ₃	3,0
1.7	400	130	Al ₂ (SO ₄) ₃	4,0
1.8	400	112	Frem C-3 B	0,5
1.9	400	104	Frem C-3 B	0,7
1.10	400	104	Frem C-3 B	1,0
1.11	400	111	Frem C-3 B, Al ₂ (SO ₄) ₃	0,7 0,3
1.12	400	100	Frem C-3 B, Al ₂ (SO ₄) ₃	0,7 0,5
1.13	400	99	Frem C-3 B, Al ₂ (SO ₄) ₃	0,7 0,7

Таблица 2. – Влияние расхода химических добавок на схватывание цементного теста

Шифр состава	НГЦТ, %	Сроки схватывания цементного теста		Снижение времени схватывания относительно бездобавочного состава	
		Начало схватывания, мин	Конец схватывания, мин	Начало схватывания, %	Конец схватывания, %
1.1	32,5	270	330	-	-
1.2	27,6	40	240	85,2	27,3
1.3	26,1	30	210	88,9	36,4
1.4	24,4	20	180	92,6	45,5
1.5	32,5	50	190	81,5	42,4
1.6	32,5	40	180	85,2	45,5
1.7	32,5	30	60	88,9	81,9
1.8	28,0	50	290	81,5	12,1
1.9	26,0	40	250	85,2	24,2
1.10	26,0	40	250	85,2	24,2
1.11	27,6	40	245	85,2	25,8
1.12	25,0	20	180	92,6	45,5
1.13	24,8	20	180	92,6	45,5

¹² ГОСТ 30459-96. Добавки для бетонов. Методы определения эффективности. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь; НИИЖБ РФ, 1998. – 40 с.

¹³ СТБ 1112-98. Добавки для бетонов. Общие технические условия. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь; Стройтехнорм, 1999. – 23 с.

Таблица 3. – Влияние расхода химических добавок на прочность цементного камня

Шифр состава	Прочность на сжатие, МПа		Прирост прочности относительно бездобавочного состава, %		Выполнение критерия эффективности ускорителя твердения ¹⁴	
	1 сутки	2 сутки	1 сутки	2 сутки	1 сутки	2 сутки
1.1	2,30	7,00	-	-	-	-
1.2	2,35	7,25	2,2	3,6	Нет	Нет
1.3	2,51	8,11	9,1	15,9	Нет	Нет
1.4	3,25	9,12	41,3	30,3	Да	Да
1.5	2,31	7,12	0,4	1,7	Нет	Нет
1.6	2,85	8,25	23,9	17,9	Да	Нет
1.7	1,00	4,25	-56,5	-39,3	Нет	Нет
1.8	2,41	7,45	4,7	6,4	Нет	Нет
1.9	2,60	7,47	13,0	6,4	Нет	Нет
1.10	2,69	7,50	17,0	7,1	Нет	Нет
1.11	2,61	7,65	13,5	9,3	Нет	Нет
1.12	3,19	9,10	38,7	30,0	Да	Да
1.13	3,21	9,11	39,6	30,1	Да	Да

Примечание. Сравнение изменения средних величин прочности на сжатие для составов 1.12 и 1.13 показывает, что изменение статистически не значимо [20] (число степеней свободы $f=6$, уровень значимости $p=0,05$, двусторонний критерий $t_{0,975}=2,23$, для испытаний через одни сутки ошибка воспроизводимости $s=0,31$, нулевая гипотеза принимается $0,02 < 0,40$; через двое суток $s=0,34$, нулевая гипотеза принимается $0,01 < 0,44$).

Как видно из таблицы 3, критерию эффективности соответствуют гиперпластификатор «Frem S-SB» (состав 1.4) и комплексная добавка суперпластификатора и ускорителя твердения (состав 1.12, 1.13).

Прочность цементного камня при введении гиперпластификатора с ускоряющим эффектом в количестве 1,1% от массы цемента (состав 1.2) практически не изменяется по сравнению с бездобавочным составом 1.1 (в первые сутки твердения увеличивается на 2,2%, во вторые – на 3,6%). Время начала схватывания при этом снижается на 85,2%, конца схватывания – на 27,3%. Концентрация добавки 1,3% (состав 1.3) приводит к росту прочности в 1 сутки на 9,1%, во вторые – на 15,9%. Сроки схватывания сокращаются на 88,9% и 36,4% соответственно. При введении добавки в количестве 1,5% (состав 1.4) в 1 сутки твердения прочность повышается на 41,3%, во 2 сутки – на 30,3%. Начало схватывания уменьшается на 92,6%, конец схватывания – на 45,5%.

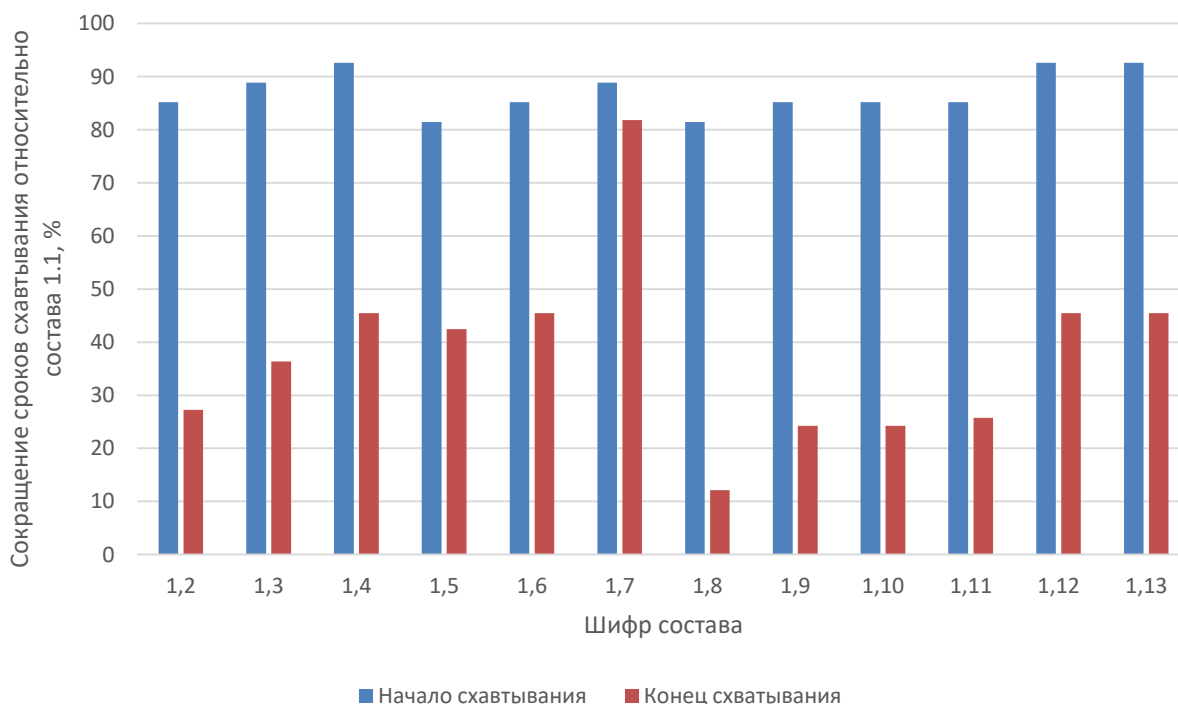


Рисунок 1. – Изменение сроков схватывания относительно бездобавочного состава

¹⁴ См. сноску 13.

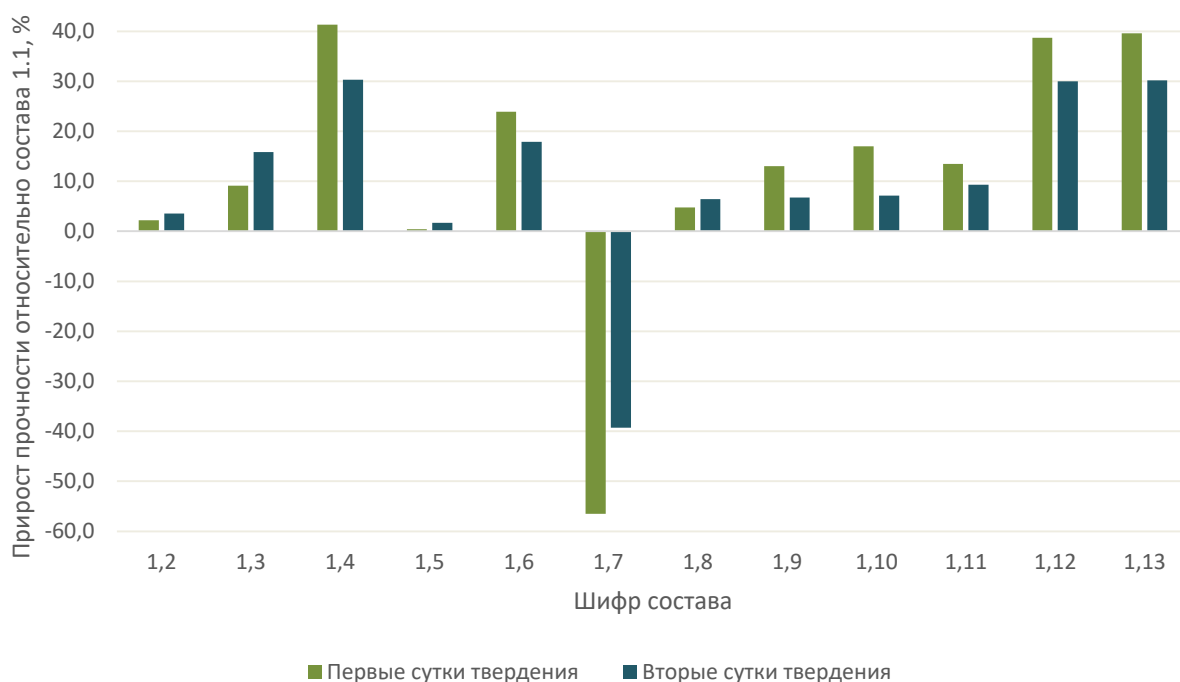


Рисунок 2. – Прирост прочности на сжатие относительно бездобавочного состава

Применение ускорителя твердения – сернокислого алюминия при дозировке 2% от массы цемента (состав 1.5) не выявило увеличения прочности за 1 сутки твердения (прирост 0,4%), за вторые сутки твердения – прирост 1,7%. Сроки схватывания снизились на 81,5% и 42,4% соответственно. Дозировка добавки 3% (состав 1.6) позволяет увеличить прочность в 1 сутки твердения на 23,9%, во 2 сутки – на 17,9%. Начало схватывания снижается на 85,2%, конец схватывания – на 45,5%. При дозировке 4% от массы цемента (состав 1.7) наблюдается значительное снижение прочности в 1 и 2 сутки твердения – на 56,5% и 39,3% соответственно. Также наблюдается значительное уменьшение времени конца схватывания – на 81,9%, начало схватывания сократилось на 88,9%.

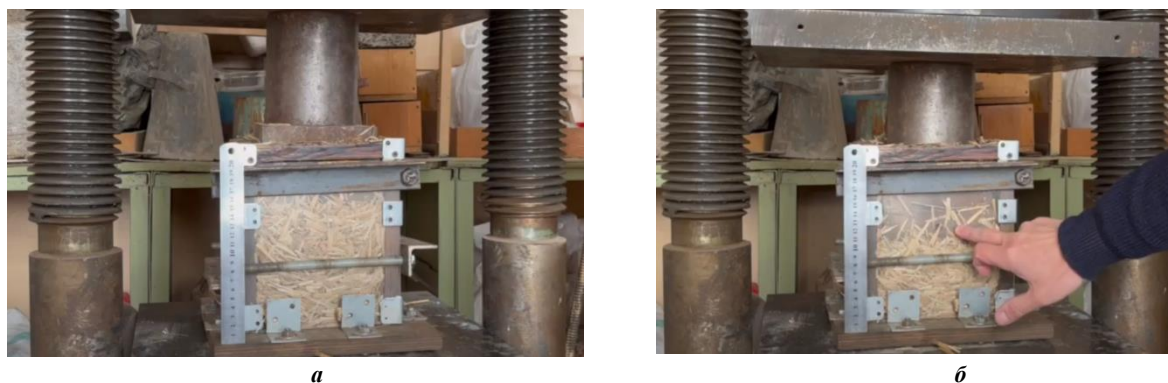
При введении 0,5% от массы цемента суперпластификатора «Frem C-3 В» (состав 1.8) за 1 и 2 сутки твердения прочность повышается незначительно (на 4,7% и 6,4% соответственно). Начало схватывания понижается на 81,5%, конец схватывания – на 12,1%. Для состава 1.9 с расходом суперпластификатора 0,7% прочность в 1 сутки твердения увеличивается на 13% по сравнению с бездобавочным составом, а во 2 сутки твердения остается на уровне состава 1.8 с расходом добавки 0,5%. Начало схватывания уменьшается на 85,2%, конец схватывания – на 24,2%. Дозировка 1% (состав 1.10) позволяет поднять прочность в 1 сутки на 17%, а после 2 суток – на 7,1%. Сроки схватывания не изменяются по сравнению с составом 1.9 (расход добавки 0,7%).

Показатели прочности для состава 1.13 статистически незначительно отличаются от показателей состава 1.12 (см. примечание к таблице 3), при этом состав 1.13 имеет больший расход ускорителя твердения.

Комплексная добавка (состав 1.11) увеличивает прочность в 1 сутки твердения на 13,5%, во 2 сутки – на 9,3%. Начало схватывания снижается на 85,2%, конец схватывания – на 25,8%. Для состава 1.12 увеличение прочности на сжатие составило 38,7% в первые сутки твердения и 30% во вторые сутки твердения по сравнению с бездобавочным составом. Сроки схватывания сокращаются на 92,6% и 45,5% соответственно. Для состава 1.13 прочность в 1 сутки повышается на 39,6%, во 2 сутки – на 30,1%. Сроки схватывания не изменяются по сравнению с составом 1.12.

На основании результатов проведенного эксперимента (см. таблицы 2, 3, рисунки 1, 2) и выполненного анализа его результатов в дальнейших исследованиях использовали добавку гиперпластификатора с ускоряющим эффектом в количестве 1,5% от массы цемента и комплексную добавку суперпластификатора и ускорителя твердения в количестве 0,7 и 0,5% от массы цемента соответственно (см. составы 1.4 и 1.12, таблица 1).

На втором этапе общий расход растительного структурообразующего материала принимали на основании проведенных экспериментов. Для этого одну из вертикальных граней формы размером 200×150×150 мм (высота×длина×ширина) заменяли оргстеклом толщиной 10 мм. Затем в форму загружали резанную фракционированную пшеничную солому (рисунок 3, а). Соотношение фракций определялось экспериментальным путем и соответствовало 50/50 [4]. Далее гидравлическим прессом П-125 осуществляли сжатие образца до размера вертикального ребра формы 150 мм (рисунок 3, б). Расход пшеничной соломы и давление формования подбирали таким образом, чтобы в производстве использовать гидравлический домкрат 1,5–2 т (при этом расход пшеничной соломы составил 180–225 кг на 1 м³ соответственно).



a – форма с соломой до испытаний; *б* – форма с соломой при фиксировании крышки на расстоянии 150 мм от нижней грани
Рисунок 3. – Определение расхода структурообразующего материала

Расход цемента принимался на основании данных из литературных источников [9–16, 17–19]. Водоцементное отношение подбиралось экспериментальным путем.

На третьем этапе изготавливали образцы-кубы с размером ребра 150 мм при различных расходах компонентов и определяли следующие характеристики: среднюю плотность, коэффициент теплопроводности, прочность на сжатие, давление формования, время выдержки образца в форме. Расход основных компонентов приведен в таблице 4. Результаты исследований приведены в таблице 5 и на рисунках 4, 5.

Таблица 4. – Составы образцов

Шифр состава	Расход цемента, кг на 1 м ³	Расход воды, кг на 1 м ³	Расход соломы, кг на 1 м ³	В/Ц	Вид добавки	Расход добавки, % от массы цемента
1.15	400	280	180	0,7	Frem S-SB	1,5
1.16	500	350	180	0,7	Frem S-SB	1,5
1.17	500	300	180	0,6	Frem S-SB	1,5
1.18	500	300	180	0,6	Frem C-3 B, Al ₂ (SO ₄) ₃	0,7 0,5
1.19	500	250	180	0,5	Frem S-SB	1,5
1.20	500	300	180	0,6	Frem S-SB	1,5
1.21	500	300	180	0,6	Frem C-3 B, Al ₂ (SO ₄) ₃	0,7 0,5
1.22	625	375	225	0,6	Frem S-SB	1,5
1.23	625	375	225	0,6	Frem S-SB	1,5
1.24	625	375	225	0,6	Frem C-3 B, Al ₂ (SO ₄) ₃	0,7 0,5

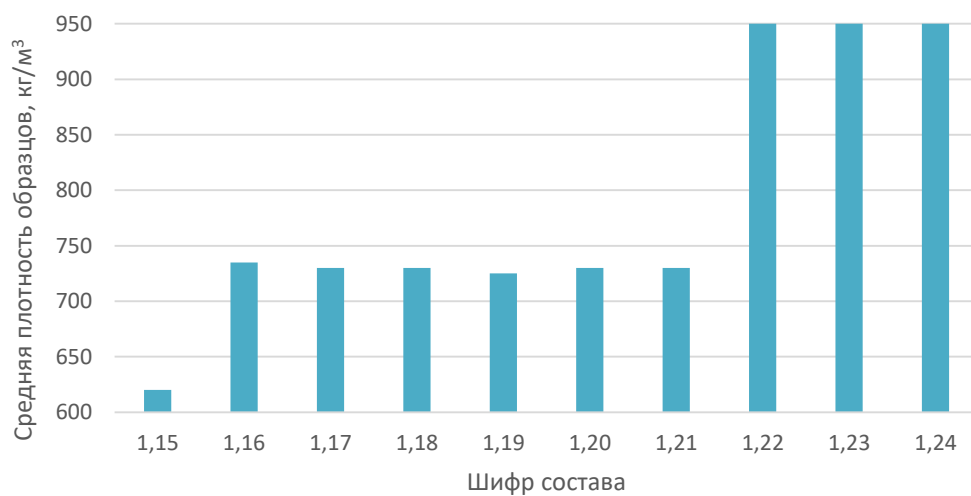
Таблица 5. – Основные физико-механические характеристики образцов

Шифр состава	Средняя плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности в абсолютно сухом состоянии, Вт/(м·°C)	Прочность на сжатие, МПа	Давление формования, МПа	Время выдержки образца в форме, ч	Состояние образца
1.15	620	0,081	1,0	0,8	48	Разуплотненная слабо связная структура, шелушение (см. рисунок 4, а)
1.16	735	0,091	1,1	1,2	48	Сформированная связная структура
1.17	730	0,089	1,5	1,2	48	Сформированная связная структура (см. рисунок 4, б)
1.18	730	0,089	1,2	1,2	48	Сформированная связная структура
1.19	725	0,089	1,0	1,2	48	Разуплотненная слабо связная, шелушение
1.20	730	0,089	1,0	1,2	24	Разрывы
1.21	730	0,089	1,0	1,2	24	Разуплотненная структура, разрывы (см. рисунок 4, в)
1.22	950	0,11	1,8	1,5	48	Разрывы
1.23	950	0,11	2,1	1,5	72	Сформированная связная структура (см. рисунок 4, г)
1.24	950	0,11	1,8	1,5	72	Сформированная связная структура



a – разуплотненная структура (состав 1.15); *б* – сформированная, связная структура (состав 1.17);
в – разуплотненная структура (состав 1.21); *г* – сформированная, связная структура (состав 1.23)

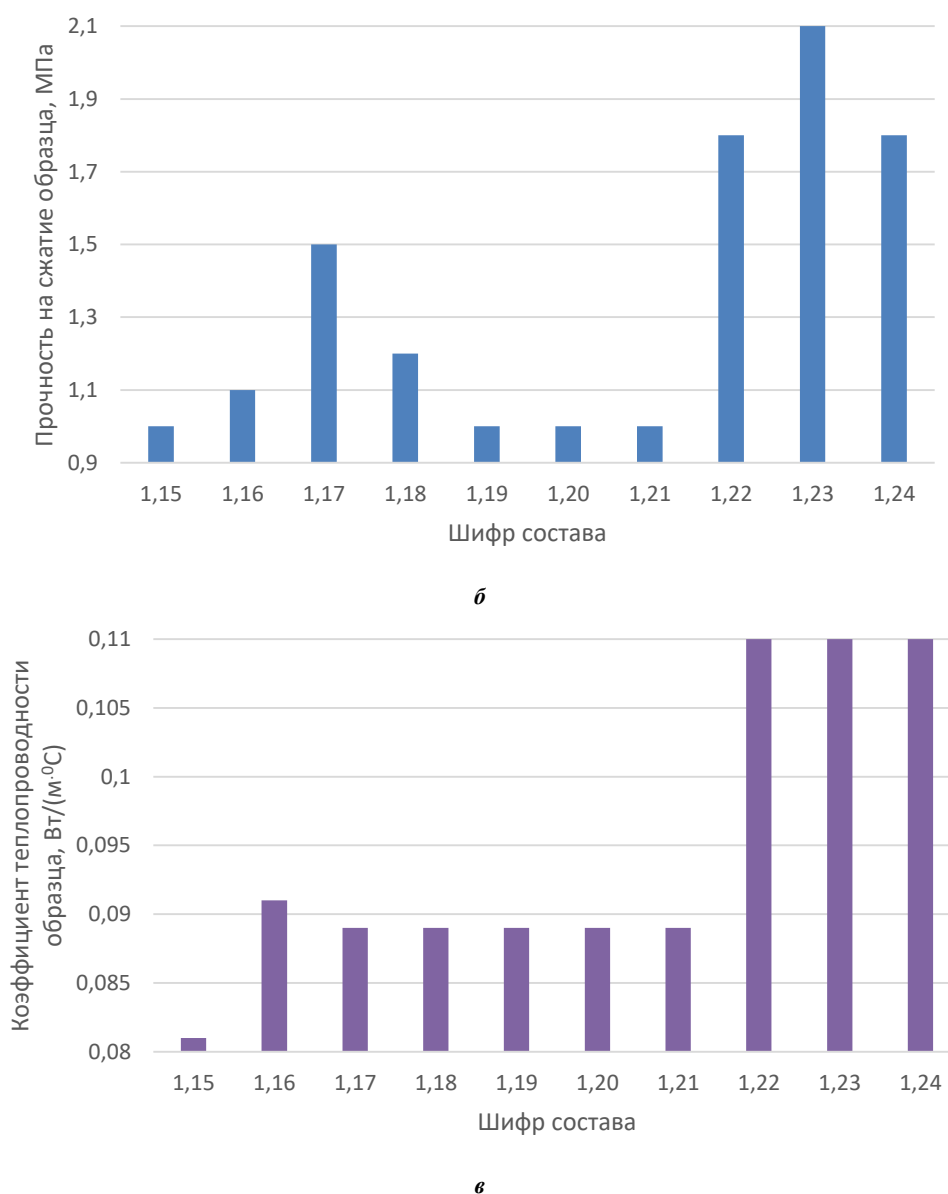
Рисунок 4. – Внешний вид образцов-кубов



a

a – средняя плотность образцов

Рисунок 5. – Влияние химических добавок на основные свойства образцов (начало)



б – прочность на сжатие образцов; **в** – коэффициент теплопроводности образцов

Рисунок 5. – Влияние химических добавок на основные свойства образцов (окончание)

Образцы состава 1.15 при средней плотности 620 кг/м^3 показали коэффициент теплопроводности $0,081 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$, прочность на сжатие 1 МПа, давление формования $0,8 \text{ МПа}$, время выдержки образца в форме 48 ч. Разуплотненная, слабо связанная структура и шелушение для этого состава объясняется недостаточным расходом цемента (см. рисунок 4, а).

Сформированная связанная структура образцов-кубов (см. составы 1.16–1.18, рисунок 4, б) обеспечена достаточным расходом цемента и выдержкой в форме в течение 48 часов. При этом состав 1.17 с добавкой гиперпластификатора (В/Ц=0,6) имеет прочность на 26% выше, чем аналогичный состав 1.16 с В/Ц=0,7. Образец (состав 1.18) с комплексной добавкой при В/Ц=0,6 имеет прочность на 20% ниже, чем аналогичный состав 1.17 с гиперпластификатором. Коэффициенты теплопроводности для составов 1.17–1.18 на 10% выше, чем для состава 1.15. Давление формования повышается с $0,8 \text{ МПа}$ (состав 1.15) до $1,2 \text{ МПа}$.

При снижении В/Ц с 0,6 (состав 1.17) до 0,5 происходит формирование слабо связанной структуры и наблюдается шелушение поверхности образцов (состав 1.19), что свидетельствует о недостаточном количестве воды затворения.

При сокращении выдержки в форме с 48 до 24 часов (составы 1.20–1.21) появляются горизонтальные разрывы в структуре образцов, что связано с саморазуплотнением структурообразующего материала (солемы) при низкой прочности цементного камня в первые сутки (см. рисунок 4, в). Результаты свидетельствуют о том, что 24 часа недостаточно для выдерживания образца в форме (для такого расхода компонентов и средней плотности материала).

Возрастание плотности кубов с 730 до 950 кг/м³ (состав 1.22) при выдержке в форме 48 часов также приводит к появлению разрывов в структуре образцов. Как показали исследования, при выдержке в форме 72 часа получаем образцы, обеспечивающие сформированную, связную структуру (см. составы 1.23–1.24, рисунок 4, з). Образцы состава 1.23 с добавкой гиперпластификатора при средней плотности 950 кг/м³ показали коэффициент теплопроводности 0,11 Вт/(м·°С), прочность на сжатие 2,1 МПа, давление формования 1,5 МПа. У образцов состава 1.24 с комплексной добавкой по сравнению с образцами состава 1.23 средняя плотность, коэффициент теплопроводности, давление формования не изменяются, а прочность на сжатие уменьшается на 15%.

Заключение. В статье с учетом особенностей формирования структуры строительного материала на основе растительного сырья по сравнению с обычными бетонами произведен выбор вида, расхода химических добавок и определение их влияния на физико-механические свойства конструкционно-теплоизоляционного материала из пшеничной соломы, подбор составов и величины давления формования для изготовления стеновых блоков.

На основании проведенного эксперимента и выполненного анализа его результатов для изготовления конструкционно-теплоизоляционных блоков приняты следующие расходы химических добавок: расход гиперпластификатора с ускоряющим эффектом – 1,5% от массы цемента, расход комплексной добавки суперпластификатора и ускорителя твердения – 0,7 и 0,5% от массы цемента соответственно.

Состав 1.17 с добавкой гиперпластификатора в количестве 1,5% от массы цемента при плотности 730 кг/м³ показывает коэффициент теплопроводности 0,089 Вт/(м·°С), прочность на сжатие равна 1,5 МПа. Время выдержки в форме 48 часов. Давление формования 1,2 МПа. Конструкционно-теплоизоляционные блоки на данном составе рекомендуется применять при кладке стен одноэтажных зданий.

При плотности 950 кг/м³ состав 1.23 с добавкой гиперпластификатора в количестве 1,5% от массы цемента имеет коэффициент теплопроводности равный 0,11 Вт/(м·°С), прочность на сжатие составляет 2,1 МПа. Время выдержки в форме 72 часа. Давление формования 1,5 МПа. Применение состава 1.23 для производства конструкционно-теплоизоляционных блоков позволит возводить двухэтажные здания с облегченными перекрытиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Straw bale construction towards nearly-zero energy building design with low carbon emission in northern China / B. Rui, Z. Hongrui, M. Zixuan et al. // *Energy and Buildings*. – 2023. – Vol. 298. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113555.
2. Есельбаева А.Г., Книжигареева А.С. Энергоэффективный арболит для малоэтажного строительства // *Парадигма*. – 2021. – № 4. – С. 26–29.
3. Ягубкин А.Н., Бакатович А.А., Дембицкий Р.С. Влияние химических добавок на свойства цементного камня при разработке составов стеновых блоков на растительной основе // *Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: электрон. сб. ст. V Междунар. науч. конф. / Новополюцк (27 окт. 2023 г.) / Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой; редкол.: Д.Н. Лазовский (пред.) и др. – Новополюцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2024. – С. 325–328.*
4. Ягубкин А.Н., Бакатович А.А. Подбор гранулометрического состава и определение расхода растительного структурообразующего материала для стеновых блоков // *Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: электрон. сб. материалов VIII Междунар. науч.-практ. конф. / Омск (23–24 нояб. 2023 г.) / СибАДИ; редкол.: А.П. Жигадло, П.А. Корчагин. – Омск: СибАДИ, 2023. – С. 590–594.*
5. Зайченко М.В., Курбатов В.Л. Новый строительный материал из соломы и земли // *Университет. наука*. – 2021. – № 1(11). – С. 45–47.
6. Building insulation materials based on agricultural wastes / F. Gaspar, A. Bakatovich, N. Davydenko et al. // *Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction / F. Pacheco-Torgal, V. Ivanov, D.C.W. Tsang (Eds.)*. – 2020. – P. 149–170. – (Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering). DOI: 10.1016/B978-0-12-819481-2.00008-8.
7. Semi-dry technology mediated lignocellulosic coconut and energy reed straw reinforced cementitious insulation panels / Z.M. Mucsi, K.M.F. Hasan, P.G. Horváth et al. // *Journal of Building Engineering*. – 2022. – № 57. DOI: 10.1016/j.job.2022.104825.
8. Agro-industrial waste from corn straw fiber: Perspectives of application in mortars for coating and laying blocks based on Ordinary Portland cement and hydrated lime / L. Aquino, T. Ranilson, C. Silva et al. // *Construction and Building Materials*. – 2022. – № 353. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129111.
9. Experimental investigation of mechanical and microstructural properties of cemented paste backfill containing maple-wood filler / B. Koohestani, A. Koubaa, T. Belem et al. // *Construction and Building Materials*. – 2016. – № 121. – P. 222–228. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.118.
10. Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates / A. Bouguerra, A. Ledhem, F. de Barquin et al. // *Cement and Concrete Research*. – 1998. – Vol. 28, № 8. – P. 1179–1190.
11. Mixture design and reaction sequence for recycling construction wood waste into rapid-shaping magnesia-phosphate cement particleboard / L. Wang, I.K.M. Yu, D.C.W. Tsang et al. // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2017. – № 56(23). – P. 6645–6654. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b01175.
12. Coatanlem P., Jauberthie R., Rendell F. Lightweight wood chipping concrete durability // *Construction and Building Materials*. – 2006. – № 20. – P. 776–781. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.057.
13. Costa H., Carmo R.N.F., Júlio E. Influence of lightweight aggregates concrete on the bond strength of concrete-to-concrete interfaces // *Construction and Building Materials*. – 2018. – № 180. – P. 519–530. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.011.

14. Simatupang M. Abbaureaktionen von glucose, cellobiose und holz unter dem einfluss von portlandzementmörtel // *Holzforschung*. – 1986. – № 40. – P. 149–155. DOI: 10.1515/hfsg.1986.40.3.149.
15. Miller D.P., Moslemi A. Wood-cement composites: species and heartwood-sapwood effects on hydration and tensile strength // *Wood Fiber Sci.* – 1991. – № 41(3). – P. 9–14.
16. Miller D.P., Moslemi A. Wood-cement composites: effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength // *Wood Fiber Sci.* – 1991. – № 23(4). – P. 472–482.
17. Цементный фибролит / Б.Н. Кауфман, Л.М. Шмидт, Д.А. Скоблов и др. – М.: Стройиздат, 1961. – 166 с.
18. Майоров П.М. Бетонные смеси: рецептурный справочник для строителей и производителей строительных материалов. – Ростов н/Д: Феникс, 2009. – 461 с.
19. Наназашвили И.Х. Структурообразование древесно-цементных композитов на основе ВНВ // *Бетон и железобетон*. – 1991. – № 12. – С. 15–17.
20. Ахназарова С.Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии: учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1978. – 318 с.

REFERENCES

1. Rui, B., Hongrui, Z., Zixuan, M., Riyong, Y., An, L. & Xunzhi, Y. (2023). Straw bale construction towards nearly-zero energy building design with low carbon emission in northern China. *Energy and Buildings*, (298). DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113555.
2. Esel'baeva, A.G. & Kinzhigareeva, A.S. (2021). Energoeffektivnyi arbolit dlya maloetazhnogo stroitel'stva. *Paradigma*, (4), 26–29. (In Russ.).
3. Yagubkin, A.N., Bakatovich, A.A. & Dembitskii, R.S. (2024). Vliyanie khimicheskikh dobavok na svoistva tsementnogo kamnya pri razrabotke sostavov stenovykh blokov na rastitel'noi osnove. *Arkhitekturno-stroitel'nyi kompleks: problemy, perspektivy, innovatsii [Elektronnyi resurs]: elektron. sb. st. V Mezhdunar. nauch. konf. / Novopolotsk (27 okt. 2023 g.)* (325–328). Novopolotsk: Polots. gos. un-t im. Evfrosinii Polotskoi. (In Russ.).
4. Yagubkin, A.N. & Bakatovich, A.A. Podbor granulometricheskogo sostava i opredelenie raskhoda rastitel'nogo strukturoobrazuyushchego materiala dlya stenovykh blokov. *Arkhitekturno-stroitel'nyi i dorozhno-transportnyi komplekсы: problemy, perspektivy, innovatsii [Elektronnyi resurs]: elektron. sb. materialov VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. Konf. / Omsk (23–24 noyab 2023 g.)* (590–594). Omsk: SibADI. (In Russ.).
5. Zaichenko, M.V. & Kurbatov, V.L. (2021). Novyi stroitel'nyi material iz solomy i zemli. *Universitetskaya nauka*, 1(11), 45–47. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Gaspar, F., Bakatovich, A., Davydenko, N. & Joshi, A. (2020). Building insulation materials based on agricultural wastes. In F. Pacheco-Torgal, V. Ivanov & D.C.W. Tsang (Eds.). *Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction* (149–170). DOI: 10.1016/B978-0-12-819481-2.00008-8.
7. Mucsi, Z.M., Hasan, K.M.F., Horváth, P.G., Bak, M., Kóczán, Z. & Alpár, T. (2022). Semi-dry technology mediated lignocellulosic coconut and energy reed straw reinforced cementitious insulation panels. *Journal of Building Engineering*, (57). DOI: 10.1016/j.job.2022.104825.
8. Aquino, L., Rnilson, T., Silva, C., Teixeira, M., Afoso, M. & Azevedo, R. (2022). Agro-industrial waste from corn straw fiber: Perspectives of application in mortars for coating and laying blocks based on Ordinary Portland cement and hydrated lime. *Construction and Building Materials*, (353). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129111.
9. Koohestani, B., Koubaa, A., Belem, T., Bussiére, B. & Bouzazhah, H. (2016). Experimental investigation of mechanical and microstructural properties of cemented paste backfill containing maple-wood filler. *Construction and Building Materials*, (121), 222–228. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.118.
10. Bouguerra, A., Ledhem, A., de Barquin, F., Dheilily, R.M. & Que'neudec, M. (1998). Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates. *Cement and Concrete Research*, 28(8), 1179–1190.
11. Wang, L., Yu, I.K.M., Tsang, D.C.W., Li, Sh. & Poon, Ch.S. (2017). Mixture design and reaction sequence for recycling construction wood waste into rapid-shaping magnesia-phosphate cement particleboard. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 56(23), 6645–6654. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b01175.
12. Coatanlem, P., Jauberthie, R. & Rendell, F. (2006). Lightweight wood chipping concrete durability. *Construction and Building Materials*, (20), 776–781. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.057.
13. Costa, H., Carmo, R.N.F. & Júlio, E. (2018). Influence of lightweight aggregates concrete on the bond strength of concrete-to-concrete interfaces. *Construction and Building Materials*, (180), 519–530. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.011.
14. Simatupang, M. (1986). Abbaureaktionen von glucose, cellobiose und holz unter dem einfluss von portlandzementmörtel. *Holzforschung*, (40), 149–155. DOI: 10.1515/hfsg.1986.40.3.149.
15. Miller, D.P. & Moslemi, A. (1991). Wood-cement composites: species and heartwood-sapwood effects on hydration and tensile strength. *Wood Fiber Sci.*, 41(3), 9–14.
16. Miller, D.P. & Moslemi, A. (1991). Wood-cement composites: effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength. *Wood Fiber Sci.*, 23(4), 472–482.
17. Kaufman, B.N., Shmidt, L.M., Skoblov, D.A. & Povolotskii A.S. (1961). *Tsementnyi fibrolit*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
18. Maiorov, P.M. (2009). *Betonnye smesi: retsepturnyi spravochnik dlya stroitelei i proizvoditelei stroitel'nykh materialov*. Rostov-on-Don: Feniks. (In Russ.).
19. Nanazashvili, I.Kh. (1991). Strukturoobrazovanie drevesno-tsementnykh kompozitov na osnove VNV. *Beton i zhelezobeton*, (12), 15–17. (In Russ.).
20. Akhnazarova, S.L. (1978). *Optimizatsiya eksperimenta v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. Moscow: Vyssh. shk. (In Russ.).

Поступила 30.11.2024

**THE INFLUENCE OF CHEMICAL ADDITIVES ON THE PROPERTIES
OF WALL BLOCKS MADE OF WHEAT STRAW**

A. YAGUBKIN, A. BAKATOVICH
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The article presents for the first time in the Republic of Belarus the results of studies of chemical additives affecting the physical and mechanical properties of wheat straw blocks. The subject of the study is the physical and mechanical properties of the cement component and wall blocks made of wheat straw. Based on the experiment and the analysis of its results, compositions for the manufacture of structural and heat-insulating blocks made of wheat straw were proposed and patented. Structural and heat-insulating blocks on these compositions are recommended for use in laying walls of one- and two-story buildings. The results of the study can be used to select compositions in the production of building materials and products from plant materials, in the educational process of construction specialties of universities.

Keywords: *vegetable raw material, wheat straw, chemical additive, setting time of cement paste, normal density of cement paste, molding pressure, wall material, average density, thermal conductivity coefficient, compressive strength.*