

Модифицированный арболит повышенной прочности для объёмно-пространственных блоков модульного домостроения

А.К. Кошкин¹, О.А. Ветрова²

¹Государственный университет по землеустройству,

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: Освоение удалённых и труднодоступных территорий России требует разработки эффективных строительных решений, сочетающих высокие эксплуатационные характеристики, экологичность и возможность полной заводской готовности. В данной статье представлены результаты исследования модифицированного арболита, предназначенного для использования в производстве объёмно-пространственных модулей. С целью повышения физико-механических свойств традиционного состава была применена комплексная химическая модификация древесного заполнителя, включающая предварительную обработку силикатом алюминия (Al_2SiO_5) с последующим введением в состав смеси этандиовой кислоты. Экспериментально установлено, что предлагаемая модификация приводит к снижению средней плотности материала на 11% при одновременном увеличении прочности на сжатие на 47% по сравнению с контрольным образцом. В работе обоснован физико-химический механизм упрочнения, заключающийся в образовании органо-минерального каркаса в структуре древесины. Результаты работы демонстрируют потенциал применения разработанного материала в качестве конструкционно-теплоизоляционного элемента в модульном домостроении.

Ключевые слова: модифицированный арболит, модульное домостроение, силикат алюминия, этандиовая кислота, прочность на сжатие, плотность.

Освоение малозаселённых и труднодоступных территорий России, характеризующихся экстремальными климатическими условиями, представляет собой одну из ключевых государственных задач. Ее успешная реализация напрямую связана с созданием комфортной и безопасной среды проживания, что, в свою очередь, требует разработки принципиально новых подходов к строительству. Традиционные технологии зачастую оказываются экономически неэффективными и логистически сложно реализуемыми в условиях Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока. В таких условиях наиболее подходящим вариантом решения проблемы видится разработка строительных решений, которые обеспечили бы полную заводскую готовность жилых модулей, их автономность, высокие эксплуатационные характеристики и возможность быстрого развертывания. Такие решения легко реализуемы в модульном домостроении [1]. Существенным

преимуществом модульной технологии является детерминированность сроков строительства, обеспечиваемая переносом ключевых этапов в контролируемые заводские условия, что нивелирует риски, связанные с неблагоприятным климатом Крайнего Севера [2]. Несмотря на явные преимущества возведения зданий полной заводской готовности развитие модульного домостроения сталкивается со многими трудностями, в большей степени связанными с отсутствием полноценной нормативной базы [3]. Кроме этого, основные типы модульных домов: на основе деревянного и стального каркасов, а также на основе контейнеров уже, как правило, не удовлетворяют критериям набирающего темпы «зеленого» строительства [4]. Последние тенденции строительной науки и практики требуют перехода на новый экологически ориентированный уровень [5, 6], в этой связи исследования и разработка экологичных композитных материалов для применения в модульном домостроении представляют несомненную актуальность.

В условиях растущего спроса на энергоэффективные и экологически безопасные строительные материалы все большее внимание уделяется технологиям, позволяющим совмещать высокие эксплуатационные характеристики с экономической целесообразностью. Одним из критериев “зеленого” строительства является повышение энергоэффективности здания за счет применения высокоэффективных теплоизоляционных материалов для наружных стен, а также конструктивных и технологических мероприятий, минимизирующих мостики холода и повышающих теплотехническую однородность ограждающих конструкций. Достичь теплотехнической однородности можно применением более однородных по своему составу однослойных ограждающих конструкций [7]. В этой связи для изготовления элементов объемно-пространственных модулей полной заводской готовности однослойного типа ограждающей конструкции предлагается использование

экологичного композитного материала на основе модифицированного арболита [8, 9]. Для создания технологий заводского производства объемно-пространственных деревокаменных модулей, обеспечивающих надлежащий контроль качества выпускаемой строительной продукции [10] требуется разработка арболита с определенными свойствами – достаточная прочность на сжатие и растяжение, огнестойкость, биостойкость и экологичность [11].

Арболит – это разновидность легкого бетона на основе цементного вяжущего и дробленой древесины (органического заполнителя). Качество арболита определяется следующими основными нормируемыми компонентами: органический заполнитель (дробленая древесина (щепа) преимущественно хвойных пород, 80-90% по объему); минеральное вяжущее – портландцемент марки М400 или М500; вода; модифицирующие добавки. Древесина содержит сахара (водорастворимые экстрактивные вещества), которые препятствуют нормальному схватыванию цемента и снижают прочность. Для их нейтрализации применяются химические модифицирующие добавки (1-4% от массы цемента): хлорид кальция (CaCl_2) наиболее распространенная добавка, ускоряющая твердение и минерализующая древесину; силикат натрия (жидкое стекло), обволакивает частицы щепы, блокируя выделение сахаров; сульфат алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$).

В качестве преимуществ стандартного арболита выделяют: высокие теплоизоляционные свойства; экологичность (материал на 80-90% состоит из природного, возобновляемого сырья); хорошая паропроницаемость позволяет создать комфортный микроклимат в помещении; низкая плотность снижает нагрузку на фундамент и упрощает монтаж; трудногорючесть по сравнению с древесиной; высокая прочность на изгиб относительно других легких бетонов.

Для производства объемно-пространственных деревокаменных модулей полной заводской готовности была разработана и оптимизирована рецеп-

тура арболита, модифицированного обработкой древесного заполнителя силикатом алюминия Al_2SiO_5 и добавкой этандиовой кислоты, что обеспечило повышение комплекса физико-механических и эксплуатационных характеристик, включая прочность на сжатие и растяжение, огнестойкость и скорость твердения. В ходе исследования оптимизированного арболита был проведен ряд экспериментальных исследований опытных образцов материала. На первом этапе были определены прочностные характеристики на сжатие. Данная статья посвящена этому этапу исследований.

Для изготовления образцов модифицированного арболита использовались: портландцемент М400 Д20 ЦЕМ II 32,5Н (АО «Михайловцемент», Рязанская область); древесный заполнитель (щепа) в виде частиц длиной от 2 до 20 мм по ГОСТ 19222-2019, предварительно обработанный раствором силиката алюминия Al_2SiO_5 ; мелкий заполнитель – кварцевый песок, фр. 0,1-0,5 мм; модифицирующая добавка на основе этандиовой кислоты х.ч. ГОСТ22180-76 (ООО «Торговая компания АНТ», г. Санкт-Петербург); питьевая вода по ГОСТ 23732-2011. Экспериментальные образцы (рис.1) были выполнены из модифицированного арболита из смеси в следующих пропорциях: древесный заполнитель (3 части), обработанный силикатом алюминия Al_2SiO_5 ; вяжущее – портландцемент (1 часть); мелкий заполнитель – кварцевый песок (0,5 части); модифицирующая добавка на основе этандиовой кислоты (0,15 части); вода (1 часть).

Приготовление арболитовой смеси осуществлялось в лабораторном смесителе принудительного действия. Для обеспечения однородности сначала производилось смешивание влажной обработанной древесной дробленки, портландцемента и песка, после чего добавлялась вода с растворенной в ней добавкой этандиовой кислоты. Приготовленная смесь укладывалась в стандартные металлические формы размером 100x100x100мм. Формование осуществлялось методом послойного уплотне-

ния. После формования образцы извлекались из форм и подвергались твердению в нормальных температурно-влажностных условиях (температура $20 \pm 2^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха не менее 95%). Образцы испытывались методом осевого кратковременного статического сжатия автоматическим устройством для испытания на сжатие AUTOMAX 65-L1052 в соответствии с ГОСТ 10180 – 2012 после набора прочности через 28 суток (рис. 2).



Рис. 1. – Внешний вид образца



Рис. 2. – Общий вид испытания образцов на сжатие

Исследования проводились с использованием серии из 3 образцов модифицированного арболита и одного контрольного образца без модифицирующей добавки, изготовленного в соответствии с ГОСТ 19222-2019. Характеристики образцов и результаты испытаний приведены в таблице 1.

Средняя прочность для серии была определена в соответствии с ГОСТ 10180-2012 как среднее арифметическое значение двух наибольших результатов в серии из трёх образцов и составила 3,9 МПа.

Проведена статистическая обработка результатов эксперимента: сумма квадратов отклонений составила 0,1346; дисперсия – 0,0673; среднеквадратическое отклонение $S = 0,2594$ МПа. Коэффициент вариации прочности на сжатие составил 6,63%. Полученное значение коэффициента вариации указывает на небольшой разброс результатов прочности вокруг среднего значения. Дан-

ное значение свидетельствует о хорошей однородности свойств испытательных образцов в данной серии. Следует отметить, что оценка статистических параметров проведена на малой выборке ($n = 3$), и их значения носят ориентировочный характер. Для получения статистически надёжных результатов требуется испытание большего количества образцов в планируемых исследованиях.

Таблица № 1

Физико-механические характеристики опытных образцов арболита

Образец	Характеристика образца			Результаты испытания		
	Масса, г	Плотность, кг/м ³	Средняя плотность образцов в серии, кг/м ³	Разрушающая нагрузка, кН	Прочность образца, МПа	Средняя прочность образцов в серии, МПа
1	778	778	753	38,6	3,86	3,9
2	772	772		39,6	3,96	
3	708	708		35,5	3,55	
Контрольный образец	845	845	845	26,0	2,6	2,6

Анализируя данные, представленные в таблице 1, отмечается статистически значимое снижение на 11 % средней плотности серии опытных образцов модифицированного арболита до 753 кг/м³ против 845 кг/м³ у контрольного образца. Параллельно зафиксировано увеличение прочности при сжатии на 47 % с 2,6 МПа (контрольный образец) до среднего значения 3,9 МПа для модифицированной серии, что демонстрирует эффективность примененной химической модификации.

Полученные экспериментальные данные, а именно снижение средней плотности модифицированных образцов при одновременном значительном росте их прочности на сжатие, обусловлены комплексным воздействием предложенной химической модификации древесного наполнителя.

Обработка щепы раствором силиката алюминия с последующим подкислением приводит к протеканию двух ключевых процессов. Во-первых, происходит нейтрализация водорастворимых сахаров, тормозящих гидратацию цемента. Во-вторых, и это главное, активные компоненты (ионы алюминия и кремния) проникают в структуру древесины, в частности, в зоны сохранившейся биологической активности – камбиальные слои клеток. Именно эти клетки, обладая высокой проницаемостью, функционируют как структуроформирующие узлы композитной системы.

В момент затворения смеси водой и ее уплотнения внутри пропитанных клеток и на поверхности волокон инициируются реакции с образованием нерастворимых соединений, таких как оксалаты и гидросиликаты алюминия. Эти соединения формируют жесткий органоминеральный каркас, который не просто покрывает древесину, а пронизывает ее изнутри, создавая плотную кристаллическую структуру в межволоконном пространстве.

Таким образом, снижение плотности объясняется увеличением жесткости древесных частиц, которые при формировании образца создают более стабильный и менее деформируемый пористый каркас. Рост прочности является прямым следствием описанного внутреннего «армирования», при котором древесный наполнитель превращается из пассивного компонента в активный упрочняющий элемент композитной системы, обеспечивающий эффективное перераспределение механических нагрузок.

Также следует отметить, что полученная средняя прочность в серии образцов на сжатие 3,9 МПа превышает прочность контрольного образца 2,6 МПа (приблизительно класс В2,5), что подтверждает эффективность применяемой модификации и позволяет рекомендовать данный материал для использования в качестве конструкционно-теплоизоляционного материала в ответственных несущих конструкциях объемно-пространственных блоков модульного домостроения. Низкая плотность 753 кг/м³ снижает вес готовых

блоков, что важно для транспортировки и монтажа. Кроме этого, данный материал для применения в объемно-пространственных деревокаменных блоках имеет неоспоримые технологические и экономические преимущества: использование отходов в качестве сырья; возможность рециклинга; заводская готовность и гарантия качества.

Данные исследования позволяют на стадии проектирования разрабатывать более эффективные конструктивные решения для выполнения государственной программы по заселению территорий с тяжёлыми климатическими условиями. Предлагаемый материал на основе модифицированного арболита позволяет не только кардинально сократить сроки строительства и снизить затраты, но и создать устойчивую, адаптивную и экологически ответственную систему освоения территорий, что имеет фундаментальное значение для развития территорий России со сложными природными условиями, но обладающих значительным сырьевым потенциалом.

Литература

1. Пименова Н.Д., Мошкова А.И., Давиденко А.А., Кошкин А.К. Модуль жилого назначения из объёмных самодостаточных блоков (для Сибири и дальнего Востока) // Международная научная конференция «Новые идеи нового века». Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2024. Т. 2. С. 219-223.
2. Ким Д.А., Погосова Е.Б., Зуева М.К. Возможности модульной технологии домостроения // Инженерный вестник Дона. 2023. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8264.
3. Сомов В.В., Глухова А.В. Модульное строительство. Перспективы развития технологии модульного домостроения в России // Инженерный вестник Дона. 2025. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2025/9895.

4. Долотказина Н.С., Поташова М.Д. Экологичная архитектура. Региональные природные материалы в "зеленом" строительстве // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2017. №1 (19). С. 18-24.

5. Acker P., Baverel O., Brochard L., Habert G., Rivallain M., Le Roy R., Ehrlicher A. Les matériaux de structures du «développement durable» pour l'habitat // La chimie et l'habitat. 2011. Janvier. Pp. 175-192.

6. Kauskale L., Geipele I., Zeltins N., Lecis I. Energy Aspects of Green Buildings – International Experience // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 2016. No. 53 (6). Pp. 21-28.

7. Ветрова О.А. Конструктивные решения наружных стен: проблемы, дефекты и перспективы применения однослойных ограждающих конструкций // Инженерный вестник Дона. 2025. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2025/9916.

8. Кошкин А.К., Синянский И.А., Божиков А.Ю., Орлов Е.В. Исследования для увеличения прочностных характеристик деревобетона (арболита) в объёмно-блочных пространственно-конструктивных изделиях полной заводской готовности // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 108-13. С. 32-34.

9. Никулин А.А., Соргутов И.В. Арболитовые плиты. Строительство быстровозводимых зданий из арболитовых плит // Вестник науки. 2023. №2 (2). С. 309-322.

10. Дементьев Н.М., Волкодав В.А., Волкодав И.А., Титова И.Д. Перспективы развития и нормирования модульного строительства в России с учетом зарубежного опыта // Инженерный вестник Дона. 2023. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8321.

11. Полищук А.И., Рубинская А.В., Трофимук В.Н. Производство арболита как одно из перспективных направлений комплексной переработки

древесины // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2012. №32. С. 108-110.

References

1. Pimenova N.D., Moshkova A.I., Davidenko A.A., Koshkin A.K. Mezhdunarodnaja nauchnaja konferencija «Novye idei novogo veka» [International Scientific Conference "New Ideas for the New Century"] Habarovsk: PNU. 2024. T. 2. Pp. 219-223.
2. Kim D.A., Pogosova E.B., Zueva M.K. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8264.
3. Somov V.V., Gluhova A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2025/9895.
4. Dolotkazina N.S., Potashova M.D. Inzhenerno-stroitel'nyj vestnik Pri-kaspia. 2017. №1 (19). Pp. 18-24.
5. Acker P., Baverel O., Brochard L., Habert G., Rivallain M., Le Roy R., Ehrlacher A. Chemistry and habitat. 2011. January. Pp. 175-192.
6. Kauskale L., Geipele I., Zeltins N., Lecis I. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 2016. No. 53 (6). Pp. 21-28.
7. Vetrova O.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2025/9916.
8. Koshkin A.K., Sinjanskij I.A., Bozhikov A.Ju., Orlov E.V. Tendencii razvitija nauki i obrazovanija. 2024. № 108-13. Pp. 32-34.
9. Nikulin A.A., Sorgutov I.V. Vestnik nauki. 2023. №2 (2). Pp. 309-322.
10. Dement'ev N.M., Volkodav V.A., Volkodav I.A., Titova I.D. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8321.
11. Polishhuk A.I., Rubinskaja A.V., Trofimuk V.N. Aktual'nye prob-lemy lesnogo kompleksa. 2012. №32. Pp. 108-110.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 18.11.2025

Дата публикации: 26.12.2025