



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.311

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-30-42

Влияние добавок льняного волокна на прочность строительных композитов на основе гипса

**П.Б. Разговоров, В.Б. Доброхотов, В.А. Кожухов,
М.О. Баканов, И.Н. Давыдов**

Павел Борисович Разговоров¹, Владимир Борисович Доброхотов^{1,*}, Илья Николаевич Давыдов¹

¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация
razgovorovpb@ystu.ru, dobrokhotovvb@ystu.ru*, ilya-davydov-00@list.ru

Виктор Анатольевич Кожухов²

²Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева,
Красноярск, Российская Федерация
vkozuhkov@mail.ru

Максим Олегович Баканов³

³Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Москва, Российская Федерация
mask-13@mail.ru



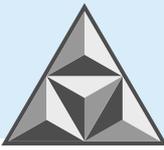
Рассмотрены перспективы использования добавок льняного волокна для повышения физико-механических свойств строительных композитов. Отмечается, что регламентированный подход к вопросам подготовки армирующих добавок из растительного сырья способствует улучшению эксплуатационных характеристик строительных материалов на основе гипса. Установлено, что внесение 1-3% льняного волокна с влажностью 18-20% в гипс марки ГЗ существенно (на 83%) повышает прочность на растяжение при изгибе для образцов, полученных из отвержденных гипсовых смесей, и более чем вдвое – прочность на сжатие готовых композитов. Выявлено положительное влияние степени предварительного помола льняного волокна (до 50-70° по шкале Шоппер-Риглера), смешиваемого с гипсом (марка ГЗ) и водой, на достижение эффекта упрочнения готовых композитов. Разработка таких материалов соответствует современным нормативным и законодательным требованиям в области устойчивого строительства и охраны окружающей среды.

Ключевые слова: гипс, льняное волокно, степень помола, строительные композиты, армирующая добавка, прочность на изгиб, прочность на сжатие

Для цитирования:

Разговоров П.Б., Доброхотов В.Б., Кожухов В.А., Баканов М.О., Давыдов И.Н. Влияние добавок льняного волокна на прочность строительных композитов на основе гипса // *Умные композиты в строительстве*. 2026. Т. 7, вып. 1. С. 30-42. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-30-42



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-30-42

The effect of flax fiber additives on the strength of gypsum-based construction composites

**P.B. Razgovorov, V.B. Dobrokhotov, V.A. Kozhukhov,
M.O. Bakanov, I.N. Davydov**

Pavel Borisovich Razgovorov¹, Vladimir Borisovich Dobrokhotov^{1,*}, Ilya Nikolaevich Davydov¹

¹Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

razgovorovpb@ystu.ru, dobrokhotovvb@ystu.ru, ilya-davydov-00@list.ru*

Viktor Anatolyevich Kozhukhov²

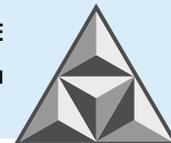
²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation

vkozhukhov@mail.ru

Maksim Olegovich Bakanov³

³National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

mask-13@mail.ru



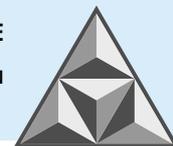
The paper considers the prospects of using flax fibre additives to improve the physical and mechanical properties of building composites. The authors note that a regulated approach to the preparation of reinforcing additives from plant raw materials contributes to improving the performance characteristics of gypsum-based building materials. It has been established that the addition of 1-3% flax fibre with a moisture content of 18-20% to G3 gypsum significantly (by 83%) increases the flexural tensile strength of samples obtained from hardened gypsum mixtures and more than doubles the compressive strength of finished composites. The authors identified a positive effect of the degree of preliminary grinding of flax fibre (up to 50-70° on the Shopper-Rigler scale), mixed with gypsum (G3 grade) and water, on achieving the strengthening effect of the finished composites. The development of such materials complies with modern regulatory and legislative requirements in the field of sustainable construction and environmental protection.

Keywords: gypsum, linen fibre, freeness, construction composites, reinforcing additive, bending strength, compressive strength

For citation:

Razgovorov P.B., Dobrokhoto V.B., Kozhukhov V.A., Bakanov M.O., Davydov I.N. The effect of flax fiber additives on the strength of gypsum-based construction composites // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 1. P. 30-42. URL: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-30-42



ВВЕДЕНИЕ

В последние 5-7 лет вопросы введения растительного сырья и древесных отходов в строительные композиты с целью повышения их технологических и эксплуатационных характеристик активно изучаются зарубежными исследователями [1-4]. Это во многом объясняется возможностью возобновления указанных ресурсов [5], повышенной экономичностью [6], экологичностью [7] и достигаемой оптимизацией реологических и прочностных характеристик получаемых смесей [7, 8].

В свою очередь, в России перспективными направлениями являются переработка природного сырья и отходов в композиционные материалы [9], а также модифицирование свойств строительных материалов путем дисперсного армирования различными добавками. Хорошо известно, что Россия богата лесными массивами и, следовательно, объем древесных отходов, образующихся в процессе лесозаготовок и переработки древесины, весьма велик. Переработка и утилизация этих отходов являются привлекательной задачей, решаемой как на промышленных предприятиях, так и в сфере экологии. Повышенный интерес к ним проявляется в строительстве, поскольку они могут широко использоваться в производстве композитных панелей, изоляционных материалов и т.д. Древесно-цементные композиты также хорошо зарекомендовали себя, в частности, в качестве внутреннего декоративного отделочного материала. В работах отечественных авторов [10, 11] показано, что введение растительных волокон [10] и опилок [11] в бетонную или гипсовую матрицу позволяет на 25-40% повысить ее трещиностойкость и экономичность, значительно изменить характер разрушения – от хрупкого к квазипластичному [10].

Известны также композиты на основе гипса (45 мас%) марки Г16 с включением до 16 мас% древесных опилок фракции до 5 мм и воды (остальное) [11]. В отличие от изделий из натурального камня и чистого гипса, которые имеют высокий вес и стоимость, такой композит характеризуется уменьшенной теплопроводностью (коэффициент теплопроводности $0.181 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{К}^{-1}$ по сравнению с $0.373 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{К}^{-1}$ у гипса). Кроме того, благодаря снижению расхода гипсового вяжущего ($600 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ для композита против $1400 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ для гипса) древесно-гипсовый композит предлагает более экономичное решение для внутренней отделки помещений [11].

Весьма интересным техническим и технологическим решением в производстве бетонных композитов представляется использование сухого борщевика Сосновского. Такой подход позволяет не только утилизировать сорное растение, но и способствует устойчивости композита к окружающей среде, снижая потребность в традиционных строительных материалах и уменьшая экологический след [12]. Дисперсно-армированные композиты с включением в состав растительной добавки борщевика Сосновского в настоящее время используются в строительстве при изготовлении и ремонте бетонных и железобетонных изделий. Их характерной особенностью являются повышенные прочностные характеристики при сжатии и изгибе, улучшенная удельная работа разрушения и деформационное упрочнение после появления первой микротрещины. При этом достижение максимальной прочности испытываемых образцов обеспечивалось при длине волокон добавки, составляющей 50 мм [13].

В целом применению натуральных растительных волокон и текстильных отходов в качестве армирующих и модифицирующих добавок строительных материалов уделяется особое внимание [14]. Их преимущества перед химическими аналогами очевидны: они биоразлагаемы, обладают низкой углеродной эмиссией при производстве и доступны по стоимости. Так, например, использование 1 т льняного волокна взамен синтетической фибры позволяет снизить углеродный след материала на 2-3 т CO_2 -эквивалента. В ряду отечественных растительных волокон с повышенными физико-механическими свойствами льняное волокно выделяют отдельно: его прочность на разрыв достигает 1500 МПа, что сравнимо со стальной



арматурой малого диаметра, а удельная прочность превышает показатели стекловолокна. При этом экологически чистый лен является традиционной сельскохозяйственной культурой для России. Так, в 2024 году площади посевов льна-долгунца составили более 50 тыс. га, а потенциал производства волокна оценивается в 100-120 тыс. т. в год, что создает устойчивую сырьевую базу для его использования в области пищевой химии и эндозекологии [15], а также сфере строительной индустрии в качестве ценного армирующего материала [16].

На основании вышеизложенного сформулирована цель настоящего исследования, которая заключается в изучении влияния степени помола льняного волокна, добавляемого в смеси на основе гипса, на показатель прочности получаемых композитов, что вносит вклад в развитие теории строительных конгломератов и практики использования разработок с применением растительного сырья в отечественном строительстве.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Подготовка льняного волокна

Отходы переработки льна в виде пакли, представляющие собой внешние части стебля с заостренностью волокон до 20% и относительной влажностью 12-17%, предварительно измельчали сухим способом на дезинтеграторе-дробилке (рис. 1) с последующим замачиванием в воде при 293 К в течение 24 ч. Процесс осуществляли путем однократного пропускания через дезинтегратор-дробилку «Рекорд» (рис. 1) при частоте 3000 мин⁻¹ и ударном воздействии 2.3 кВт, до получения волокнистого полуфабриката, прошедшего через сито диаметром 3.0 мм.

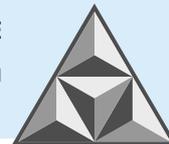


Рис. 1. Общий вид дезинтегратора-дробилки «Рекорд»

Fig. 1. General view of the "Record" disintegrator-crusher

Массоподготовку льняного полуфабриката проводили в полупромышленной дисковой мельнице, имеющей габаритные размеры (м) 0.95×0.60×0.80, зазор между ножами 0.30 мм при точности их установки 0.05 мм, с частотой оборотов 2000 мин⁻¹. Привод мельницы, в которую по трубопроводам поступала дробленая масса волокон, характеризуется номинальной мощностью 22 кВт. Гидроразбиватель представлял собой емкость объемом 320 л с двумя мешалками – вертикальной рамной (60 мин⁻¹) и наклонной дисковой (900 мин⁻¹); расход жидкости составлял 3 л·с⁻¹.

Для измерения степени помола волокнистой массы (в градусах Шоппер-Риглера, далее – °ШР) применяли прибор СР-2. Водой в объеме 1.0 л заливали 2.0 г сухого льняного волокна, перемешивали суспензию, затем помещали ее в рабочий цилиндр и после подъема клапана прибора осуществляли обезвоживание суспензии на сетке. Степень помола льняного волокна, фиксируемая по делениям на стекле, составляла соответственно 30, 50 и 70°ШР.



Фракционный состав растительной массы (по геометрическому признаку) оценивали по ГОСТ 13425-93 с использованием аппарата ФДМ. Ниже представлены характеристики сеток:

№ 9/9 по ТУ 13 – 0281036 – 06 (крупная фракция, размер ячейки 0.61 мм);

№ 20 по ТУ 13 – 0281151 – 20 (средняя фракция, размер ячейки 0.25 мм);

№ 40 по ТУ 13 – 0281151 – 20 (мелкая фракция, размер ячейки 0.12 мм).

Волокно, проходящее через сетку № 40 (< 0.12 мм), направляли в унос.

По методу Джайме (в соответствии с ISO 23714:2014) определяли водоудерживающую способность волокон после центрифугирования и замеров массы высушенных образцов на аналитических весах ВЛА-200 г-М с точностью 0.1 мг.

Приготовление композитов и тестирование их физико-механических характеристик

Приготовление композитного материала осуществляли путем перемешивания льняных волокон в емкости с водой и последующего введения гипса установленной марки Г3, степень помола II ("ВОЛМА-Алебастр" ГОСТ 125-2018; ООО "Волма", г. Волгоград) до образования тестообразной массы. Волокна (влажность 10%) распределяли в матрице путем механического перемешивания с частотой 60 мин⁻¹ до получения однородной консистенции. Из гипсового теста формовали стандартные образцы – балочки размером 40×40×160 мм, которые выдерживали в воздушно-сухих условиях (влажность воздуха 55-65%, температура 293 К) до затвердевания в течение 24-48 ч.

Оценку прочности на изгиб и сжатие образцов затвердевшего гипса (марка Г3) и композитов на основе вяжущего с включением 1-5 мас% льняного волокна, имеющего степень помола 30-70°ШР, производили на специализированном оборудовании – прессах (ГОСТ 23789, ГОСТ 10180-2012). Шкала Шоппер-Риглера характеризует степень дисперсности волокон, где более высокие значения соответствуют мелкому помолу, что должно оказывать влияние на адгезионные свойства и распределение в матрице. Введение добавки льняного волокна на трех уровнях (1, 3 и 5% от массы гипса) обеспечивает систематический анализ эффекта армирования и модифицирования физико-механических свойств композита. Суммарное количество вариаций составляет 9, включая контрольный образец (гипс марки Г3 без добавок).

Применение предлагаемого подхода при исследовании строительных композитов с добавлением льняных волокон позволяет объективно оценить влияние добавок растительного сырья на формирование структуры гипсового камня и физико-механические характеристики затвердевших образцов. Так, предел прочности образцов на изгиб определяли с использованием испытательной машины МИИ-100 (рис. 2).



Рис. 2. Испытательная машина МИИ-100 для определения прочности гипсовых композитов на изгиб

Fig. 2. МИИ-100 Test Machine for Determination of Bending Strength of Gypsum Composites



Для определения предела прочности на сжатие строительных композитов применяли гидравлический пресс П-10. Результаты анализа физико-механических свойств полученных материалов (прочность на растяжение при изгибе и прочность на сжатие) сравнивали с контрольными образцами, что позволило оценить эффективность армирования льняными волокнами и оптимизировать составы для применения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нами установлена зависимость фракционного состава волокна от степени помола (табл. 1). Согласно данным, приведенным в табл. 1, с увеличением степени помола волокнистой массы от 30 до 70°ШР снижается число волокон крупной фракции за счет попадания в зазор ротора и статора мельницы. Уменьшение длины волокон приводит к повышению содержания средней и мелкой фракции; также возрастает процент уноса волокна в сток.

Таблица 1. Изменение фракционного состава льняного волокна в процессе размола

Table 1. Change in Linen Fiber Fractional Composition During Milling

Степень помола, °ШР	Содержание фракций, мас%			
	Крупная	Средняя	Мелкая	Унос
30	77.46	10.87	4.02	7.65
50	68.09	16.17	6,60	9.15
70	52.85	23.37	10.37	13.41

В процессе помола льна реализована возможность получить волокнистую массу с определенным фракционным составом и обеспечить фибриллирующее воздействие на волокно. Внешняя фибрилляция заключается в отделении от волокна клеточных оболочек и фибрилл, что приводит к повышению числа свободных гидроксилы на его поверхности и обеспечивает активизацию адсорбции воды на поверхности волокна.

Подтверждением данных процессов является увеличение водоудерживающей способности волокна при его интенсивном помоле на дисковой мельнице (рис. 3).

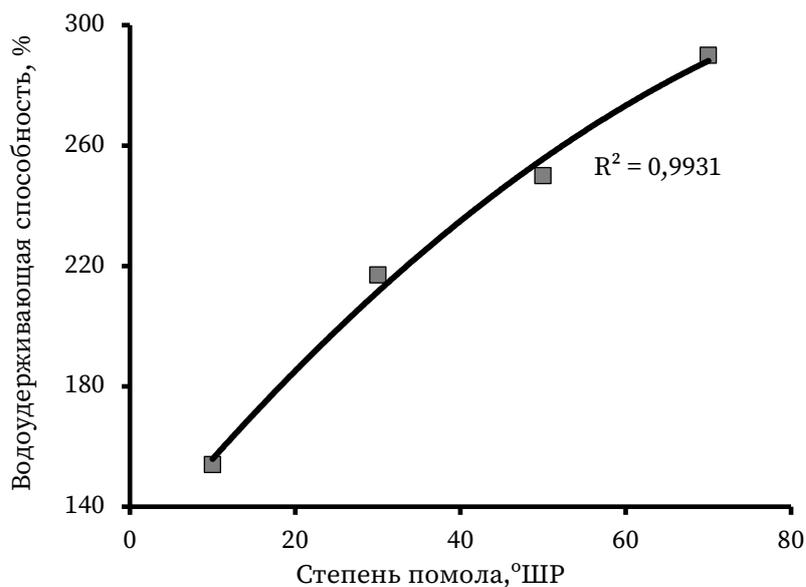
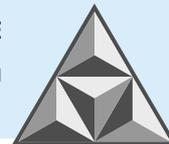


Рис. 3. Зависимость водоудерживающей способности льняного волокна от степени его помола на дисковой мельнице

Fig. 3. Dependence of the water retention capacity of flax fibre on the degree of its grinding in a disc mill



Согласно данным по водоудерживающей способности, полученным при варьировании степени помола льняного волокна, наименьшие значения (217%) получены при показателе 30°ШР. Помол армирующей добавки до 70°ШР способствовал росту водоудерживающей способности до 290%, что объясняется фибриляцией волокна и увеличением числа активных связей с участием гидроксильных групп как в структуре суспензии, так и в смеси с гипсом.

При изучении прочности на растяжение ($\sigma_{\text{раст}}$) гипсовых композитов с включением влажного льняного волокна установлено (см. рис. 4): по мере повышения степени помола растительной добавки, измеряемой в градусах Шоппер-Риглера, прочность на изгиб, по сравнению с контрольным образцом, возрастает в среднем:

при 30°ШР – в среднем на 23.0%;

при 50°ШР – в среднем на 43.6%;

при 70°ШР – в среднем на 60.6%.

Таким образом, наблюдается практически прямо пропорциональная зависимость между степенью помола льняного волокна и прочностью образцов гипсовых композитов при испытании их на изгиб в присутствии указанной добавки, взятой в количестве 1-5% от массы вяжущего компонента.

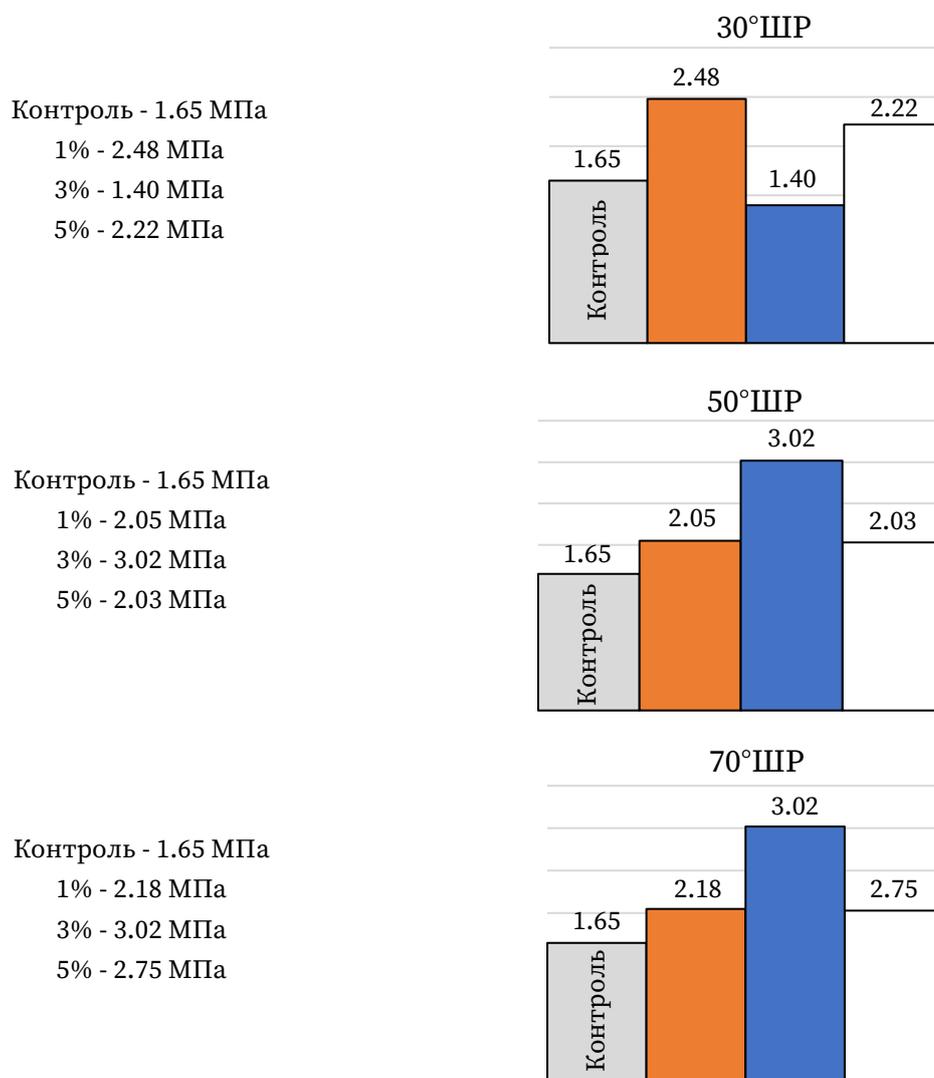


Рис. 4. Расчетная прочность гипсовых композитов (марка гипса Г3) на растяжение с включением 1-5 мас% влажных льняных волокон с различной степенью их помола (30, 50, 70°ШР)

Fig. 4. Design tensile strength of gypsum composites (grade G3) with inclusion 1-5 wt% wet linen fibers with varying degrees of grinding (30, 50, 70 degrees Schopper-Riegler)



Анализ рис. 4 показывает, что введение всего 1 мас% льняного волокна в гипс марки Г3 при степени помола указанной добавки в диапазоне 30-70°ШР обеспечивает повышение прочности композитов на растяжение при изгибе в пределах 24-50%. Также выявлено, что максимальная степень прироста прочности строительного композита на изгиб ($\sigma_{изг}$) достигается при введении 3% волокна от массы гипса в условиях средней (50°ШР) и повышенной (70°ШР) степени его помола. При этом эффект от произведенного армирования оценивается на уровне 83%.

Влияние степени помола влажного льняного волокна на прочность при сжатии ($\sigma_{сж}$) полученных гипсовых композитов с включением 1-3 мас% добавки доступно продемонстрировано на рис. 5.

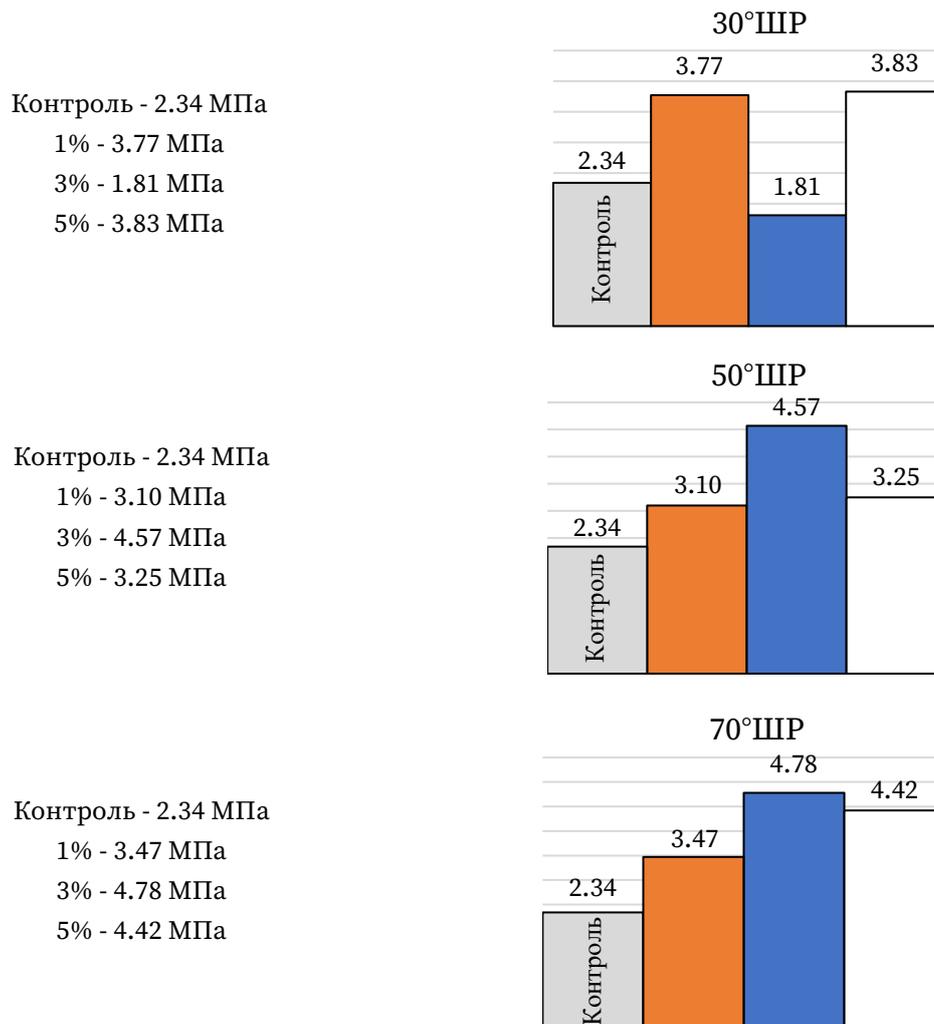
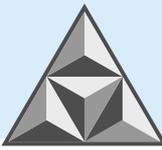


Рис. 5. Прочность гипсовых композитов (марка гипса Г-3) на сжатие с включением 1-5 мас.% влажных льняных волокон со степенью помола 30, 50 и 70°ШР

Fig. 5. Compressive strength of gypsum composites (gypsum grade G-3) with inclusion 1-5 wt% wet linen fibers with a fineness of 30, 50 and 70 degrees Schopper-Riegler

Как видно на рис. 5, зависимость имеет экстремальный характер: наибольшее значение прочности композита на сжатие ($\sigma_{сж}$, 4.78 МПа) достигается при введении 3% льняного волокна от массы гипса; при увеличении количества армирующей добавки до 5% наблюдается снижение указанного показателя на 7.5% (до 4.42 МПа).

В общем и целом отмечается, что добавка 1-3% льняного волокна с влажностью 10% в гипс марки Г3 приводит к наиболее значимому росту прочности на сжатие полученного строительного материала; дальнейшее увеличение концентрации волокна в строительном композите представляется нецелесообразным.



ВЫВОДЫ

Соблюдение регламентированных условий замешивания, формования, выдержки и экспериментальных образцов позволило получить новые достоверные данные о физико-механических свойствах строительных композитов на основе гипса марки ГЗ с включением возобновляемого растительного сырья – отечественного льняного волокна.

Установлено, что введение 1-3 мас% влажных льняных волокон в гипсовую смесь (на примере марки гипса ГЗ) существенно улучшает ее механические свойства; при этом выявлена повышенная эффективность от армирования гипсового вяжущего добавкой волокон льна в количестве 3%, характеризуемой высокой степенью помола (70°ШР). Это позволяет увеличить прочность строительных композитов на изгиб на 83% и прочность их на сжатие более чем вдвое по сравнению с образцами гипса без волокон. Превышать указанную дозировку льняного волокна не рекомендуется, что требует четкого контроля расхода растительного сырья при изготовлении таких строительных материалов на основе гипса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Barría J.C., Vazquez A., Pereira J.M., Manzanal D.** Effect of bacterial nanocellulose on the fresh and hardened states of oil well cement // *J. Petroleum Sci. Eng.* 2021. Vol. 199. P. 1-12. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108259.
2. **Nishimura T., Shinonaga Y., Nagaishi C., Imataki R., et al.** Effects of powdery cellulose nanofiber addition on the properties of glass ionomer cement. *Materials*. 2019. Vol. 12. № 19. P. 3077. DOI: 10.3390/ma12193077.
3. **Barnat-Hunek D., Szymanska-Chargot M., Jarosz-Hadam M., Łagód G.** Effect of cellulose nanofibrils and nanocrystals on physical properties of concrete // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 223. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.145.
4. **Abdellaoui H., Bouhfid R.** Review of nanocellulose and nanohydrogel matrices for the development of sustainable future materials. In *Sustainable // Nanocellulose and Nanohydrogels from Natural Sources*. 2020. P. 155-176. DOI: 10.1016/B 978-0-12-816789-2.00007-9.
5. **Nakagaito A.N., Yano H.** The effect of morphological changes from pulp fiber towards nano-scale fibrillated cellulose on the mechanical properties of high-strength plant fiber based composites // *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 2004. Vol. 78. P. 547-552. DOI: 10.1007/s00339-003-2453-5.
6. **Rajendran N., Runge T., Bergman R.D., Nepal P., et al.** Techno-economic analysis and life cycle assessment of cellulose nanocrystals production from wood pulp // *Bioresour. Tech.* 2023. Vol. 377. P. 128955. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128955.
7. **Hoyos C.G., Zuluaga R., Ganan P., Pique T.M., et al.** Cellulose nanofibrils extracted from fique fibers as bio-based cement additive // *J. Clean. Prod.* 2019. Vol. 235. P. 1540-1548. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.292.
8. **Tan T., Santos S.F., Savastano H., Soboyejo W.O.** Fracture and resistance-curve behavior in hybrid natural fiber and polypropylene fiber reinforced composites // *J. Mater. Sci.* 2012. Vol. 47. P. 2864-2874. DOI: 10.1007/s10853-011-6116-1.
9. **Разговоров П.Б., Игнатьев А.А., Абрамов М.А., Нагорнов Р.С.** Переработка алюмосиликатного сырья и отходов строительства метрополитена в композиционные сорбенты для очистки водных и маслосодержащих сред // *Умные композиты в строительстве*. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 10-24. DOI: 10.52957/27821919_2020_1_1/0
10. **Семенов В.Л., Коротких Д.Н.** Дисперсно-армированные цементные композиты: состояние и перспективы // *Вестник строительной науки*. 2020. № 2. С. 45-52.
11. Пат. 2788603 РФ. Древесно-гипсовый композит / А.В. Ерофеев, Т.И.Горохов, Н.С. Ковалев, С.И. Горохов; опубл. 23.01.2023, бюл. № 3. URL: <https://findpatent.ru/patent/278/2788603.html> (дата обращения 10.11.2025).
12. **Мусорина Т.А., Петриченко М.Р., Заборова Д.Д., Гамаюнова О.С., Куколев М.И.** Улучшение свойств бетонного композита, армированного сухой растительной добавкой // *Строительство и техногенная безопасность*. 2021. № 22 (74). С. 57-65. DOI: 10.37279/2413-1873-2021-22-57-65.



13. Пат. 2771347 РФ. Способ создания бетонного композита, армированного сухой растительной добавкой / М.И. Куколев, Т.А. Мусорина, Д.Д. Заборова; опубл. 29.04.2022, бюл. № 13. URL: <https://findpatent.ru/patent/277/2771347.html> (дата обращения 10.11.2025).
14. **Ильичев В.А., Колчунов В.И., Бакаева Н.В., Кобелева С.А.** Экологическая безопасность использования текстильных волокон в промышленности строительных материалов // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2017. № 1 (367). С. 194-198.
15. **Нагорнов Р.С., Разговоров П.Б., Смирнова Е.А., Разговорова М.П.** Сравнительный анализ действия природных алюмосиликатов в отношении сопутствующих ингредиентов льняного масла // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2015. Т. 58. № 8. С. 63-66.
16. **Румянцева В.Е., Коновалова В.С., Румянцев Е.В., Одинцова О.И., Касьяненко Н.С.** Использование отходов текстильной промышленности в производстве строительных композитов // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2021. № 6 (396). С. 21-29. DOI: 10.47367/0021-3497_2021_6_21.

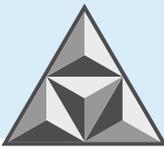
Поступила в редакцию 27.01.2026

Одобрена после рецензирования 18.02.2026

Принята к опубликованию 10.03.2026

REFERENCES

1. **Barría, J.C., Vazquez, A., Pereira, J. and Manzanal, D.** (2021), Effect of bacterial nanocellulose on the fresh and hardened states of oil well cement, *J. Petroleum Sci. Eng.*, vol. 199, pp. 1-12. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108259.
2. **Nishimura, T., Shinonaga, Y., Nagaishi, C. and Imataki R., et al.** (2019), Effects of powdery cellulose nanofiber addition on the properties of glass ionomer cement, *Materials*, vol. 12, no. 19, p. 3077. DOI: 10.3390/ma12193077.
3. **Barnat-Hunek, D., Szymanska-Chargot, M., Jarosz-Hadam, M. and Łagód, G.** (2019), Effect of cellulose nanofibrils and nanocrystals on physical properties of concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 223, pp. 1-11. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.145.
4. **Abdellaoui, H. and Bouhfid, R.** (2020), Review of nanocellulose and nanohydrogel matrices for the development of sustainable future materials. In *Sustainable, Nanocellulose and Nanohydrogels from Natural Sources*, pp. 155-176. DOI: 10.1016/B 978-0-12-816789-2.00007-9.
5. **Nakagaito, A.N. and Yano, H.** (2004), The effect of morphological changes from pulp fiber towards nano-scale fibrillated cellulose on the mechanical properties of high-strength plant fiber based composites, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process*, vol. 78, pp. 547-552. DOI: 10.1007/s00339-003-2453-5.
6. **Rajendran, N., Runge, T., Bergman, R.D., and Nepal, P., et al.** (2023), Techno-economic analysis and life cycle assessment of cellulose nanocrystals production from wood pulp, *Bioresource Tech.*, vol. 377, p. 128955. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128955.
7. **Hoynos, C.G., Zuluaga, R., Ganan, P. and Pique, T.M., et al.** (2019), Cellulose nanofibrils extracted from fique fibers as bio-based cement additive, *J. Clean. Prod.*, vol. 235, pp. 1540-1548. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.292.
8. **Tan, T., Santos, S.F., Savastano, H. and Soboyejo, W.O.** (2012), Fracture and resistance-curve behavior in hybrid natural fiber and polypropylene fiber reinforced composites, *J. Mater. Sci.*, vol. 47, pp. 2864-2874. DOI: 10.1007/s10853-011-6116-1.
9. **Razgovorov, P.B., Ignatyev, A.A., Abramov, M.A. and Nagornov, R.S.** (2020), Processing of raw aluminosilicates and subway construction dumps into composite sorbents for purification of water and oil-containing media, *Umnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Constructon]*, vol. 1, no. 1, pp. 10-24 (in Russian). DOI: 10.52957/27821919_2020_1_10
10. **Semenov, V.L. and Korotkikh, D.N.** (2020), Dispersed-reinforced cement composites: state and prospects, *Vestnik stroitel'noj nauki [Construction Science Bulletin]*, no. 2, pp. 45-52 (in Russian) (accessed 10.11.2025).
11. Pat. 2788603 Russian Federation. Wood-gypsum composite / A.V. Erofeev, T.I. Gorokhov, N.S. Kovalev, S.I. Gorokhov; publ. 23.01.2023, Bul. 3. Available at: <https://findpatent.ru/patent/278/2788603.html> (accessed 10.11.2025).



12. **Musorina, T.A., Petrichenko, M.R., Zaborova, D.D., Gamayunova, O.S. and Kukolev, M.I.** (2021), Improving the properties of a concrete composite reinforced with a dry plant additive, *Stroitel'stvo i tekhnosfernaya bezopasnost'* [Construction and man-made safety], vol. 22, no. 74, pp. 57-65 (in Russian).
13. Pat. 2771347 Russian Federation. Method of creating a concrete composite reinforced with dry vegetable supplement / M.I. Kukolev, T.A. Musorina, D.D. Zaborova; publ. 29.04.2022, Bul. 13. Available at: <https://findpatent.ru/patent/277/2771347.html> (accessed 10.11.2025).
14. **Plyichev, V.A., Kolchunov, V.I., Bakaeva, N.V. and Kobeleva, S.A.** (2017), Environmental safety of the use of the textile wastes in the constructions materials industry, *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Tekhnol. Tekstil. Prom.*, vol. 1, no. 367, pp. 194-198 (in Russian).
15. **Nagornov, R.S., Razgovorov, P.B., Smirnova, E.A. and Razgovorova, M.P.** (2015), Comparative analysis of natural aluminosilicates action in relation to attendant ingredients of linseed oil, *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. [ChemChemTech]*, vol. 58, no. 8, pp. 63-66 (in Russian).
16. **Rumyantseva, V.E., Konovalova, V.S., Rumyantsev, E.V., Odintsova, O.I. and Kasiyanenko, N.S.** (2019), The use of of textile industry waste in the production of building composites, *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Tekhnol. Tekstil. Prom.*, vol. 6, no 396, pp. 21-29 (in Russian). DOI: 10.47367/0021-3497_2021_6_21.

Received 27.01.2026

Approved 18.02.2026

Accepted 10.03.2026