



Study on the effect of water-cement ratio on the workability of reed fiber foam concrete

Xianpeng Wang, Haoxuan Yu, Kalinovskaya N.N., Kovshar S.N.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

KEYWORDS

reed fiber;

water-cement ratio;

foam concrete;

Workability;

strength

ABSTRACT

The results of using reed fiber as a fibrous filler for foam concrete are presented. Thus, the workability of a concrete mixture decreases as the amount of fiber increases from 0 to 2%. In the range of fiber content from 2 to 4%, workability increases slightly, after which (at a fiber dosage of 4 to 6%) it decreases again. The maximum compressive and flexural strengths are achieved by adding 3% reed fiber and are 27.96 and 2.16 MPa, respectively. The optimal dosage of reed fiber is 2–3%. Thus, reed fiber is an effective fibrous filler for foam concrete.

Введение

В последние десятилетия глобальная экономика демонстрировала устойчивый рост, который сопровождался активным развитием строительной отрасли. Урбанизация, строительство инфраструктурных объектов и расширение промышленного сектора требовали значительных объемов строительных материалов. Это, в свою очередь, вызвало повышенное потребление природных ресурсов, таких как песок, гравий, известняк и другие минеральные компоненты, используемые для производства строительных материалов. Помимо интенсивного потребления ресурсов, строительная отрасль является одним из крупных потребителей энергии. Производственные процессы, транспортировка материалов, строительство и эксплуатация зданий требуют значительных объемов энергии, большая часть которой все еще производится из ископаемых источников. Это способствует увеличению выбросов парниковых газов, что усиливает проблему глобального изменения климата.

Данное исследование было посвящено изучению влияния водоцементного соотношения (В/Ц) на обрабатываемость пенобетона из тростникового волокна. Как легкий, теплоизоляционный материал с хорошими звукоизглощающими свойствами, пенобетон привлекает

все большее внимание в области строительства. В частности, введение в состав пенобетона камышевых волокон широко изучается благодаря его экологичности и устойчивости. Однако взаимодействие между водопоглощающими свойствами тростниковых волокон и обрабатываемостью бетона изучено недостаточно хорошо. Мы экспериментально исследовали работоспособность, включая текучесть, обрабатываемость и стабильность пенобетона из тростниковых волокон при различных соотношениях воды и цемента. Результаты эксперимента показали, что водоцементное отношение оказывает значительное влияние на обрабатываемость пенобетона из тростникового волокна Phragmites. Высокое водоцементное отношение может способствовать улучшению текучести и заполнимости бетона, но высокое водоцементное отношение может привести к расслоению и снижению стабильности пенобетона. Добавление тростниковых волокон положительно влияет на обрабатываемость бетона, но при этом увеличивает потребность в воде. Результаты данного исследования не только дают важные рекомендации по приготовлению пенобетона на основе тростникового волокна, но и обеспечивают теоретическую основу для понимания

* Corresponding author. E-mail address:wxp-phd@bntu.by

Received date: October 13, 2025; Revised manuscript received date: October 20, 2025; Accepted date: October 22, 2025; Online publication date: October 29, 2025.

Copyright © 2025 the author. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



механизма действия тростникового волокна в бетоне и оптимизации рецептуры бетона. Это имеет большое значение для продвижения применения тростникового волокна в строительных материалах, особенно в области охраны окружающей среды и устойчивого развития.

Стремительное развитие мировой экономики сопровождалось развитием строительной отрасли. Этот рост привел к увеличению потребления природных ресурсов, энергопотребления и образования отходов [1], [2], [3]. В настоящее время основным строительным материалом остается бетон, мировое производство которого достигает 4,4 миллиарда тонн в год. Ожидается, что к 2050 году этот показатель вырастет до 5,5 млрд тонн [4].

За прошлые десятилетия были разработаны различные виды бетона, в частности пенобетон, который является объектом исследования, приведенного в данной статье. Пенобетон представляет собой цементный материал, содержащий воздушные пустоты в растворе. Плотность бетона может варьироваться от 400 до 1600 кг/м³ [8] в зависимости от количества используемой пены. Пенобетон имеет различные применения, такие как наполнитель, теплоизоляция, звукоизоляция, огнезащита и поглощение энергии удара. Однако из-за низкой прочности на сжатие он не часто используется в качестве конструкционного материала. Кроме того, он плохо выдерживает растягивающие нагрузки и склонен к растрескиванию в пластичном и в затвердевшем состоянии. Прочность пенобетона на изгиб и растяжение составляет от 15 до 35 % от прочности на сжатие [9]. Таким образом, наряду с очевидными преимуществами – низкой плотностью и отличными теплоизоляционными свойствами, пенобетон также имеет и недостатки – хрупкость и низкую прочность на изгиб [7]. Недавние исследования показали, что добавление различных типов и пропорций растительных волокон, таких как кукурузная солома, пшеничная солома, конопля и рапсовая солома, может значительно улучшить механические свойства пенобетона, в частности уменьшит усадочные деформации и повысит прочность на растяжение и изгиб [10].

При этом в большинстве современных исследований используются синтетические волокна, которые являются более дорогостоящими [https://www.atlantis-press.com/proceedings/icache-23/125996124]. Поэтому важно найти дешевые и доступные

волокнистые материалы для улучшения свойств пенобетона. Это позволит улучшить характеристики и значительно снизить затраты на производство.

Одним из источников армирующего волокна для пенобетона в Беларуси может служить камыш. Камыш – быстрорастущее растение, распространенное по всему миру, – является возобновляемым ресурсом, имеющим важное экологическое значение. В Беларуси насчитывается около 760 000 акров камышовых полей. Однако ежегодно значительное количество камыша выбрасывается или сжигается как топливо, что оказывает пагубное влияние на местные водоемы и окружающую среду. Камышовая солома не только долговечна, но и обладает отличными теплоизоляционными свойствами, что делает ее идеальным легким изоляционным материалом для использования в строительстве. При этом современные исследования показывают, что она используется в основном для производства олигосахаридов, глюкозы, ксилозы, L-молочной кислоты и биоэтанола из левулиновой кислоты [11]. Таким образом, несмотря на свою потенциальную ценность, потенциал камышовой соломы не полностью реализован. Следует отметить, что идея использовать камыш в производстве бетона не нова и описана в патенте 1958 года [https://patents.su/2-115415-sposob-izgotovleniya-izdelij-iz-kamyshebetona.html]. При этом камыш использовался в качестве волокон, которые заливались растворной смесью и обеспечивали снижение плотности, улучшили звуко- и теплоизолирующие свойства изделия.

Данное исследование посвящено влиянию тростникового волокна на удобоукладываемость и прочность бетона на сжатие и изгиб.

1. Материалы и методы

1.1. Материалы

В исследовании использовались следующие материалы: цемент СЕМ I R 42.5 производства «Красносельскстройматериалы», крупный заполнитель – природный гравий (фракция 5...10 мм), мелкий заполнитель – природный речной песок (Минский карьер, $M_k = 2,3$), лабораторная водопроводная вода, тростниковое волокно (20-30 мм длиной, 3-5 мм шириной). Содержание волокна принималось от 0



(контрольный состав) до 6 %. Составы пенобетона приведены в таблице 1.(Приложение 1.)

1.2. Методы испытаний

Для определения осевого сжатия стандартных кубических образцов с проектным размером 100×100×100 мм и образцов из фибробетона был использован гидравлический пресс DS2-1000N. Для определения прочности на изгиб использовалась трехточечная рама GB/T3722, испытуемые образцы имели размеры 40×40×160.

Для определения удобоукладываемости использовался конус Абрамса. Бетон укладывался в три приема, каждый слой уплотнялся 25 ударами штыковки, затем поверхность заглаживалась [12]. Определялось влияние на удобоукладываемость как размоченного, влажного тростникового волокна, так и неразмоченного, сухого тростникового волокна. Целевая удобоукладываемость составляла 150-180 мм.

2. Результаты

Результаты определения удобоукладываемости, прочности на сжатие и изгиб пенобетона приведены на рисунках 1, 2 ,3 и 4.

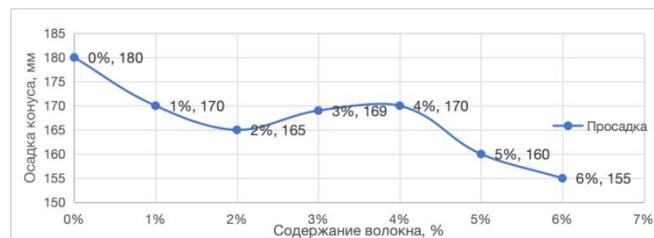


Рисунок 1 – Удобоукладываемость пенобетона с различным содержанием тростникового волокна

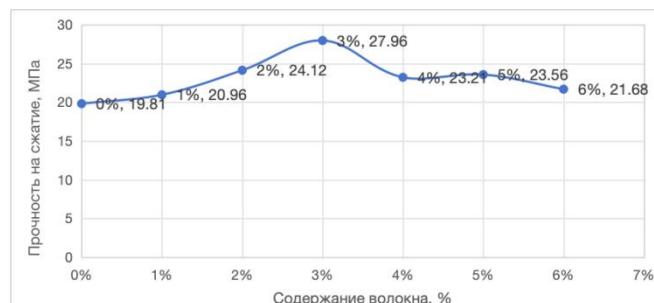


Рисунок 2 – Прочность на сжатие пенобетона с различным содержанием тростникового волокна

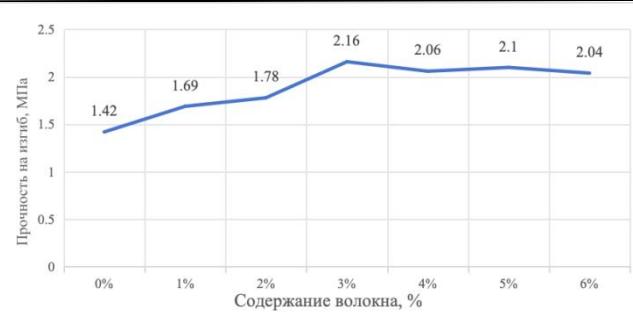


Рисунок 3 – Прочность на изгиб пенобетона с различным содержанием тростникового волокна

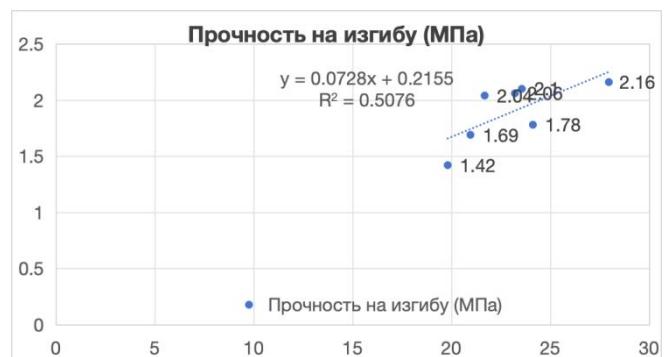


Рисунок 4, диаграмма зависимости линейной проверки сопротивления бетона изгибу и сопротивлению сжатию.[Прочность на изгиби (Мпа)](Приложение2.)

Проанализировав полученные результаты можно сделать следующие выводы:

1. Удобоукладываемость бетонной смеси снижается при увеличении количества волокна с 0 до 2 %. В диапазоне содержания волокна с 2 до 4 % удобоукладываемость незначительно увеличивается, после чего (при дозировке волокна 4...6 %) снова снижается. Таким образом, оптимальной дозировкой тростникового волокна с точки зрения удобоукладываемости является дозировка 2...4 %. Снижение удобоукладываемости должно компенсироваться дополнительным количеством воды, что видно по составам бетона, приведенным в таблице 1 (градиент ввода воды составлял 50 мл). Следует отметить, что все бетонные смеси имели хорошую обрабатываемость.

2. Добавление тростникового волокна улучшает механические свойства пенобетона. Так максимальная прочность при сжатии и изгибе достигается при добавлении 3% волокна камыша и составляет соответственно 27,96 и 2,16 МПа. Рост прочности относительно контрольного состава (без камышевых волокон) составляет 41% для прочности на сжатие и



52% для прочности на изгиб. Таким образом добавление тростникового волокна в состав пенобетона приводит к значительному улучшению его механических свойств. Волокна камыша, равномерно распределяясь в цементной матрице, выполняют роль «микроармирования», что существенно улучшает механические свойства пенобетона. Одним из ключевых преимуществ добавления камышовых волокон является их способность эффективно поглощать и перераспределять внутренние напряжения, возникающие в процессе твердения и последующей эксплуатации бетона. В процессе затвердевания цементная матрица испытывает различные напряжения из-за усадки и температурных изменений. Камышевые волокна действуют как амортизаторы, поглощая эти напряжения и равномерно распределяя их по всей структуре бетона. Это уменьшает концентрацию напряжений в отдельных точках и предотвращает образование трещин, которые могут привести к разрушению материала. Однако после того, как количество добавленного волокна превышает 3%, из-за чрезмерного количества тростникового волокна во время смешивания бетона легко возникает изгиб, а с другой стороны, напряжения изгиба и сжатия уменьшаются с увеличением количества тростникового волокна; После того, как добавление тростникового волокна превышает 2%, тростниковое волокно имеет определенное водопоглощение, в результате чего исходное количественное соотношение воды и цемента больше не соответствует требованиям удобоукладываемости при смешивании бетона, и общая удобоукладываемость становится плохой. трудно пластифицируется, поэтому в эксперименте мы изменили исходное водоцементное соотношение. Результаты эксперимента показали, что бетон показал лучшее состояние смешивания и хорошую удобоукладываемость.

3. Анализируя Таблицу 2 и Рисунок 3, мы обнаружили, что осадка тростникового пенобетона напрямую связана с количеством добавленного волокна. Чем меньше волокна, тем больше осадка и тем лучше удобоукладываемость. обеспечить гибкость, которая приведет к меньшему спаду и еще большей неоднородности. В целом, добавление тростникового волокна в количестве 3% дает наилучший эффект и лучшую удобоукладываемость.

4. Анализируя рисунок 4, мы используем феноменологический метод для моделирования коэффициента взаимосвязи механики бетона. Благодаря регрессионному анализу $R^2 = 0,5076$, и общая зависимость является линейной. Точки разброса равномерно распределены по обе стороны линии регрессии. видно, что измерения экспериментальных данных верны, что доказывает, что приведенные выше экспериментальные данные действительно верны.

Заключение

1. Экспериментальные исследования показали, что добавление тростникового волокна влияет на удобоукладываемость и прочностные свойства пенобетона. Удобоукладываемость бетонной смеси снижается при увеличении количества волокна с 0 до 2 %. В диапазоне содержания волокна с 2 до 4 % удобоукладываемость незначительно увеличивается, после чего (при дозировке волокна 4...6 %) снова снижается. Максимальная прочность при сжатии и изгибе достигается при добавлении 3% волокна камыша и составляет соответственно 27,96 и 2,16 МПа. Рост прочности относительно контрольного состава (без камышевых волокон) составляет 41% для прочности на сжатие и 52% для прочности на изгиб.

2. Оптимальная дозировка тростникового волокна составляет 2...3 %. Добавление волокна в большей дозировке требует увеличения водоцементного отношения пенобетона для оптимизации удобоукладываемости, что отрицательно влияет на прочностные характеристики. Таким образом, водоцементное отношение должно регулироваться в зависимости от количества добавляемой фибры для достижения максимальной прочности.

3. На основании полученных результатов можно сделать вывод о пригодности камышовой фибры для использования в пенобетоне для улучшения его механических характеристик. Добавление тростникового волокна в пенобетон представляет собой перспективное направление для улучшения его механических свойств и расширения областей применения. Использование этого материала способствует созданию более прочных, устойчивых и экологически безопасных строительных решений.

Наконец, мы сделали ставку на такие характеристики



пенобетона, как низкая плотность и хорошая теплоизоляция, которые дают ему уникальные преимущества в строительстве. Соотношение воды и цемента может регулировать структуру и пористость пены, тем самым влияя на теплоизоляционные характеристики и структурную прочность бетона, а добавление растительных волокон может полностью устранить эти дефекты и дополнить характеристики пенобетона. Поэтому подходящее соотношение воды и цемента имеет решающее значение для обеспечения оптимального баланса удобоукладываемости, прочности и долговечности пенобетона с тростниковым волокном. Также есть надежда, что это исследование предоставит важную теоретическую основу и практическое руководство по применению материалов этого типа в строительной сфере.

Литература

1. Osman Gencel, Oguzhan Yavuz Bayraktar, Gokhan Kaplan, Oguz Arslan, Mehrab Nodehi, Ahmet Benli, Aliakbar Gholampour, Togay Ozbakkaloglu, Lightweight foam concrete containing expanded perlite and glass sand: Physicomechanical, durability, and insulation properties, ISSN 0950-0618, Constr. Build. Mater. Volume 320 (2022), 126187, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126187>.
2. Syed Nasir Shah, Kim Hung Mo, Soon Poh Yap, Jian Yang, Tung-Chai Ling, Lightweight foamed concrete as a promising avenue for incorporating waste materials: a review, Resour., Conserv. Recycl. Volume 164 (2021), 105103, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105103>.
3. Jan Bubeník, Jiří Zach, Klára Křížová, Vítězslav Novák, Martin Sedlmajer, Nikolážízková, Behavior and properties of ultra-lightweight concrete with foamed glass aggregate and cellulose fibres under high temperature loading, ISSN 2352- 7102, J. Build. Eng. Volume 72 (2023), 106677, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106677>.
4. Muhammad Ahmad, Rashid Hameed, Shaban Shahzad, Muazzam Ghous Sohail, Performance evaluation of loadbearing compressed fully recycled aggregate concrete bricks, Structures Volume 55 (2023) 1235–1249, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.06.098>.
5. Haibao Liu, Qiuyi Li, Peihan Wang, Assessment of the engineering properties and economic advantage of recycled aggregate concrete developed from waste clay bricks and coconut shells, J. Build. Eng. Volume 68 (2023), 106071, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106071>.
6. Haiizi Wang, Xinming Pan, Shabin Zhang, Spatial autocorrelation, influencing factors and temporal distribution of the construction and demolition waste disposal industry, Waste Manag. Volume 127 (2021) 158–167, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.025>.
7. Sudipta Ghosh, Amiya K. Samanta, Utilization of recycled refractory brick as fine aggregate on various properties of sustainable concrete, Mater. Today.: Proc. (2023), <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.712>.
8. Ramamurthy, K.; Kunhanandan Nambiar, E.K.; Indu Siva Ranjani, G. A classification of studies on properties of foam concrete. Cem. Compos. 2009, 31, 388–396.
9. Mugahed Amran, Y.H.; Farzadnia, N.; Abang Ali, A.A. Properties and applications of foamed concrete; a review. Constr. Build. Mater. 2015, 101, 990–1005.
10. Song, P.S.; Hwang, S.; Sheu, B.C. Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes. Cem. Concr. Res. 2005, 35, 1546–1550. [CrossRef]
11. Yu H, Wang X, Nikolaevich K S, et al. Mechanical properties and environmental protection analysis of non-metallic fibers[C]//2023 9th International Conference on Architectural, Civil and Hydraulic Engineering (ICACHE 2023). Atlantis Press, 2023: 830-842.
12. X. Cai, K. Wu, W. Huang, J. Yu, H. Yu, Application of recycled concrete aggregates and crushed bricks on permeable concrete road base, Road. Mater. Pavem. Des. 22 (2021) 2181–2196, <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1742193>.
13. Wang X, Yu H, Sadovskaya E, et al. Comparative Study on the Applicability of Non-Metallic Nanofibers and Reed Fibers in Concrete[J]. Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки, 2024, 36(1): 14-20.
14. Li, B. (2025, August). High-precision photovoltaic potential prediction using a multi-factor deep residual network. In 2025 6th International Conference on Clean Energy and Electric Power Engineering (ICCEPE) (pp. 300-303). IEEE.
15. Gu, Y., Pan, D., Yang, N., & Wang, X. (2025). Research on Storage and Transportation Cost Control and Technological Breakthroughs from the Perspective of Global Hydrogen Energy Development. Journal of Sustainable Built Environment, 2(5), 33-38.



Исследование влияния водоцементного соотношения на удобоукладываемость тростникового фибробетона

Ван Сяньпэн, Юй Хаосюань, Калиновская Н.Н., Ковшар С. Н.

Строительные материалы и технология строительства, Белорусский национальный технический университет, 220013, Минск, Беларусь

Представлены результаты использования камышовой фибры в качестве волокнистого наполнителя для пенобетона. Так удобоукладываемость бетонной смеси снижается при увеличении количества волокна с 0 до 2 %. В диапазоне содержания волокна с 2 до 4 % удобоукладываемость незначительно увеличивается, после чего (при дозировке волокна 4...6 %) снова снижается. Максимальная прочность при сжатии и изгибе достигается при добавлении 3% волокна камыша и составляет соответственно 27,96 и 2,16 МПа. Оптимальная дозировка тростникового волокна составляет 2...3 %. Таким образом тростниковое волокно является эффективным волокнистым наполнителем для пенобетона.

Ключевые слова: тростниковое волокно, водоцементное отношение, пенобетон, прочность, удобоукладываемость

**(Приложение 1.)**

Таблица 1 – Составы пенобетона

Количество камыша, %	В/Ц	Количество кг/м ³						
		Цемент	Вода	Песок	Гравий	Тростниковые волокна	Пенообразующее вещество	Супер-пластификатор
0%	0.45	500	250	600	900	0	0.036	0.005
1%	0.45	500	250	600	900	0.005	0.036	0.005
2%	0.45	500	250	600	900	0.01	0.036	0.005
3%	0.50	500	300	600	900	0.015	0.036	0.005
4%	0.50	500	300	600	900	0.02	0.036	0.005
5%	0.55	500	350	600	900	0.025	0.036	0.005
6%	0.55	500	350	600	900	0.03	0.036	0.005

(Приложение 2.)

Таблица 2: Просадка бетона

серийный номер	Вода (мл)	Процентное содержание клетчатки	Просадка
1	250	0%	180
2	250	1%	170
3	250	2%	165
4	300	3%	169
5	300	4%	170
6	350	5%	160
7	350	6%	155