

**ОПТИМИЗАЦИЯ ДОЗИРОВКИ И РЕЖИМА МИНЕРАЛИЗАЦИИ
ВОЛОКНИСТОГО ОТХОДА КОРНЯ СОЛОДКИ В НЕАВТОКЛАВНОМ
ГАЗОБЕТОНЕ D600**

Цой Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор,
Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент,
Республика Узбекистан, 100167 (E-mail: volodya_tsoy@inbox.ru, +998909521576)

Эшбеков Шухрат Гадоймуротович ассистент,
Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент,
Республика Узбекистан, 100167, Узбекистан. (E-mail:
sh.eshbekov77@gmail.com, +998906202264)

Жумагелдиев Азиз Олимович, магистрант,
Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент,
Республика Узбекистан, 100167, (E-mail: jumageldiyevaziz@gmail.com,
+998914077060)

Тургаев Жанбул Адилбаевич,
доктор философии (PhD) по техническим наукам, доцент,
Каракалпакский государственный университет, Республика Каракалпакстан,
Республика Узбекистан, 230100, (E-mail: jambulturgaev46@gmail.com)

Аннотация: В статье представлено продолжение исследования неавтоклавного газобетона D600, армированного переработанным волокнистым отходом корня солодки. В отличие от первой части исследования, где была доказана эффективность очищенного и известково-силикатно минерализованного волокна по сравнению с необработанным и только промытым отходом, настоящая работа направлена на уточнение рациональной дозировки волокна и режима его минерализации. Рассмотрены модельно-экспериментальные варианты с дозировкой минерализованного волокна 0,0; 2,0; 3,5; 5,0 и 7,0 кг/м³, а также различные режимы известково-силикатной обработки. Установлено, что наиболее сбалансированный комплекс свойств достигается при дозировке 3,5 кг/м³ и режиме минерализации, включающем известковую обработку Ca(OH)₂ 2,0 % и силикатную обработку раствором жидкого стекла концентрацией около 8,5 % в течение 10 минут. При указанном варианте прочность при сжатии в возрасте 28 суток составляет 3,05 МПа, прочность при изгибе - 0,72 МПа, водопоглощение - 36 %, усадка при высыхании - 0,52 мм/м. Увеличение

дозировки до 7,0 кг/м³ ухудшает устойчивость газомассы и снижает прочность, что связано с ростом водопотребности и риском нарушения равномерности пористой структуры. Полученные результаты позволяют обосновать технологический интервал применения минерализованного солодкового волокна в неавтоклавном газобетоне плотностной группы D600.

Ключевые слова: неавтоклавный газобетон, корень солодки, растительное волокно, минерализация, дозировка волокна, известково-силикатная обработка, водопоглощение, усадка, прочность при изгибе.

1. Введение

Развитие технологии неавтоклавного газобетона связано с необходимостью получения материалов с пониженной средней плотностью, достаточной прочностью и устойчивой пористой структурой без применения автоклавной обработки. Такой подход особенно важен для малых и средних производств стеновых блоков, где стоимость оборудования, энергопотребление и доступность местного сырья являются определяющими факторами конкурентоспособности продукции.

Одним из эффективных путей повышения эксплуатационных свойств ячеистых бетонов является дисперсное армирование межпоровых перегородок. Волокнистые добавки препятствуют развитию усадочных микротрещин, повышают сопротивление изгибу и стабилизируют структуру материала на ранних стадиях твердения. Однако при использовании растительных отходов возникает проблема химической совместимости органического волокна с цементно-известковой средой. Водорастворимые сахара, фенольные соединения, сапонины и органические кислоты могут замедлять гидратацию цемента, нарушать вспучивание газобетонной массы и ухудшать прочность материала.

В первой части исследования было показано, что необработанный отход корня солодки снижает прочность неавтоклавного газобетона, тогда как горячая

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-06**

промывка и последующая известково-силикатная минерализация позволяют получить устойчивую пористую структуру и повысить прочностные показатели. Наиболее эффективный заявляемый состав НГБ-3 содержал 3,5 кг/м³ очищенного и минерализованного волокна и обеспечивал прочность при сжатии 3,05 МПа в возрасте 28 суток.

Вместе с тем для практического внедрения такого состава недостаточно подтвердить сам факт положительного влияния минерализованного волокна. Необходимо определить рациональный интервал дозировки волокна и уточнить режим минерализации, при котором достигается баланс между прочностью, трещиностойкостью, водопоглощением, усадкой и устойчивостью газообразования.

Цель настоящей работы - продолжить исследование неавтоклавного газобетона D600 с волокнистым отходом корня солодки и обосновать рациональную дозировку минерализованного волокна и режим его известково-силикатной обработки.

2. Материалы и методика продолженного исследования

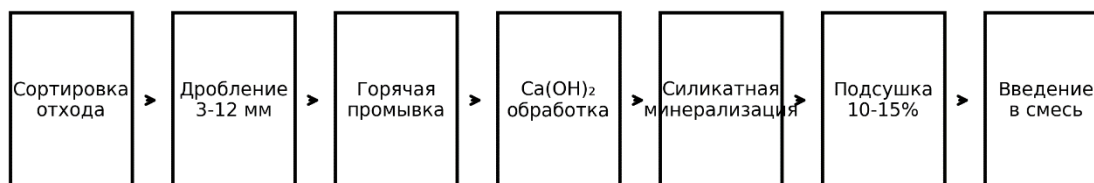
Базовый состав неавтоклавного газобетона включал портландцемент М500, гидратную известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$, тонкомолотый кварцевый песок, золу-унос или тонкомолотый доменный шлак, микрокремнезем, строительный гипс, поликарбоксилатный суперпластификатор, алюминиевую пудру и воду. В качестве армирующего компонента использовался волокнистый отход корня солодки после предварительной подготовки.

Подготовка волокна включала последовательные стадии сортировки, дробления, горячей водной промывки, известковой обработки, силикатной минерализации и подсушки. Логика технологической подготовки показана на рисунке 1.

В качестве исходной базы использованы результаты протокольной серии НГБ-0 - НГБ-3, где сравнивались контрольный состав без волокна, состав с необработанным отходом, состав с горячепромытым волокном и состав с очищенным известково-силикатно минерализованным волокном. На втором этапе исследование было продолжено в двух направлениях: изменение дозировки минерализованного волокна и изменение режима его минерализации.

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-06**

Технологическая схема подготовки волокнистого отхода корня солодки



Цель подготовки: удаление водорастворимых ингибиторов и формирование минеральной оболочки на волокне

Рисунок 1 - Технологическая схема подготовки волокнистого отхода корня солодки

Для оценки влияния дозировки волокна рассмотрены составы с содержанием минерализованного волокна 0,0; 2,0; 3,5; 5,0 и 7,0 кг/м³. Водосодержание корректировалось с учетом остаточной влажности волокна и сохранения требуемой пластично-вязкой консистенции газобетонной массы. Газообразующая добавка вводилась в последнюю очередь, после предварительного равномерного распределения волокна в смеси.

Таблица 1 - Варианты дозировки минерализованного волокна в газобетоне D600

Показ.	СД-0	СД-2,0	СД-3,5	СД-5,0	СД-7,0
Волокно, кг/м ³	0,0	2,0	3,5	5,0	7,0
Состояние волокна	без волокна	минерализованное	минерализованное	минерализованное	минерализованное
Вода, л/м ³	250	253	255	259	265
Плотность, кг/м ³	604	602	606	608	611
Осадка, мм	5	4	4	6	12
Рсж, 28 сут, МПа	2,08	2,72	3,05	2,88	2,20
Ризг, 28 сут, МПа	0,44	0,62	0,72	0,70	0,55
Водопогл., %	44	39	36	37	43
Усадка, мм/м	0,78	0,60	0,52	0,55	0,68

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-06**

Для уточнения режима поверхностной подготовки волокна рассмотрены пять вариантов: горячая промывка без минерализации, известковая обработка, умеренная известково-силикатная минерализация, рациональная известково-силикатная минерализация и усиленная силикатная обработка. При сравнении режимов дозировка волокна принималась равной 3,5 кг/м³, поскольку данный уровень в исходной серии обеспечил максимальный комплексный эффект.

Таблица 2 - Сравнение режимов минерализации волокнистого отхода корня солодки

Показ.	PM-0	PM-1	PM-2	PM-3	PM-4
Режим подготовки	промывка	Ca(OH) ₂ 1,5%; 25 мин	Ca(OH) ₂ 2,0% + силикат 7%; 8 мин	Ca(OH) ₂ 2,0% + силикат 8,5%; 10 мин	Ca(OH) ₂ 2,5% + силикат 12%; 15 мин
Рсж28, МПа	2,05	2,58	2,88	3,05	2,74
Ризг28, МПа	0,49	0,61	0,68	0,72	0,66
Водопогл., %	43	39	37	36	38
Усадка, мм/м	0,68	0,59	0,55	0,52	0,57
Задержка, мин	35-45	15-20	5-15	0-10	10-25
Оценка	эффект ограничен	улучшена контактная зона	стабильная поризация	рациональный режим	вероятен избыток солей

Для комплексной оценки использован интегральный показатель качества К, учитывающий прочность при сжатии, прочность при изгибе, водопоглощение и усадку при высыхании. Чем выше значение К, тем более сбалансированным является состав. Показатель применялся не как нормативный критерий, а как инструмент сравнительной технологической оптимизации внутри одной плотностной группы D600.

3. Результаты и их анализ

3.1. Влияние дозировки минерализованного волокна на прочностные свойства

Результаты показывают, что увеличение дозировки минерализованного волокна до определенного предела положительно влияет на прочность неавтоклавного газобетона. При введении $2,0 \text{ кг/м}^3$ волокна прочность при сжатии в возрасте 28 суток увеличивается с 2,08 до 2,72 МПа, а прочность при изгибе - с 0,44 до 0,62 МПа. Максимальные значения достигаются при дозировке $3,5 \text{ кг/м}^3$: прочность при сжатии составляет 3,05 МПа, а прочность при изгибе - 0,72 МПа.

Дальнейшее увеличение дозировки до $5,0 \text{ кг/м}^3$ не приводит к росту прочности. Прочность при сжатии снижается до 2,88 МПа, хотя прочность при изгибе остается сравнительно высокой - 0,70 МПа. При дозировке $7,0 \text{ кг/м}^3$ наблюдается более выраженное снижение прочности до 2,20 МПа, что указывает на нарушение баланса между армирующим эффектом и технологической устойчивостью газобетонной массы.

Полученная зависимость имеет экстремальный характер. На начальном участке волокно выполняет функцию микроармирования межпоровых перегородок и повышает сопротивление развитию микротрещин. После достижения оптимального содержания избыток волокна увеличивает водопотребность, затрудняет равномерное распределение газовых пор и повышает риск образования волокнистых скоплений. Поэтому рациональная дозировка должна определяться не только по максимальной прочности, но и по устойчивости газомассы и водопоглощению.

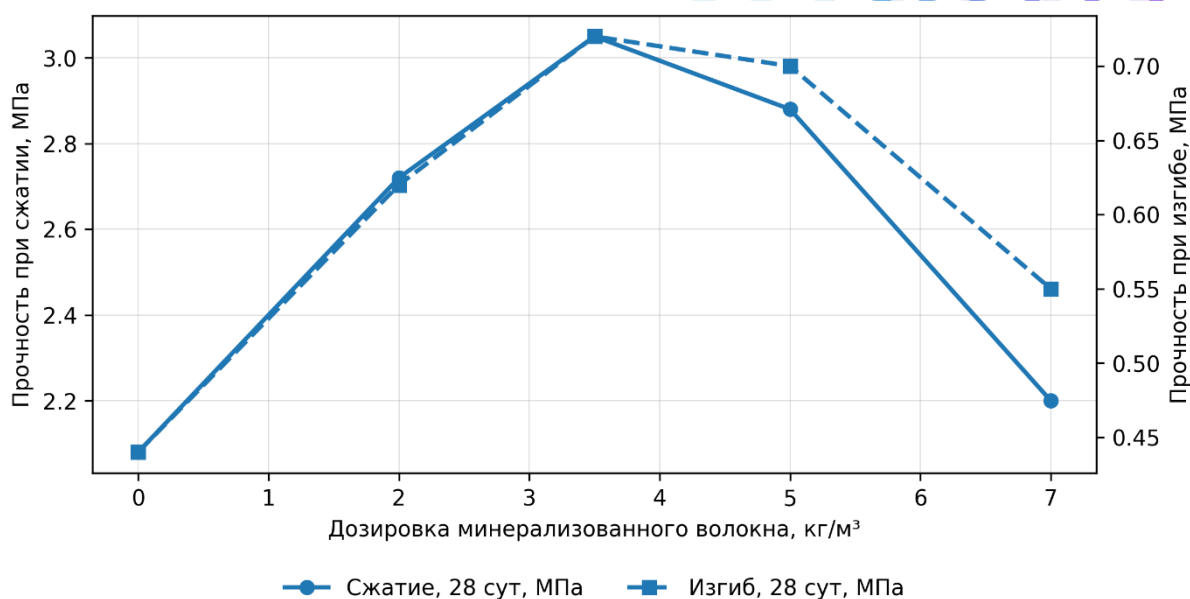


Рисунок 2 - Влияние дозировки минерализованного солодового волокна на прочность газобетона D600

3.2. Влияние дозировки на водопоглощение и усадку

Введение минерализованного волокна снижает водопоглощение и усадку относительно контрольного состава. При дозировке 3,5 кг/м³ водопоглощение уменьшается с 44 до 36 %, а усадка при высыхании - с 0,78 до 0,52 мм/м. Данный эффект объясняется повышением трещиностойкости межпоровых перегородок и улучшением контактной зоны между волокном и цементно-силикатной матрицей.

При дозировке 5,0 кг/м³ показатели остаются приемлемыми, однако тенденция к ухудшению уже проявляется: водопоглощение повышается до 37 %, а усадка - до 0,55 мм/м. При 7,0 кг/м³ водопоглощение возрастает до 43 %, а усадка - до 0,68 мм/м. Это подтверждает, что избыток растительного волокна даже после минерализации может нарушать плотность межпоровых перегородок и увеличивать долю дефектных капиллярных участков.

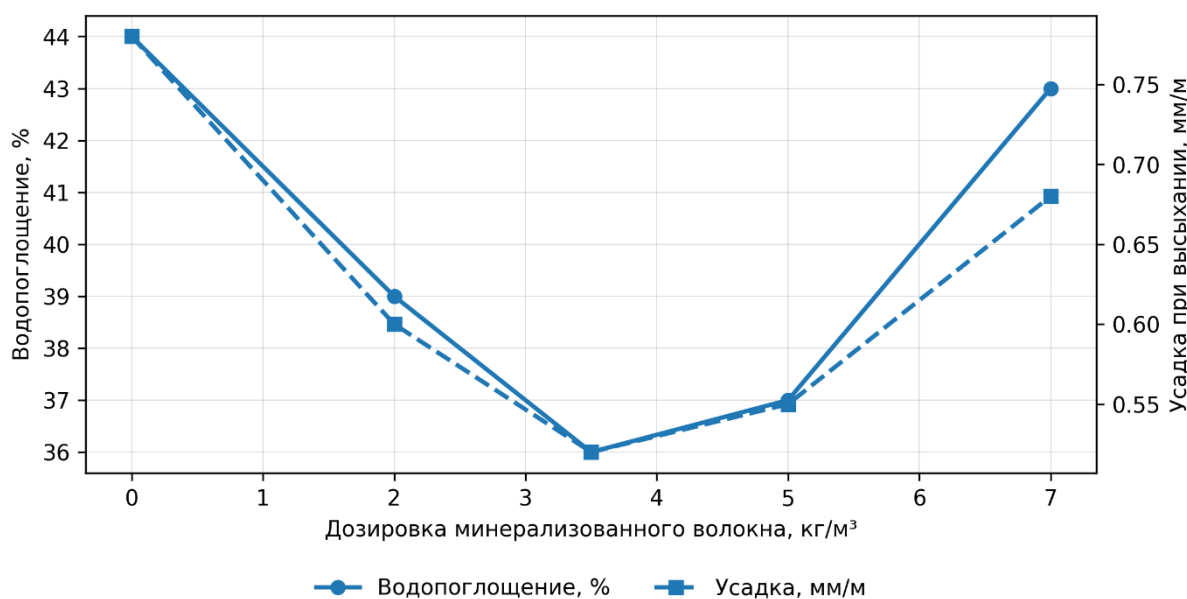


Рисунок 3 - Влияние дозировки минерализованного волокна на водопоглощение и усадку

3.3. Влияние режима минерализации волокна

Сравнение режимов подготовки показывает, что горячая промывка является необходимой, но недостаточной операцией. Она снижает количество водорастворимых органических ингибиторов, однако не обеспечивает полноценного сцепления волокна с цементно-известковой матрицей.

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-06**

Известковая обработка дополнительно улучшает химическую совместимость поверхности волокна, а силикатная минерализация формирует тонкую минеральную оболочку, выполняющую роль переходной зоны.

Рациональным оказался режим РМ-3, предусматривающий обработку волокна суспензией $\text{Ca}(\text{OH})_2$ концентрацией около 2,0 % и последующую обработку разбавленным раствором жидкого стекла концентрацией около 8,5 % в течение 10 минут. При этом режиме достигаются максимальная прочность при сжатии и изгибе, минимальное водопоглощение и наименьшая усадка среди рассмотренных вариантов.

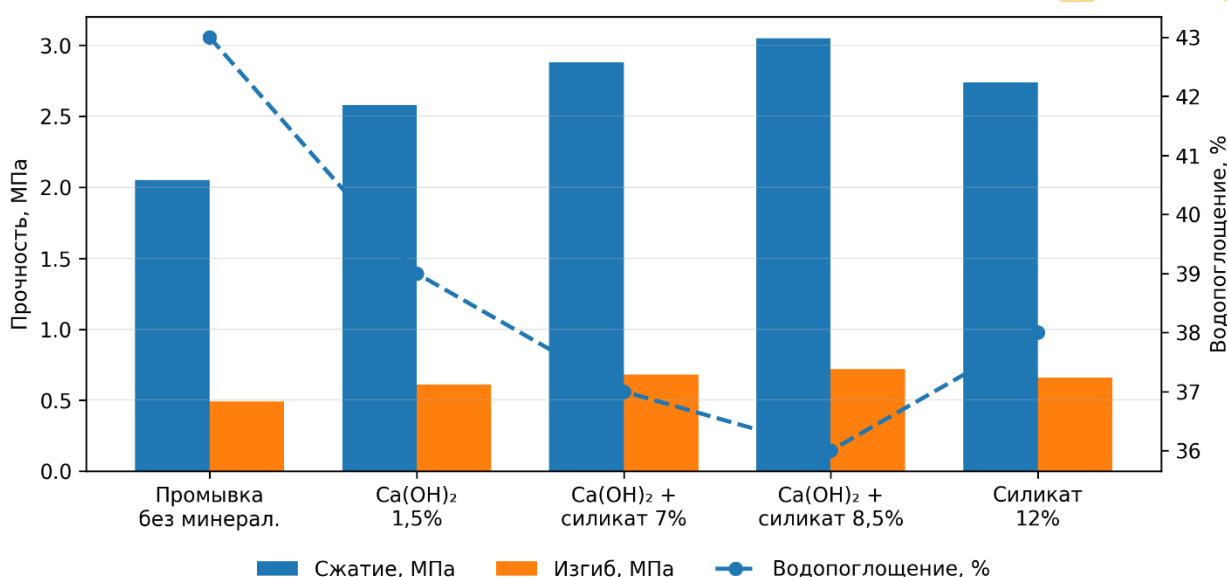


Рисунок 4 - Влияние режима минерализации волокна на прочность и водопоглощение газобетона

Усиление силикатной обработки до 12 % и увеличение продолжительности до 15 минут не повышают качество материала. Напротив, прочность снижается, а водопоглощение и усадка несколько увеличиваются. Вероятной причиной является избыток растворимых силикатов и повышение солевого фона на поверхности волокна, что может нарушать раннее структурообразование и равномерность газообразования.

3.4. Комплексная оценка рационального состава

Для практического выбора состава важен не один отдельный показатель, а совокупность свойств. Состав с $3,5 \text{ кг/м}^3$ минерализованного волокна показывает наиболее высокий интегральный показатель качества. Он сочетает максимальную прочность при сжатии и изгибе, минимальное водопоглощение, минимальную усадку и устойчивую пористую структуру.

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-06**

Таким образом, технологический оптимум не совпадает с максимальным количеством армирующего компонента. Для неавтоклавного газобетона D600 рациональная дозировка минерализованного волокна корня солодки находится в интервале 2,0-5,0 кг/м³, а наиболее эффективным значением для исследуемого состава является 3,5 кг/м³. При этом рабочий диапазон должен уточняться с учетом фактической влажности волокна, дисперсности, продолжительности перемешивания и требуемой плотности изделия.

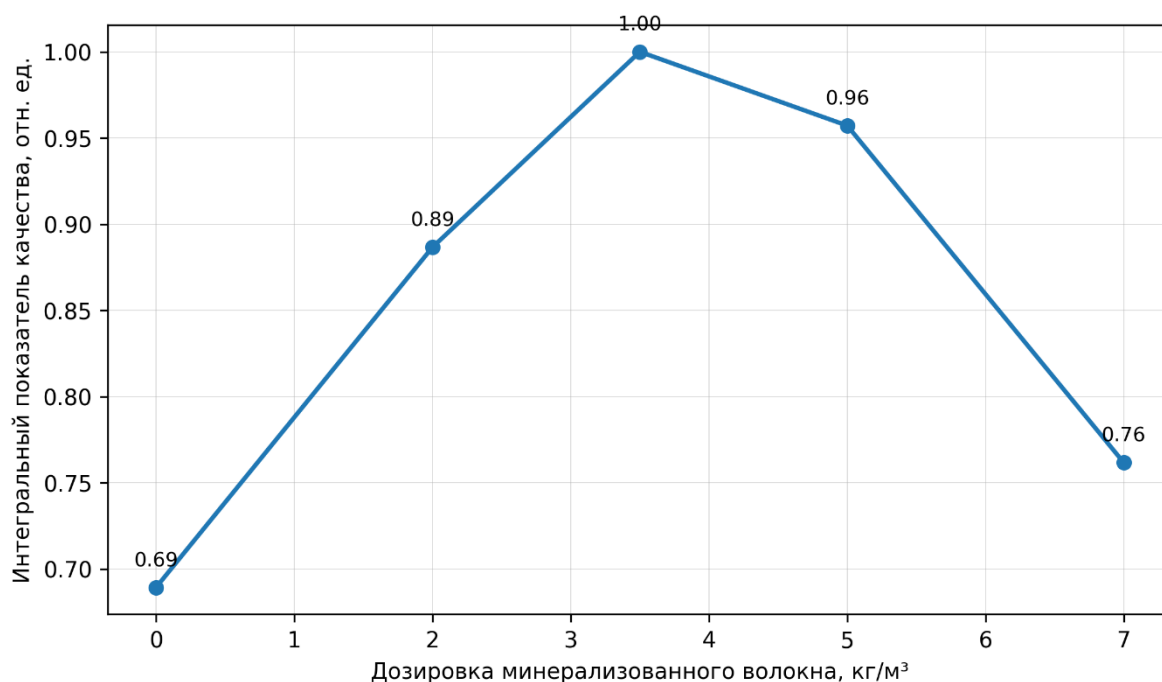


Рисунок 5 - Интегральная оценка качества газобетона в зависимости от дозировки волокна

4. Предполагаемый механизм улучшения свойств

Механизм повышения эксплуатационных свойств газобетона при использовании минерализованного волокна связан с формированием переходной органоминеральной зоны. Горячая промывка удаляет основную часть растворимых ингибиторов твердения, известковая обработка насыщает поверхность волокна кальцием, а силикатная обработка способствует образованию тонкого кальций-силикатного слоя. В результате растительное волокно перестает работать как инертная или вредная органическая примесь и превращается в функциональный микроармирующий элемент.

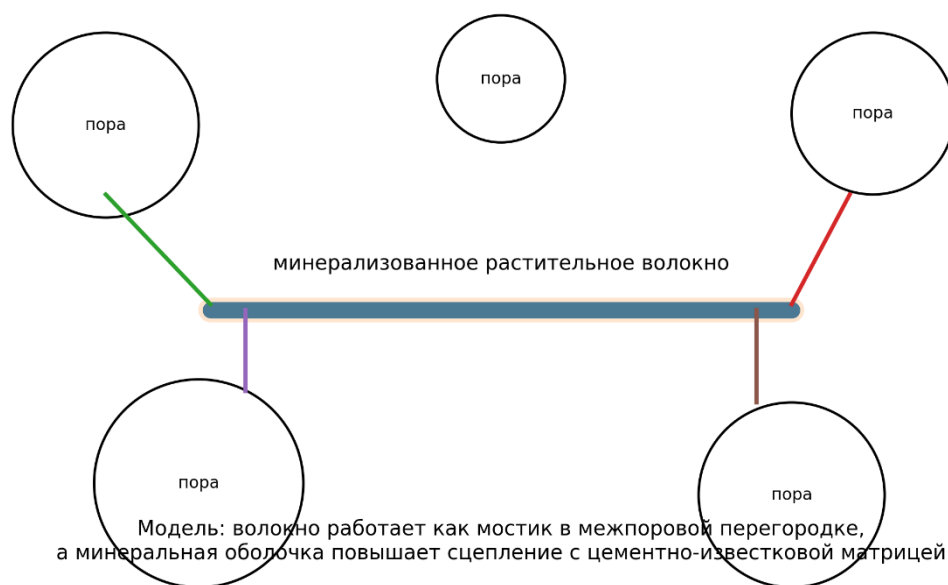


Рисунок 6 - Модель работы минерализованного волокна в межпоровой перегородке газобетона

В межпоровых перегородках такое волокно выполняет роль мостика, ограничивающего раскрытие микротрещин при усадке и изгибающих нагрузках. Одновременно минеральная оболочка снижает водопоглощение самого волокна и повышает его сцепление с цементно-известковой матрицей. Это объясняет одновременное повышение прочности при изгибе, снижение усадки и уменьшение водопоглощения в рациональном составе.

При избыточной дозировке волокна положительный эффект ослабевает. Большое количество волокон увеличивает внутреннюю поверхность, повышает потребность в воде, ухудшает реологию смеси и может препятствовать равномерному расширению газобетонной массы. Поэтому для ячеистых бетонов с алюминиевым газообразованием особенно важно соблюдать ограниченную дозировку волокна и вводить его до газообразующей добавки, обеспечивая предварительное равномерное распределение в жидкой фазе.

5. Технологические рекомендации

На основании выполненного продолжения исследования для производства неавтоклавного газобетона D600 с волокнистым отходом корня солодки рекомендуется следующий технологический подход:

- использовать только очищенное волокно после горячей водной промывки; прямое введение необработанного отхода не рекомендуется;

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-06**

- проводить известковую обработку волокна суспензией $\text{Ca}(\text{OH})_2$ концентрацией 1,5-2,5 % в течение 25-40 минут;
- применять мягкую силикатную минерализацию разбавленным раствором жидкого стекла концентрацией 7-10 % в течение 8-12 минут;
- поддерживать остаточную влажность волокна на уровне 10-15 % и учитывать ее при корректировке воды затворения;
- вводить волокно в смесь предварительно диспергированным в части воды затворения с суперпластификатором;
- добавлять алюминиевую пудру или пасту только после равномерного распределения волокнистой суспензии;
- принимать рациональную дозировку минерализованного волокна 3,5 кг/м³, а рабочий технологический интервал - 2,0-5,0 кг/м³.

6. Выводы

1. Продолженное исследование подтвердило, что эффективность растительного волокна в неавтоклавном газобетоне определяется не только фактом его введения, но и дозировкой, степенью очистки и режимом известково-силикатной минерализации.
2. Рациональная дозировка минерализованного волокнистого отхода корня солодки для исследуемого газобетона D600 составляет 3,5 кг/м³. При этом достигаются прочность при сжатии 3,05 МПа, прочность при изгибе 0,72 МПа, водопоглощение 36 % и усадка 0,52 мм/м.
3. Увеличение дозировки волокна до 7,0 кг/м³ ухудшает устойчивость газобетонной массы, повышает осадку после максимального подъема и снижает прочность, что связано с ростом водопотребности и нарушением равномерности пористой структуры.
4. Наиболее эффективным режимом подготовки волокна является сочетание известковой обработки $\text{Ca}(\text{OH})_2$ около 2,0 % и мягкой силикатной минерализации раствором жидкого стекла концентрацией около 8,5 % в течение 10 минут.
5. Предложенный технологический подход позволяет использовать отход переработки корня солодки как местный ресурсный компонент для повышения трещиностойкости и эксплуатационной устойчивости неавтоклавногo газобетона.

**FAN, TA'LIM, TEXNOLOGIYA VA ISHLAB CHIQARISH
INTEGRATSIYASI ASOSIDA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI
RESPUBLIKA ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
VOLUME-3, ISSUE-06**

Список литературы

1. RU2616303C1. Состав сырьевой смеси для изготовления неавтоклавного газобетона.
2. RU2276121C1. Состав смеси для изготовления неавтоклавного газобетона.
3. RU2379262C1. Состав для получения неавтоклавного газобетона и способ его приготовления.
4. ГОСТ 25485. Бетоны ячеистые. Общие технические условия.
5. ГОСТ 10180. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
6. ГОСТ 12730.1. Бетоны. Методы определения плотности.
7. ГОСТ 12730.3. Бетоны. Метод определения водопоглощения.
8. Баженов Ю.М. Технология бетона. - М.: Издательство АСВ, 2011.
9. Горлов Ю.П., Меркин А.П., Устенко А.А. Технология теплоизоляционных материалов. - М.: Стройиздат, 1980.
10. Neville A.M. Properties of Concrete. - London: Pearson Education, 2011.
11. Narayanan N., Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: a review. Cement and Concrete Composites, 2000.
12. Ramamurthy K., Kunhanandan Nambiar E.K., Indu Siva Ranjani G. A classification of studies on properties of foam concrete. Cement and Concrete Composites, 2009.
13. Савин В.И., Розенберг Т.И. Ячеистые бетоны и изделия на их основе. - М.: Стройиздат, 1972.
14. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. Строительные материалы на основе техногенного сырья. - Казань: КГАСУ, 2015.