

УДК 691.327.332:691.542

**НЕАВТОКЛАВНЫЙ ГАЗОБЕТОН D600 С МИНЕРАЛИЗОВАННЫМ
ВОЛОКНИСТЫМ ОТХОДОМ КОРНЯ СОЛОДКИ**

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 рассмотрена возможность получения неавтоклавного газобетона плотностной группы D600 с использованием переработанного волокнистого отхода корня солодки в качестве дисперсного армирующего компонента. Актуальность исследования связана с необходимостью расширения сырьевой базы для производства ячеистых бетонов, повышения трещиностойкости межпоровых перегородок и вовлечения местных растительных отходов в строительное материаловедение. Особое внимание уделено предварительной подготовке органического волокна, включающей горячую водную промывку, известковую обработку и мягкую силикатную минерализацию. Показано, что прямое введение необработанного отхода корня солодки ухудшает структурообразование газобетонной массы, снижает прочность и повышает водопоглощение. Наиболее эффективным является состав с очищенным и известково-силикатно минерализованным волокном в количестве 3,5 кг/м³. Для данного состава средняя плотность составила 606 кг/м³, прочность при сжатии в возрасте 28 суток - 3,05 МПа, прочность при изгибе -

0,72 МПа, водопоглощение - 36 %, усадка при высыхании - 0,52 мм/м. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования минерализованного солодкового волокна как функциональной добавки для повышения эксплуатационных свойств неавтоклавного газобетона.

Ключевые слова: неавтоклавный газобетон, ячеистый бетон, корень солодки, растительное волокно, минерализация, известково-силикатная обработка, прочность, усадка, водопоглощение, дисперсное армирование.

Abstract. The paper presents a non-autoclaved aerated concrete of density class D600 modified with processed fibrous waste of licorice root. The organic fiber was subjected to hot-water washing, lime treatment and mild silicate mineralization to reduce the content of water-soluble inhibitors and to improve compatibility with the cement-lime matrix. The mineralized-fiber composition achieved a 28-day compressive strength of 3.05 МПа, flexural strength of 0.72 МПа, water absorption of 36% and drying shrinkage of 0.52 mm/m at an average density of 606 kg/m³.

Keywords: non-autoclaved aerated concrete, licorice root, plant fiber, mineralization, lime-silicate treatment, compressive strength, shrinkage, water absorption.

Введение

Неавтоклавный газобетон относится к числу перспективных стеновых и теплоизоляционно-конструкционных материалов, так как его производство не требует энергоемкой автоклавной обработки и может быть организовано на сравнительно простом технологическом оборудовании. Вместе с тем при нормальном твердении такой материал часто характеризуется повышенной усадкой, недостаточной прочностью межпоровых перегородок и чувствительностью к нарушениям режима газообразования. Поэтому одним из актуальных направлений совершенствования неавтоклавных ячеистых бетонов является использование дисперсного армирования и активных минеральных компонентов, способных повысить стабильность пористой структуры и эксплуатационную надежность материала.

В традиционных составах для армирования газобетонной массы применяют минеральные, базальтовые, полимерные или техногенные волокнистые добавки [1-3]. Их использование способствует снижению усадочного микротрещинообразования и повышению сопротивления изгибу. Однако в регионах с развитой переработкой растительного сырья образуются значительные объемы волокнистых отходов, которые могут стать дополнительным источником функциональных наполнителей для строительных материалов.

Одним из таких видов сырья является отход переработки корня солодки, содержащий волокнистую часть растительного происхождения. Прямое применение растительных отходов в цементных системах ограничивается наличием водорастворимых органических веществ, сахаров, фенольных соединений и других компонентов, способных замедлять гидратацию цемента и нарушать формирование прочной минеральной матрицы. Поэтому научный интерес представляет не простое введение отхода корня солодки в газобетон, а разработка способа его предварительной подготовки, обеспечивающей совместимость волокна с цементно-известковой средой.

Целью настоящей работы является оценка влияния очищенного и известково-силикатно минерализованного волокнистого отхода корня солодки на физико-механические свойства неавтоклавного газобетона D600.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработать состав неавтоклавного газобетона на цементно-известковом вяжущем с использованием минерализованного волокна корня солодки;
- определить влияние состояния волокна на прочность, водопоглощение, усадку и равномерность пористой структуры;
- сравнить контрольный состав без волокна, состав с необработанным отходом, состав с горячепромытым волокном и заявляемый состав с минерализованным волокном;
- установить рациональный технологический подход к введению растительного волокна в газобетонную смесь.



Рисунок 1 - Технологическая схема подготовки и введения минерализованного волокна корня солодки

Материалы и методы исследования

В качестве основного вяжущего использовали портландцемент М500. Для создания щелочной среды, стабилизации газообразования и участия в формировании цементно-силикатной матрицы применяли гидратную известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Кремнеземистый компонент был представлен тонкомолотым кварцевым песком. В состав также вводили золу-унос или тонкомолотый доменный шлак, микрокремнезем, строительный гипс, поликарбосилатный суперпластификатор, алюминиевую пудру и воду.

Функциональной особенностью исследуемого состава являлось введение волокнистого отхода корня солодки. Для оценки влияния степени подготовки волокна были рассмотрены четыре варианта: НГБ-0 - контрольный газобетон без волокнистого наполнителя; НГБ-1 - газобетон с необработанным отходом корня солодки; НГБ-2 - газобетон с волокном после горячей водной промывки; НГБ-3 - газобетон с очищенным и известково-силикатно минерализованным волокном.

Таблица 1 - Составы опытной серии неавтоклавного газобетона D600, кг/м³

| Компонент | НГБ-0 контроль | НГБ-1 необр. отход | НГБ-2 промытое волокно | НГБ-3 минерализ. волокно |
|--|-------------------|-----------------------|-------------------------------------|--|
| Портландцемент М500 | 290 | 290 | 290 | 290 |
| Гидратная известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Тонкомолотый кварцевый песок | 230 | 230 | 230 | 230 |
| Зола-унос или тонкомолотый шлак | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Микрокремнезем | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Гипс строительный | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Волокнистый отход корня солодки | - | 3,5 необработанный | 3,5 после горячей промывки | 3,5 очищенный и минерализованный |
| Поликарбосилатный суперпластификатор | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 |
| Алюминиевая пудра | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |

| | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Вода с учетом влажности волокна, л/м ³ | 250 | 263 | 258 | 255 |
| Фактическое В/Т по сухим компонентам | 0,389 | 0,407 | 0,399 | 0,394 |

Подготовка волокнистого отхода корня солодки включала сортировку, измельчение до фракции 3-12 мм, горячую водную промывку, обработку суспензией гидроксида кальция, силикатную минерализацию разбавленным раствором жидкого стекла, отжим и подсушку до рабочей влажности. Горячая промывка была направлена на удаление водорастворимых экстрактивных веществ, сахаров, сапонинов и фенольных соединений. Известково-силикатная минерализация обеспечивала образование на поверхности растительного волокна тонкого минерального слоя, повышающего совместимость волокна с цементно-известковой матрицей.

Технология приготовления газобетонной смеси включала предварительное сухое перемешивание минеральных компонентов, диспергирование подготовленного волокна в части воды затворения с суперпластификатором, введение волокнистой суспензии в сухую смесь и последующее введение алюминиевой пудры. Газообразующая добавка вводилась на заключительной стадии, чтобы исключить преждевременное нарушение процесса вспучивания.

Образцы твердели в нормальных условиях: первые 24 часа - в формах под пленочным укрытием, затем - во влажностных условиях с последующим естественным твердением до возраста 28 суток. Оценивались средняя плотность, осадка газомассы после максимального подъема, задержка начала схватывания, прочность при сжатии в возрасте 7 и 28 суток, прочность при изгибе в 28 суток, водопоглощение, усадка при высыхании и теплопроводность в сухом состоянии.

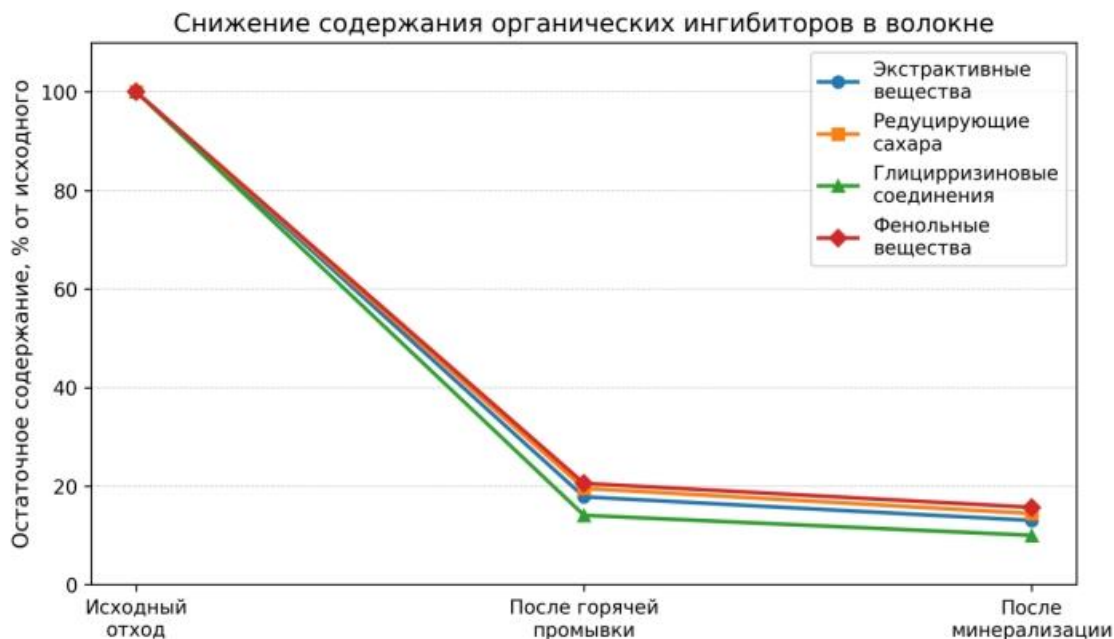


Рисунок 2 - Динамика снижения органических ингибиторов при промывке и минерализации волокна

Результаты исследования

Химический контроль волокнистого отхода показал, что исходный материал содержит значительное количество водорастворимых экстрактивных веществ и редуцирующих сахаров. После горячей промывки их содержание резко снизилось, а после известково-силикатной минерализации волокно приобрело более стабильное состояние для введения в цементно-известковую систему.

Таблица 2 - Химические показатели волокнистого отхода корня солодки

| Показатель | Исходный отход | После горячей промывки | После минерализации |
|---|----------------|------------------------|---------------------|
| Водорастворимые экстрактивные вещества, % | 14,6 | 2,6 | 1,9 |
| Редуцирующие сахара, % | 2,15 | 0,42 | 0,31 |
| pH водной вытяжки 1:10 | 5,7 | 7,2 | 9,1 |
| Электропроводность вытяжки, мСм/см | 3,10 | 0,58 | 1,05 |
| Глицирризиновые соединения, % усл. | 3,20 | 0,45 | 0,32 |
| Суммарные фенольные вещества, мг GAE/г | 18,5 | 3,8 | 2,9 |

| | | | |
|------------------------------------|-----|-----|-----|
| Зольность / минеральный остаток, % | 2,1 | 2,4 | 7,8 |
| Водопоглощение волокна за 24 ч, % | 168 | 150 | 126 |

Результаты физико-механических испытаний приведены в таблице 3. Они показывают, что состояние волокна оказывает решающее влияние не только на прочность, но и на устойчивость газобетонной массы в период вспучивания и раннего структурообразования.

Таблица 3 - Сводные физико-механические показатели опытных составов

| Показатель | НГБ-0 контроль | НГБ-1 необр. отход | НГБ-2 промытое волокно | НГБ-3 минерализ. волокно |
|--|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|---|
| Средняя плотность, кг/м ³ | 604 | 598 | 601 | 606 |
| Осадка газомассы после максимального подъема, мм | 5 | 17 | 8 | 4 |
| Задержка начала схватывания относительно контроля, мин | 0 | 110-125 | 35-45 | 0-10 |
| Прочность при сжатии, 7 сут, МПа | 1,32 | 0,69 | 1,15 | 1,78 |
| Прочность при сжатии, 28 сут, МПа | 2,08 | 1,18 | 2,05 | 3,05 |
| Прочность при изгибе, 28 сут, МПа | 0,44 | 0,28 | 0,49 | 0,72 |
| Водопоглощение, % по массе | 44 | 53 | 43 | 36 |

| | | | | |
|---|-------------|--|--------------------|---|
| Усадка при высыхании, 28 сут, мм/м | 0,78 | 0,94 | 0,68 | 0,52 |
| Теплопроводность в сухом состоянии, Вт/(м·К) | 0,133 | 0,130 | 0,131 | 0,134 |
| Равномерность пористой структуры | равномерная | неравномерная , отдельные крупные поры | удовлетворительная | равномерная , дефектные поры не выражены |

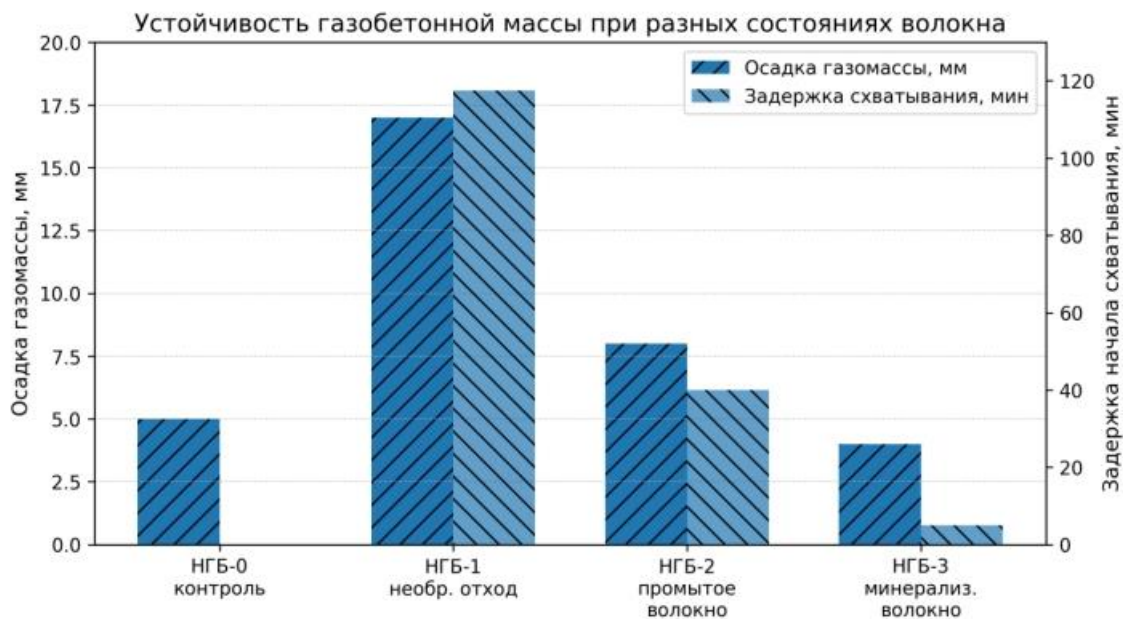


Рисунок 3 - Осадка газомассы и задержка начала схватывания опытных составов

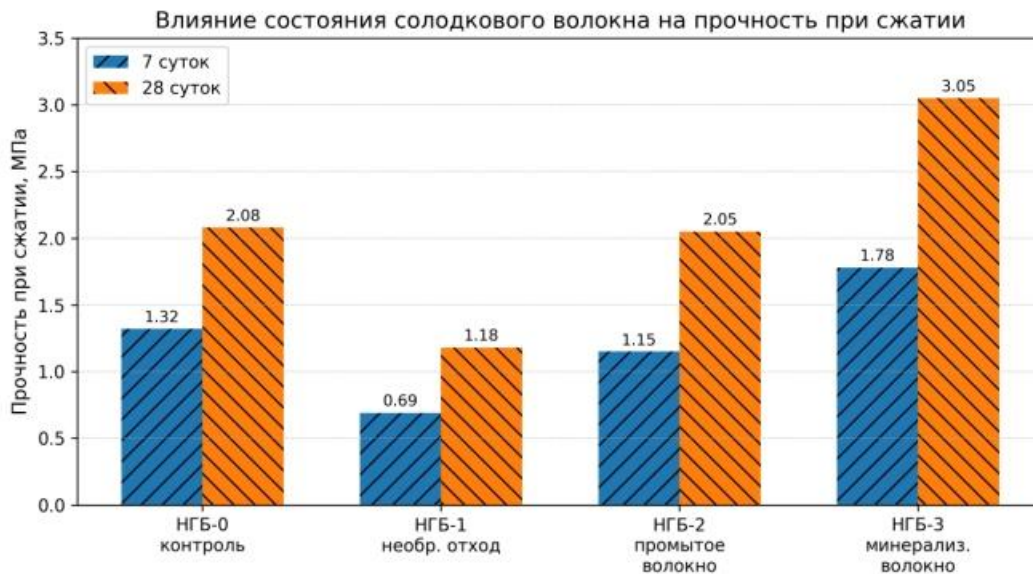


Рисунок 4 - Влияние состояния волокна на прочность при сжатии

Полученные данные показывают, что необработанный отход корня солодки отрицательно влияет на структурообразование газобетонной массы. В составе НГБ-1 наблюдалась значительная задержка начала схватывания - 110-125 минут относительно контрольного состава. Кроме того, осадка газомассы после максимального подъема увеличилась до 17 мм, что указывает на недостаточную устойчивость пористой структуры. Прочность при сжатии в возрасте 28 суток снизилась с 2,08 МПа у контрольного состава до 1,18 МПа, а прочность при изгибе - с 0,44 до 0,28 МПа.

После горячей промывки волокна отрицательное влияние органических веществ уменьшилось. Состав НГБ-2 показал прочность при сжатии 2,05 МПа, что практически соответствует контрольному составу без волокна. При этом прочность при изгибе повысилась до 0,49 МПа, а усадка снизилась до 0,68 мм/м. Это подтверждает, что удаление водорастворимых компонентов является обязательным условием для применения растительного волокна в газобетонной смеси.

Наиболее высокие показатели получены для состава НГБ-3, в котором использовано очищенное и известково-силикатно минерализованное волокно. Прочность при сжатии в возрасте 28 суток достигла 3,05 МПа, что на 46,6 % выше по сравнению с контрольным составом НГБ-0. Прочность при изгибе увеличилась до 0,72 МПа, то есть на 63,6 % выше контрольного значения. Одновременно водопоглощение снизилось с 44 до 36 %, а усадка при высыхании - с 0,78 до 0,52 мм/м.

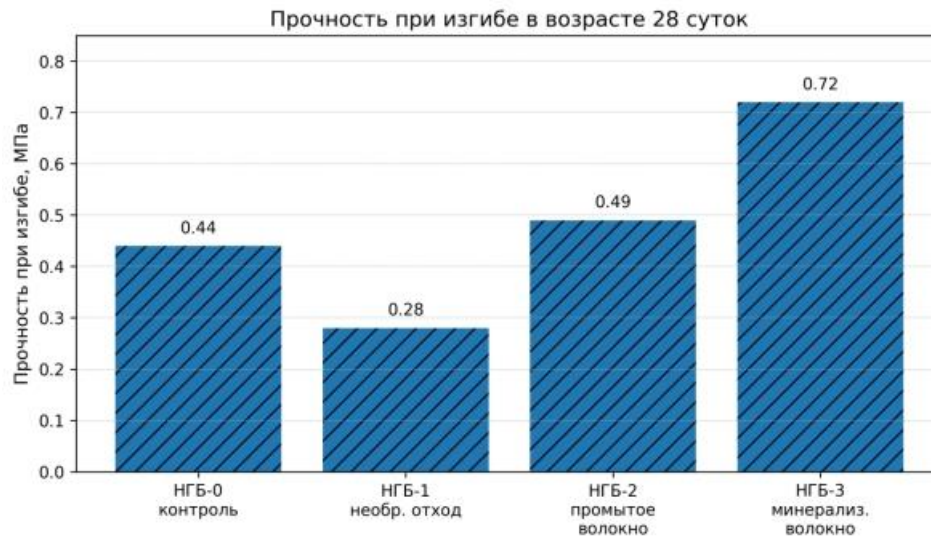


Рисунок 5 - Прочность при изгибе опытных составов в возрасте 28 суток

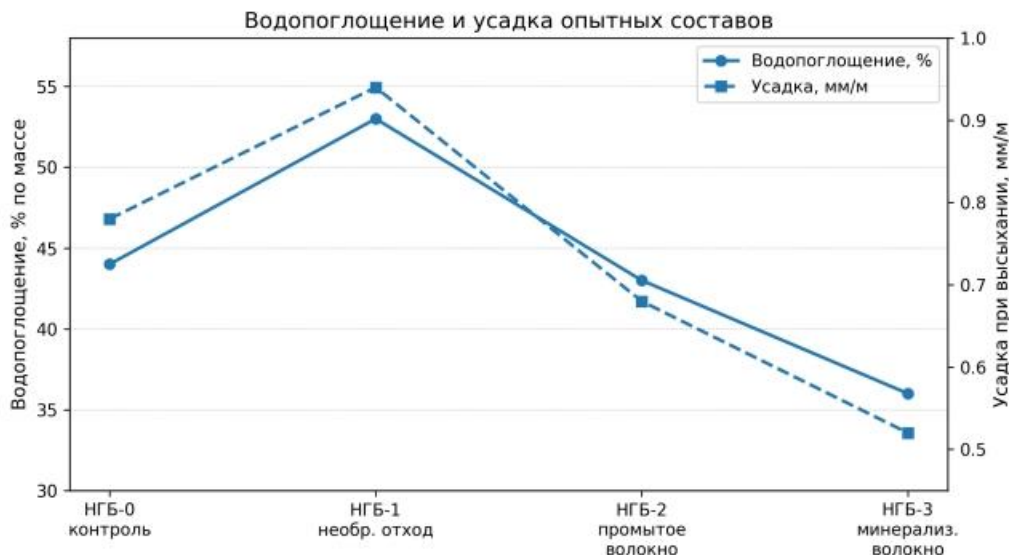


Рисунок 6 - Водопоглощение и усадка при высыхании опытных составов

Обсуждение результатов

Повышение прочности и снижение усадочных деформаций в составе НГБ-3 можно объяснить совокупным действием нескольких факторов. Во-первых, горячая водная промывка уменьшает содержание сахаров, фенольных соединений и других экстрактивных веществ, которые способны тормозить гидратацию цемента и ухудшать раннее структурообразование. Во-вторых, обработка гидроксидом кальция нейтрализует кислые группы на поверхности растительного волокна и насыщает ее ионами кальция. В-третьих, силикатная минерализация способствует формированию тонкой кальций-силикатной оболочки, повышающей адгезию между волокном и цементно-известковой матрицей.

Дисперсное армирование межпоровых перегородок минерализованным волокном снижает вероятность развития усадочных микротрещин. При этом ограниченная дозировка волокна - $3,5 \text{ кг/м}^3$ - не нарушает равномерность газообразования и не вызывает чрезмерного увеличения водопотребности. Это особенно важно для неавтоклавного газобетона, где прочностные свойства в значительной степени зависят от устойчивости пористой структуры в период вспучивания и начального схватывания.

Сравнение НГБ-1 и НГБ-3 показывает, что само наличие растительного волокна не гарантирует улучшения свойств материала. Напротив, без предварительной очистки и минерализации волокно действует как неблагоприятная органическая примесь, повышающая водопотребность, задерживающая схватывание и ухудшающая поризацию. Следовательно, ключевым технологическим фактором является именно подготовка волокнистого отхода, а не только его количественное содержание в составе.

С практической точки зрения предложенный состав может быть использован при производстве стеновых блоков, перегородочных плит и теплоизоляционно-конструкционных элементов плотностной группы D600. Дополнительным преимуществом является возможность утилизации местного растительного отхода, что соответствует принципам ресурсосбережения и экологизации производства строительных материалов.



Рисунок 7 - Предполагаемый механизм повышения свойств газобетона за счет минерализованного волокна

В сравнении с ближайшим прототипом в одной плотностной группе D600 заявляемый состав ориентирован на повышение 28-суточной прочности при сжатии с 1,60 до 3,05 МПа. Такой результат достигается не простой заменой минерального базальтового волокна растительным сырьем, а комплексной подготовкой солодкового волокна, включающей фракционирование, горячую промывку, химический контроль вытяжки, известковую нейтрализацию и мягкую силикатную минерализацию.

Таблица 4 - Сравнение заявляемого состава с ближайшим прототипом

| Показатель | Прототип RU2616303C1 D600 | Заявляемый состав НГБ-3 | Изменение |
|--|--|---|---------------------------------------|
| Предел прочности при сжатии, 7 суток, МПа | 1,40 | 1,78 | +0,38 МПа / +27,1 % |
| Предел прочности при сжатии, 28 суток, МПа | 1,60 | 3,05 | +1,45 МПа / +90,6 % |
| Средняя плотность, кг/м ³ | около 600 | 606 | сопоставимая плотность, группа D600 |
| Характер армирования | волокнистые базальтовые отходы | очищенное и минерализованное растительное волокно корня солодки | изменена природа и подготовка волокна |

В сравнении с ближайшим прототипом в одной плотностной группе D600 заявляемый состав ориентирован на повышение 28-суточной прочности при сжатии с 1,60 до 3,05 МПа. Такой результат достигается не простой заменой минерального базальтового волокна растительным сырьем, а комплексной подготовкой солодкового волокна, включающей фракционирование, горячую промывку, химический контроль вытяжки, известковую нейтрализацию и мягкую силикатную минерализацию.

Выводы

1. Разработан состав неавтоклавного газобетона D600 с использованием очищенного и известково-силикатно минерализованного волокнистого отхода корня солодки в количестве 3,5 кг/м³.
2. Установлено, что необработанный отход корня солодки ухудшает свойства газобетона: прочность при сжатии в возрасте 28 суток снижается до 1,18 МПа, водопоглощение повышается до 53 %, а усадка - до 0,94 мм/м.
3. Горячая промывка волокна снижает содержание водорастворимых органических веществ и частично восстанавливает прочностные показатели материала, однако максимальный эффект достигается только после известково-силикатной минерализации.
4. Заявляемый состав НГБ-3 обеспечивает среднюю плотность 606 кг/м³, прочность при сжатии 3,05 МПа, прочность при изгибе 0,72 МПа, водопоглощение 36 % и усадку при высыхании 0,52 мм/м.
5. Улучшение свойств связано с формированием минерализованной поверхности растительного волокна, повышением его адгезии к цементно-известковой матрице и дисперсным армированием межпоровых перегородок.
6. Предложенный подход позволяет расширить сырьевую базу для производства неавтоклавных ячеистых бетонов и обеспечить рациональное использование отходов переработки корня солодки.

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. Горлов Ю.П., Меркин А.П., Устенко А.А. Технология теплоизоляционных материалов. - М.: Стройиздат, 1980.
5. Баженов Ю.М. Технология бетона. - М.: Издательство АСВ, 2011.
6. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. Строительные материалы на основе техногенного сырья. - Казань: КГАСУ, 2015.
7. Neville A.M. Properties of Concrete. - London: Pearson Education, 2011.
8. Narayanan N., Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: a review. Cement and Concrete Composites, 2000.

9. Ramamurthy K., Kunhanandan Nambiar E.K., Indu Siva Ranjani G. A classification of studies on properties of foam concrete. Cement and Concrete Composites, 2009.
10. Савин В.И., Розенберг Т.И. Ячеистые бетоны и изделия на их основе. - М.: Стройиздат, 1972.
11. Штарк Й., Вихт Б. Долговечность бетона. - Киев: Оранта, 2004.
12. ГОСТ 25485. Бетоны ячеистые. Общие технические условия.
13. ГОСТ 10180. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
14. ГОСТ 12730.1. Бетоны. Методы определения плотности.
15. ГОСТ 12730.3. Бетоны. Метод определения водопоглощения.