

УДК 622.245.422.4; <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2023-5.03>

<https://orcid.org/0000-0003-3579-9054>

<https://orcid.org/0000-0001-5442-4763>

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ АРМИРОВАНИЕМ БАЗАЛЬТОВОЙ ФИБРОЙ



**А.А. КАБДУШЕВ<sup>1</sup>**,  
PhD, и.о. доцента,  
[arman-kz@mail.ru](mailto:arman-kz@mail.ru)



**Д.Н. ДЕЛИКШЕВА<sup>2</sup>**,  
магистр,  
старший преподаватель,  
[d.deliksheva@satbayev.university](mailto:d.deliksheva@satbayev.university)

<sup>1</sup>ТАРАЗСКИЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ М.Х. ДУЛАТИ,  
Республика Казахстан, 080014, г. Тараз, ул. Толе би, 60

<sup>2</sup>SATBAYEV UNIVERSITY,  
Республика Казахстан, 050000, г. Алматы, ул. К. Сатпаева, 22

*При проектировании цементного раствора для крепления скважин основное внимание уделяется обеспечению его прочности и долговечности. В целях получения высокопрочных материалов на основе цемента, было изучено влияние базальтового волокна в качестве усилителя для получения цементного раствора с высокой прочностью на сжатие и изгиб. В процессе испытаний также была исследована деформация цемента под нагрузкой.*

*Для исследования был создан цементный камень из портландцемента с водоцементным отношением 0,5. В смесь добавляли различные концентрации базальтового волокна (0,1%, 0,5%, 1% и 2%). Прочностные испытания образцов цементного камня проводились через 2, 7 и 14 суток.*

*Результаты показали, что армирование цемента базальтовым волокном значительно улучшило как его прочностные свойства, так и пластичность. Добавление волокна привело к увеличению прочности на сжатие и изгиб на 11%. Среди протестированных различных концентраций волокна базальтовое волокно 0,5% дало наиболее успешные результаты, обеспечив самые высокие прочностные характеристики цементного камня при сохранении его текучести в виде цементного раствора.*

*Эти результаты дают ценную информацию для практического использования цементного раствора, армированного базальтовым волокном, при строительстве нефтяных и газовых скважин, обеспечивая их долговечность и долгосрочную работу.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** цементный раствор; композиционные материалы на цементной основе; базальтовое волокно; усиленный эффект; долговечность.

## ЦЕМЕНТ ТАСЫНЫҢ БЕРІКТІЛІК СИПАТТАМАЛАРЫН БАЗАЛТ ТАЛШЫҚТАРЫН ҚОСУ АРҚЫЛЫ АРТТЫРУ

**А.А. КАБДУШЕВ**<sup>1</sup>, PhD, доцент қ.а., [arman-kz@mail.ru](mailto:arman-kz@mail.ru)

**Д.Н. ДЕЛИКЕШЕВА**<sup>2</sup>, магистр, аға оқытушы, [d.delikesheva@satbayev.university](mailto:d.delikesheva@satbayev.university)

<sup>1</sup>М.Х.ДУЛАТИ АТЫНДАҒЫ ТАРАЗ Өңірлік Университеті,  
Қазақстан Республикасы, 080012, Тараз қ., Төле би көшесі 60

<sup>2</sup>SATBAYEV UNIVERSITY,  
Қазақстан Республикасы, 050000, Алматы қ., Қ. Сәтпаева көш., 22

Ұңғыманы бекітуге арналған цемент ерітіндісін жобалау кезінде оның беріктігі мен ұзақ мерзімге жарамдылығын қамтамасыз етуге басты назар аударылады. Беріктігі жоғары цемент негізіндегі материалдарды алу үшін базальт талшығының арматура ретінде әсері зерттеліп, сығымдауға және иілуге төзімділігі жоғары цемент ерітіндісі алынды. Сынақтар кезінде цементтің жүктеме кезінде деформациясы да зерттелді.

Зерттеу үшін портландцементтен су-цемент қатынасы 0,5 болатын цемент тасы жасалды. Қоспаға базальт талшығының әртүрлі концентрациясы (0,1%, 0,5%, 1% және 2%) қосылды. Цемент тас үлгілерінің беріктік сынағы 2, 7 және 14 күннен кейін жүргізілді.

Нәтижелер цементті базальт талшығымен күшейту оның беріктік қасиеттерін де, иілгіштігін де айтарлықтай жақсартқанын көрсетті. Талшықты қосу қысу және иілу беріктігін 11% арттыруға әкелді. Сынақталған талшықтардың әртүрлі концентрацияларының ішінде 0,5% базальт талшығы ең сәтті нәтиже берді, ол цемент тасының ең жоғары беріктік сипаттамаларын қамтамасыз етеді, сонымен бірге оның цемент ерітіндісі ретінде аққыштығын сақтайды.

Бұл нәтижелер мұнай және газ ұңғымаларының құрылысында базальт талшығымен нығайтылған цемент ерітінділерін тәжірибеде қолдану, олардың беріктігі мен ұзақ мерзімді жұмысын қамтамасыз ету үшін құнды ақпарат береді.

**ТҮЙІН СӨЗДЕР:** цемент ерітіндісі; цемент негізіндегі композициялық материалдар; базальт талшығы; күшейтілген әсер; төзімділік.

## ENHANCING THE DURABILITY PROPERTIES OF CEMENT STONE THROUGH THE INCORPORATION OF BASALT FIBER REINFORCEMENT

**A.A. KABDUSHEV**<sup>1</sup>, PhD, acting associate professor, [arman-kz@mail.ru](mailto:arman-kz@mail.ru)

**D.N. DELIKESHEVA**<sup>2</sup>, MSc, senior lecturer, [d.delikesheva@satbayev.university](mailto:d.delikesheva@satbayev.university)

<sup>1</sup>TARAZ REGIONAL UNIVERSITY NAMED AFTER M.H. DULATI,  
60 Tole bi Street, Taraz, 080014, Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup>SATBAYEV UNIVERSITY,  
Republic of Kazakhstan, 050000, Almaty, K. Satpaeva St., 22

The primary focus in designing a cement slurry for wellbore cementing is to ensure its strength and long-term integrity. To obtain high-strength cement-based materials, the influence of basalt

*fiber as a reinforcement was studied to create a cement slurry with high compressive and flexural strength. Deformation of the cement under loading was also investigated during the testing process.*

*For the study, a cement plug was created using Portland cement with a water-cement ratio of 0.5. Different concentrations of basalt fiber (0.1%, 0.5%, 1%, and 2%) were added to the mix. Strength tests were carried out on the cement stone samples after 2, 7, and 14 days.*

*The results showed that reinforcing the cement with basalt fiber significantly improved both its strength properties and plasticity. The addition of fiber led to an 11% increase in both compressive and flexural strength. Among the different fiber concentrations tested, 0.5% basalt fiber yielded the most successful outcomes, providing the highest strength characteristics for the cement stone while preserving its fluidity as a cement slurry.*

*These findings offer valuable insights for the practical use of basalt fiber-reinforced cement slurry in constructing oil and gas wells, ensuring their durability and long-term performance.*

**KEY WORDS:** *Cement slurry; cement-based composite materials; basalt fiber; enhanced effect; durability*

**В**ведение. Производительность добывающей скважины во многом зависит от качества первичного цементирования. Низкое качество прочностных характеристик тампонажного раствора и затвердевшей цементной матрицы за обсадной колонной может привести к необходимости проведения ремонтно-изоляционных работ, что значительно увеличит эксплуатационные расходы на скважину [1]. Одним из основных недостатков тампонажных материалов является низкая сопротивляемость получаемого камня ударным нагрузкам, вследствие чего в нем при работах, проводимых в пространстве обсадной колонны, образуются трещины [2].

Причинами наиболее сильных напряжений в крепи скважин и нарушения целостности цементного камня могут быть гидроразрыв пласта [3] и операция перфорации призабойной зоны скважины из-за возникновения избыточного давления жидкости и больших колебаний давления жидкости в перфорационных отверстиях [4-5]. Кроме этого разбуривание цементного стакана, башмака обсадной колонны, а также дальнейшее углубление скважины негативно сказываются на целостности цементного камня и являются одной из причин нарушения герметичности крепи еще до завершения строительства скважины [6].

Армирование фиброй стало новым направлением поиска улучшения механических свойств и долговечности цемента [7]. Обычно используются волокна из стекла, джута, стали, углерода, человеческого волоса, нейлона, базальта, полипропилена, полиэстера и арамида для улучшения характеристик бетона [8-9].

В последние годы установлено, что базальтовые фибры в цементе обладают более высокими прочностными характеристиками и экономической эффективностью, чем другие фибры [8]. Базальтовая фибра – широко распространенный материал в строительной отрасли, который используется для армирования бетонов. Волокно может производиться различной толщины (0,5–20) микрометров длины (5–12) мм. Базальтовое волокно имеет высокую стойкость к агрессивным средам, термоизоляцию, устойчивость к очень низким температурам, высокую прочность, модуль упругости, а также волокно широкодоступно на рынке и имеет невысокую стоимость [8;9-11]. Фибра производится из расплавленных магматических пород, затем пропускается через специальные формы для получения волокон. Далее волокна рубятся, после чего к ним добавляют замасливатель, благодаря чему возни-

кает трехмерная структура. К преимуществам базальтовой фибры можно отнести небольшой вес, коррозионную устойчивость, высокую адгезию и сродность к цементной матрице [6].

В настоящее время для цементного камня регламентируются показатели прочности при сжатии и изгибе. При этом ряд исследователей считают необходимым ввести требования к упругим свойствам цементного камня и предлагают ввести показатели свойств цементного камня, необходимые для оценки его упругих свойств, важных при проведении операций, которые приводят к возникновению ударных нагрузок [12-13].

Известны публикации, описывающие прочностное поведение цементного камня с добавлением базальтовой фибры, однако его деформационное поведение изучено гораздо меньше.

В исследовании рассматривается влияние добавления объемной доли базальтового волокна 1%, 2% и 3% к трем различным смесям высокопрочного бетона. В первой смеси используется 100% цемент, а в двух других смесях 10% содержание цемента заменяется микрокремнеземом и метакаолином соответственно. Экспериментальные результаты показывают, что добавление базальтовых волокон в сочетании с минеральными добавками повышает прочность бетона на сжатие. Деформации, соответствующие максимальной прочности на сжатие и прочности на растяжение при раскалывании, также демонстрируют улучшение при всех объемах волокна. Однако добавление волокон оказывает незначительное влияние на модуль упругости бетона [14].

В работе изучалось влияние добавления измельченных в шаровой мельнице базальтовых волокон (5% от массы цемента) в растворы портландцемента для нефтяных скважин. Образцы были приготовлены с кварцевой мукой и без нее (40% массы цемента) и выдержаны в течение 7 дней при двух разных статических температурах забоя скважины: 80°C (176°F) и 300°C (572°F). Механические свойства затвердевшего цемента оценивали с помощью испытаний на прочность при сжатии. На микроструктуру и механические свойства отвержденных суспензий влияли температура отверждения и присутствие кварцевой муки. Отверждение при 80°C привело к получению материала с высокой энергией разрушения при добавлении кварцевой муки (40% по весу цемента) и измельченных базальтовых волокон (5% по весу цемента), что привело к увеличению энергии разрушения примерно с 35 Дж. до 47 Дж. [15].

В данной статье основное внимание уделяется исследованию ударных характеристик бетона, армированного базальтоволокном с различной объемной долей и подверженного различным скоростям деформации. В исследовании используется разрезной стержень Гопкинсона диаметром 74 мм для оценки динамической прочности на сжатие и ударной вязкости на основе кривых напряжения-деформации. Степень повреждения увеличивается с увеличением скорости деформации при ударной нагрузке. Включение базальтовых волокон снижает хрупкость бетона и повышает его ударную вязкость. Результаты испытаний показывают очевидный эффект скорости деформации, при этом значение динамической прочности на сжатие растет примерно линейно со скоростью деформации [16].

В этой статье исследуется влияние добавления различных пропорций базальтового волокна в бетон для повышения его ударной вязкости и предотвращения растрескивания. Испытания на сжатие, растяжение и изгиб проводились на образцах бетона с различным содержанием базальтового волокна. Результаты испытаний, режимы разрушения и механические свойства были сопоставлены и проанализированы для установления взаимосвязи между содержанием базальтового волокна и механическими свойствами. Полученные данные показывают, что базальтовое волокно значительно повышает прочность и трещиностойкость бетона. Влияние базальтового волокна на прочность на сжатие менее выражено по сравнению с прочностью на растяжение и изгиб. Наибольшее улучшение наблюдается при содержании базальтового волокна 0,3% и 0,4% [17].

Это исследование направлено на изучение влияния содержания базальтового волокна на механические свойства одноосного сжатия и характеристики повреждения бетона. Метод акустической эмиссии (АЭ): характеристические параметры АЭ, такие как количество звонков и энергия, собирались на протяжении всего процесса нагружения базальтофибробетона. Были проанализированы изменения этих параметров от начального сжатия до окончательного разрушения. Добавление соответствующего количества базальтовой фибры ( $6 \text{ кг/м}^3$ ) повышает прочность бетона на сжатие при одновременном снижении плотности и интенсивности характеристических параметров АЭ. Результаты показали, что введение соответствующего количества базальтового волокна повышает прочность бетона на сжатие, снижает характеристики повреждения, замедляет растрескивание и превращает длинные трещины в микротрещины [18].

Это исследование направлено на изучение динамических характеристик сдвига бетона, армированного базальтовым волокном и его реакции на скорость деформации магнитуды землетрясения. Были проведены экспериментальные исследования с динамическими характеристиками прямого сдвига: образцы с различной длиной и содержанием волокон были испытаны при различных скоростях деформации. Результаты показали, что цемент продемонстрировал значительный эффект скорости деформации, при этом более высокие скорости деформации привели к увеличению напряжения сдвига. Коэффициент увеличения динамического сдвига цемента сначала увеличивался, а затем уменьшался по мере изменения содержания и длины волокна. Максимальное напряжение сдвига и коэффициент динамического увеличения наблюдались при содержании волокна 0,2 % и длине волокна 6 мм. Способность цемента к пластической деформации постепенно улучшалась с увеличением содержания и длины волокна [19].

В этом исследовании были проведены испытания на растяжение бразильским диском на разрыв образцов бетона с различной скоростью нагружения и содержанием базальтового волокна. Влияние этих переменных на свойства динамического расщепления при растяжении и характеристики повреждения базальтового фибробетона (BFRC) были проанализированы с использованием технологии акустической эмиссии (АЭ) и метода цифровой спекл-корреляции (DSCM). Результаты показали, что содержание базальтовой фибры может повысить прочность бетона на изгиб и привести к более пластичному поведению с меньшим количеством трещин, кроме

этого, фибра улучшает трещиностойкость и значительно улучшают поведение балок при изгибе [20].

Данная работа направлена на исследование прочности цементного камня при сжатии и изгибе. В процессе испытаний использовался прибор Мицис-200–3 для фиксации деформации при нагружении. Целью исследования было определение применимости базальтовой фибры в качестве дополнительной добавки для улучшения свойств цементного раствора и затвердевшего цементного камня.

**Материалы и методы исследований.** При определении прочности был использован портландцемент тампонажный с водоцементным отношением 0,5, были использованы следующие рецептуры:

- 1) базовый портландцемент;
- 2) базовый портландцемент + базальтовая фибра (0,1%);
- 3) базовый портландцемент + базальтовая фибра (0,5%);
- 4) базовый портландцемент + базальтовая фибра (1%);
- 5) базовый портландцемент + базальтовая фибра (2%).

Основные характеристики базальтового волокна приведены в *таблице 1*.

**Таблица 1 – Физические характеристики базальтового фиброволокна**

| Минимальный диаметр волокна, мкм | Максимальный диаметр волокна, мкм | Средний диаметр волокна, мкм | Длина отрезка волокна, мм | Массовая доля влаги, не более | Плотность рыхлой массы, кг/м <sup>3</sup> | Химическая устойчивость (потеря в весе после 3 ч кипячения, г): |                 |                   | Рабочая температура, °С  |
|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---|---|-----------------|-------------------|--------------------------|
|                                  |                                   |                              |                           |                               |   | в воде  | в оксиде натрия | в соляной кислоте |                          |
| 20                               | 400                               | 200±                         | 6,12,18,24±               | 0,3                           | 70-80                                     | 1,6   | 2,75            | 2,2               | от минус 270 до плюс 750 |

Внешний вид волокна представлен на *рисунке 1*.



**Рисунок 1 – Базальтовая фибра**

Испытания на прочность образца цементного камня проводились в возрасте 2, 7 и 14 суток. После приготовления и извлечения из воды цементные образцы подвергались испытаниям на приборе Мицис-200-3. Определение прочности на изгиб и сжатие проводилось с использованием форм для приготовления цементных балок размерами 40×40×160 согласно ГОСТ 1581-96. Прибор изображен на *рисунке 2*.

Этот прибор, помимо прочности на сжатие и изгиб, позволял измерять деформацию цементного камня. Для этого было внесено улучшение в виде модернизации устройства путем добавления в его конструкцию индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм. Индикатор часового типа показан на *рисунке 3*.



*Рисунок 2 – Прибор Мицис-200-3*



*Рисунок 3 – Индикаторы часового типа*

Принципиальная схема определения деформации приведена на *рисунке 4*, где изображен образец цементного камня, деформация которого регистрируется индикаторами часового типа. Когда образец цементного камня подвергается деформации, форма или размер образца меняется. Эти изменения приводят к сдвигу показателей на индикаторах часового типа.

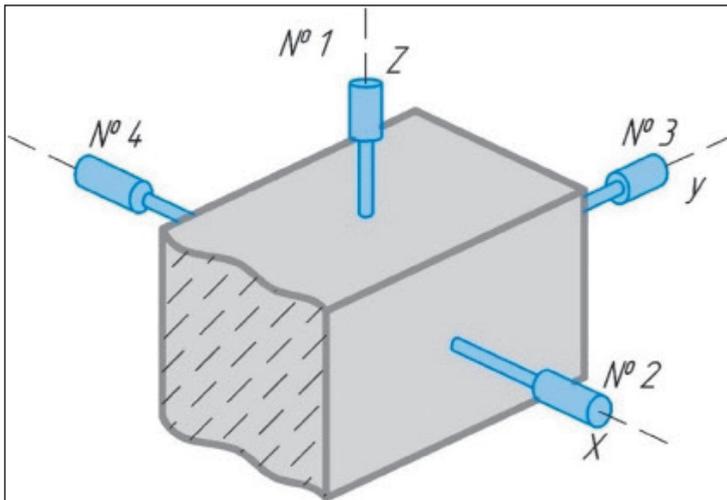


Рисунок 4 – Схема испытаний цементного образца

Для определения деформации необходимо сравнить показания индикаторов часового типа до и после применения нагрузки на образец. Разница между исходными и конечными показаниями индикаторов была использована для определения степени деформации образца.

Максимальная нагрузка при проведении испытаний по нагружению фиксируется на цифровой панели управления, а также устройство позволяет осуществлять учет результатов исследований.

**Результаты и обсуждение.** Результаты исследования прочностных характеристик цементного камня с различными концентрациями базальтовой фибры и при разных периодах твердения (2, 7 и 14 суток) были представлены в *таблице 2*.

На 2-х и 7-х сутках твердения цементного камня не наблюдалось значительного повышения прочности при добавлении любой из исследованных концентраций базальтовой фибры. Это может быть объяснено тем, что процесс твердения цементного камня на начальных этапах не достигает полной реакции, и вклад добавленного волокна в укрепление структуры материала оказывается незначительным.

Однако на 14-й сутки твердения отчетливо наблюдается улучшение прочностных характеристик цементного камня при использовании базальтовой фибры. В частности, наилучший результат по пределам прочности на сжатие и изгибу достигается при концентрации базальтовой фибры в 0,5%. Это говорит о том, что с увеличением времени твердения цементного камня происходит более полное взаимодействие между добавленными волокнами и цементной матрицей, что приводит к повышению прочности материала.

По результатам исследований были получены зависимости нагрузки от величины деформации цементного камня в возрасте 2-х суток, результаты отображены на *рисунках 5–9*.

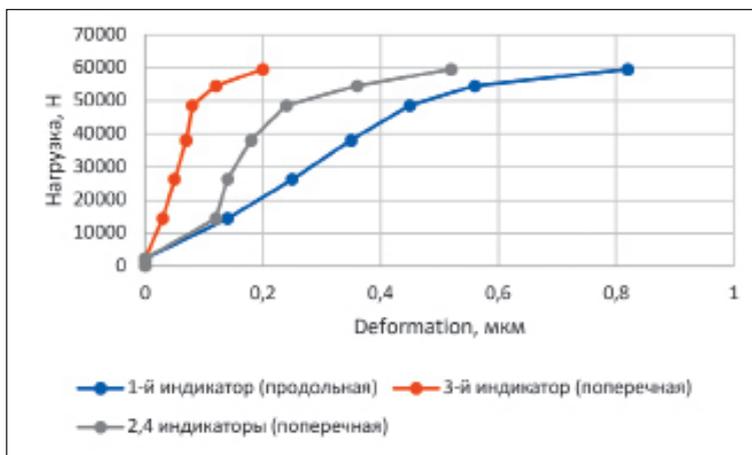
При использовании чистого цемента (*рисунок 5*), деформация цементного камня возрастает с увеличением нагрузки. Это можно видеть по значениям деформации, которые увеличиваются по мере роста нагрузки.

**Таблица 2 – Результаты экспериментов по определению прочности цементного камня при различных концентрациях и различных возрастах твердения**

| Процентное содержание фибры | Предел прочности на сжатие, Н/мм <sup>2</sup> |         |          | Предел прочности на изгиб, Н/мм <sup>2</sup> |         |          |
|-----------------------------|---|---------|----------|--|---------|----------|
|                             | 2 суток                                       | 7 суток | 14 суток | 2 суток                                      | 7 суток | 14 суток |
| ПЦТ                         | 24,50   | 39,79   | 37,47    | 6,04   | 5,67    | 6,68     |
| ПЦТ + 0,1 %                 | 23,59   | 29,94   | 38,36    | 4,32   | 5,83    | 5,79     |
| ПЦТ + 0,5 %                 | 23,66   | 26,95   | 41,58    | 5,31   | 5,17    | 7,43     |
| ПЦТ + 1 %                   | 23,67   | 30,72   | 38,18    | 4,94   | 6,01    | 4,71     |
| ПЦТ + 2 %                   | 23,43   | 33,34   | 27,84    | 5,65   | 5,41    | 5,69     |

Значения деформации для каждого индикатора различаются. Продольная деформация (1-й индикатор) имеет меньшие значения по сравнению с поперечной деформацией (3-й индикатор) и поперечной деформацией для 2-4-х индикаторов.

С увеличением нагрузки значения деформации для всех индикаторов увеличиваются, что свидетельствует о возрастании общей деформации цементного камня.



**Рисунок 5 – Деформация цементного камня по каждому индикатору, чистый цемент**

При добавлении 0,1% фибр в цементный камень (рисунок б) наблюдается снижение значения деформации по сравнению с чистым цементом при тех же нагрузках.

Добавление фибр приводит к уменьшению деформации во всех индикаторах. Значения деформации для каждого индикатора при добавлении фибр меньше, чем для чистого цемента при тех же нагрузках.

Значения деформации для каждого индикатора увеличиваются с увеличением нагрузки, но при использовании фибр они все равно остаются ниже, чем при использовании чистого цемента.

Продольная деформация (1-й индикатор) имеет меньшие значения по сравнению с поперечной деформацией (3-й индикатор) и поперечной деформацией для 2-4-х индикаторов, что указывает на более эффективное сопротивление деформации в продольном направлении.

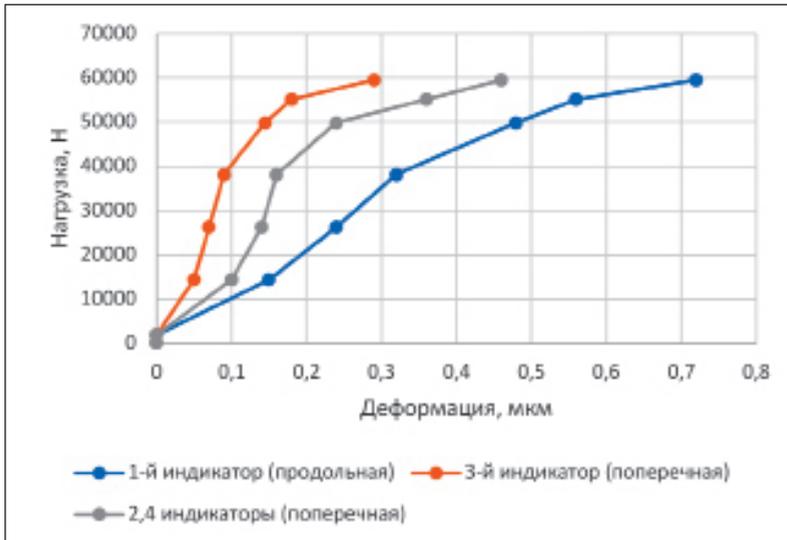


Рисунок 6 – Деформация цементного камня по каждому индикатору, 0,1 % фибры

При добавлении 0,5% фибр в цементный камень (рисунок 7) деформация значительно снижается по сравнению с чистым цементом и цементом с 0,1% фибр.

Значения деформации для каждого индикатора при использовании 0,5% фибр являются наименьшими по сравнению с другими концентрациями, что свидетельствует о более высокой эффективности добавления большего количества фибр.

Продольная деформация (1-й индикатор) все еще имеет меньшие значения по сравнению с поперечной деформацией (3-й индикатор) и поперечной деформацией для 2-4-х индикаторов.

При увеличении нагрузки значения деформации увеличиваются, но все равно остаются ниже по сравнению с чистым цементом и цементом с 0,1% фибр.

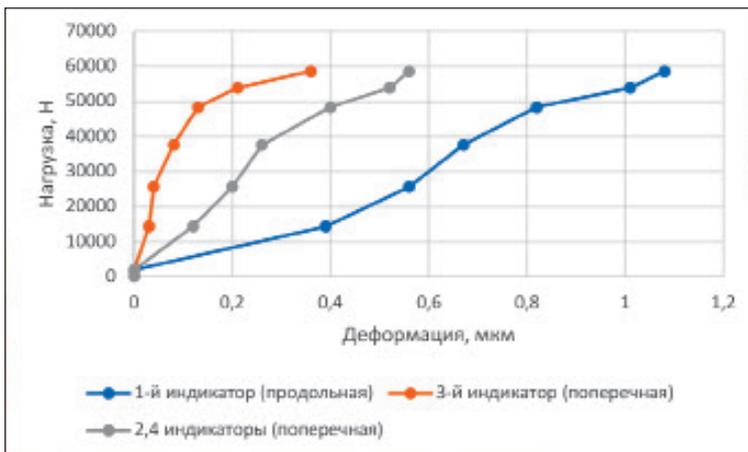


Рисунок 7 – Деформация цементного камня по каждому индикатору, 0,5 % фибры

Из графика (рисунки 8 и 9) видно, что с увеличением нагрузки происходит увеличение значений деформации по всем индикаторам. Продольная деформация (1-й индикатор) имеет наименьшие значения, в то время как поперечная деформация (3-й индикатор и 2-4-е индикаторы) имеет более выраженные значения. Применение 1% фибры в цементном камне приводит к более заметной поперечной деформации по сравнению с продольной деформацией.

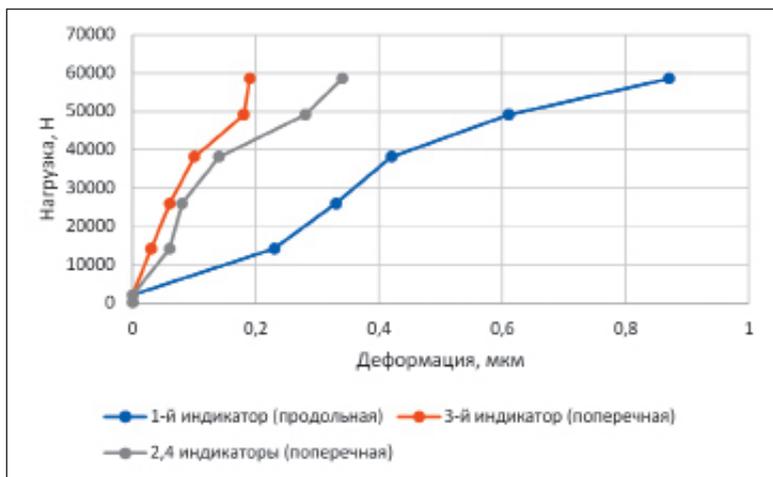


Рисунок 8 – Деформация цементного камня по каждому индикатору, 1 % фибры

Из графика видно, что с увеличением нагрузки происходит увеличение значений деформации по всем индикаторам. Продольная деформация (1-й индикатор) имеет наименьшие значения, в то время как поперечная деформация (3-й индикатор и 2-4-е индикаторы) имеет более выраженные значения. Применение 2% фибры в цементном камне приводит к более заметной поперечной деформации по сравнению с продольной деформацией.

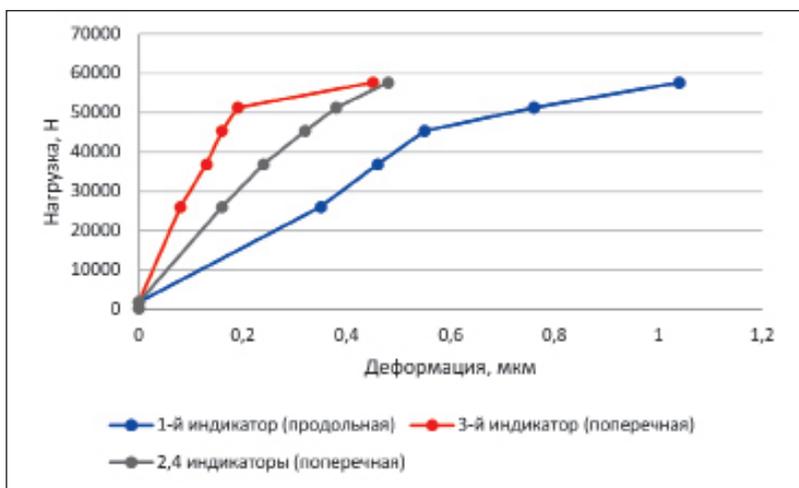


Рисунок 9 – Деформация цементного камня по каждому индикатору, 2 % фибры

С увеличением концентрации фибры в цементном камне наблюдается увеличение значений деформации. Поперечная деформация (3-й индикатор и 2-4-е индикаторы) становится более заметной по сравнению с продольной деформацией (1-й индикатор). 2% фибра приводит к более выраженным значениям деформации по всем индикаторам по сравнению с 0,5% и 1% фиброй. На основе представленных данных можно предположить, что содержание фибры 0,5% может быть потенциально оптимальным для достижения максимальной прочности цементного камня. В этом диапазоне наблюдается значительное увеличение прочности материала и умеренное увеличение деформации. Результаты экспериментов по исследованию продольной и поперечной деформации камня приведены в *таблицах 3-5*.

**Таблица 3 – Продольная деформация цементного камня**

| Сроки твердения, суток | Концентрация |             |             |           |           |
|------------------------|--------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
|                        | ПЦТ          | ПЦТ + 0,1 % | ПЦТ + 0,5 % | ПЦТ + 1 % | ПЦТ + 2 % |
| 2                      | 1,14         | 1,08        | 0,98        | 0,87      | 0,83      |
| 7                      | 1,08         | 0,98        | 0,86        | 0,78      | 0,78      |
| 14                     | 0,63         | 0,63        | 0,54        | 0,48      | 0,33      |

**Таблица 4 – Поперечная деформация по второму и четвертому индикатору**

| Сроки твердения, суток | Концентрация |             |             |           |           |
|------------------------|--------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
|                        | ПЦТ          | ПЦТ + 0,1 % | ПЦТ + 0,5 % | ПЦТ + 1 % | ПЦТ + 2 % |
| 2                      | 0,4          | 0,44        | 0,56        | 0,36      | 0,44      |
| 7                      | 0,46         | 0,56        | 0,64        | 0,42      | 0,46      |
| 14                     | 0,66         | 0,76        | 0,84        | 0,58      | 0,62      |

**Таблица 5 – Поперечная деформация по третьему индикатору**

| Сроки твердения, суток | Концентрация |             |             |           |           |
|------------------------|--------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
|                        | ПЦТ          | ПЦТ + 0,1 % | ПЦТ + 0,5 % | ПЦТ + 1 % | ПЦТ + 2 % |
| 2                      | 0,32         | 0,3         | 0,28        | 0,25      | 0,42      |
| 7                      | 0,27         | 0,25        | 0,22        | 0,22      | 0,35      |
| 14                     | 0,21         | 0,18        | 0,2         | 0,18      | 0,25      |

Продольная деформация цементного камня: видно, что при увеличении концентрации фибры (от 0,1% до 2%), продольная деформация цементного камня снижается с течением времени от начала твердения (2, 7 и 14 суток). Это указывает на улучшение прочностных характеристик материала с добавлением фибры. Наблюдается снижение деформации с увеличением времени твердения во всех случаях.

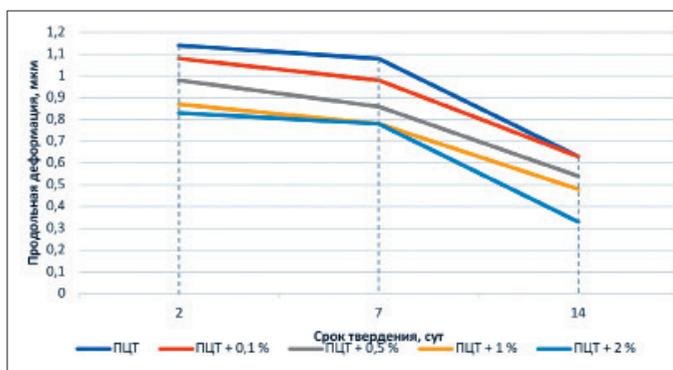
Поперечная деформация по второму и четвертому индикаторам: при увеличении концентрации фибры (от 0,1% до 2%), поперечная деформация по второму и

четвертому индикаторам имеет разную динамику в зависимости от времени твердения. В некоторых случаях (например, при 2-недельном твердении) наблюдается уменьшение деформации с увеличением концентрации фибры, в то время как в других случаях (например, при 7-дневном твердении) наблюдается увеличение деформации с увеличением концентрации фибры.

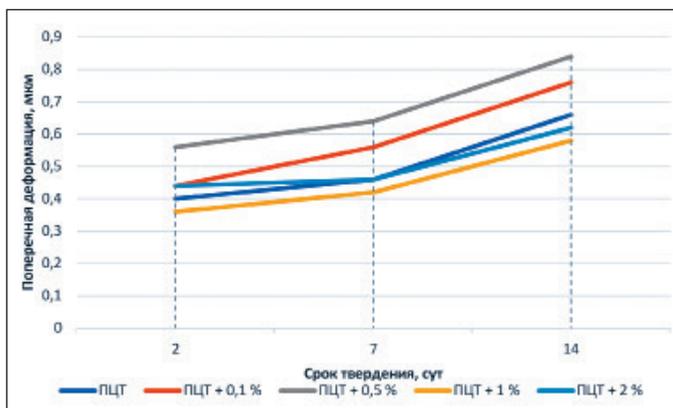
Поперечная деформация по третьему индикатору: в случае поперечной деформации по третьему индикатору также наблюдается влияние концентрации фибры и времени твердения. Увеличение концентрации фибры может приводить как к увеличению, так и к уменьшению поперечной деформации в зависимости от времени твердения.

На графике ниже (рисунок 10) видно, что с увеличением концентрации фибры продольная деформация цементного камня снижается. Также заметно, что с течением времени (сроки твердения) деформация уменьшается независимо от концентрации фибры.

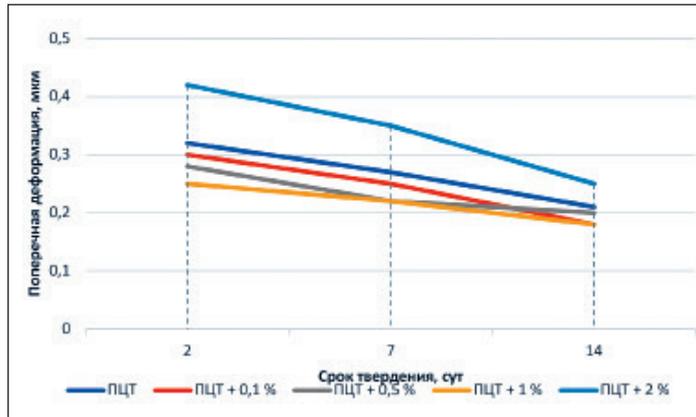
**Рисунок 10 – График зависимости продольной деформации от срока твердения камня при различных концентрациях**



На графике ниже (рисунок 11) можно заметить, что с увеличением концентрации фибры поперечная деформация цементного камня по второму и четвертому индикатору увеличивается. Также видно, что с течением времени деформация снижается для всех концентраций фибры.



**Рисунок 11 – График зависимости поперечной деформации по второму и четвертому индикатору от срока твердения камня при различных концентрациях**



**Рисунок 12 – График зависимости поперечной деформации по третьему индикатору от срока твердения камня при различных концентрациях**

Наблюдается уменьшение продольной деформации с увеличением концентрации фибры. Оптимальное содержание фибры для минимальной продольной деформации может быть в диапазоне от 0,5% до 2%.

Влияние концентрации фибры на поперечную деформацию может быть неоднозначным и зависит от времени твердения и конкретного индикатора. В некоторых случаях, оптимальное содержание фибры для минимальной поперечной деформации может быть около 0,1%, в то время как в других случаях оптимальное содержание может быть выше, например, в диапазоне от 0,5% до 1%.

**Заключение и выводы.**

1) Разрушение цементного камня, армированного фиброй, значительно отличается от поведения базового цемента. При разрушении обычного состава образуется крупный скол дальнейшим хрупким разрушением камня по всему сечению. При разрушении армированного цемента наблюдались локальные трещины и сколы намного меньшего размера, что говорит о большей энергоёмкости разрушения.

2) Армирование бетонов волокном повышает его прочностные характеристики, а также пластичные свойства. В проведенном исследовании с помощью армирования удалось повысить предел прочности на сжатие и изгиб на 11 %. Это связано с тем, что хаотично расположенное волокно в составе цементной матрицы воспринимает часть внешней нагрузки, не позволяя её полностью воздействовать на цементный камень в начальных стадиях нагружения.

3) Наиболее успешные результаты были достигнуты добавкой 0,5 % базальтовой фибры, при которой камень имеет наиболее высокие прочностные характеристики и не теряет свойства текучести в виде цементного раствора. Оптимальная концентрация армирующего материала – 0,5 %, именно при таком соотношении удается повысить прочностные и деформационные характеристики при сохранении свойств текучести цементного раствора. Предел прочности на сжатие и изгиб выше на 11 % по сравнению с традиционными цементами. 📍

*Статья подготовлена в рамках проекта AP09058636 «Разработка тампонажных растворов с дифференциальными свойствами» в рамках действующего конкурса на грантовое финансирование фундаментальных и прикладных исследований молодых ученых по научным и (или) научно-техническим проектам на 2021-2023 г.г. Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.*

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Calvert D. J., Dwight K. Smith. API oilwell cementing practices." In Offshore Technology Conference, pp. OTC-6210. OTC, 1990. <https://doi.org/10.2118/20816-PA>.
- 2 Зимин Д.Е. Армирование цементных бетонов дисперстными материалами из базальта / Материалы 3-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с Международным участием. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-т, 2010. – В 2 ч.: ч.1. – С. 12–15.
- 3 Wang W., Taleghani, A. D. Impact of hydraulic fracturing on cement sheath integrity; A modelling approach. Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2017. – N 44. – P. 265-277.
- 4 Yan Y., Guan, Zh. Yan, W., Hongtu W. Analysis Method of Cement Sheath Damage Zone After Perforation. Paper presented at the SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Bali, Indonesia, October 2019. doi: <https://doi.org/10.2118/196556-MS> /
- 5 Yan Y., Guan Z., Xu Y., Yan W., Wang, H. Numerical investigation of perforation to cementing interface damage area. Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – N 179. – P. 257-265.
- 6 Агзамов Ф.А. Результаты расчета нагрузок, возникающих при динамическом и ударном воздействии в обсадной колонне, как обоснование требований к прочности цементного камня / Ф.А. Агзамов, А.О. Белоусов // Нефть. Газ. Новации. – 2017. – № 10. – С. 60-64. [Agzamov F.A. Rezul'taty rascheta nagruzok, vznikayushchih pri dinamicheskom i udarnom vozdejstvii v obsadnoj kolonne, kak obosnovanie trebovanij k prochnosti cementnogo kamnya / F.A. Agzamov, A.O. Belousov // Neft'. Gaz. Novacii. – 2017. – № 10. – S. 60-64.]
- 7 Purnell P., Short N.R., Page C.L., Majumdar A.J. Microstructural observations in new matrix glass fibre reinforced cement [J]. Cem. Concr. Res. – 2010. – N 30(11). – P. 1747-1753
- 8 Bheel N. Basalt fibre-reinforced concrete: review of fresh and mechanical properties. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, – 2021. – N 6(1). doi:10.1007/s41024-021-00107-4
- 9 Yuanxun Zh., Yu Zh., Jingbo Zh., Yamin Zh., Cong W. A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete. Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 359. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129360>.
- 10 Wang, S., Chen F., Xue Q., Zhang P. Splitting Tensile Strength of Cement Soil Reinforced with Basalt Fibers // Materials. – 2020. – N 13. – P. 3110. <https://doi.org/10.3390/ma13143110>
- 11 Пустовгар А.П., Абрамова А. Ю., Ерёмина Н. Е. Эффективность использования дисперсного армирования бетонов и строительных растворов полипропиленовой и базальтовой фиброй // Технологии бетонов. – 2019. – N 7-8. – P. 156-157. [Pustovgar A.P., Abramova A. YU., Eryomina N. E. Effektivnost' ispol'zovaniya dispersnogo armirovaniya betonov i stroitel'nyh rastvorov polipropilenovoj i bazal'tovoj fibroj // Tekhnologii betonov. – 2019. – N 7-8. – P. 156-157.]

- 12 Толкачев Г.М. Оценка упруго-прочностных свойств цементного камня тампонажного материала, предназначенного для цементирования скважин // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 8. – С. 36-40. [Tolkachev G.M. Osenka urugno-prochnostnyh svojstv cementnogo kamnya tamponazhnogo materiala, prednaznachenного dlya cementirovaniya skvazhin // Vestnik PNIPIU. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo. – 2013. – № 8. – S. 36-40.]
- 13 Агзамов Ф.А. Обоснование методики оценки опасных напряжений в теле цементного камня при проведении технологических операций в скважине // Нефтяная провинция. – 2018. – № 4. – С. 225-239. [Agzamov F.A. Obosnovanie metodiki ocenki opasnyh napryazhenij v tele cementnogo kamnya pri provedenii tekhnologicheskikh operacij v skvazhine // Neftyanaya provinciya. – 2018. – № 4. – S. 225-239.]
- 14 Tehmina A., Nasir Sh., M. Fadhil N.. Mechanical Properties of High-performance Concrete Reinforced with Basalt Fibers // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 77. – P. 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.07.029>.
- 15 Luanna Carla Matias Paiva, Irantécio Mendonça Ferreira, Antonio Eduardo Martinelli, Julio Cezar de Oliveira Freitas, Ulisses Targino Bezerra. Milled basalt fiber reinforced Portland slurries for oil well applications // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 175. – P. 184-189, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.11.068>.
- 16 Huang Zh., Bin W., Aoyu X., Yazhen Q. Experimental study on dynamic mechanical properties and constitutive model of basalt fiber reinforced concrete // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 152. – P. 154-167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.177>.
- 17 Zhou H., Bin Jia, Hui Huang, Yanling Mou. Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete. Materials. – 2020. – N 13. – P. 1362. <https://doi.org/10.3390/ma13061362>
- 18 Liyun Yang, Huanzhen Xie, Shizheng Fang, Chen Huang, Aiyun Yang, Yuh J. Chao, Experimental study on mechanical properties and damage mechanism of basalt fiber reinforced concrete under uniaxial compression // Structures. – 2021. – Vol. 31. – P. 330-340, ISSN 2352-0124, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.071>
- 19 Xie Lei, Xinjian Sun, Zhenpeng Yu, Juntao Zhang, Guochao Li, and Mushuang Diao. "Experimental Study and Mechanism Analysis of the Shear Dynamic Performance of Basalt Fiber–Reinforced Concrete // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2023. – No. 1 (2023). – P. 04022374.
- 20 Zhang H., Ji S., Wang L., Jin C., Liu X, Li, X. Study on dynamic splitting tensile damage characteristics of basalt fiber reinforced concrete based on AE and DSCM // Journal of Building Engineering. – 2023. – P.104905.