

УДК 691.322.7

**ВЛИЯНИЕ ЦИКЛОВ ЗАМОРАЖИВАНИЯ – ОТТАИВАНИЯ  
НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ ФИБРОБЕТОНА**

**К. Н. Алексеев, Е. В. Захаров**

*Институт горного дела Севера СО РАН,  
E-mail: const1711@mail.ru, просп. Ленина, 43, 677980, г. Якутск, Россия*

Изучено влияние содержания базальтовой фибры диаметром 23 мкм на удельную энергоёмкость разрушения бетона D2000 и легкого теплозащитного бетона D1000. Установлены закономерности воздействия знакопеременных температур на сопротивляемость фибробетона динамическим воздействиям. После 12 циклов (температура замораживания  $-50 \pm 2$  °C) затраты энергии на разрушение образцов бетона марки D2000 при объемном содержании фибры 2.7 % составили 1962 Дж/м<sup>2</sup>, что в 3.6 раза превышает энергоёмкость разрушения образцов неармированной группы. Выявлено, что бетон на пористом демпфирующем заполнителе из вспученного вермикулита обладает более высокой сопротивляемостью к динамическим нагрузкам, чем бетон повышенной плотности. Энергоёмкость разрушения теплозащитного бетона на основе вермикулита D1000 составила 5038 Дж/м<sup>2</sup>, мелкозернистого D2000 — 2326 Дж/м<sup>2</sup>. Энергоёмкость разрушения неармированного бетона на основе вермикулита после трех циклов замораживания – оттаивания падает на 71 % с 5038 до 1473 Дж/м<sup>2</sup>, но при объемном содержании фибры 2.4 % энергоёмкость разрушения фибробетона снижается на 9 % до 4608 Дж/м<sup>2</sup>. Полученные результаты могут способствовать повышению сопротивляемости торкрет-бетонных крепей ударным нагрузкам, в том числе после негативного воздействия циклов замораживания – оттаивания.

*Фибра, волокно базальтовое, бетон мелкозернистый, бетон теплоизоляционный, фибробетон, циклическое замораживание – оттаивание, удельная энергоёмкость разрушения*

DOI: 10.15372/FTPRPI20240606

EDN: XOACMC

Практика разработки месторождений северных территорий России показывает, что все большее распространение получает подземный способ добычи полезных ископаемых. В комплексе вопросов, связанных со строительством шахт, рудников, тоннелей различного назначения и подземных сооружений, вопрос поддержания горных выработок, пройденных в области криолитозоны, все более актуален и требует выбора рациональных, надежных, экономичных способов их крепления.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 0297-2021-0021, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800083-0) на оборудовании ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Известно, что свойства и устойчивость многолетнемерзлых пород во многом зависят от температурного фактора. В зависимости от теплового режима эксплуатации подземных сооружений, конструкции и параметров крепи окружающие многолетнемерзлые породы могут испытывать негативное воздействие протаивания, сезонных и суточных циклов замораживания – оттаивания, суффозии, сублимации льда и др. Прочность кимберлита и карбонатных пород с алмазных месторождений Республики Саха (Якутия) существенно снижается (вплоть до дезинтеграции) после знакопеременного температурного воздействия [1]. Изменение контуров и снижение устойчивости выработок, пройденных в условиях многолетнемерзлых пород по причинам морозного выветривания и протаивания окружающих пород, прослеживается при любом тепловом режиме эксплуатации [2].

В Институте горного дела Севера СО РАН теоретически обоснована и доказана практическая возможность использования легких набрызг-бетонных крепей и покрытий на шахтах и рудниках Севера, выполняющих теплоизоляционную и несущую функции [3, 4]. Предложены конструкции и составы легких набрызг-бетонов на базе теплоизоляционных заполнителей: азерит, керамзит, вермикулит; определены их прочностные характеристики и теплопроводность. В [5] показано, что слой теплозащитного покрытия снижает число циклов замораживания – оттаивания, испытываемых породами приконтурного массива (сезонных и суточных), и уменьшает ореол оттаивания вокруг выработок. Несмотря на описанные характеристики, теплозащитные крепи и покрытия массового внедрения не получили ввиду низкой морозостойкости, недостаточной прочности и более трудоемкой технологии возведения [3].

Повысить физико-механические характеристики бетона позволяет введение в его матрицу коротких искусственных волокон (фибры). Микроармированный композиционный строительный материал обладает высоким уровнем конструктивных свойств: вязкостью разрушения при статическом нагружении, прочностью на изгиб, морозостойкостью и т. д. [6 – 11].

Перечень натуральных и искусственных волокон достаточно обширен [12 – 15]. Благодаря стойкости к щелочной среде цементного теста в течение гидратации цемента [16, 17], относительно малому диаметру (10 – 23 мкм) и, как следствие, большой длине поверхности сцепления фибры с бетонной матрицей [18], стоимостным показателям и массовости производства, внимание заслуживает высокомодульная базальтовая фибра. Одна из задач фибрового армирования бетонов — повышение его стойкости к динамической нагрузке (вязкость разрушения). ГОСТ 29167-2021 устанавливает параметры трещиностойкости бетона при статическом кратковременном нагружении, ГОСТ 10180-2012 — прочность бетонных образцов при изгибе и сжатии путем разрушающей статической нагрузки. Однако давление на подземные горные выработки и возведенную крепь носит не только статический, но и динамический характер, что может спровоцировать чрезвычайные ситуации. Бетонные конструкции в процессе эксплуатации могут подвергаться ударным воздействиям, отличительная черта которых — быстрая скорость передачи энергии разрушения. В настоящее время широко распространены ударные испытания металлов и пластмасс падающим грузом или маятником. Устойчивость бетона к динамическим нагрузкам определяется по его удельной энергоемкости разрушения путем сбрасывания груза на вертикальном копре [19, 20].

Особенно значительно физико-механические характеристики бетона снижаются в условиях Севера при воздействии знакопеременных температур. По этой причине разработана методика, позволяющая оценить энергоемкость разрушения бетона на вертикальном копре, которая учи-

тывает изменение объемного содержания коротких искусственных волокон и температурного фактора [19]. Она обеспечивает оценку воздействия циклов замораживания – оттаивания на исследуемый материал. Основное преимущество методики — возможность испытаний полуразрушенных образцов, частично дезинтегрированных под влиянием циклического замораживания – оттаивания.

Цель настоящей работы — оценка введения искусственных волокон в бетонную матрицу для повышения сопротивляемости бетона ударной нагрузке, цель — обеспечение составам легкого теплозащитного бетона повышенной стойкости к воздействию динамических (ударных) нагрузок, в том числе при негативном воздействии циклов замораживания – оттаивания.

### МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Удельная энергоемкость разрушения бетона определяется с помощью вертикального копра К. И. Сыскова по методу толчения. Способ заключается в дроблении исследуемого геоматериала многократными ударами падающего груза с заданной высоты с дальнейшим проведением ситового анализа продуктов дробления [21]. Энергоемкость разрушения бетона рассчитывается по данным дробления пяти навесок из трех образцов размерами  $24 \times 24 \times 14$  мм. Каждая серия испытываемого материала погружается в загрузочный стакан копра и подвергается дроблению. Дробленный бетон просеивается через лабораторные сита с размерами ячеек 25, 20, 15, 10, 8, 5, 2, 1, 0.5 и 0.25 мм. По итогам гранулометрического анализа находится площадь вновь образованной поверхности  $\Delta S$  (для упрощения расчетов форма частиц принимается шарообразной):

$$\Delta S = \frac{6}{\rho_0} \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{d_i} - 6 \sqrt[3]{\left( \frac{M_n}{\rho_0} \right)^2},$$

где  $\rho_0$  — истинная плотность бетона,  $\text{кг/м}^3$ ;  $M_n$  — масса образцов, т. е. общая пяти навесок,  $\text{кг}$ ;  $d_i = 0.5 \times (d_i + d_{i+1})$  — средний диаметр фракции массой  $M_i$ ,  $\text{мм}$ .

По площади поверхности, образованной в результате дробления образцов  $\Delta S$ , рассчитывалась энергия  $E$ , затрачиваемая на их механическое дробление, затем удельная энергоемкость разрушения бетонных образцов  $W$ :

$$E = mgH\eta k,$$

$$W = \frac{E}{\Delta S}.$$

Здесь  $m$  — масса сбрасываемого груза,  $\text{кг}$ ;  $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $H$  — высота сбрасывания груза,  $\text{м}$ ;  $\eta = 0.95$  — затраты на трение;  $k$  — число ударов груза, значение которого находилось по величине выхода фракции менее 0.5 мм [22].

Изучение воздействия знакопеременных температур осуществлялось согласно методике ГОСТ 10060-2012 по третьему ускоренному методу при температуре заморозки  $-50 \pm 2$  °С. По достижении 28 сут изготовленные серии образцов насыщались 5 % водным раствором NaCl в течение 4 сут, затем в наполненных этим же раствором закрытых емкостях подвергались воздействию циклического замораживания – оттаивания.

Бетонные образцы изготавливались из следующих компонентов:

- портландцемент М400 производства ОАО ПО “Якутцемент”, насыпная плотность  $1194 \text{ кг/м}^3$ , истинная —  $3121 \text{ кг/м}^3$ ;

- речной песок из карьера “Пригородный”, г. Якутск, содержание глинисто-илистых примесей 0.4 %, модуль крупности 1.2, насыпная плотность 1418 кг/м<sup>3</sup>, истинная — 2685 кг/м<sup>3</sup>;
- вермикулитовый песок фракции 0.6–2.0 мм ВВТ-150 ГОСТ 12865-67 производства ООО “ПО Химцентр”, г. Новосибирск, насыпная плотность 140–305 кг/м<sup>3</sup>, истинная — 2846 кг/м<sup>3</sup>;
- фибра базальтовая марки ВС23-6-61, замасливатель — водная эмульсия № 61, длина 6 мм, диаметр 23 мкм, производства ООО “ТД “Русский базальт”.

Расход компонентов смеси на изготовление образцов представлен в табл. 1. Смешение компонентов бетонной смеси проводилось с помощью дрели с миксер-насадкой, продолжительность смешивания не менялась, готовый бетонный раствор в формах уплотнялся на виброплощадке СМЖ-539. Образцы распалубливались в возрасте 4 сут и хранились при 100 % влажности и температуре  $20 \pm 1$  °С в течение 28 сут.

ТАБЛИЦА 1. Состав смесей

| Марка бетона<br>и объемное соотношение<br>вяжущее / заполнитель | Состав смеси, кг/м <sup>3</sup> |             |      |       | Содержание базальтовой фибры       |                     |                                     |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------|------|-------|------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|
|                                                                 | Цемент                          | Заполнитель | Вода | Фибра | % от массы<br>сухих<br>компонентов | % от общей<br>массы | объемное<br>содержание $\mu$ ,<br>% |
| D2000,<br>цемент / песок = 1 / 1                                | 792                             | 940         | 396  | 0     | 0                                  | 0                   | 0                                   |
|                                                                 |                                 |             |      | 17.3  | 1                                  | 0.8                 | 0.7                                 |
|                                                                 |                                 |             |      | 34.6  | 2                                  | 1.6                 | 1.3                                 |
|                                                                 |                                 |             |      | 69.3  | 4                                  | 3.3                 | 2.7                                 |
| D1000,<br>цемент / вермикулитовый<br>песок = 1 / 2              | 571                             | 365         | 628  | 0     | 0                                  | 0                   | 0                                   |
|                                                                 |                                 |             |      | 31.3  | 3.3                                | 2                   | 1.2                                 |
|                                                                 |                                 |             |      | 62.5  | 6.7                                | 4                   | 2.4                                 |

Примечание. D2000, D1000 — марки бетона в соответствии с ГОСТ 25820-2021.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние базальтовой фибры на удельную энергоёмкость разрушения образцов конструкционного бетона повышенной плотности D2000 и конструкционно-теплоизоляционного D1000 после воздействия знакопеременных температур приведены на рис. 1, 2 и в табл. 2.

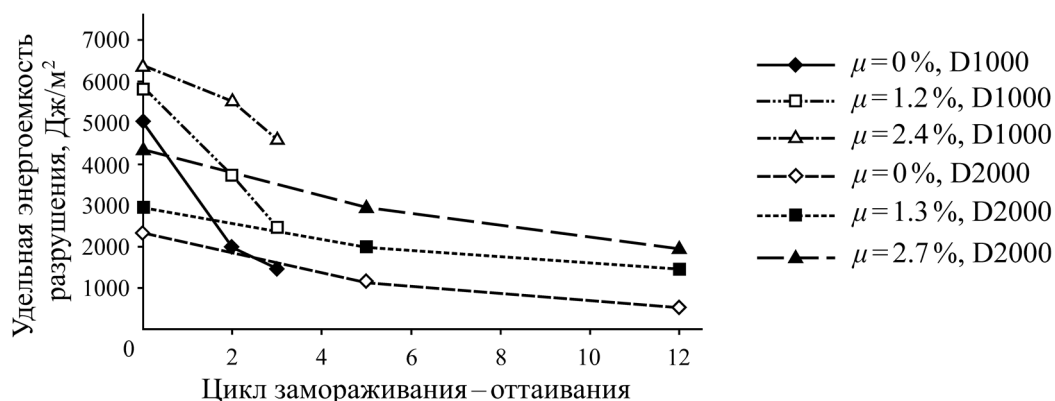


Рис. 1. Удельная энергоёмкость разрушения бетонов разной плотности в зависимости от воздействия циклов замораживания – оттаивания и содержания фибры

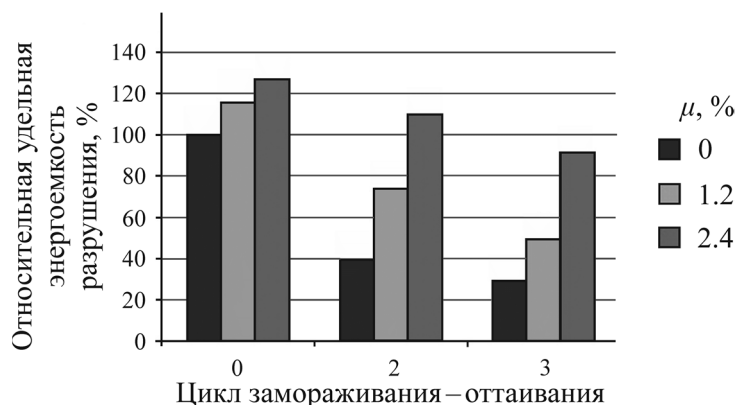


Рис. 2. Относительная удельная энергоемкость разрушения теплозащитного бетона D1000, армированного базальтовой фиброй в зависимости от количества циклов

ТАБЛИЦА 2. Затраты энергии на разрушение бетона, армированного базальтовой фиброй после воздействия знакопеременных температур

| Марка бетона<br>и объемное соотношение<br>вяжущее / заполнитель | Базальтовая фибра |                           | Количество<br>циклов<br>замораживания –<br>оттаивания | Энергоемкость разрушения |      |           |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------|------|-----------|
|                                                                 | кг/м <sup>3</sup> | Объемное<br>содержание, % |                                                       | Дж/м <sup>2</sup>        | %    | $V_m$ , % |
| D2000,<br>цемент / песок = 1 / 1                                | 0                 | 0                         | 0                                                     | 2326*                    | 100* | 8.8       |
|                                                                 |                   |                           | 5                                                     | 1146                     | 49   | 10.7      |
|                                                                 |                   |                           | 12                                                    | 549                      | 24   | 6.4       |
|                                                                 | 17.3              | 0.7                       | 0                                                     | 2686                     | 116  | 5.1       |
|                                                                 |                   |                           | 5                                                     | 1703                     | 73   | 3.7       |
|                                                                 |                   |                           | 12                                                    | 1038                     | 45   | 4.0       |
|                                                                 | 34.6              | 1.3                       | 0                                                     | 2943                     | 127  | 10.6      |
|                                                                 |                   |                           | 5                                                     | 2002                     | 86   | 9.8       |
|                                                                 |                   |                           | 12                                                    | 1466                     | 63   | 11.6      |
|                                                                 | 69.3              | 2.7                       | 0                                                     | 4366                     | 188  | 0.8       |
|                                                                 |                   |                           | 5                                                     | 2956                     | 127  | 3.9       |
|                                                                 |                   |                           | 12                                                    | 1962                     | 84   | 11.4      |
| D1000<br>Цемент / вермикулитовый<br>песок = 1 / 2               | 0                 | 0                         | 0                                                     | 5038*                    | 100* | 4.8       |
|                                                                 |                   |                           | 2                                                     | 1984                     | 39   | 6.4       |
|                                                                 |                   |                           | 3                                                     | 1473                     | 29   | 28.5      |
|                                                                 | 31.3              | 1.2                       | 0                                                     | 5834                     | 116  | 9.2       |
|                                                                 |                   |                           | 2                                                     | 3726                     | 74   | 24.2      |
|                                                                 |                   |                           | 3                                                     | 2473                     | 49   | 19.0      |
|                                                                 | 62.5              | 2.4                       | 0                                                     | 6396                     | 127  | 16.4      |
|                                                                 |                   |                           | 2                                                     | 5528                     | 110  | 30.8      |
|                                                                 |                   |                           | 3                                                     | 4608                     | 91   | 15.0      |

Примечание.  $V_m$  — текущий коэффициент вариации по ГОСТ 18105-2018; звездочкой обозначены результаты испытаний контрольной серии, % — значение энергоемкости разрушения относительно данных контрольных серий.

Из рис. 1 и табл. 1 видно, что наличие высокомодульных базальтовых волокон в бетонной матрице увеличивает сопротивляемость бетона динамическим нагрузкам от падающего груза при испытаниях на вертикальном копре. Удельная энергоемкость разрушения бетона D2000

при увеличении объемного содержания фибры с 0 до 2.7 % выросла на 88 %, т. е. с 2326 до 4366 Дж/м<sup>2</sup>, теплозащитного бетона D1000 — с 5038 до 6396 Дж/м<sup>2</sup> при повышении содержания искусственных волокон с 0 до 2.4 %.

Под влиянием циклов замораживания – оттаивания энергоемкость разрушения всех серий бетонных образцов снижалась вне зависимости от наличия фибры в своей матрице. Затраты энергии на разрушение образцов контрольной неармированной серии D2000 после пяти циклов замораживания – оттаивания снизилась с 2326 до 1146 Дж/м<sup>2</sup> (51 %). При объемном содержании фибры  $\mu = 2.7\%$  после пяти циклов затраты энергии на дробление составили 1146 Дж/м<sup>2</sup>, что в 2.6 раза выше энергоемкости разрушения образцов неармированной серии. После 12 циклов удельная энергоемкость разрушения при  $\mu = 2.7\%$  составила 1962 Дж/м<sup>2</sup>, что в 3.6 раза превышает данный показатель у образцов неармированной серии, равный 549 Дж/м<sup>2</sup>.

Согласно рис. 2 и табл. 2, влияние трех циклов замораживания – оттаивания снижает относительную энергоемкость разрушения неармированных образцов теплозащитного бетона D1000 на 71 % (с 5038 до 1473 Дж/м<sup>2</sup>). Однако у фиброармированных образцов с содержанием фибры 2.4 % энергоемкость разрушения снизилась всего на 9 % от контрольной (до 4608 Дж/м<sup>2</sup>).

На разрушение теплозащитного бетона D1000 затрачено энергии 5038 Дж/м<sup>2</sup>, что более чем в 2 раза превышает затраты на разрушение бетона повышенной плотности D2000 (2326 Дж/м<sup>2</sup>). Это связано с присутствием в легком теплозащитном бетоне демпфирующего заполнителя из вспученного вермикулита. В [23] предположено, что на пути роста трещины находится энергетический гаситель из вермикулита, который в меньшей степени способен передавать динамическую энергию от падающего груза.

Наличие в структуре бетона включений из вермикулита (рис. 2, табл. 1) не только снижает его плотность и теплопроводность, но и повышает сопротивляемость динамической нагрузке. Сочетание вермикулита и высокомодульной фибры способно повысить сопротивление бетона ударной нагрузке, в том числе после негативного воздействия знакопеременных температур.

## ВЫВОДЫ

Экспериментально определено влияние содержания базальтовой фибры на удельную энергоемкость разрушения плотного бетона D2000 и легкого теплозащитного бетона D1000. Установлены закономерности воздействия знакопеременных температур на сопротивляемость фибробетона динамическим воздействиям. Показано, что бетон на пористом демпфирующем заполнителе из вспученного вермикулита обладает более высокой сопротивляемостью к динамическим нагрузкам, чем бетон повышенной плотности. Энергоемкость разрушения неармированного бетона на основе вермикулита после трех циклов замораживания – оттаивания падает на 71 %, но при объемном содержании фибры 2.4 % энергоемкость разрушения фибробетона снижается на 9 %. Полученные результаты показывают, что использование высокомодульного базальтового волокна в качестве микроарматуры торкрет-бетонных крепей и теплозащитных покрытий может увеличить их сопротивление динамическим воздействиям, в том числе после неблагоприятного влияния циклов замораживания – оттаивания; способствовать повышению долговременной устойчивости торкрет-бетонных крепей и безопасности труда горнорабочих.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курилко А. С. Экспериментальные исследования влияния циклов замораживания – оттаивания на физико-механические свойства горных пород. — Якутск: Изд-во СО РАН, 2004. — 154 с.
2. Авксентьев И. В., Скуба В. Н. Теплоизоляция горных выработок в условиях многолетней мерзлоты. — Новосибирск: Наука, 1983. — 176 с.
3. Галкин А. Ф., Киселев В. В., Курилко А. С. Набрызг-бетонная теплозащитная крепь. — Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992. — 164 с.
4. Васильев П. Н., Курилко А. С., Хохолов Ю. А., Шерстов В. А. Тепловой режим угольных шахт Якутии и способы его регулирования. — Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2009. — 244 с.
5. Соловьев Д. Е., Хохолов Ю. А., Захаров Е. В. Изменение контуров незакрепленной горной выработки под воздействием циклов замораживания – оттаивания // Тр. Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. памяти чл.-корр. РАН М. Д. Новопашина. — 2011. — С. 270–273.
6. Кюлекчи Г., Чуллу М., Йилмаз А. О. Механические свойства торкрет-бетона с регенерированным заполнителем из строительных отходов // ФТПРПИ. — 2023. — № 3. — С. 34–47.
7. Холодняк М. Г., Нажуев М. П., Зарецкий А. В., Фоминых Ю. С., Доценко Н. А. Зависимость прочности на растяжение при изгибе центрифугированного бетона от фибрового армирования дисперсными волокнами различных видов // Вестн. евразийской науки. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 51.
8. Харун М., Коротеев Д. Д., Дхар П., Ждеро С., Елроба Ш. М. Физико-механические свойства базальто-волокнистого высокопрочного бетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2018. — Т. 14. — № 5. — С. 396–403.
9. Соболев Г. М., Зотов А. Н. Морозостойкость и водонепроницаемость модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй // Вестн. науч. конференций. — 2018. — № 5-2 (33). — С. 89–91.
10. Перфилов В. А., Габова В. В., Лукьяница С. В. Бетон для строительства подводных нефтегазовых сооружений // Инж. вестн. Дона. — 2020. — № 11 (71). — С. 313–320.
11. Kang J., Chen X., and Yu Z. Effect of polypropylene fiber on frost resistance and carbonation resistance of manufactured sand concrete, Structures, 2023, No. 56.
12. Окольников Г. Э., Новиков Н. В., Старчевская А. Ю., Пронин Г. С. Влияние базальтовой фибры на прочность бетона // Системные технологии. — 2019. — № 2 (31). — С. 37–40.
13. Yoo D.-Y. and Banthia N. Impact resistance of fiber-reinforced concrete — A review, Cement Concrete Composites, 2019, Vol. 104. — 103389.
14. Abbass W., Khan M. I., and Mourad S. Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete, Construction Building Materials, 2018, Vol. 168. — P. 556–569.
15. Ahmad W., Farooq S. H., Usman M., Khan M., Ahmad A., Aslam F., Yousef R. A., Abduljabbar H. A., and Sufian M. Effect of coconut fiber length and content on properties of high strength concrete, Materials, 2020, Vol. 13, No. 5. — 1075.
16. Бабаев В. Б., Строкова В. В., Нелюбова В. В., Савгир Н. Л. К вопросу о щелочестойкости базальтовой фибры в цементной системе // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2013. — № 2. — С. 63–66.
17. Wang Q., Ding Y., and Randl N. Investigation on the alkali resistance of basalt fiber and its textile in different alkaline environments, Construction Building Materials, 2021, Vol. 272, No. 11. — 121670.

18. **Боровских И. В., Хозин В. Г.** Изменение длин базальтовых волокон при его распределении в композиционном вяжущем высокопрочных базальтофибробетонов // Изв. КазГАСУ. — 2009. — № 2 (12). — С. 233–237.
19. **Алексеев К. Н., Курилко А. С., Захаров Е. В.** Влияние базальтового волокна (фибры) на вязкость и энергоемкость разрушения мелкозернистого бетона // ГИАБ. — 2017. — № 12. — С. 56–63.
20. **Alekseev K. and Kurilko A.** Strength characteristics of fiber-reinforced light shotcrete, E3S Web of Conf., Khabarovsk, 2020.
21. **Захаров Е. В.** Влияние отрицательных температур на дробление горных пород различных месторождений Якутии // Обогащение руд. — 2021. — № 4. — С. 3–9.
22. **Каркашадзе Г. Г.** Механическое разрушение горных пород. — М.: МГГУ, 2004. — 224 с.
23. **Драпалюк М. В.** Исследование механизма торможения процессов разрушения бетона // Вестн. Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. — 2012. — № 1 (93). — С. 110–113.

*Поступила в редакцию 29/II 2024*

*После доработки 20/X 2024*

*Принята к публикации 08/XI 2024*