



Научная статья

УДК 624.127

EDN: OEIRQU

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-1-2



Исследование физико-механических свойств и методы повышения прочности бетонной шахтной крепи при влиянии агрессивных факторов внешней среды

И.В. Перельгин^a, А.Ю. Болотнев^b^{a,b}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

Резюме. Существуют различные способы крепления подземных горных выработок, каждый из этих способов имеет ряд преимуществ и недостатков. Наиболее универсальным себя зарекомендовало крепление, в составе которого имеется бетонная смесь (набрызг и торкрет – бетонная крепь, железобетонная крепь и т. д.). На данный момент множество рудников и шахт используют бетонную смесь для сооружения различных упрочняющих конструкций в условиях подземной разработки месторождения, требующих очень тщательного подхода, при всем этом горнодобывающие предприятия зачастую сталкиваются с такой проблемой, как потеря бетоном своих прочностных характеристик в процессе эксплуатации. Целью данного исследования являлась наиболее точная оценка поведения бетона при различных агрессивных факторах внешней среды, таких как растепление массива горных пород и наличие агрессивных вод в месте установки крепления. Также в работе рассмотрены возможные методы повышения прочности и устойчивости к тем или иным разрушающим факторам. Исследования включали в себя испытания бетона на морозостойкость, а также проведение «электролизных» испытаний, добавление различных компонентов для повышения прочности бетонных образцов, а также сравнение различных марок бетона. Полученные результаты помогли дать более точную оценку влияния негативных факторов на физико-механические свойства бетонной крепи, дали возможность подобрать комплексный подход к повышению устойчивости крепления в различных условиях подземной среды.

Ключевые слова: бетон, бетонные образцы, М400, агрессивная среда, растепление массива горных пород

Для цитирования: Перельгин И.В., Болотнев А.Ю. Исследование физико-механических свойств и методы повышения прочности бетонной шахтной крепи при влиянии агрессивных факторов внешней среды // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 1. С. 18–29. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-2>. EDN: OEIRQU.

Original article

Study of physico-mechanical properties and methods for increasing the strength of concrete shaft supports under the influence of aggressive environmental factors

Ivan V. Perelygin^a, Aleksandr Yu. Bolotnev^b^{a,b}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. There are various methods of supporting underground mine workings, each of these methods has a number of advantages and disadvantages. The most versatile method has proven to be the support that includes a concrete mixture (shotcrete and gunite – concrete support, reinforced concrete support, etc.). Today, many mines and mining enterprises use concrete mixtures to construct various structures in the conditions of underground mining, while mining enterprises often face the problem of concrete losing its strength characteristics during operation. The purpose of the study is to provide the most accurate assessment of concrete behavior under various aggressive environmental factors, such as thawing of the rock mass and the presence of aggressive waters at the support installation site. The paper also discusses possible methods for increasing strength and resistance to various destructive factors. The research included testing concrete for frost resistance, conducting electrolysis tests, adding various components to increase the strength of concrete samples, as well as comparing different concrete grades. The obtained results allowed to provide a more accurate assessment of the influence of negative factors on the physical and mechanical properties of concrete support, as well as to select an integrated approach to increasing the stability of support under various conditions of underground environment.

Keywords: concrete, concrete samples, M400, aggressive environment, thawing of rock mass

For citation: Perelygin I.V., Bolotnev A.Yu. Study of physico-mechanical properties and methods for increasing the strength of concrete shaft supports under the influence of aggressive environmental factors. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(1):18-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-2>. EDN: OEIRQU.



Введение

Обеспечение безопасности при производстве подземных горных работ – это один из самых важных аспектов при введении в эксплуатацию горнодобывающих предприятий, занимающихся разработкой месторождений полезных ископаемых подземным способом добычи. Одним из этапов по обеспечению безопасности горных работ в условиях подземной разработки месторождений является возведение шахтной крепи [1]. В современной практике наиболее универсальной себя показала шахтная крепь, в составе которой имеется бетон (набрызг и торкрет – бетонные крепи, железобетонная крепь, бетонная крепь), такую крепь могут использовать для горизонтальных, наклонных, а также вертикальных выработок различного сечения [2]. Бетонная крепь по сравнению с другими видами крепления имеет низкую себестоимость, а также более высокие прочностные характеристики, которые и делают ее наиболее универсальной по сравнению с другими способами крепления [3]. Однако существует ряд негативных факторов, которые оказывают отрицательное влияние на прочностные характеристики бетона, и с течением определенного времени полностью разрушают его. Наиболее выраженными агрессивными факторами, влияющими на разрушение бетона, являются агрессивные воды, содержащие в себе различные химические элементы [4–6] и перепады температур, особенно в рудниках, находящихся в условиях вечной мерзлоты [7, 8]. В связи с нарастающей тенденцией перехода с рельсового на самоходный транспорт, который в большинстве своем оснащен дизельными двигателями (температура отработки газов, поступающих в атмосферу из такого агрегата, может достигать 400 °С), происходит значительный перепад температур, что в последствии и вызывает растрескивание массива горных пород [9]. Такие негативные факторы могут повлечь за собой значительные разрушения и повреждения материалов, оборудования и несущих конструкций, что помешает своевременному выполнению работ на горном производстве, значительно повысит риск травмирования работников на рабочем месте, а также приведет к дополнительным расходам на восстановление этих конструкций [10].

Материалы и методы исследования

Для изучения влияния негативных факторов горно-шахтной среды на бетонную крепь, а также для выявления возможных методов повышения устойчивости к негативным факторам проведены следующие испытания:

- морозостойкость бетона;
- использование разных марок цемента;
- добавление строительной фибры в состав бетона;
- влияние коррозии на железобетонные образцы;
- применение композитной сетки в составе бетона.

Морозостойкость бетона. Эксперимент проведен в соответствии с ГОСТ 10060-2012¹ [11]. Для получения оптимальной прочности бетонного образца необходимо учитывать пропорции, предложенные заводом-изготовителем используемого цемента, для изготовления одного образца размерами 100×100×100 мм использованы следующие пропорции [12]:

- цемент М400 – 492 г;
- песок – 661 г;
- вода – 207 мл.

В последующем изготовлено 12 экспериментальных бетонных образцов; после заливки (для достижения максимальных прочностных характеристик) образцы набирали прочность при комнатной температуре в течение 28 суток. Далее проводились циклы морозостойкости путем помещения их в среду с отрицательной температурой на 2 ч, по истечении времени образцы помещались в воду комнатной температуры, на такое же время (рис. 1). Всего проведено 50 циклов морозостойкости.

После 50 циклов морозостойкости, проведены испытания прочности на одноосное сжатие на испытательном прессе марки ИП-500М. Результаты сравнения представлены на рис. 5, а.

Использование различных марок цемента. В ходе эксперимента использовался цемент марок М400 и М600, далее полученные образцы также были испытаны на морозостойкость. Для получения бетонного образца М600 размерами 100×100×100 мм использовались пропорции, предложенные заводом-изготовителем [13]:

- цемент М600 – 528 г;
- песок – 456 г;
- вода – 265 мл.

¹ ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. М.: Стандартинформ, 2018. 25 с.



a



b

Рис. 1. Цикл морозостойкости с бетонными образцами:

a – бетонные образцы находятся в воде комнатной температуры;
b – бетонные образцы находятся в условиях отрицательной температуры

Fig. 1. Freeze-thaw cycle with concrete samples:

a – concrete samples kept in water at room temperature;
b – concrete samples kept under subzero temperatures

Пропорции для получения бетонных образцов марки М400:

- цемент М400 – 492 г;
- песок – 661 г;
- вода – 207 мл.

Для достижения своих максимальных прочностных свойств образцы набирали прочность в течение 28 суток. Далее бетонные образцы испытывались на морозостойкость в количестве 50 циклов. Результаты сравнения представлены на рис. 5, b.

Добавление строительной фибры в состав бетона. Для проведения опыта исполь-

зовались два вида строительной фибры – базальтовая и полипропиленовая (рис. 2).

Базальтовая фибра представляет собой небольшие отрезки базальтовых волокон, ее непосредственным преимуществом по сравнению с другими видами строительной фибры является стойкость к агрессивным средам, в том числе к экстремальному перепаду температур [14]. Полипропиленовая фибра, напротив, исполнена в виде волокон полипропиленовой нити, также отрезками небольшой длины. Данный вид фибры наиболее устойчив к пластическим деформациям [15, 16]. При про-



a



b

Рис. 2. Виды строительной фибры:

a – базальтовая фибра; b – полипропиленовая фибра

Fig. 2. Types of construction fiber:

a – basalt fiber; b – polypropylene fiber



ведении опыта также использовался цемент марки М400, пропорции бетона и введенной в его состав строительной фибры взяты в соответствии с заводом-изготовителем:

- цемент М400 – 492 г;
- песок – 661 г;
- вода – 207 мл;
- полипропиленовая/базальтовая фибра – 5 г.

Пропорции взяты для изготовления одной единицы бетонного образца размерами 100×100×100 мм. Как и ранее, образцы набирали прочностные свойства в течение 28 суток и были испытаны на прочность на одноосное сжатие, с помощью испытательного пресса ИП-500М. Результаты сравнения представлены на рис. 5, с.

Влияние коррозии на железобетонные образцы. Коррозия – процесс, происходящий в течение длительного времени, даже при наличии агрессивных условий требуется несколько недель или месяцев для выявления каких-либо изменений, с целью ускорения процесса коррозии проведены электролизные испытания [17]. Электролиз представляет собой физико-механический процесс, при котором электрический ток, проходя через электролит, вызывает разложение вещества на его составные части. При данном испытании электролиз помогает в несколько раз увеличить скорость протекания процесса коррозии.

Порядок проведения электролизных испытаний. В сосуд с раствором воды и соли (соотношение 40 г/л) помещены экспериментальные образцы бетона, в составе которого находится стальная арматурная сетка. К выступающим концам стали приспособлен медный провод, по которому идет электрический ток (подаваемый ток составил 2–3 А, а подаваемое напряжение – в районе 12 В). Второй медный провод, также идущий от источника тока, приспособлен к металлической пластине, которая тоже находится в заготовленном растворе воды и соли. В этой конструкции металлическая пластина является катодом, а арматурная сетка в составе образца бетона – анодом. Вследствие окислительно-восстановительных реакций арматурная сетка за небольшой период времени покрывается налетом коррозии [18, 19] (рис. 3).

По истечении определенного времени (2 и 4 ч) образцы испытаны на прочность на одноосное сжатие, испытания проводились с использованием пресса марки ИП-500М.

Для контроля потерь прочности, а также визуального сравнения арматурной сетки в составе бетона изготовлены эталонные образцы железобетона, и образцы железобетона, для электролизных испытаний, всего 12 штук. Для изготовления железобетонного образца использовался также цемент марки М400.

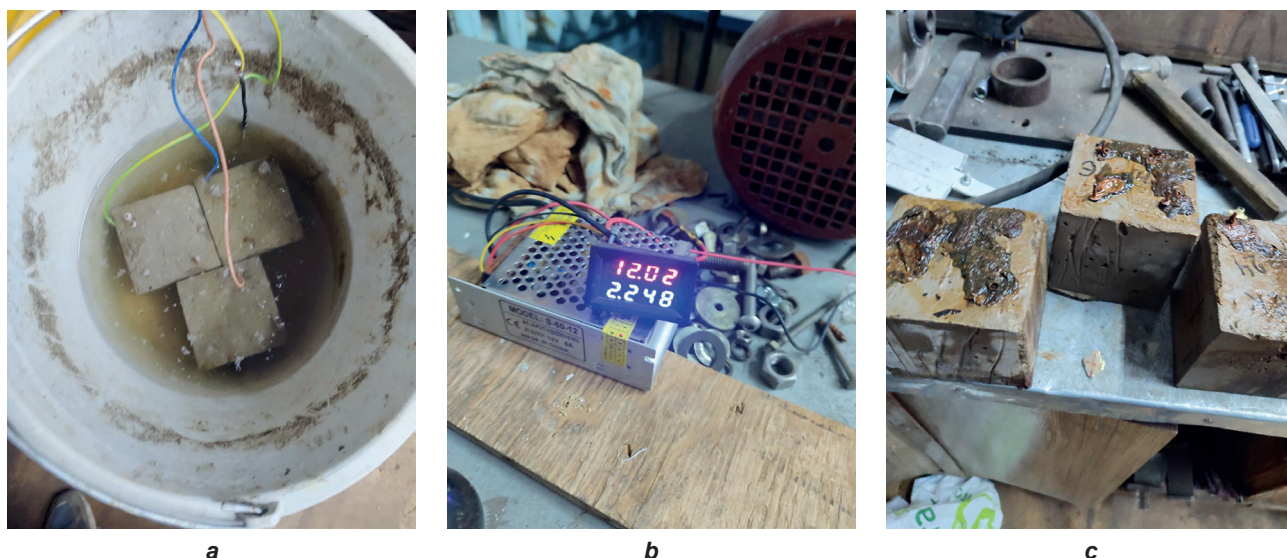


Рис. 3. Электролизные испытания:

a – железобетонные образцы, находящиеся в растворе NaCl; b – напряжение и ток, подаваемые на образцы; c – железобетонные образцы, подверженные коррозии

Fig. 3. Electrolysis tests:

a – reinforced concrete samples in NaCl solution; b – voltage and current applied to the samples; c – reinforced concrete samples undergoing corrosion



- цемент М400 – 492 г;
- песок – 661 г;
- вода – 207 мл;
- стальная арматурная сетка – 47 г.

В табл. 1, 2 представлены значения размеров, нагрузки и напряжения в железобетонных образцах.

Применение композитной сетки в составе бетона. Использование композитных материалов в составе бетонной смеси для возведения шахтной крепи на данный момент не получило широкого применения в горнодобывающей отрасли и требует дополнительных исследований, поскольку поведение композитов в условиях высоких нагрузок и длительного воздействия горного давления изучено недостаточно [20]. Однако в последние десятилетия современные полимерные композиты, а также конструкции и изделия из них находят более широкое применение в строительной индустрии. Для изготовления образцов использовалась обычная композитная сетка из полимерных материалов (рис. 4).

В качестве составляющих компонентов использовались цемент марки М400, песок и вода в следующих пропорциях:

- цемент М400 – 492 г;
- песок – 661 г;
- вода – 207 мл;
- композитная сетка – 25 г.

Для проведения эксперимента изготовлено 6 образцов бетона, в составе которых имеется композит. Композитная сетка имеет наименьший удельный вес, по сравнению со стальной арматурной сеткой, при этом стоит отметить, что композит не подвержен коррозии, так как подвержена сталь. Результаты испытания представлены в табл. 3.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование морозостойкости бетона. Значение давления рассчитано в соответствии с ГОСТ 10180-2012². Эталонный размер образца – 100×100×100 мм. Средняя нагрузка на образцы бетона марки М400 составляет 146,3 кН, усредненное значение напряжения, действующего на образцы, равно 13,5 МПа. Средняя нагрузка на бетонные образцы марки М400 после проведения циклов морозостойкости составила 90,28 кН, средний показатель давления – 8,58 МПа, при



a



b

Рис. 4. Композитная сетка в составе бетона:

a – вид композитной сетки, добавляемой в раствор бетона; b – композитная сетка в разрушенном образце

Fig. 4. Composite mesh in concrete composition:

a – type of composite mesh added to the concrete mix; b – composite mesh in the destroyed sample

² ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: Стандартинформ, 2013. 31 с.

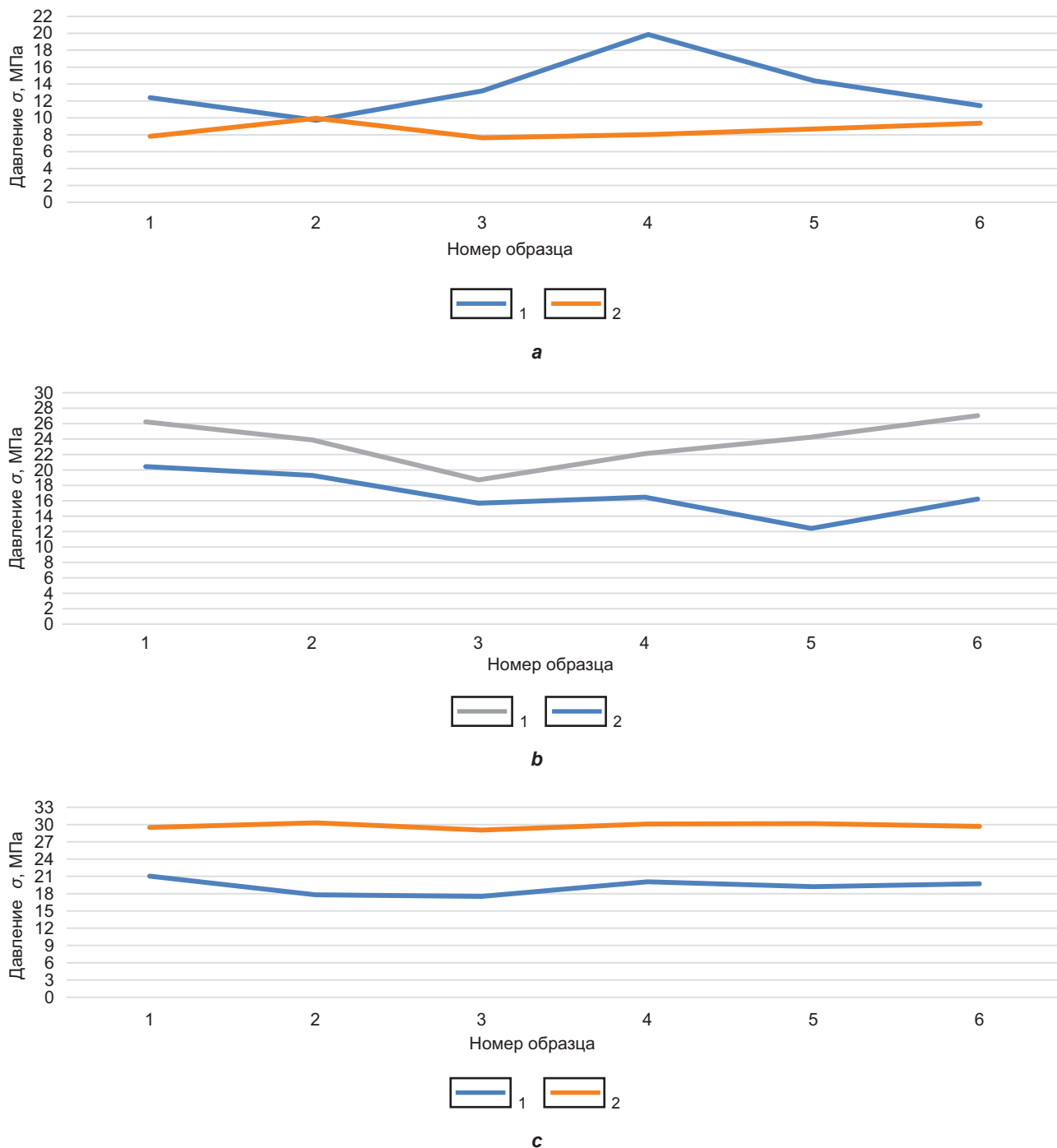


Рис. 5. Графики зависимости давления, действующего на образцы бетона:
 а – марки М400 до (1) и после (2) испытаний на морозостойкость;
 б – марки М400 (1) и М600 (2);
 с – марки М400 с добавлением в состав полипропиленовой (1) и базальтовой (2) фибры
Fig. 5. Dependence diagrams of the pressure acting on concrete samples:
 а – grade М400 before (1) and after (2) freeze-thaw resistance tests;
 б – grades М400 (1) and М600 (2);
 с – grade М400 with polypropylene (1) and basalt (2) fibers added in the mix

этом показатель после испытаний на морозостойкость упал почти на 39 %.

Сравнение двух различных марок бетона. Брали эталонный размер образца 100×100×100 мм. По итогам сравнения проч-

ности двух марок бетона наиболее прочным оказался бетон марки М600, образцы этой марки выдержали среднюю нагрузку, равную 299,5 кН, при этом среднее напряжение в образцах составляет 23,7 МПа, что выше на



74 %. Также бетон марки М600 оказался наиболее морозостойким по сравнению с бетоном марки М400. После проведения циклов морозостойкости средняя нагрузка на бетонные образцы этой марки составила 219,5 кН, а средний показатель давления – 16,75 МПа, по сравнению с эталонными образцами прочность упала на 27 %.

Использование строительной фибры в составе бетона. Был взят эталонный размер образца 100×100×100 мм. По итогу проведенных испытаний наиболее прочным оказался бетон марки М400 с использованием базальтовой фибры. Данные образцы смогли выдержать среднюю нагрузку в 313,13 кН, средний показатель давления на образец составил 29,8 МПа. Базальтовая фибра помогла повысить прочность почти в 2,5 раза, по сравнению с эталонными образцами бетона, в которых не было никаких дополнительных добавок.

Влияние коррозии на железобетонные образцы. В ходе сравнения прочности испытываемых образцов было установлено, что среднее напряжение в железобетонных образцах на сжатие составляет 26 МПа, что почти в 1,5 раза больше, чем напряжение в эталон-

ных образцах, среднее значение которых составило 18 МПа. При этом стоит отметить, что арматурная сетка не давала образцу разделиться на части даже после его разрушения.

Электролизные испытания помогли за небольшой промежуток времени добиться образования коррозии на поверхности арматурной сетки, при этом образцы были разделены на две части – это образцы, которые находились в растворе 2 и 4 ч. В результате испытаний на сжатие было установлено, что средняя прочность образцов, находящихся в растворе 2 ч, упала почти в 1,3 раза (среднее давление – 19,28 МПа), а прочность образцов, которые находились в растворе 4 ч, упала в 1,5 раза (среднее давление – 17,58 МПа).

Использование в составе бетона композитного материала. Сравнительный анализ прочности показал, что железобетонные образцы демонстрируют среднюю прочность на сжатие 25,99 МПа, что в 1,85 раза превышает показатель эталонных образцов (14 МПа), в свою очередь, образцы с композитной сеткой прочнее всего в 0,24 раза. Прочность же железобетонных образцов выше композитных на 81 %.

Таблица 1. Характеристики образцов железобетона
Table 1. Characteristics of reinforced concrete samples

Номер опыта	Длина a , мм	Ширина b , мм	Высота h , мм	Масштабный коэффициент α	Нагрузка F , кН	Давление σ , МПа
1	100	100	96	0,96	238,041	22,85
2	100	95	100	0,95	254,406	25,44
3	100	100	95	0,95	341,573	32,45
4	100	100	96	0,96	238,308	22,88
5	97	98	100	0,97	227,741	23,24
6	97	95	100	0,92	291,142	29,07

Таблица 2. Характеристики образцов железобетона после проведения электролизных испытаний
Table 2. Characteristics of reinforced concrete samples after electrolysis tests

Номер опыта	Длина a , мм	Ширина b , мм	Высота h , мм	Масштабный коэффициент α	Нагрузка F , кН	Давление σ , МПа
2 ч						
1	96	99	95	0,99	179,294	18,67
2	99	104	100	0,99	192,683	18,71
3	102	98	100	0,98	204,509	20,46
4 ч						
4	101	100	99	0,99	183,413	17,98
5	97	105	103	0,94	188,220	17,37
6	100	100	97	0,97	183,795	17,39



Таблица 3. Характеристики образцов бетона с композитной сеткой
Table 3. Characteristics of concrete samples with composite mesh

Номер опыта	Длина a , мм	Ширина b , мм	Высота h , мм	Масштабный коэффициент α	Нагрузка F , кН	Давление σ , МПа
1	100	102	100	0,98	157,411	15,12
2	100	100	98	0,98	151,552	14,85
3	100	101	100	0,99	157,353	15,42
4	95	103	100	0,97	174,101	17,25
5	100	103	97	0,94	154,784	14,12
6	100	100	100	1,00	152,146	15,21

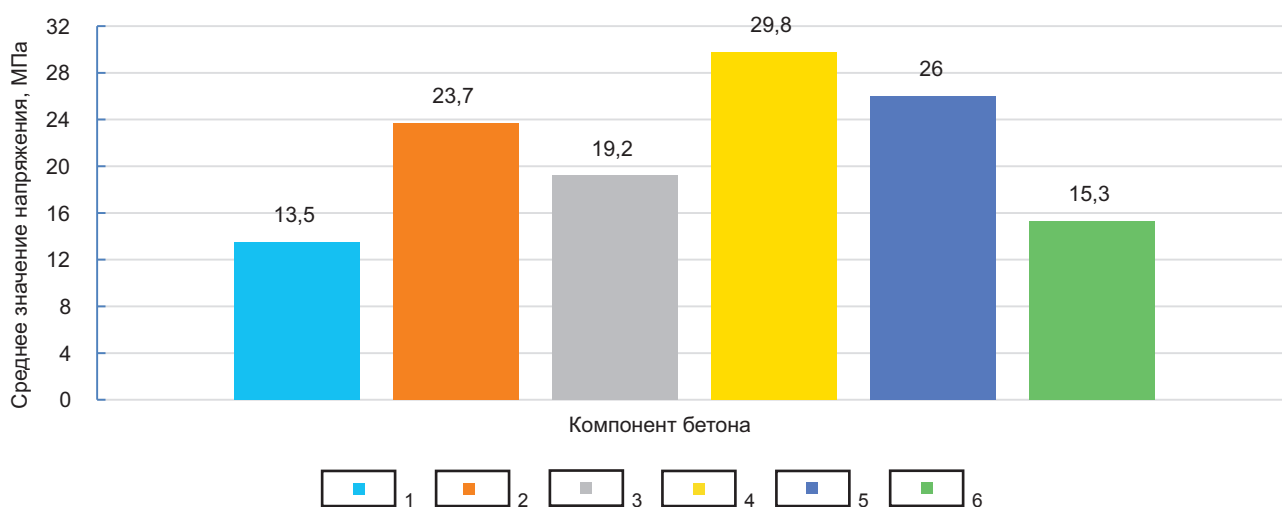


Рис. 6. График зависимости напряжения от компонентов, добавляемых в состав бетона:

1 – М400; 2 – полипропиленовая фибра и М400; 3 – стальная арматура и М400;
 4 – М600; 5 – базальтовая фибра и М400; 6 – композитная арматура и М400

Fig. 6. Mechanical stress vs components added to the concrete:

1 – M400; 2 – polypropylene fiber and M400; 3 – steel reinforcement and M400;
 4 – M600; 5 – basalt fiber and M400; 6 – composite reinforcement and M400

Выше представлен график зависимости напряжения от компонентов, добавляемых в состав бетона (рис. 6).

Исходя из графика можно сделать вывод, что наиболее высокие показатели имеет бетон, в составе которого имеются:

- базальтовая фибра в совокупности с цементом М400;
- стальная арматура в совокупности с цементом М400;
- цемент М600.

Самый низкий показатель у бетона, в составе которого находился только цемент М400.

Заклучение

Экспериментальным путем удалось выявить ряд определенных особенностей, связанных с бетоном:

1. Постоянный перепад температур, иными словами, «растепление массива горных пород» негативным образом влияет на прочностные характеристики бетонной крепи, со временем бетон становится более хрупким, а также начинает терять свою прочность, при этом визуально бетонная конструкция остается неизменной, вследствие этого крепление быстро приходит в негодность, тем самым создается риск обрушения бортов и кровли выработок. Для предотвращения разрушения и потери прочности требуется более постоянная температура с наименьшими колебаниями. Особенно данная проблема актуальна для рудников и шахт, разработка которых ведется в условиях вечной мерзлоты.

2. Бетон марки М600 оказался более устойчив к перепадам температур по сравнению с бетоном марки М400, при этом образец в



результате потерял определенную часть прочностных свойств, что тоже говорит о его недостаточной морозостойкости, также образцы бетона марки М600 имеют наибольшую прочность в сравнении с бетоном марки М400, но его себестоимость во много раз выше, именно поэтому бетон марки М600 не используется для крепления горных выработок.

3. Использование таких добавок, как полипропиленовая и базальтовая фибра, напрямую помогает увеличить прочностные характеристики бетона, при этом наиболее лучшим образом показала себя базальтовая фибра в составе бетона М400, продемонстрировав наиболее высокие показатели прочности по сравнению со всеми остальными способами. При всем этом строительная фибра в несколько раз повышает морозостойкость бетона, в ходе проведения эксперимента потери прочности выявлено не было. По заявлениям завода-изготовителя базальтовой фибры, помимо морозостойкости, значительно повышается огнестойкость бетона, что характерно для рудников и шахт, которые ведут разработку в условиях высоких температур. Также, помимо этого, строительная фибра имеет невысокую себестоимость и минимальный расход при изготовлении раствора бетона.

4. Одним из наиболее негативных факторов, влияющих на прочность шахтной крепи, являются воды, в составе которых имеются агрессивные элементы, в ходе эксперимента было выявлено, каким образом такие факторы влияют на прочность железобетона. Арматура в составе бетона за 4 ч была полностью разрушена, в образце остались лишь некоторые ее части, при этом прочность значительно упала. Такие условия могут привести к скорейшему износу шахтной крепи и последующему ее разрушению, что

может повлечь за собой дополнительные затраты. Особенно агрессивно себя проявляют воды, в составе которых имеются соли, буквально за считанные недели они могут разрушить металлическую конструкцию, тем самым нарушая поддержание массива горных пород.

5. Композитный материал на данный момент не используется при возведении шахтной крепи, поскольку поведение композитных материалов в условиях больших нагрузок и длительного воздействия горного давления изучено недостаточно, но при этом такой материал активно используется в строительстве зданий и сооружений на поверхности. Композит имеет наиболее низкую прочность по сравнению со стальной арматурой, но при этом более устойчив к агрессивным элементам подземной среды, раствор NaCl никаким образом не повлиял на изменение прочности образцов бетона, так как полимерные материалы, по сравнению со сталью, не подвержены коррозии. При этом полимерный материал также имеет наиболее низкую себестоимость.

Таким образом, поведение бетонных конструкций с изменением различных условий внешней среды, а также с добавлением различных компонентов для повышения прочности постоянно меняется. Любой добавляемый в состав бетона компонент имеет различные преимущества, ввиду этого требуются наиболее углубленные исследования по изучению негативного влияния на прочность бетонных конструкций в условиях агрессивной среды. Более детальное исследование поможет подобрать необходимый материал, который наилучшим образом сможет показать себя в тех или иных условиях. Полученные результаты могут способствовать наиболее корректному изучению прочностных характеристик бетона.

Список источников

1. Khalikova E.R., Demin V.F., Demina T.V., Syzdykbaeva D.S., Zairov Sh.Sh. Technological conditions for ensuring the stability of the array of enclosing rocks during the fastening of mine workings // Комплексное использование минерального сырья. 2024. № 3. С. 76–84. <https://doi.org/10.31643/2024/6445.31>. EDN: RINFRY.
2. Ягодкин Ф.И., Плешко М.С. Повышение качества бетонной крепи вертикальных шахтных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 11. С. 324–328. EDN: LTZNSN.
3. Перельгин И.В., Болотнев А.Ю. Исследование прочностных свойств бетонной шахтной крепи при растеплении массива горных пород // Молодежный вестник Иркутского государственного технического университета. 2024. Т. 14. № 2. С. 334–337. EDN: EKVAZZ.
4. Старцев В.О. Влияние агрессивных жидкостей на свойства полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды Всесоюзного алюминиево-магниевого института. 2022. № 8. С. 98–112. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-8-98-112>. EDN: QUEYUI.
5. Аузина Л.И. Системно-модельный анализ при оценке гидрогеологических условий месторождений полезных ископаемых Восточной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 1. С. 90–101. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/1/4232>. EDN: SRJQJA.



6. Li Jinghua, Li Guichen, Zhang Lei, Miao Kaijun, Wo Xiaofang, Yuan Yingqi, et al. Experimental study on stress-permeability evolution of rocks under complex mining-induced loading: Insights into water inrush risk in floor strata // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2025.12.007>. EDN: PWYMDQ.
7. Лавров С.А. Воздействие климатических изменений на сезонное протаивание и водный режим почвогрунтов зоны вечной мерзлоты // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2022. № 4. С. 66–85. https://doi.org/10.35567/19994508_2022_4_5. EDN: HKGQJU.
8. Бублик С.А., Семин М.А., Левин Л.Ю. Исследование прочности монолитной бетонной крепи шахтного ствола в условиях переменных тепловых нагрузок // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2021. Т. 14. № 2. С. 220–232. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2021.14.2.19>. EDN: DFCLCVG.
9. Huang Zhenjiang, Shen Mingxuan, Zhao Yu., Wang Chaolin., Bi Jing, Zhang Yongfa, et al. Experimental study on damage evolution and failure precursor characteristics of granite under thermal shock cycles // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2025.11.006>. EDN: PZJQIU.
10. Fattahi H., Jiryae F. Reliability analysis of surface settlement caused by mechanized tunneling-a case study // *Journal of Mining and Environment*. 2022. Vol. 13. Iss. 1. P. 201–216. <https://doi.org/10.22044/jme.2022.11570.2143>. EDN: UNPJAN.
11. Баранова А.А., Гасс Ю.А., Лоншаков И.В. Определение масштабных и поправочных коэффициентов для образцов мелкозернистого бетона // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2019. Т. 9. № 3. С. 502–509. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-3-502-509>. EDN: XOFKOF.
12. Луценко Е.В. Автоматизированный системнокогнитивный анализ влияния состава бетона на его физико-механические свойства и стоимость // *Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2023. № 191. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14701.56804>.
13. Калашников В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего. Часть 1. Изменение составов и прочности бетонов // *Строительные материалы*. 2016. № 1–2. С. 96–103. EDN: VPWHMH.
14. Котляревская А.В., Лубенец Я.В., Котляревский А.А. Актуальность применения базальтовой фибры в современном строительстве // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 11. С. 507–516. EDN: RQIRTM.
15. Ведищев К.А., Полторан Я.Е. Экспериментальные Исследования фибробетонных конструкций // *Аллея науки*. 2017. Т. 4. № 15. С. 421–424. EDN: YMDUEH.
16. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О., Чамурлиев М.Ю. Применение полипропиленовой микрофибры в технологии геополимерного мелкозернистого бетона // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 2. С. 217. EDN: YATGRV.
17. Хорошев А.А., Есина Е.С., Нархова С.Е., Кононенко В.В. Влияние коррозии и методы защиты бетонных и железобетонных конструкций // *Инженерный вестник Дона*. 2025. № 3. С. 50–61. EDN: KQGQTY.
18. Перельгин И.В., Болотнев А.Ю. Влияние коррозии на железобетонные конструкции при ведении подземных горных работ // *Молодежный вестник Иркутского государственного технического университета*. 2025. Т. 15. № 1. С. 153–157. EDN: VVDDPT.
19. Liu Gang, Zhu Xingyu, Yang Jiayong, Zhang Zhiqiang, Song Jilin, Yang Yuda. Study of structural deterioration behavior of mining method tunnels under steel reinforcement corrosion // *Buildings*. 2025. Vol. 15. Iss. 11. P. 1902. <https://doi.org/10.3390/buildings15111902>. EDN: QHUIFB.
20. Ahmad Z., Salmi A., El Ouni M.H., Ahmed M., Ahmed B., Ghazouani N. Experiments and modeling of structural behavior of different BFRP reinforcements in concrete compressive members // *Materials and Structures*. 2024. Vol. 57. No. 6. P. 141. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02416-9>. EDN: QWOZGY.

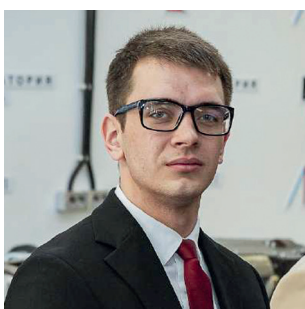
References

1. Khalikova E.R., Demin V.F., Demina T.V., Syzdykbaeva D.S., Zairov Sh.Sh. Technological conditions for ensuring the stability of the array of enclosing rocks during the fastening of mine workings. *Complex Use of Mineral Resources*. 2024;3:76-84. <https://doi.org/10.31643/2024/6445.31>. EDN: RINFRY.
2. Yagodkin F.I., Pleshko M.S. Improving the quality of concrete walling for vertical mine shafts. *Mining informational and analytical bulletin*. 2009;11:324-328. (In Russ.). EDN: LTZNSN.
3. Pereilygin I.V., Bolotnev A.Yu. Investigation of the strength properties of concrete shaft supports during the thawing of an array of rocks. *Molodezhnyj vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2024;14(2):334-337. (In Russ.). EDN: EKVAZZ.
4. Startsev V.O. Effect of aggressive liquids on properties of polymer composite materials (review). *Trudy Vsesoyuznogo alyuminievo-magnievogo instituta*. 2022;8:98-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-8-98-112>. EDN: QUEYUI.
5. Auzina L.I. System model analysis in estimating hydrogeological conditions of Eastern Siberia mineral deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024;335(1):90-101. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/1/4232>. EDN: SRJQJA.
6. Li Jinghua, Li Guichen, Zhang Lei, Miao Kaijun, Wo Xiaofang, Yuan Yingqi, et al. Experimental study on stress-permeability evolution of rocks under complex mining-induced loading: Insights into water inrush risk in floor strata. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2025.12.007>. EDN: PWYMDQ.
7. Lavrov S.A. The impact of climate change on seasonal thawing and water regime of soils in the permafrost zone. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2022;4:66-85. (In Russ.). https://doi.org/10.35567/19994508_2022_4_5. EDN: HKGQJU.

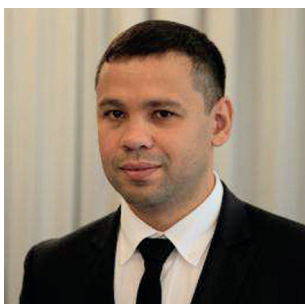


8. Bublik S.A., Semin M.A., Levin L.Yu. Study of the strength of monolithic concrete lining of mine shaft under variable heat loads. *Computational Continuum Mechanics*. 2021;14(2):220-232. (In Russ.). <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2021.14.2.19>. EDN: DFCLCVG.
9. Huang Zhenjiang, Shen Mingxuan, Zhao Yu., Wang Chaolin., Bi Jing, Zhang Yongfa, et al. Experimental study on damage evolution and failure precursor characteristics of granite under thermal shock cycles. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2025.11.006>. EDN: PZJQIU.
10. Fattahi H., Jiryae F. Reliability analysis of surface settlement caused by mechanized tunneling-a case study. *Journal of Mining and Environment*. 2022;13(1):201-216. <https://doi.org/10.22044/jme.2022.11570.2143>. EDN: UNPJAN.
11. Baranova A.A., Gass Yu.A., Lonshakov I.V. Determination of scale and correction factors for fine-grained concrete samples. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2019;9(3)502-509. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-3-502-509>. EDN: XOFKOF.
12. Lutsenko E.V. Automated system-cognitive analysis of the influence of concrete composition on its physical and mechanical properties and cost. *Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2023;191. (In Russ.). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14701.56804>.
13. Kalashnikov V.A. Evolution of development of concretes compositions and change in concrete strength. Concretes of present and future. Part 1. Change in compositions and strength of concretes. *Construction materials Russia*. 2016;1-2:96-103. (In Russ.). EDN: VPWHMH.
14. Kotlyarevskaya A.V., Lubenets Y.V., Kotlyarevsky A.A. The relevance of the use of basalt fiber in modern construction. *Inženernyj vestnik Dona*. 2021;11:507-516. (In Russ.). EDN: RQIRTM.
15. Vedishchev K.A., Poltoran Ya.E. Experimental studies of fiber-reinforced concrete structures. *Alleya nauki*. 2017;4(15):421-424. (In Russ.). EDN: YMDUEH.
16. Eroshkina N.A., Korovkin M.O., Chamurliiev M.Ju. Application of polypropylene microfiber in technology of geopolymer fine grained concrete. *Inženernyj vestnik Dona*. 2018;2:217. (In Russ.). EDN: YATGRV.
17. Khoroshev A.A., Esina E.S., Narkhova S.E., Kononenko V.V. The effect of corrosion and methods of protection of concrete and reinforced concrete structures. *Inženernyj vestnik Dona*. 2025;3:50-61. (In Russ.). EDN: KQGQTY.
18. Pereygin I.V., Bolotnev A.Yu. Effect of corrosion on reinforced concrete structures during underground mining. *Molodezhnyj vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2025;15(1):153-157. (In Russ.). EDN: VVDDPT.
19. Liu Gang, Zhu Xingyu, Yang Jiayong, Zhang Zhiqiang, Song Jilin, Yang Yuda. Study of structural deterioration behavior of mining method tunnels under steel reinforcement corrosion. *Buildings*. 2025;15(11):1902. <https://doi.org/10.3390/buildings15111902>. EDN: QHUIFB.
20. Ahmad Z., Salmi A., El Ouni M.H., Ahmed M., Ahmed B., Ghazouani N. Experiments and modeling of structural behavior of different BFRP reinforcements in concrete compressive members. *Materials and Structures*. 2024;57(6):141. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02416-9>. EDN: QWOZGY.

Информация об авторах / Information about the authors



Перельгин Иван Викторович,
студент,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
✉ pereygin31102008@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-7246-9252>
Ivan V. Pereygin,
Student,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
✉ pereygin31102008@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-7246-9252>



Болотнев Александр Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
✉ abolotnev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4250-6216>



Aleksandr Yu. Bolotnev,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mineral Deposits Development,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
abolotnev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4250-6216>

Вклад авторов / Contribution of the authors

И.В. Перельгин – проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.
А.Ю. Болотнев – разработка концепции, разработка методологии, научное руководство, курирование данных.
Ivan V. Perelygin – investigation, writing – original draft, writing – editing.
Aleksandr Yu. Bolotnev – conceptualization, methodology, supervision, data curation.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 19.01.2026; одобрена после рецензирования 03.02.2026; принята к публикации 16.02.2026.

The article was submitted 19.01.2026; approved after reviewing 03.02.2026; accepted for publication 16.02.2026.