

Инженерная геология, горное дело

УДК 622.023.25:539.32

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-220-230>



Оригинальная статья

Влияние условий водонасыщения на прочность карбонатных пород при сжатии

С. В. Сукнёв

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
suknyov@igds.ysn.ru*

Аннотация

Изучение влияния воды на механические свойства горных пород необходимо для практики их разработки, в частности, при добыче полезных ископаемых, сооружении плотин, прокладывании туннелей, захоронении отходов. Присутствие воды в поровом пространстве материала наряду с наличием самих пор, трещин, каверн оказывает существенное влияние на механические свойства материала. Представлены результаты экспериментального исследования влияния условий водонасыщения на прочность при сжатии образцов доломита и известняка, представляющих вмещающие породы на месторождениях алмазов трубки «Ботубобинская» и трубки «Дальняя». В соответствии с разработанной методикой исследования осуществлен выбор режимов водонасыщения и проведены механические испытания образцов, насыщенных до определенного уровня и затем выдержанных в течение различного времени. По результатам трех серий испытаний построены зависимости прочности доломита при сжатии от времени выдержки и установлено существенное влияние времени выдержки на прочность материала, которое может приводить как к снижению, так и к увеличению прочности. Высказана гипотеза о том, что такое поведение материала связано с неравномерным распределением влаги и образованием «сухого» ядра в образце. Показано, что в рамках модели «сухого» ядра в материале могут быть реализованы различные сценарии разрушения, и это отразится на характере зависимости прочности образца от времени выдержки во влажном состоянии, включая ее немонокотное поведение. Полученные результаты имеют не только фундаментальное значение для понимания и соответствующего описания механизмов воздействия воды на породу, но также и практическое значение для оценки устойчивости и длительной прочности обводненных горных выработок.

Ключевые слова: известняк, доломит, условия насыщения, содержание воды, одноосное сжатие, прочность

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИГДС СО РАН «Исследование поведения геоматериалов при воздействии знакопеременных температурных полей, особенностей теплофизических, аэрогазодинамических и геомеханических процессов в горных выработках и массивах пород при разработке месторождений твердых полезных ископаемых криолитозоны» (проект № FWRS-2021-0021) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Для цитирования: Сукнёв С.В. Влияние условий водонасыщения на прочность карбонатных пород при сжатии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):220–230. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-220-230>

Original article

Influence of water saturation conditions on the compressive strength of carbonate rocks

Sergey V. Suknev

*Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia
suknyov@igds.ysn.ru*

Abstract

The investigation into the influence of water on the mechanical properties of rocks is essential for their effective application in various fields, particularly in mining, dam construction, tunneling, and waste management. The presence of water within the pore spaces of geological materials, along with the existence of pores, cracks, and voids, plays

a significant role in determining their mechanical characteristics. This study presents the results of an experimental investigation into the effects of water saturation conditions on the compressive strength of dolomite and limestone specimens, which are recognized as host rocks in the diamond deposits found in the Botuobinskaya and Dalnaya tubes. Following established research methodologies, specific water saturation regimes were selected, and mechanical tests were conducted on specimens that were saturated to predetermined levels and subsequently maintained for varying durations. The results from the three series of tests revealed the dependence of the compressive strength of dolomite on the duration of holding time. A significant effect of holding time on the material's strength was observed, indicating that it can lead to both a decrease and an increase in strength. This phenomenon is hypothesized to be associated with a non-homogeneous distribution of water and the development of a "dry" core within the specimen. The analysis indicates that, within the framework of the "dry" core model, various fracture scenarios may develop within the material. These scenarios will affect the nature of the dependence of the specimen's strength on holding time in a wet condition, including its non-monotonic behavior. The findings are not only fundamentally important for advancing the understanding and accurate description of the mechanisms of water interaction with rock but also have practical implications for assessing the stability and long-term durability of flooded mine workings.

Keywords: limestone, dolomite, saturation conditions, water content, uniaxial compression, strength

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment for the Chersky Mining Institute of the North SB RAS, titled "An examination of the response of geomaterials to alternating temperature fields, thermophysical, aerogasdynamic, and geomechanical processes in mining operations and rock formations during the extraction of solid mineral deposits in the Cryolithozone." This project (No. FWRS-2021-00210) used the scientific equipment available at the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences."

For citation: Suknev S.V. Influence of water saturation conditions on the compressive strength of carbonate rocks. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):220–230. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-220-230>

Введение

Присутствие воды в поровом пространстве материала наряду с наличием самих пор, трещин, каверн оказывает существенное влияние на механические свойства материала. Это относится и к горным породам [1–3]. Изучение влияния воды на механические свойства горных пород необходимо для практики их разработки, в частности, при добыче полезных ископаемых, сооружении плотин, прокладывании туннелей, захоронении отходов [4–6]. Объектом исследований являются породы различного типа и происхождения. Наиболее изучены песчаники [7–10], глинистые породы (глинистые сланцы, аргиллиты, глинистые песчаники) [11–16]. В меньшей степени исследованы карбонатные породы (известняки, доломиты) [9, 17, 18].

Присутствие влаги, как правило, приводит к снижению предела прочности и уменьшению модуля упругости, т. е. к ослаблению горной породы. Так, снижение прочности горных пород в водонасыщенном состоянии, по разным данным, составляет от 2 до 90 % [19]. Большой разброс данных связан, прежде всего, с большим разнообразием горных пород. Такое действие влаги на механические свойства горных пород получило в англоязычной научной литературе название «water-weakening effect». Хотя единых, стандартных методов оценки «water-weakening

effect» не существует, тем не менее, если попытаться обобщить результаты многочисленных экспериментальных исследований, то можно сделать следующие выводы относительно общих закономерностей поведения горных пород во влажном состоянии [20]:

1. Прочностные и деформационные свойства горных пород однозначно определяются количеством содержащейся в них воды (при зафиксированных всех прочих параметрах). То есть прочность и деформируемость образца горной породы зависят в числе прочего от количества содержащейся воды и не зависят от распределения воды по образцу, а также от способа, которым заданная влажность была достигнута.

2. Значения пределов прочности и модулей упругости горной породы монотонно убывают с увеличением содержания воды.

В последнее время появились работы [20–25], в которых представлены результаты, выходящие за рамки сформулированных выше представлений об общих закономерностях влияния воды на механические свойства горных пород. Главный вопрос состоит в том, действительно ли прочностные и деформационные свойства горных пород являются однозначной функцией количества воды, содержащейся в них, и не зависят, к примеру, от распределения воды в породе или времени выдержки в воде? Как отмечалось в ра-

боте [20], такая постановка вопроса вполне закономерна, поскольку речь идет о деградации механических свойств, которая во многих случаях является необратимым процессом, а это входит в противоречие с постулатом об однозначности.

Настоящее исследование продолжает цикл работ, направленных на установление закономерностей изменения физико-механических свойств карбонатных пород при неравномерном распределении влаги, т. е. в нестационарном состоянии, когда свойства породы претерпевают изменения в процессе перераспределения влаги в поровом пространстве материала. Ранее [23, 25] было обнаружено нетипичное, отличающееся от общепринятых представлений поведение упругих свойств известняка в процессе высыхания образца после его полного водонасыщения, т. е. в процессе перехода образца из водонасыщенного в воздушно-сухое состояние. В работе [20] исследованы упругие свойства образцов доломита и известняка в условиях частичного водонасыщения. Проведены три цикла испытаний предварительно насыщенных образцов в процессе их естественного высыхания в комнатных условиях. На основе анализа полученных экспериментальных данных установлены закономерности изменения модуля упругости исследованных материалов в зависимости от содержания воды при различных режимах предварительного насыщения и сделан вывод о том, что сложившиеся представления об общих закономерностях влияния воды на физико-механические свойства горных пород справедливы только для стационарного состояния и нарушаются в нестационарном, когда влага неравномерно распределена в поровом пространстве материала.

Влияние неравномерности распределения воды на физико-механические свойства горных пород исследовалось также в работах [21, 22, 24]. Обнаружено, что характер и степень влияния распределения воды на прочностные и деформационные свойства различны для разных видов пород. К примеру, в работе [22] приведены результаты испытаний на одноосное сжатие частично насыщенных образцов черного песчаника, один из которых испытывали сразу после насыщения, а второй после насыщения гидроизолировали и выдерживали перед испытанием в течение 2 суток. Тогда образцы имели одинаковое содержание воды, но в первом случае вода была сосредоточена во внешней области образца, а во втором – равномерно распределена по образцу.

Прочность и модуль упругости второго образца оказались на 10 % меньше, чем первого. Из этого наблюдения автор сделал вывод, что различное распределение воды в породе приводит к различным механическим свойствам. Это отличается от предположений традиционных исследований, которые рассматривают механическое поведение как функцию только содержания воды и пренебрегают распределением воды, продолжительностью замачивания в воде и другими условиями. Поэтому традиционные исследования, которые фокусируются только на установлении взаимосвязи между механическими свойствами и содержанием воды в породе, не дают полного понимания влияния воды на механическое поведение породы. Вывод сделан на основании сопоставления диаграмм деформирования, полученных при испытании всего двух образцов, и вряд ли может считаться достаточно обоснованным. Тем не менее, к аналогичным выводам приходят и авторы работ, упомянутых выше. Таким образом, представленные в работах [20–25] результаты свидетельствуют о том, что влияние воды на механические свойства горных пород в условиях неравномерного распределения влаги имеет существенные особенности и требует дальнейшего изучения.

В настоящем исследовании была поставлена задача установить закономерности изменения прочности при сжатии образцов карбонатных пород при различных условиях и уровнях водонасыщения.

Методика эксперимента и предварительные испытания

Для отладки технологии подготовки образцов и методики проведения исследования предварительно были проведены испытания образцов известняка из керновых проб, извлеченных из геомеханической скважины ГМС-1 в окрестности трубки «Ботуобинская». Цилиндрические образцы были изготовлены из кусков керна 38/5 (интервал отбора 372–374 м) и 18/3 (интервал отбора 167–170 м).

Известняк 38/5. Было испытано шесть образцов. Все образцы насыщали в течение 1 ч путем полного погружения в ванну с водой. Перед насыщением образцы высушивали на воздухе. После насыщения три образца испытывали сразу, остальные образцы гидроизолировали и до испытания выдерживали в течение 1 суток в эксикаторе. Испытания проводили на испытатель-

Результаты испытаний известняка 38/5

Table 1

Test results for limestone 38/5

Номер образца	Высота образца, мм	Диаметр образца, мм	Содержание воды, %	Разрушающая нагрузка, МПа	Примечание
38/5-9	36,9	35,1	0,33	56,0	
38/5-19	34,0	35,1	0,14	100,0	
38/5-21	24,0	35,1	0,25	87,6	
38/5-10	36,8	35,1	0,20	68,0	Выдержанный
38/5-20	34,0	35,1	0,26	58,2	Выдержанный
38/5-22	22,0	35,1	0,43	70,3	Выдержанный

ной машине UTS 250 со скоростью нагружения 2 МПа/с. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Содержание воды в образце после насыщения рассчитывали исходя из массы образца до насыщения, т. е. речь идет о содержании избыточной относительно воздушно-сухого состояния воды в образце.

Усредненное по трем образцам значение прочности известняка 38/5 после насыщения составило 81,2 МПа, а после насыщения и выдержки – 65,5 МПа, т. е. на 19 % ниже, что подтверждает вывод, сделанный в работе [22]. Следует, однако, обратить внимание на то, что содержание воды в образцах после насыщения имеет большой разброс, хотя все образцы были изготовлены из одного небольшого куса керна. Это свидетельствует о достаточно сильной структурной неоднородности материала, что проявляется также в большом разбросе прочностных свойств, как это видно из табл. 1. Высокое значение прочности образца 38/5-19, содержащего значительно меньшее количество воды по сравнению с остальными образцами, вероятнее всего, обусловлено очень низкой пористостью, и этот эффект является преобладающим. Поэтому сравнение влияния количества воды (времени насыщения) или времени выдержки необходимо производить на образцах, имеющих, как минимум, сопоставимые значения общей пористости. В противном случае такое сопоставление нельзя признать корректным, и статистика (т. е. большое количество испытанных образцов) здесь не поможет. Если исключить образец 38/5-19 из рассмотрения, значение прочности известняка 38/5 после насыщения уменьшится до 71,8 МПа, а снижение прочности после выдержки соответственно уменьшится до 10 %, но при этом разброс свойств по образцам

все равно превысит 20 %! В этих условиях делать однозначные выводы о характере влияния времени выдержки образца, а значит, и о характере влияния распределения воды в образце на его прочностные свойства было бы преждевременным.

Известняк 18/3. Было испытано восемь образцов. Все образцы насыщали в течение 24 ч путем частичного погружения в ванну с водой с последующим (через 7 ч) доливом воды до полного погружения образцов. Перед насыщением образцы высушивали на воздухе. После насыщения четыре образца испытали сразу, остальные образцы гидроизолировали и до испытания выдерживали в течение 7 суток в эксикаторе. Испытания проводили на испытательной машине UTS 250 со скоростью нагружения 2 МПа/с. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Усредненное по четырем образцам значение прочности известняка 18/3 после насыщения составило 39,95 МПа, а после насыщения и выдержки – 38,7 МПа, т. е. на 3 % ниже. Это отличие незначительно по сравнению с разбросом свойств по образцам, поэтому говорить о влиянии времени выдержки образца на изменение предела прочности в данном случае не приходится. Но здесь противоречия с результатом работы [22] как раз нет. Дело в том, что, как было отмечено выше, вывод, сделанный в работе [22], состоит в том, что различное распределение воды в породе приводит к различным механическим свойствам. В данном эксперименте образцы насыщались достаточно длительное время, и можно было говорить о достижении стационарного водонасыщенного состояния (рис. 1, 2). Поскольку предполагается, что в стационарном состоянии вода равномерно распределена по образцу, дополнительная выдержка образца уже не изменяет

Результаты испытаний известняка 18/3

Table 2

Test results for limestone 18/3

Номер образца	Высота образца, мм	Диаметр образца, мм	Содержание воды, %	Разрушающая нагрузка, МПа	Примечание
18/3-8	38,0	35,1	3,96	52,5	
18/3-9	37,0	35,1	6,68	19,3	
18/3-19	35,7	35,1	7,32	39,4	
18/3-20	23,6	35,1	5,85	48,6	
18/3-28	36,4	35,1	4,72	31,2	Выдержанный
18/3-29	36,9	35,1	6,97	29,2	Выдержанный
18/3-39	36,5	35,1	6,64	64,6	Выдержанный
18/3-40	24,0	35,1	7,07	29,8	Выдержанный

распределение воды в образце и, соответственно, не приводит к изменению его механических свойств.

Основная программа испытаний

Исследования были проведены на образцах доломита из керновых проб, извлеченных из скважины № 120 на месторождении алмазов трубки «Дальняя». Цилиндрические образцы были изготовлены из куска керна 9/1 (интервал отбора 43,0–43,6 м).

Керн разрезался на диски, из которых выбушивались цилиндрические образцы диаметром 35 мм. Из двух дисков было изготовлено по четыре образца, и еще из одного диска было изготовлено два образца. Образцы, изготовленные из одного диска, составляли одну серию, которой

присваивался номер диска. Шлифование торцов образцов производилось на торцевальном станке. Высота образцов выдерживалась в диапазоне 34,8–35,6 мм.

Режимы водонасыщения для каждого образца приведены в табл. 3.

На рис. 3–5 представлены диаграммы насыщения образцов, изготовленных из дисков 1, 2 и 3 соответственно.

Испытания проводили на испытательной машине UTS 250 со скоростью нагружения 2 МПа/с. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Исследование влияния времени выдержки образца в водонасыщенном состоянии на прочность при сжатии проводили на образцах, изготовленных из дисков 1 и 3. Для каждой серии испытаний отбирали по три образца, имеющих

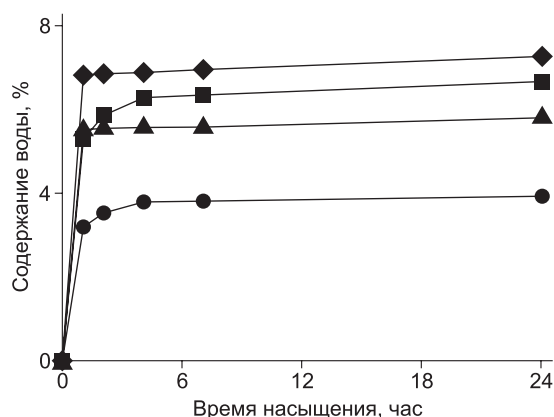


Рис. 1. Диаграммы водонасыщения образцов 18/3-8, 18/3-9, 18/3-19 и 18/3-20

Fig. 1. Diagrams of water saturation of specimens 18/3-8, 18/3-9, 18/3-19, and 18/3-20

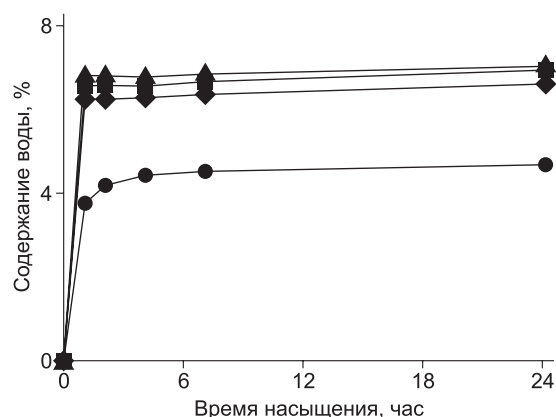


Рис. 2. Диаграммы водонасыщения образцов 18/3-28, 18/3-29, 18/3-39 и 18/3-40

Fig. 2. Diagrams of water saturation of specimens 18/3-28, 18/3-29, 18/3-39, and 18/3-40

Таблица 3

Режимы водонасыщения

Table 3

Water saturation regimes

Образец	Режим водонасыщения
9/1_1-17	Замачивание в течение 4 часов + выдержка в течение 3 суток
9/1_1-18	Замачивание в течение 4 часов + выдержка в течение 6 суток
9/1_1-19	Замачивание в течение 4 часов + выдержка в течение 1 суток
9/1_1-20	Замачивание в течение 4 часов
9/1_2-21	Замачивание в течение 4 часов + выдержка в течение 7 суток
9/1_2-22	Замачивание в течение 4 часов
9/1_3-23	Замачивание в течение 7 часов + выдержка в течение 1 суток
9/1_3-24	Замачивание в течение 7 часов + выдержка в течение 3 суток
9/1_3-25	Замачивание в течение 7 часов + выдержка в течение 6 суток
9/1_3-26	Замачивание в течение 7 часов

наиболее близкие между собой содержания воды после насыщения. Образцы после насыщения гидроизолировали и помещали в эксикатор. Перед испытанием один образец выдерживали в эксикаторе в течение 1 суток, второй – в течение 3 суток, третий – в течение 6 суток. Еще по одному образцу было испытано непосредственно после насыщения. На рис. 6 представлены зависимости прочности при сжатии от времени выдержки.

Обсуждение результатов испытаний

Так же как в испытаниях известняка 18/3, все образцы доломита 9/1 предварительно насыщались до достижения стационарного водонасыщенного состояния (см. рис. 3–5). Поэтому, как было отмечено выше, дополнительная выдержка образ-

ца уже не изменяет распределение воды в образце и, соответственно, не приводит к изменению его механических свойств. Отсюда логически следует, что в данном случае свойства не должны зависеть от времени выдержки образца. Действительно, среднее значение прочности доломита 9/1 после насыщения составило 104,6 МПа, а после насыщения и выдержки (по всем образцам) – 90,0 МПа, что на 14 % ниже, но при этом разброс значений прочности после насыщения превысил 20 %. То есть эффект от выдержки образцов лежит в полосе разброса свойств. Кроме этого, следует обратить внимание на образец 9/1_1-20, который показал наиболее высокую прочность при наименьшем содержании воды (см. рис. 3). Если исключить образец 9/1_1-20

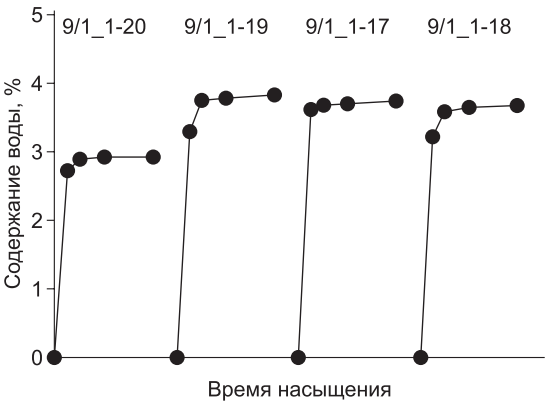


Рис. 3. Диаграммы водонасыщения образцов 9/1_1-20, 9/1_1-19, 9/1_1-17 и 9/1_1-18

Fig. 3. Diagrams of water saturation of specimens 9/1_1-20, 9/1_1-19, 9/1_1-17, and 9/1_1-18

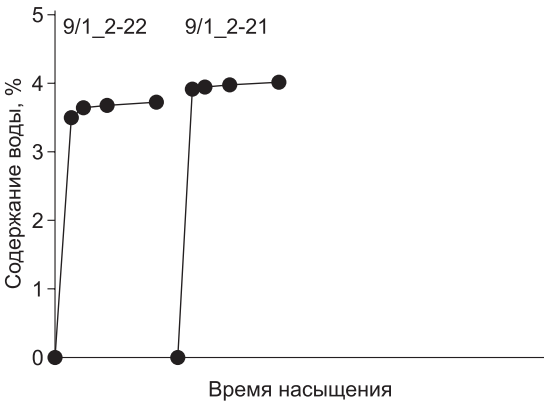


Рис. 4. Диаграммы водонасыщения образцов 9/1_2-22, 9/1_2-21

Fig. 4. Diagrams of water saturation of specimens 9/1_2-22, and 9/1_2-21

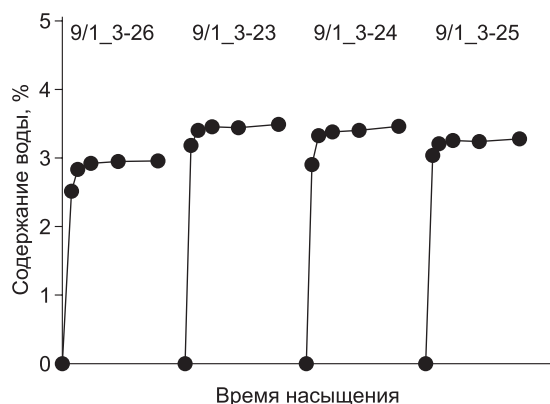


Рис. 5. Диаграммы водонасыщения образцов 9/1_3-26, 9/1_3-23, 9/1_3-24 и 9/1_3-25

Fig. 5. Diagrams of water saturation of specimens 9/1_3-26, 9/1_3-23, 9/1_3-24, and 9/1_3-25

из рассмотрения, значение прочности доломита 9/1 после насыщения составит всего 89,9 МПа. Это значение практически совпадает со значением прочности выдержанных образцов.

Но здесь необходимо сделать два важных замечания. Во-первых, говорить о достижении стационарного состояния, не вполне корректно. Образец продолжает медленно впитывать воду, поэтому правильно говорить о существенном снижении скорости насыщения, но не о полном насыщении, когда водой заполнено все поровое пространство. Здесь можно сослаться на данные работы [22]. Для пяти образцов, предварительно высушенных в печи в течение 24 ч при температуре 110 °С, были построены диаграммы водонасыщения, при этом полное время насыщения

составило 240 ч. Уже после 48 ч замачивания содержание воды стабилизировалось на уровне 1,6 %, что значительно ниже пористости образцов, которая была оценена на уровне 4,7 % (пористость рассчитывали с использованием значения истинной плотности породы, определенного пикнометрическим методом). То есть даже при длительном насыщении значительный объем порового пространства образца (около 15 %) остается не заполненным водой. То, что снижение скорости водонасыщения не всегда является надежным свидетельством достижения стационарного состояния, подразумевающего равномерное распределение воды в образце, отмечалось также в работе [21].

Второе, на что следует обратить внимание, это структура порового пространства материала, которая весьма сложна и неоднородна и представляет собой совокупность пор и каналов различных размера и формы. Скорость миграции влаги и заполнения водой крупных и мелких пор существенно различается, поэтому даже при равномерном распределении воды в образце процесс перераспределения влаги из крупных пор в мелкие поры продолжается еще длительное время. При этом увеличивается совокупная площадь контакта скелета породы с водой, а поскольку взаимодействие породы с водой осуществляется через поверхность пор, это приводит к изменению свойств породы. Другими словами, если поровое пространство заполнено водой не полностью, то даже в стационарном состоянии, при сохранении в образце определенного содержания воды, его свойства со временем могут изменяться.

Таблица 4

Результаты испытаний доломита 9/1

Table 4

Test results for dolomite 9/1

Номер образца	Высота образца, мм	Диаметр образца, мм	Содержание воды, %	Разрушающая нагрузка, МПа	Примечание
9/1_1-17	35,4	35,0	3,75	88,3	Выдержанный 3 сут
9/1_1-18	35,6	35,0	3,68	72,1	Выдержанный 6 сут
9/1_1-19	35,0	35,0	3,84	99,9	Выдержанный 1 сут
9/1_1-20	34,8	35,0	2,94	134,0	
9/1_2-21	35,3	35,0	4,03	106,7	Выдержанный 7 сут
9/1_2-22	35,2	35,0	3,74	82,2	
9/1_3-23	35,0	35,0	3,52	89,5	Выдержанный 1 сут
9/1_3-24	35,4	35,0	3,48	104,8	Выдержанный 3 сут
9/1_3-25	35,4	35,0	3,31	68,6	Выдержанный 6 сут
9/1_3-26	35,3	35,0	2,99	97,5	

Из сказанного следует, что вопрос о влиянии времени выдержки при определенном уровне водонасыщения на изменение механических свойств горной породы требует более тщательного рассмотрения.

Если рассмотреть зависимости прочности при сжатии от времени выдержки отдельно по трем сериям испытаний, то обнаружится гораздо более сложная картина. Как видно из рис. 6, изменение прочности доломита при сжатии в зависимости от времени выдержки в водонасыщенном состоянии продемонстрировало различный характер в трех проведенных сериях испытаний. Для серий испытаний 1 и 3 можно говорить о тенденции снижения прочности с увеличением времени выдержки, хотя в третьей серии испытаний эта зависимость имеет немонотонный характер. Во второй серии испытаний получен обратный результат: выдержанный в течение 7 суток образец показал более высокую прочность, чем образец, испытанный непосредственно после насыщения.

На этот счет можно высказать ряд гипотез, обоснованность которых может быть подтверждена результатами дополнительных физических экспериментов и соответствующего математического моделирования. Если справедливо предположение о том, что после окончания насыщения (замачивания) образца значительная часть пор остается незаполненными или заполненными водой частично и вода в образце распределена неравномерно (т. е. большая часть воды сосредоточена во внешних слоях образца), то это приведет к неравномерному изменению прочностных и деформационных свойств в объеме образца. Внешние слои образца будут более подвержены их деградации (снижению), чем внутренние области. Напряженно-деформированное состояние (НДС) такого неоднородного материала при нагружении будет также неоднородным. Какое именно неоднородное НДС возникнет в образце, зависит от условий нагружения и от степени деградации деформационных свойств материала, содержащего определенное количество влаги. По мере миграции влаги во внутренние области материала будут изменяться его свойства, и, соответственно, будет изменяться НДС образца при приложении такой же нагрузки. Чтобы оценить НДС, нужно знать закономерности изменения деформационных свойств в зависимости от содержания воды и закономерности миграции влаги в образце. А чтобы предсказать, какую нагрузку выдержит образец, нужно еще

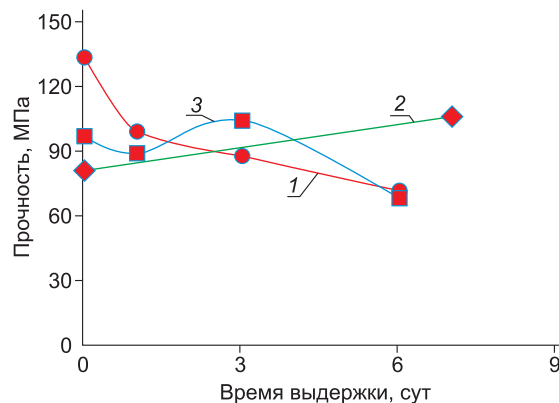


Рис. 6. Зависимости прочности доломита при сжатии от времени выдержки для серий испытаний 1–3

Fig. 6. The dependence of the compressive strength of dolomite on the holding time for test series 1–3

знать закономерности разрушения материала в неоднородном и неравнокомпонентном поле напряжений, а также закономерности изменения его прочностных свойств в зависимости от содержания воды. Таким образом, прочность образца при неравномерном распределении влаги зависит от многих факторов, и их результирующее влияние на величину предельной нагрузки может быть разным. Поэтому зависимость прочности от времени выдержки образца может носить различный, в том числе немонотонный характер.

Рассмотрим в качестве примера схему с образованием «сухого» ядра в центральной части образца. Возьмем цилиндрический образец, который насыщается водой с боковой поверхности, торцы образца гидроизолированы (т. е. для упрощения пренебрегаем краевыми эффектами). После насыщения образец устанавливается на испытательную машину. Нагружение образца осуществляется путем равномерно распределенного по площади торцевых граней смещения. Это типичная схема для испытаний, когда образец помещается между двумя нажимными плитами, жесткость которых намного превышает жесткость образца. В процессе насыщения влага быстро заполняет поры во внешних слоях образца и медленно мигрирует во внутренние области, таким образом, сердцевина образца значительное время остается сухой. Нагружение такого образца по схеме, описанной выше, приводит к неравномерному распределению напряжений в поперечном сечении. Поскольку во влажных слоях модуль упругости уменьшается, это приводит к уменьшению напряжений во внешних слоях и к увеличению напряжений в центральной части образца.

Разрушение образца может происходить как за счет высоких напряжений во внутренних слоях, так и за счет низкой прочности внешних слоев, поскольку помимо уменьшения модуля упругости во влажных слоях также происходит снижение предела прочности материала. Если уменьшение напряжений во внешних слоях происходит быстрее, чем снижается прочность материала, то тогда разрушение образца будет обусловлено потерей несущей способности внутренних слоев, образующих «сухое» ядро. По мере миграции влаги во внутренние слои материала размер «сухого» ядра будет уменьшаться, а с ним будет уменьшаться и предельная разрушающая нагрузка. Но если разрушение образца будет обусловлено потерей несущей способности внешних слоев, то картина поменяется на противоположную. По мере миграции влаги и уменьшения размера «сухого» ядра напряжения будут распределены все более неравномерно, концентрируясь в области «сухого» ядра и уменьшаясь во влажных слоях, что приведет к увеличению разрушающей нагрузки. В реальном материале сценарии разрушения могут меняться в процессе миграции влаги и приводить к немонотонному поведению разрушающей нагрузки со временем.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования влияния условий водонасыщения на прочность при сжатии образцов доломита и известняка, представляющих вмещающие породы на месторождениях алмазов трубки «Ботуобинская» и трубки «Дальняя». На основе анализа результатов предварительных испытаний разработана методика подготовки образцов, осуществлен выбор режимов водонасыщения и проведены механические испытания образцов доломита, насыщенных до определенного уровня и затем выдержанных в течение различного времени. По результатам трех серий испытаний построены зависимости прочности доломита при сжатии от времени выдержки и установлено существенное влияние времени выдержки на прочность материала. Если для серий испытаний 1 и 3 можно говорить о тенденции снижения прочности с увеличением времени выдержки (хотя в третьей серии испытаний эта зависимость имеет немонотонный характер), то во второй серии испытаний получен обратный результат: выдержанный в течение 7 суток образец показал более высокую прочность, чем образец, испытанный непосредственно после насыщения.

Сделано предположение о том, что такое поведение материала связано с неравномерным распределением влаги в образце и ее миграцией не только в процессе насыщения, но и во время выдержки образца. После окончания насыщения (замачивания) образца значительная часть пор остается незаполненными или заполненными водой частично и большая часть воды сосредоточена во внешних слоях, что приводит к неравномерному изменению прочностных и деформационных свойств в объеме образца, и, как следствие, к неравномерному распределению напряжений во время испытания, а это оказывает влияние на величину предельной разрушающей нагрузки. По мере выдержки образца происходят миграция влаги, изменение свойств материала и, соответственно, изменение величины разрушающей нагрузки. Показано, что в рамках модели «сухого» ядра в материале могут быть реализованы различные сценарии разрушения, что отразится на характере зависимости прочности образца от времени выдержки в водонасыщенном состоянии, включая ее немонотонное поведение. Для обоснования высказанных гипотез необходимы дополнительные физические эксперименты на возможно большем количестве образцов и соответствующее математическое моделирование.

Список литературы / References

1. Erguler Z.A., Ulusay R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2009;46(2):355–370. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.07.002>
2. Zhou Z., Cai X., Cao W., et al. Influence of water content on mechanical properties of rock in both saturation and drying processes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49(8):3009–3025. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0987-z>
3. Wong L.N.Y., Maruvanchery V., Liu G. Water effects on rock strength and stiffness degradation. *Acta Geotechnica*. 2016;11(4):713–737. <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0407-7>
4. Reviron N., Reuschlé T., Bernard J.-D. The brittle deformation regime of water-saturated siliceous sandstones. *Geophysical Journal International*. 2009;178(3):1766–1778. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04236.x>
5. Wasantha P.L.P., Ranjith P.G. Water-weakening behavior of Hawkesbury sandstone in brittle regime. *Engineering Geology*. 2014;178:91–101. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.05.015>
6. Pan Y., Wu G., Zhao Z., He L. Analysis of rock slope stability under rainfall conditions considering

- the water-induced weakening of rock. *Computers and Geotechnics*. 2020;128:103806. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103806>
7. Cai X., Zhou Z., Liu K., et al. Water-weakening effects on the mechanical behavior of different rock types: phenomena and mechanisms. *Applied Sciences*. 2019;9(20):4450. <https://doi.org/10.3390/app9204450>
8. Zhao K., Yang D., Zeng P., et al. Effect of water content on the failure pattern and acoustic emission characteristics of red sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021;142:104709. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104709>
9. Маджид Я., Абу Бакар М.З. Влияние водонасыщенности на механические свойства осадочных пород Пакистана. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2018;(6):37–55. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20180605>
- Majeed Y., Abu Bakar M.Z. Water saturation influences on engineering properties of selected sedimentary rocks of Pakistan. *Journal of Mining Science*. 2018;54(6):914–930. <https://doi.org/10.1134/S1062739118065060>
10. Li D., Sun Z., Zhu Q., Peng K. Triaxial loading and unloading tests on dry and saturated sandstone specimens. *Applied Sciences*. 2019;9(8):1689. <https://doi.org/10.3390/app9081689>
11. Lashkaripour G.R. Predicting mechanical properties of mudrock from index parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2002;61(1):73–77. <https://doi.org/10.1007/s100640100116>
12. Hsu S.C., Nelson P.P. Characterization of Eagle Ford shale. *Engineering Geology*. 2002;67(1-2):169–183. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00151-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00151-5)
13. Erguler Z.A., Ulusay R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2009;46(2):355–370. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.07.002>
14. Ferrari A., Minardi A., Ewy R., Laloui L. Gas shales testing in controlled partially saturated conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018;107:110–119. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.05.003>
15. Li Z., Liu S., Ren W., et al. Multiscale laboratory study and numerical analysis of water-weakening effect on shale. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020;2020:5263431. <https://doi.org/10.1155/2020/5263431>
16. Huang S., He Y., Liu G., et al. Effect of water content on the mechanical properties and deformation characteristics of the clay-bearing red sandstone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2021;80(2):1767–1790. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01994-6>
17. Vászrhelyi B. Statistical analysis of the influence of water content on the strength of the Miocene limestone. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2005;38(1):69–76. <https://doi.org/10.1007/s00603-004-0034-3>
18. Ciantia M.O., Castellanza R., Di Prisco C. Experimental study on the water-induced weakening of calcarenites. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015;48(2):441–461. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0603-z>
19. Wong L.N.Y., Maruvanchery V., Liu G. Water effects on rock strength and stiffness degradation. *Acta Geotechnica*. 2016;11(4):713–737. <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0407-7>
20. Сукнев С.В. Влияние условий водонасыщения на статические упругие свойства карбонатных пород. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2024;(1):15–25. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20240102>
- Suknev S.V. Effects of regimes of water saturation on static elastic properties of carbonate rocks. *Journal of Mining Science*. 2024;60(1):12–21. <http://doi.org/10.1134/S1062739124010022>
21. Zhou Z., Cai X., Cao W., et al. Influence of water content on mechanical properties of rock in both saturation and drying processes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;49(8):3009–3025. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0987-z>
22. Tang S. The effects of water on the strength of black sandstone in a brittle regime. *Engineering Geology*. 2018;239:167–178. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.025>
23. Сукнев С.В. Влияние температуры и степени водонасыщения на изменение упругих свойств скальных пород при переходе из талого в мерзлое состояние. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2019;(2):14–22. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20190202>
- Suknev S.V. Influence of temperature and water content on elastic properties of hard rocks in thaw/freeze state transition. *Journal of Mining Science*. 2019;55(2):185–193. <http://doi.org/10.1134/S1062739119025444>
24. Rabat Á., Tomás R., Cano M. Advances in the understanding of the role of degree of saturation and water distribution in mechanical behaviour of calcarenites using magnetic resonance imaging technique. *Construction and Building Materials*. 2021;303:124420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124420>
25. Сукнёв С.В. Изменение упругих свойств частично насыщенного известняка в процессе высыхания. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):172–178. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-172-178>
- Suknev S.V. Change in the elastic properties of partially saturated limestone during drying conditions. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):172–178. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-172-178>

Об авторе

СУКНЁВ Сергей Викторович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0200-0429>, ResearcherID: S-7251-2016, Scopus Author ID: 6602361450, SPIN: 1998-3509, e-mail: suknyov@igds.ysn.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

About the author

SUKNEV, Sergey Victorovich, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0200-0429>, ResearcherID: S-7251-2016, Scopus Author ID: 6602361450, SPIN: 1998-3509, e-mail: suknyov@igds.ysn.ru

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 17.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 14.05.2025

Принята к публикации / Accepted 20.05.2025