

УДК 622.023.25:539.32

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВОДОНАСЫЩЕНИЯ
НА СТАТИЧЕСКИЕ УПРУГИЕ СВОЙСТВА КАРБОНАТНЫХ ПОРОД**

С. В. Сукнев

*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,
E-mail: suknyov@igds.ysn.ru, просп. Ленина, 43, 677980, г. Якутск, Россия*

Исследованы упругие свойства образцов доломита и известняка вмещающих пород на месторождении алмазов “Ботуобинская трубка” в условиях частичного водонасыщения. Проведены три цикла испытаний предварительно насыщенных образцов в процессе их естественного высыхания в комнатных условиях. 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 механические свойства горных пород справедливы только для стационарного состояния и нарушаются в нестационарном, когда влага неравномерно распределена в поровом пространстве материала.

Доломит, известняк, содержание воды, режимы водонасыщения, одноосное сжатие, модуль упругости, коэффициент Пуассона

DOI: 10.15372/FTPRPI20240102
EDN: HCGPGT

Среди множества факторов, влияющих на прочность и деформируемость горных пород, таких как минеральный состав, текстура, пористость, плотность, большую роль играет содержание в них воды [1–3]. Присутствие влаги приводит к ослаблению породы, т. е. к деградации, снижению прочностных и деформационных характеристик, так называемому water-weakening effect [4, 5]. Связанное с этим разрушение горных пород может вызвать различные повреждения инженерных конструкций и геологические катастрофы, в частности оползни, деформации оснований плотин, карстовые обвалы, сбросы шахтных вод, а также человеческие жертвы и серьезные экономические потери [5–7].

Несмотря на то, что изучение влияния содержания воды на механические свойства горных пород имеет давнюю историю [8–11], эта тема актуальна и в настоящее время. Объектом исследований служат породы различного типа и происхождения: песчаники [5, 7, 12–19], глинистые породы [20–25], карбонатные породы [18, 26, 27], туф [28], гранит [5], мрамор [5], природный гипс [18]. Природа явления достаточно сложна и до конца не изучена ввиду большого

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Тема № 0297-2021-0021, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800083-0) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант № 13.ЦКП.21.0016).

разнообразия горных пород и механизмов (химических, физических, механических) взаимодействия вещества с водой. Для одних пород преобладающими могут быть одни механизмы, для других — совершенно другие [5, 24, 27–32]. По этой причине какое-то простое, универсальное объяснение этому эффекту вряд ли возможно.

Изучение ослабляющего действия воды предполагает сравнение прочностных и деформационных характеристик, полученных на образцах, испытанных в сухом и насыщенном состоянии. Снижение прочности горных пород по разным данным составляет 2–90 % [4], что связано с большим их разнообразием. Единых стандартных методов оценки water-weakening effect не существует. В большинстве работ исследования влияния влажности на механические свойства горных пород ограничиваются изучением свойств образцов в сухом и насыщенном состоянии. Однако для оценки степени их деградации, с целью обеспечения безопасности ведения горных работ, важно знать, как сильно изменяются свойства при низких и умеренных уровнях водонасыщения. Меньшее число работ посвящено изучению свойств горных пород в промежуточных (между сухим и насыщенном) состояниях, т. е. при частичном насыщении. Необходимо учитывать, что испытания в различных состояниях проводятся на разных образцах, а двух образцов горной породы идентичного состава, структуры и обладающих одинаковыми свойствами не существует. На результаты испытаний накладываются погрешности, связанные с изменением свойств от образца к образцу, и уменьшить эти погрешности просто за счет увеличения количества испытанных образцов вряд ли возможно.

Другой важный момент заключается в том, что промежуточные состояния с заданным уровнем содержания влаги могут быть достигнуты разными способами. В большинстве исследований заданная влажность достигалась путем прямого насыщения образца из сухого состояния. При этом в разных работах образцы предварительно высушивали либо в печи, либо на воздухе. Способы достижения заданной влажности или степени насыщения также разнообразны: это полное погружение образца в ванну с водой при обычных условиях, частичное погружение образца в сосуд с водой с постепенным увеличением уровня воды по мере ее всасывания, насыщение в эксикаторе или в климатической камере с контролируемым уровнем относительной влажности воздуха, насыщение в вакуумной камере. Кроме того, заданное содержание влаги может быть достигнуто и обратным путем: при высушивании предварительно насыщенного образца. По сути, в каждой работе используется собственная методика подготовки образцов и проведения испытаний, что сильно усложняет сопоставление результатов разных авторов.

Если попытаться обобщить результаты многочисленных экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы относительно общих закономерностей поведения горных пород во влажном состоянии:

1) прочностные и деформационные свойства горных пород однозначно определяются количеством содержащейся в них воды, т. е. прочность и деформируемость образца горной породы зависят от количества содержащейся воды и не зависят от распределения воды по образцу, а также от способа, которым заданная влажность достигнута;

2) пределы прочности и модули упругости горной породы монотонно убывают с увеличением содержания воды.

В большинстве работ влияние содержания воды исследовалось в стационарном состоянии, когда влага равномерно распределена по образцу. Если условия эксперимента позволяли, то о достижении стационарного состояния судили по существенному снижению скорости водонасыщения. Что касается снижения пределов прочности и модулей упругости с увеличе-

нием содержания воды, то для аналитического описания этого явления предложены различные феноменологические формулы, чаще всего отрицательно-степенные или отрицательно-экспоненциальные зависимости [4]. Отмечалось быстрое снижение прочности и модуля упругости породы с увеличением содержания воды при низких уровнях насыщения и незначительное их уменьшение с увеличением содержания воды при высоких уровнях насыщения.

В последнее время появились публикации [33–36], в которых получены 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 от распределения воды в породе или времени выдержки в воде? Речь идет о деградации механических свойств, которая во многих случаях — необратимый процесс, а это входит в противоречие с постулатом об однозначности. Но даже если рассматривать обратимые упругие деформации пористой структурно-неоднородной среды, ее интегральные свойства будут определяться характером неоднородного распределения свойств по объему.

Также следует отметить, что этот вопрос имеет большое практическое значение для оценки устойчивости и длительной прочности обводненных горных выработок. Только нетронутый массив на удалении от поверхности и водопритоков можно считать находящимся в стационарном состоянии и характеризующимся определенной влажностью. В результате ведения горных работ, обнажения поверхностей массива, затопления и осушения выработок распределение воды в целиках и приповерхностных областях оказывается весьма неравномерным и вопрос о несущей способности целиков и устойчивости откосов приобретает еще большую актуальность.

Представленные в [33–36] результаты свидетельствуют о том, что влияние воды на механические свойства горных пород в состоянии частичного насыщения и в условиях неравномерного распределения влаги имеет существенные особенности и требует дальнейшего изучения. Для объяснения обнаруженного ранее нетипичного поведения упругих свойств горных пород выдвинута гипотеза [35] о появлении при высоких степенях водонасыщения большого количества заполненных водой пор, играющих роль жестких включений в твердом теле, что приводит к увеличению его упругих модулей. Возникает закономерный вопрос, влияют ли условия и степень водонасыщения на поведение упругих свойств в зависимости от количества влаги в образце? Другими словами, в какой степени предложенный механизм увеличения упругих модулей горной породы проявляется при частичном насыщении образца влагой, когда определенная часть пор остается незаполненной водой или заполненной частично.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для ответа на поставленный вопрос целесообразно разбить его на две части и сформулировать две задачи для экспериментального исследования. Во-первых, как влияет степень начального насыщения влагой на характер изменения упругих свойств, и, во-вторых, влияют ли условия достижения определенной степени водонасыщения на характер изменения свойств? Поскольку условия водонасыщения могут быть самые разнообразные, получить исчерпывающие ответы на ограниченном экспериментальном материале вряд ли возможно. Тем не менее на начальном этапе выбраны следующие, наиболее простые способы насыщения:

1) замачивание образца в течение определенного времени, при котором полное насыщение не достигается, с последующим испытанием образца в процессе высыхания (варьируемый параметр — время насыщения образца);

2) замачивание образца в течение фиксированного времени, с последующей гидроизоляцией образца и выдержкой в течение определенного времени перед испытанием (варьируемый параметр — время выдержки образца).

Конкретные режимы насыщения выбирались исходя из предварительно построенных полных диаграмм водонасыщения и водопотери (при естественном высыхании образца в комнатных условиях). После насыщения на образец устанавливали экстензометры (продольный экстензометр 3542RA и поперечный диаметральный экстензометр 3975 фирмы Epsilon) и помещали образец на испытательную машину UTS 250 (рис. 1). Испытания проводили в процессе естественного высыхания образца через определенные промежутки времени, и по диаграммам деформирования рассчитывали модули упругости и коэффициенты Пуассона согласно СТО 05282612-001-2013 [37]. Цикл испытаний одного образца составлял 12 сут. В течение этого времени образец с установленными экстензометрами оставался на машине.

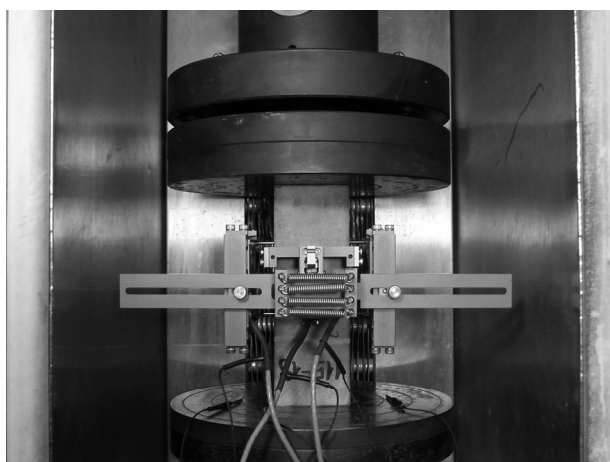


Рис. 1. Образец с экстензометрами, установленный на испытательной машине UTS 250

Действующий ГОСТ 28985-91 [38] не отвечает поставленной задаче. Его основной недостаток состоит в необходимости нагружения образца до уровня внутренних напряжений, приводящих к необратимым структурным изменениям, накоплению повреждений, микротрещин, изменению структуры порового пространства, что ведет к изменению физико-механических свойств.

Из-за необратимых структурных изменений невозможно повторное испытание образца. Это не позволяет проследить за изменением упругих характеристик материала вследствие изменения его влажности, пришлось бы испытывать разные образцы, увлажненные до различного уровня водонасыщения. Такое исследование трудоемко, поскольку связано с изготовлением и испытанием большого количества образцов. Опираясь на статистический анализ достоверности полученных результатов, можно судить о свойствах материала в контрастных (воздушно-сухом и водонасыщенном) состояниях. Для корректного определения свойств материала испытания образца проводили в диапазоне нагрузок, исключающих образование и накопление структурных изменений (повреждений) в материале. После завершения цикла испытаний образец помещали в температурную камеру и выдерживали при 60 °С в течение времени, необходимого для достижения исходного воздушно-сухого состояния. Достижение воздушно-сухого состояния контролировали, измеряя массу образца и проводя контрольные деформационные испытания. После этого выполняли новый цикл испытаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Объект исследования — образцы доломита и известняка, представляющие вмещающие породы на месторождении алмазов “Ботуобинская трубка”. Призматические образцы размером $150 \times 50 \times 50$ мм изготавливались из керна контрольно-стволовой скважины КСС-2. Диаграммы водонасыщения и водопотери образцов приведены на рис. 2. Выбраны три режима водонасыщения с последующим испытанием по мере высыхания образца в течение 12 сут: замачивание в течение 3 сут; замачивание в течение 3 ч; замачивание в течение 3 ч плюс выдержка в течение 6 сут и 21 ч. За время испытания образец терял значительную часть накопленной при насыщении влаги, в результате чего можно было ожидать стабилизации его свойств.

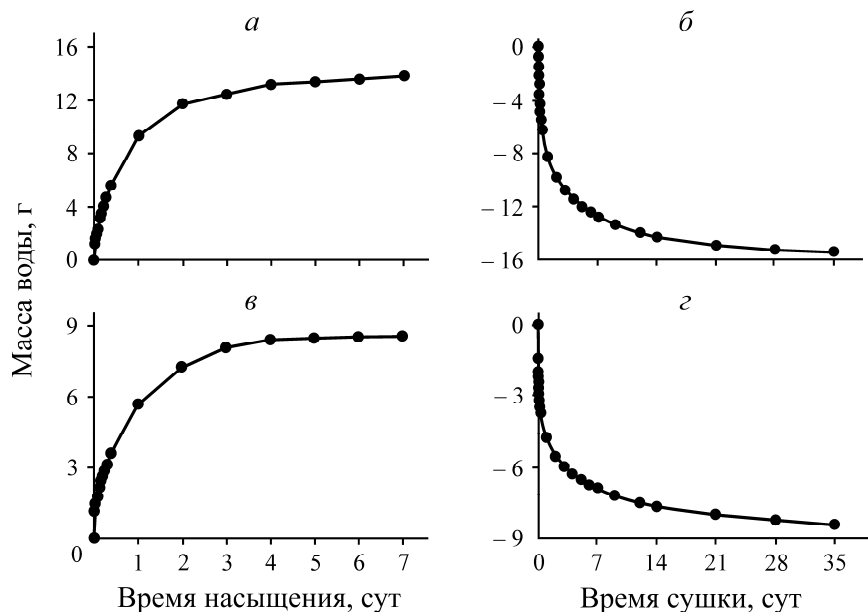


Рис. 2. Диаграмма водонасыщения (а, в) и водопотери (б, з) образцов доломита и известняка

В третьем режиме водонасыщения образец после замачивания заворачивали в полиэтиленовую пленку и помещали в эксикатор. Для каждого режима водонасыщения строили диаграммы водопотери образцов, измеряя их массу в процессе высыхания при комнатной температуре (рис. 3). Для всех режимов насыщения наблюдалась стабилизация массы образца после 12 сут сушки, при том что воздушно-сухое состояние достигалось только после трехчасового замачивания (режим 2). После насыщения в режимах 1 и 3 вода более равномерно распределялась по образцу, небольшая ее часть еще длительное время сохранялась во внутренних областях образца.

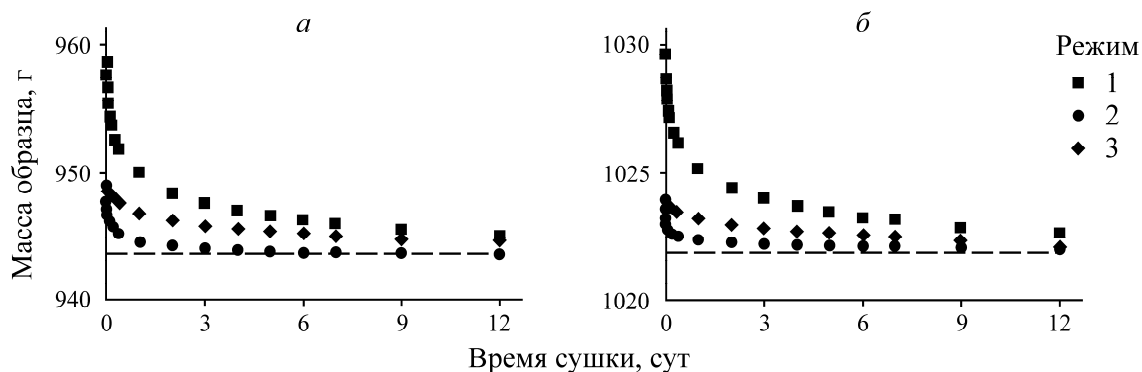


Рис. 3. Изменение массы образца доломита (а) и известняка (б) в процессе сушки после насыщения в режимах 1–3. Штриховые линии — масса образцов в воздушно-сухом состоянии

На рис. 4 приведены результаты определения модуля упругости и коэффициента Пуассона в процессе высыхания образцов после насыщения.

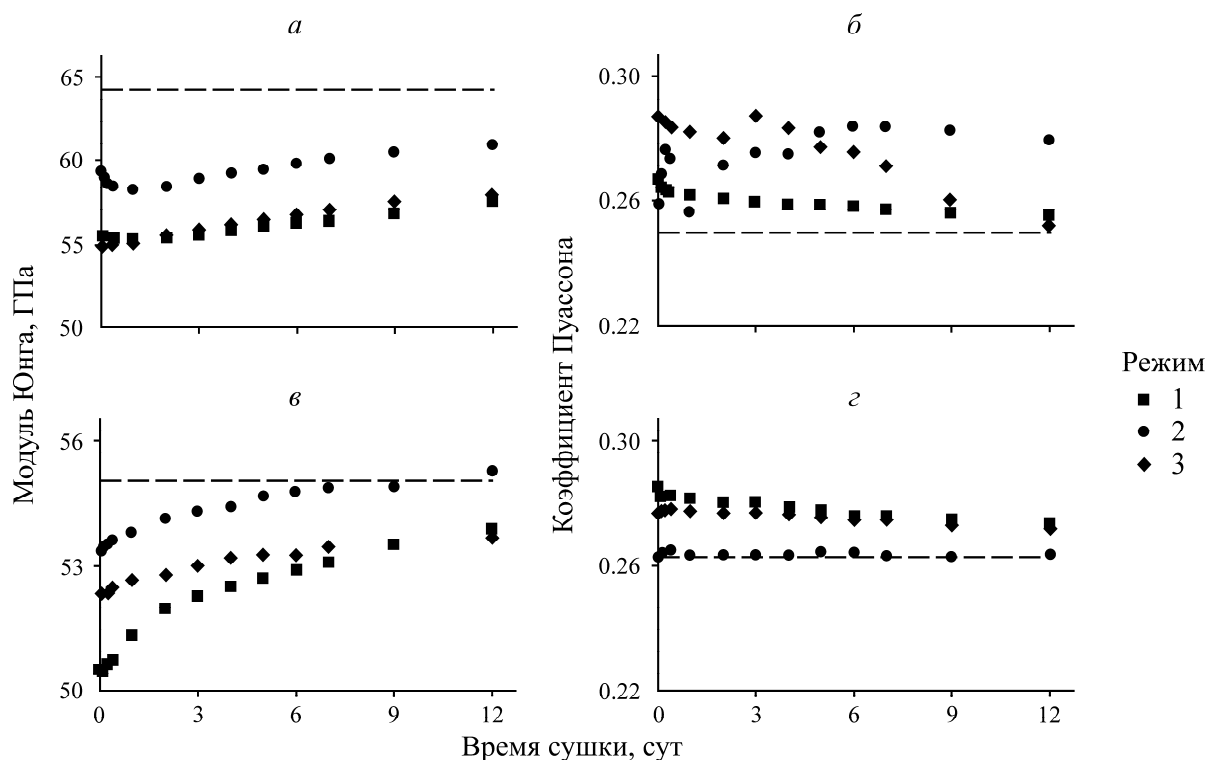


Рис. 4. Зависимость модуля Юнга и коэффициента Пуассона образца доломита (*a*, *б*) и известняка (*в*, *г*) от времени сушки для режимов 1–3. Штриховые линии — модули упругости и коэффициенты Пуассона образцов в воздушно-сухом состоянии

Полученные данные не позволяют сделать определенные выводы относительно характера поведения коэффициента Пуассона. Изменения его по мере высыхания образца доломита после насыщения в режимах 2 и 3 носят немонокотный характер и могут быть связаны как с влиянием миграции влаги, структурными особенностями материала, так и с погрешностями эксперимента. Изменения коэффициента Пуассона образца известняка в процессе сушки очень незначительны для всех режимов насыщения и находятся в пределах погрешности измерений. Для надежного выявления закономерностей поведения данного коэффициента необходимы дополнительные исследования.

В отличие от массы образца, стабилизации модуля упругости материала после 12 сут сушки не происходит. В большей степени это относится к образцу доломита и в меньшей — к образцу известняка. Это означает, что упругие свойства материала и количество воды в образце в процессе сушки изменяются непропорционально. Образец теряет влагу гораздо быстрее, чем происходит восстановление его упругих свойств.

На рис. 5 представлены результаты экспериментального определения модуля упругости (точки) вместе с расчетами его ожидаемого изменения (кривые) в предположении пропорциональной зависимости от содержания влаги.

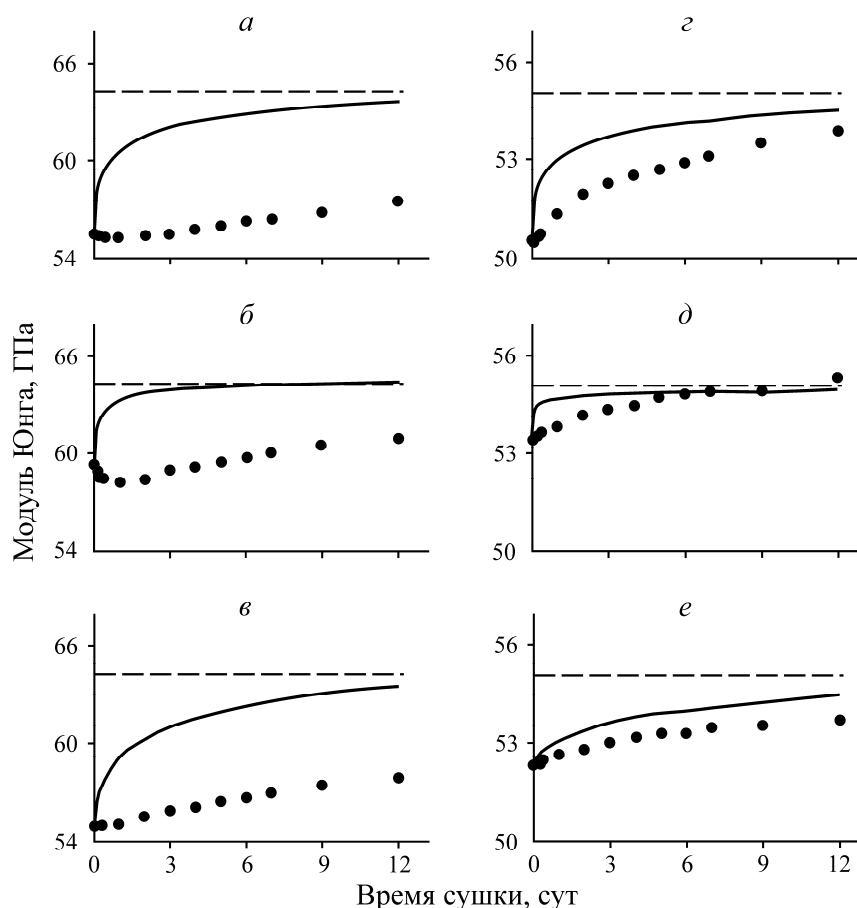


Рис. 5. Зависимость модуля Юнга образца доломита от времени сушки для режима 1 (а), 2 (б), 3 (в) и известняка для режима 1 (г), 2 (д), 3 (е)

По сути, “запаздывание” восстановления упругих свойств при высыхании образца горной породы является подтверждением известного экспериментального факта: быстрое снижение прочности и модуля упругости породы с увеличением содержания воды при низких уровнях насыщения и незначительное их уменьшение с увеличением содержания воды при высоких уровнях насыщения. Это хорошо видно на зависимостях модуля Юнга доломита от количества избыточной (относительно воздушно-сухого состояния) воды в образце в процессе его сушки после предварительного насыщения в режимах 1 и 3 (рис. 6).

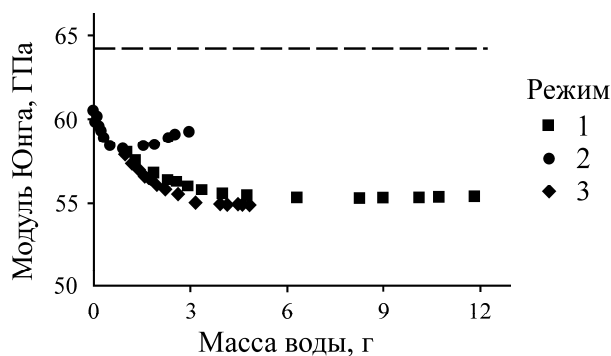


Рис. 6. Зависимость модуля Юнга образца доломита от содержания воды для режимов 1–3

После трехчасового замачивания и последующей длительной выдержки (режим 3) и после замачивания в течение 3 сут (режим 1) вода распределялась в образце доломита достаточно равномерно, зависимости модуля упругости от содержания воды для этих режимов насыщения близки и соответствуют общепринятым представлениям. Однако в процессе кратковременного трехчасового замачивания без последующей выдержки (режим 2) вода не успевала распределиться по всему объему и была сосредоточена преимущественно во внешней области образца. В этом случае поведение модуля упругости в зависимости от содержания воды носит немонотонный характер и входит в противоречие с постулатами об однозначности и монотонности.

Эти результаты, а также данные [35] свидетельствуют о происходящих в материале разнонаправленных физических процессах, связанных с присутствием влаги в образце. С одной стороны, находящаяся в порах вода взаимодействует с минеральным скелетом горной породы, что приводит к уменьшению его жесткости — материал размягчается. Независимо от конкретного механизма такого взаимодействия оно, очевидно, осуществляется через поверхность пор и поэтому наиболее эффективно при низких уровнях водонасыщения. По мере заполнения поры водой эффективность воздействия влаги на минеральный скелет снижается, поскольку в этом процессе не участвует часть воды, находящаяся во внутренних областях поры. В результате наблюдается значительное уменьшение модуля упругости породы при низких уровнях насыщения и его слабое изменение при высоких уровнях насыщения. При высыхании образец теряет эту воду в первую очередь, поэтому в начале процесса сушки наблюдается слабое изменение модуля упругости породы. Степень снижения эффективности воздействия влаги определяется, в том числе, свойствами минерального скелета и формой поры.

С другой стороны, заполненная водой пора препятствует деформации материала, что приводит к увеличению его жесткости. Причем изменение жесткости самой поры носит выраженный нелинейный, близкий к сингулярному характер. Пока пора не заполнена водой полностью, ее жесткость равна нулю. При полном заполнении водой объемная жесткость поры быстро возрастает и, если ее сообщение с другими порами затруднено, объемная жесткость стремится к неограниченно высокому значению ввиду свойства несжимаемости жидкости. В таком состоянии заполненная водой пора представляет собой деформируемое жесткое включение в упругом скелете горной породы. В отличие от недеформируемых твердых включений, пора деформируется без изменения объема и характеризуется определенным поровым давлением, зависящим от формы поры и условий нагружения. Появление в материале при высоких степенях водонасыщения большого количества жестких включений приводит к увеличению его упругих модулей, и при определенных условиях эта тенденция может оказаться преобладающей. Такая ситуация наблюдалась в течение первых суток сушки образца доломита после его насыщения в режиме 2. В это время образец терял воду преимущественно из внутренних областей пор, уменьшая их жесткость, что приводило к снижению модуля упругости. После насыщения в режимах 1 и 3 вода более равномерно распределялась в поровом пространстве, количество жестких пор было незначительно, и они не могли оказать существенного влияния на процесс восстановления упругих свойств.

На рис. 7 показаны зависимости модуля Юнга от количества избыточной воды для образца известняка. После насыщения в режиме 2 образец известняка поглощает незначительное количество воды, и хотя в первые 3–4 сут сушки теряет воду гораздо быстрее, чем происходит восстановление упругих свойств (рис. 5d), в дальнейшем его свойства стабилизируются. В результате представленная на рис. 7 зависимость имеет вид, близкий к общепринятому.

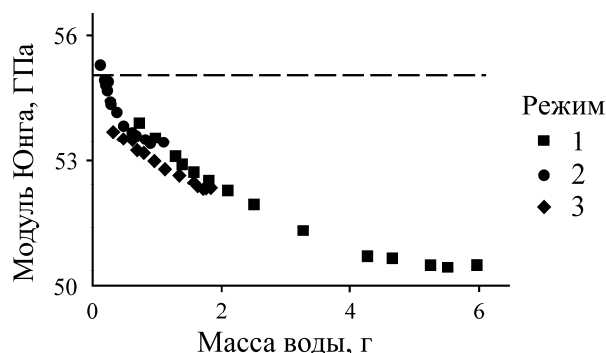


Рис. 7. Зависимость модуля Юнга образца известняка от содержания воды для режимов 1 – 3

ВЫВОДЫ

Обнаружен эффект “запаздывания” восстановления упругих свойств при высыхании предварительно насыщенного образца горной породы. Образец теряет влагу гораздо быстрее, чем происходит восстановление его упругих свойств. Возможная причина такого поведения — взаимодействие воды с минеральным скелетом горной породы осуществляется через поверхность пор и наиболее эффективно при низких уровнях водонасыщения. По мере заполнения поры водой эффективность воздействия влаги на минеральный скелет снижается. При высыхании образец теряет воду, находящуюся во внутренних областях поры, поэтому в начале процесса сушки наблюдается слабое изменение модуля упругости породы.

При предварительном водонасыщении обнаружено немонотонное поведение модуля упругости в процессе высыхания образца доломита, что свидетельствует о происходящих в материале разнонаправленных физических процессах, связанных с присутствием влаги в образце. Находящаяся в порах вода взаимодействует с минеральным скелетом горной породы, что уменьшает его жесткость (water-weakening effect). Заполненная водой пора препятствует деформации материала и увеличивает его жесткость. Появление в материале большого количества жестких включений приводит к увеличению его упругих модулей, и при определенных условиях эта тенденция может оказаться преобладающей. Такое поведение характеризуется как water-hardening effect.

Сложившиеся представления об общих закономерностях влияния воды на механические свойства горных пород справедливы только для стационарного состояния и нарушаются в нестационарном, когда влага неравномерно распределена в поровом пространстве материала. Деформационные свойства характеризуются усредненными по объему значениями упругих модулей, которые зависят от времени выдержки и характера распределения воды в образце. В этих условиях средние упругие модули уже не являются монотонными и однозначными функциями содержания воды в образце, что подтверждается полученными результатами эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hawkes I. and Mellor M. Uniaxial testing in rock mechanics laboratories, Eng. Geol., 1970, Vol. 4, No. 3. — P. 179–285.
2. Ставрогин А. Н., Карманский А. Т. Влияние влажности, вида напряженного состояния и скорости нагружения на физико-механические свойства горных пород // ФТПРПИ. — 1992. — № 4. — С. 3–9.

3. **Hawkins A. B.** Aspects of rock strength, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 1998, Vol. 57, No. 1. — P. 17–30.
4. **Wong L. N. Y., Maruvanchery V., and Liu G.** Water effects on rock strength and stiffness degradation, *Acta Geotech.*, 2016, Vol. 11, No. 4. — P. 713–737.
5. **Cai X., Zhou Z., Liu K., Du X., and Zang H.** Water-weakening effects on the mechanical behavior of different rock types: phenomena and mechanisms, *Appl. Sci.*, 2019, Vol. 9, No. 20. — 4450.
6. **Pan Y., Wu G., Zhao Z., and He L.** Analysis of rock slope stability under rainfall conditions considering the water-induced weakening of rock, *Comput. Geotech.*, 2020, Vol. 128. — 103806.
7. **Zhao K., Yang D., Zeng P., Huang Z., Wu W., Li B., and Teng T.** Effect of water content on the failure pattern and acoustic emission characteristics of red sandstone, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2021, Vol. 142. — 104709.
8. **Colback P. S. B. and Wiid B. L.** The influence of moisture content on the compressive strength of rocks, *Proc. 3rd Canadian Symp. on Rock Mechanics*, 1965. — P. 65–83.
9. **Бурштейн Л. С.** Влияние влажности на прочность и деформируемость песчаника // ФТПРПИ. — 1969. — № 5. — С. 97–100.
10. **Broch E.** The influence of water on some rock properties, *Proc. 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mechanics*, 1974, Vol. 2. — P. 33–38.
11. **Van Eeckhout E. M. and Peng S. S.** The effect of humidity on the compliances of coal mine shales, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 1975, Vol. 12, No. 11. — P. 335–340.
12. **Dyke C. G. and Dobereiner L.** Evaluating the strength and deformability of sandstones, *Q. J. Eng. Geol.*, 1991, Vol. 24, No. 1. — P. 123–134.
13. **Hawkins A. B. and McConnell B. J.** Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content, *Q. J. Eng. Geol.*, 1992, Vol. 25, No. 2. — P. 115–130.
14. **Reviron N., Reuschlé T., and Bernard J.-D.** The brittle deformation regime of water-saturated siliceous sandstones, *Geophys. J. Int.*, 2009, Vol. 178, No. 3. — P. 1766–1778.
15. **Wasantha P. L. P. and Ranjith P. G.** Water-weakening behavior of Hawkesbury sandstone in brittle regime, *Eng. Geol.*, 2014, Vol. 178. — P. 91–101.
16. **Verstrynge E., Adriaens R., Elsen J., and Van Balen K.** Multi-scale analysis on the influence of moisture on the mechanical behavior of ferruginous sandstone, *Constr. Build. Mater.*, 2014, Vol. 54. — P. 78–90.
17. **Kim E. and Changani H.** Effect of water saturation and loading rate on the mechanical properties of Red and Buff Sandstones, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2016, Vol. 88. — P. 23–28.
18. **Маджид Я., Абу Бакар М. З.** Влияние водонасыщенности на механические свойства осадочных пород Пакистана // ФТПРПИ. — 2018. — № 6. — С. 37–55.
19. **Li D., Sun Z., Zhu Q., and Peng K.** Triaxial loading and unloading tests on dry and saturated sandstone specimens, *Appl. Sci.*, 2019, Vol. 9, No. 8. — 1689.
20. **Lashkaripour G. R.** Predicting mechanical properties of mudrock from index parameters, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2002, Vol. 61, No. 1. — P. 73–77.
21. **Hsu S. C. and Nelson P. P.** Characterization of Eagle Ford shale, *Eng. Geol.*, 2002, Vol. 67, No. 1–2. — P. 169–183.
22. **Erguler Z. A. and Ulusay R.** Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2009, Vol. 46, No. 2. — P. 355–370.
23. **Ferrari A., Minardi A., Ewy R., and Laloui L.** Gas shales testing in controlled partially saturated conditions, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2018, Vol. 107. — P. 110–119.
24. **Li Z., Liu S., Ren W., Fang J., Zhu Q., and Dun Z.** Multiscale laboratory study and numerical analysis of water-weakening effect on shale, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2020, Vol. 2020. — 5263431.

25. **Huang S., He Y., Liu G., Lu Z., and Xin Z.** Effect of water content on the mechanical properties and deformation characteristics of the clay-bearing red sandstone, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2021, Vol. 80, No. 2. — P. 1767–1790.
26. **Vásárhelyi B.** Statistical analysis of the influence of water content on the strength of the Miocene limestone, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2005, Vol. 38, No. 1. — P. 69–76.
27. **Ciantia M. O., Castellanza R., and Di Prisco C.** Experimental study on the water-induced weakening of calcarenites, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2015, Vol. 48, No. 2. — P. 441–461.
28. **Chen X., Feng L., Wang J., Guo S., and Xu Y.** Cyclic triaxial test investigation on tuffs with different water content at Badantoru Hydropower Station in Indonesia, *Eng. Geol.*, 2022, Vol. 300. — 106554.
29. **Van Eeckhout E. M.** The mechanisms of strength reduction due to moisture in coal mine shales, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 1976, Vol. 13, No. 2. — P. 61–67.
30. **Jiang Q., Cui J., Feng X., and Jiang Y.** Application of computerized tomographic scanning to the study of water-induced weakening of mudstone, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2014, Vol. 73, No. 4. — P. 1293–1301.
31. **Ciantia M. O., Castellanza R., Crosta G. B., and Hueckel T.** Effects of mineral suspension and dissolution on strength and compressibility of soft carbonate rocks, *Eng. Geol.*, 2015, Vol. 184. — P. 1–18.
32. **Ahamed M. A. A., Perera M. S. A., Matthai S. K., Ranjith P. G., and Dong-yin L.** Coal composition and structural variation with rank and its influence on the coal-moisture interactions under coal seam temperature conditions — a review article, *J. Pet. Sci. Eng.*, 2019, Vol. 180. — P. 901–917.
33. **Zhou Z., Cai X., Cao W., Li X., and Xiong C.** Influence of water content on mechanical properties of rock in both saturation and drying processes, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2016, Vol. 49, No. 8. — P. 3009–3025.
34. **Tang S.** The effects of water on the strength of black sandstone in a brittle regime, *Eng. Geol.*, 2018, Vol. 239. — P. 167–178.
35. **Сукнев С. В.** Влияние температуры и степени водонасыщения на изменение упругих свойств скальных пород при переходе из талого в мерзлое состояние // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 14–22.
36. **Rabat Á., Tomás R., and 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, *Constr. Build. Mater.*, 2021, Vol. 303. — 124420.
37. **Сукнев С. В.** Опыт разработки и применения стандарта организации для определения упругих свойств горных пород // Горн. журн. — 2015. — № 4. — С. 20–25.
38. **ГОСТ 28985-91.** Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. — 11 с.

Поступила в редакцию 27/XI 2023

После доработки 20/XII 2023

Принята к публикации 24/I 2024