

УДК 552.08

**ВЛИЯНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ОСАДОЧНЫХ ПОРОД ПАКИСТАНА**

Я. Маджид¹, М. З. Абу Бакар²

*¹Инженерно-технологический университет, Факультет горного дела,
E-mail: yasirbinmajeed@gmail.com, Пенджаб, 54890, г. Лахор, Пакистан*

²Инженерно-технологический университет, Факультет инженерной геологии, г. Лахор, Пакистан

Проведена оценка влияния водонасыщенности на механические и физические свойства 34 осадочных пород, отобранных из разных геологических формаций Пакистана. Определены физико-механические свойства горных пород с использованием высушенных на воздухе и полностью насыщенных водой образцов. Выполнены шлифовые анализы образцов для определения их петрографии. Согласно статистическим анализам, пределы прочности на сжатие UCS_{sat} и пределы прочности на растяжение BTS_{sat} снизились на 40 и 50 % соответственно у образцов водонасыщенных пород по сравнению с показателями UCS_{dry} и BTS_{dry} образцов сухих пород. Обнаружены линейные корреляции между скоростями ультразвуковых волн, а также между плотностями сухих и водонасыщенных образцов горных пород. Взаимосвязь значений предела прочности на растяжение сухих и водонасыщенных образцов и пористостью породы выражена экспоненциально. Использован метод множественной регрессии для разработки прогностической линейной модели предела прочности на сжатие UCS_{sat} с геотехническими свойствами породы в сухом состоянии и петрографическими характеристиками образцов горных пород. Статистически оценена достоверность множественной регрессионной модели, разработанной в исследовании, и существующей корреляция для преобразования UCS_{dry} в UCS_{sat} .

Предел прочности на сжатие, предел прочности на растяжение, плотность горной породы, объем порового пространства, пористость, водонасыщенность, корреляция

DOI: 10.15372/FTPRPI20180605

Механические, физические и петрографические свойства породы используются горнодобывающей, гражданской и геотехнической отраслями для проектирования подземных и поверхностных сооружений в массиве горных пород. В процессе строительства вмещающая порода встречается как в сухом, так и в насыщенном водой виде. В условиях специализированного применения, например при работе в гавани, разработке и строительстве сооружений под водоемами, почва полностью насыщена водой [1]. При наличии воды в породной толще возникает необходимость в данных о свойствах породы в насыщенных условиях для создания устойчивых конструкций. Лабораторные испытания обычно проводятся с высушенными на воздухе образцами горных пород, что может привести к переоценке их свойств и влиять на общую экономичность проекта.

В [2] выделены две категории факторов, влияющих на поведение пород, особенно песчаников. Первая категория включает такие свойства, как минеральное содержание, текстура, пористость, плотность, натурные нагрузки и содержание воды. Вторая — касается процедур подготовки образцов и методов механики горных пород, принятых в лабораторных работах. На прочность горной породы влияет минералогия, размер зерна, пористость и микроструктура [3]. В насыщенных условиях минералы ведут себя по-разному (размягчение, растворение, коррозия) в зависимости от их кристаллической структуры и химического состава. Известно, что поведение пород (физико-механические свойства, сила резания, удельная энергия, абразивность и т. д.) изменяются при разных уровнях влажности [1, 4].

В многочисленных исследованиях изучалась изменчивость свойств различных типов пород в условиях насыщения водой. Они показывают значительное сокращение предела прочности на сжатие и предела прочности на растяжение образцов, насыщенных водой, в отличие от сухих образцов. Согласно гипотезе [5], твердые тела более подвержены деформации и разрушению вследствие адгезии из окружающей среды, главным образом из-за уменьшения поверхностной энергии вновь образующихся поверхностей в твердом теле в результате деформации. В [6] проведено тестирование предела прочности на сжатие на сухих и насыщенных водой образцах кварцитового сланца и кварцитовидного песчаника и обнаружено снижение прочности водонасыщенных образцов на 50%. Данное снижение прочности на сжатие приписано падению свободной энергии поверхности, вызванному окружающей жидкостью. В [7] проведены испытания на прочность образцов горных пород при повышенной скорости деформации (поровое давление воды поддерживалось при некотором постоянном значении) и отмечено увеличение значений прочности. В [8] результатом стало снижение прочности на растяжение образцов горных пород за счет увеличения их поверхностного натяжения и диэлектрической проницаемости насыщающей жидкостью.

В [9] отмечено снижение прочности породы при насыщении из-за снижения энергии разрыва, капиллярного натяжения, внутреннего трения, а также повышения порового давления, сопровождающегося дополнительным разрушением, вызванным химической реакцией. В [10] испытаны на прочность при точечной нагрузке образцы трех типов пород (магматических, осадочных и метаморфических) как высушенных на воздухе, так и водонасыщенных. Зафиксировано снижение прочности от 20 до 45%. Исследования [2] привели к заключению, что значительное уменьшение предела прочности на сжатие образцов горных пород песчаника достигнуто при содержании воды ниже 1%. Тестировались три песчаника, находящиеся в Великобритании (Penrith, Bunter и Waterstone) при различном содержании воды — от сухого до полностью насыщенного состояния. В [11] изучены данные 35 образцов песчаника, принадлежащих различным регионам Великобритании, и установлено, что увеличение влажности на 1% может значительно влиять на их прочность и деформируемость. Обнаружено уменьшение значений предела прочности на сжатие насыщенных глинистых и кремнистых песчаников до 78 и 8% соответственно. В [12], используя имеющиеся данные [11] для исследования влияния содержания воды на предел прочности на сжатие и модуль деформации горных пород, предложена статистическая корреляция, демонстрирующая, что прочность водонасыщенных образцов составляет 75.6% от прочности в сухом состоянии.

В [13] обнаружено снижение предела прочности на сжатие на 90%, модуля эластичности — на 93 и предела прочности глинистых пород — на 90% с соответствующим увеличением уровней влажности. В [14] проведены лабораторные испытания прочности глинистого кварцевого песчаника при изменении содержания воды начиная с 0% (высушенные в сушильном шкафу образцы), 0.2% (высушенные на воздухе образцы) и 5.2% (полностью водонасыщенные образцы). Отмечены значительные уменьшения на 63 и 68% предела прочности на сжатие

при содержании воды 0.2 и 5.2 % соответственно, по сравнению с пределом прочности на сжатие высушенного в печи образца. В [15] показано, что прочность природного гипса очень зависима от изменения уровня влажности, т. е. небольшое увеличение уровня влажности от 1 до 2 % приводит к значительному снижению прочности гипса. В [16] проведены испытания механических свойств (предела прочности на сжатие и модуля Юнга) на образцах бурого угля из Латроб-Валли с помощью различных насыщающих сред (воды, двуокиси углерода и азота). При испытании предела прочности на сжатие обнаружено снижение на 17 и 10 % для образцов, насыщенных водой и углекислым газом. Однако в случае с образцами угля, насыщенными азотом, зарегистрировано повышение прочности на 2 %. В [17] исследован уголь в виде слоистой структуры, включающей каменный уголь, аргиллит и песчаник, чтобы количественно оценить влияние водонасыщенности на их прочность на сжатие. Отмечено, что водонасыщенность фактически уменьшала значения предела прочности на сжатие на 9.6, 18.7, 30.3 % соответственно. В [18] испытан предел прочности на растяжение с применением водонасыщенных и сухих образцов песчаника и известняка. Снижение прочности на растяжение около 50 и 20 % обнаружено для образцов песчаника и известняка в условиях влажного состояния.

Поскольку степень снижения прочности при насыщении водой значительно различается среди разных пород, в последние годы данный вопрос стал предметом дискуссий и исследований [19–22]. Несмотря на обширные исследования влияния уровня влажности на механические и физические свойства горных пород, относящихся к различным регионам земного шара, до сих пор не проводились исследования на породах из Пакистана.

Цель настоящей работы — определение корреляций для выражения влияния водонасыщенности на физические (плотность, пористость, скорость звуковой волны) и механические (предел прочности на сжатие и предел прочности на растяжение) свойства осадочных пород, отобранных из разных регионов Пакистана. Предложена модель множественной регрессии для прогнозирования значений предела прочности на сжатие водонасыщенных образцов по механическим и физическим свойствам сухих пород наряду с петрографическими параметрами.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследований использовали 34 типа осадочных пород, собранных из стратиграфических образований Пакистана. Данные типы горных пород выбраны для проведения исследований при широком спектре их механических и физических свойств. В табл. 1 представлены коды, типы, формации и населенные пункты собранных образцов.

Выполнена серия лабораторных экспериментов, включающих механические и физические испытания (предел прочности на сжатие, предел прочности на растяжение, скорость звуковой волны, плотность, пористость и объем порового пространства), с использованием сухих и полностью насыщенных пород. Определены петрографические свойства выбранных образцов горных пород, которые были выделены перпендикулярно плоскостям напластования. Цилиндрические образцы горных пород подготовлены в соответствии со стандартами ASTM-D4543 [23]. В испытаниях образцы насыщались методом постепенного насыщения (рис. 1), разработанного Инженерно-строительным корпусом войск США [24]. В [11, 14, 15, 25, 26] сообщается о полном погружении образцов горной породы в воду для их насыщения. Однако применение данного метода насыщения приводит к тому, что внутри образцов остаются сухие области. Это происходит из-за воздуха, находящегося в порах в сухих областях. Этого можно избежать, используя метод постепенного насыщения, при котором основание образца помещают в воду на несколько сантиметров. По мере того как фронт насыщения, видимый в каменной матрице, поднимается из-за капиллярного действия, уровень воды в сосуде соответственно поднимается, чтобы наполовину приблизить его к фронту насыщения. Процесс повторяется до тех пор, пока фронт насыщения не достигнет вершины образца [1, 4, 27].

ТАБЛИЦА 1. Список отобранных образцов пород

Образец	Код	Порода	Формация	Населенный пункт
1	TBSIS	Алевролит	Тобар	Ущелье Хевра, Соляной хребет, Пенджаб
2	MUSIS	Алевролит	Мурее	Гидроэлектростанция Нилум-Джелум, Азад Джамму и Кашмир (ш. 34°23'34" N, д. 73°43'08" E)
3	MUSS-1	Песчаник	Мурее	Гидроэлектростанция Нилум-Джелум, Азад Джамму и Кашмир (ш. 34°23'34" N, д. 73°43'08" E)
4	MUSS-2	Песчаник	Мурее	Гидроэлектростанция Херигхаль Маджид Гала, Азад Джамму и Кашмир (ш. 33°56'37.03" N, д. 73°41'56.21" E)
5	TBSS-1	Песчаник	Тобар	Ущелье Хевра, Соляной хребет, Пенджаб
6	TBSS-2	Песчаник	Тобар	Тобар, Соляной хребет, Пенджаб
7	KHSS	Песчаник	Хевра	Ущелье Хевра, Соляной хребет, Пенджаб
8	KUSS	Песчаник	Куссак	Ущелье Хевра, Соляной хребет, Пенджаб
9	DDSS	Песчаник	Дандот	Дандот, Соляной хребет, Пенджаб
10	TBSS-3	Песчаник	Тобар	Ущелье Залуч, Соляной хребет, Пенджаб
11	CHSS	Песчаник	Чидру	Ущелье Залуч, Соляной хребет, Пенджаб
12	WASS	Песчаник	Ворчла	Ян-Сухское ущелье, Уорча, Соляной хребет, Пенджаб
13	LMSS	Песчаник	Лумшивал	Макуруол, Сургарский хребет, Пенджаб
14	HNSS	Песчаник	Хангру	Макуруол, Сургарский хребет, Пенджаб
15	DTSS	Песчаник	Датта	Ущелье Залуч, Соляной хребет, Пенджаб
16	WASS-S	Песчаник пятнистый	Ворчла	Ян-Сухское ущелье, Уорча, Соляной хребет, Пенджаб
17	AMSS	Песчаник	Амб	Ущелье Залуч, Соляной хребет, Пенджаб
18	NGSS	Песчаник	Нагри	Balkasar, Пенджаб
19	WASS-R	Песчаник красный	Ворчла	Ян-Сухское ущелье, Уорча, Соляной хребет, Пенджаб
20	HZSS	Песчаник	Хазира	Абботтабад, провинция Хайбер-Пахтунхва
21	CHCS	Сидерит	Чичали	Ущелье Залуч, Соляной хребет, Пенджаб
22	KGDL	Доломит	Кингриали	Ущелье Залуч, Соляной хребет, Пенджаб
23	JUDL-1	Доломит	Ютана	Ущелье Хевра, Соляной хребет, Пенджаб
24	ABTDL	Доломит розовый	Абботтабад	Сарбан Хилл, Абботтабад, провинция Хайбер-Пахтунхва
25	JUDL-2	Доломит	Ютана	Ущелье Хевра, Соляной хребет, Пенджаб
26	SKLS-1	Известняк	Сакесар	Цементный карьер Бествей, Каттас, Пенджаб (ш. 32°43'13.44" N, д. 72°56'06" E)
27	SKLS-2	Известняк	Сакесар	Цементный карьер Д. Г. Хан, Каттас, Пенджаб (ш. 32°42'54" N, д. 72°49'30" E)
28	SSLS-1	Известняк	Самана Сук	Цементный карьер Бествей, Хаттар, провинция Хайбер-Пахтунхва (ш. 33°50'30.88" N, д. 72°52'24.12" E)
29	SSLS-2	Известняк	Самана Сук	Цементный карьер Мустаккамский, Хаттар, провинция Хайбер-Пахтунхва (ш. 33°49'19.20" N, д. 72°50'19.68" E)
30	WRLS	Известняк	Варгал	Наммальское ущелье, Соляной хребет, Пенджаб
31	NMLS	Известняк	Наммал	Наммальское ущелье, Соляной хребет, Пенджаб
32	SKLS-3	Известняк	Сакесар	Макуруол, Сургарский хребет, Пенджаб
33	GYPSR	Природный гипс	Соляной хребет	Ущелье Хевра, Соляной хребет, Пенджаб
34	MRLSR	Мергель	Соляной хребет	Ущелье Хевра, Соляной хребет, Пенджаб



Рис. 1. Расположение кернов для полного водонасыщения с применением метода постепенного насыщения. Фронт водонасыщения постепенно продвигается к вершине керна

Определение предела прочности на сжатие. Разрушающие испытания на сжатие проводились на обрезанных и отшлифованных керновых образцах горных пород как на сухих, так и насыщенных водой с отношением длины к диаметру 2.0–2.5. Образцы подвергались сжатию с постоянной скоростью нагружения 0.5–1.0 МПа/с до разрушения, используя универсальную испытательную машину Shimadzu с пиковой нагрузкой 200 т. Испытания предела прочности на сжатие выполнялись в соответствии с процедурами, изложенными в предложенных методах ISRM [28].

Предел прочности на сжатие тестовых образцов рассчитывался как

$$\sigma = \frac{P}{A_0}, \quad (1)$$

где P — максимальная несущая способность образца во время испытания на сжатие; A_0 — начальная площадь поперечного сечения образца.

Определение предела прочности на растяжение. Испытания по определению предела прочности на растяжение сухих и водонасыщенных образцов осуществлялись в соответствии с экспериментальными процедурами методов ISRM [29]. Подготовленные диски стандартного размера 5.4 см с отношением высоты к диаметру ~ 0.5 сжимались по диаметральной оси до разрушения. Испытания проводились на универсальной испытательной машине Shimadzu с нагрузкой 200 т.

Предел прочности на растяжение испытуемых образцов определялся по формуле

$$\sigma_t = \frac{0.636P}{Dt}, \quad (2)$$

здесь D , t — диаметр и толщина образца.

Исследование скорости звука. В [30] отмечается, что измерение скорости звуковых волн, проходящих через твердые материалы (горные породы), может быть использовано как показатель свойств материала, включая плотность и упругие свойства, а также качество материала. В настоящем исследовании скорости продольной V_p и поперечной упругой волны V_s определялись с использованием портативного ультразвукового неразрушающего индикатора PUNDIT

в соответствии с методами ISRM [31]. Ультразвуковые импульсы проходили через керны. Преобразователи PUNDIT помещали на смазанные торцы образцов для измерения времени прохождения упругих волн t_p и t_s для p - и s -волн соответственно. Затем вычисляли V_p и V_s путем деления расстояния d между преобразователями PUNDIT на t_p и t_s соответственно.

Исследование плотности и пористости. Плотность сухой породы — это отношение части твердой массы за исключением поровых пространств образца к ее общему объему, а плотность водонасыщенной породы — отношение массы образца, включая минеральные зерна, матрицу и пористую воду, к его общему объему. Пористость породы определяется как отношение объема пор к общему объему образца горной породы. Существует множество методов определения плотности, пористости и связанных с этим свойств образцов горных пород. Обычно используются методы насыщения и плавучести, а также каверномер [32]. В настоящей работе проведены исследования объема, пористости и объема порового пространства с помощью метода насыщения и каверномера ISRM [33]. Использовались подготовленные образцы горных пород. Дисковые образцы применялись для расчета общего объема V путем усреднения по меньшей мере трех измерений штангенциркуля с нониусом каждого параметра. По массе дисков водонасыщенных образцов вычислялась масса при насыщении M_{sat} . Затем образцы помещали в печь на 24 ч при температуре 105 °С для определения их высушенной массы M_s . Объем порового пространства V_v , плотность сухого материала ρ_{dry} , плотность водонасыщенного материала ρ_{sat} и пористость n образцов горных пород рассчитывались с помощью стандартных уравнений.

Петрографические исследования. Петрографические анализы проводились путем подготовки шлифов всех 34 образцов для определения количественного содержания минералов и размеров зерен, благодаря применению поляризационного микроскопа МИН-8. Размеры зерен минералов измеряли методом средней длины пересечения, ранее предложенным в [34]. Аналогичным образом путем точечного анализа шлифов под микроскопом определялось соответствующее содержание минералов (в %).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование направлено на оценку влияния водонасыщенности на физико-механические свойства породы. Предложена типовая модель множественной регрессии для прогнозирования предела прочности на сжатие водонасыщенных осадочных пород UCS_{sat} . Прогнозирование основывается на механических и физических свойствах горных пород в сухом состоянии, а также на петрографических параметрах. Предприняты попытки применения уравнений регрессии, в том числе многоуровневая модель, разработанная в настоящей работе, а также уже предложенная корреляция для преобразования UCS_{dry} в UCS_{sat} , используя базу данных, полученную в настоящем исследовании.

Подробные результаты исследований 34 отобранных образцов сухих и водонасыщенных горных пород, включающие механические и физические свойства, представлены в табл. 2, 3. Петрографический анализ шлифов образцов, включая анализ содержания минералов, процентное содержание матрицы M и средний диаметр зерен минералов \bar{D} , суммированы в табл. 4.

ТАБЛИЦА 2. Исследование механических свойств сухих и водонасыщенных образцов горных пород

Образец	Код	UCS _{dry}	UCS _{sat}	Потеря прочности в пределе прочности на сжатие, %	BTS _{dry}	BTS _{sat}	Потеря прочности на растяжение в BTS, %
		МПа			МПа		
1	TBSIS	57.9	56.1	3.1	9.0	6.8	24.9
2	MUSIS	49.3	17.3	64.9	7.4	2.0	72.2
3	MUSS-1	127.6	85.3	33.1	6.4	2.5	61.5
4	MUSS-2	82.8	62.0	25.1	6.0	3.9	34.4
5	TBSS-1	39.8	19.1	52.0	1.8	2.1	-14.4
6	TBSS-2	26.7	13.6	49.2	1.4	0.9	37.2
7	KHSS	41.6	26.2	36.9	0.5	0.1	76.4
8	KUSS	69.0	43.7	36.7	6.1	3.9	35.9
9	DDSS	44.0	40.3	8.5	2.8	2.7	3.4
10	TBSS-3	109.7	66.3	39.6	6.0	1.2	80.1
11	CHSS	61.5	58.0	5.7	7.3	2.6	65.1
12	WASS	27.1	23.6	12.9	1.6	1.4	12.6
13	LMSS	29.0	14.2	51.3	1.9	1.8	4.6
14	HNSS	16.7	13.0	21.9	0.7	1.0	-42.8
15	DTSS	21.2	19.7	6.8	2.1	2.0	4.3
16	WASS-S	24.2	17.5	27.5	1.3	1.0	25.4
17	AMSS	46.4	30.6	33.9	1.6	1.8	-9.5
18	NGSS	17.1	4.8	71.6	0.9	0.9	-2.3
19	WASS-R	56.8	60.9	-7.3	4.2	1.4	67.4
20	HZSS	129.0	109.7	15.5	22.7	12.8	43.7
21	CHCS	51.7	38.8	25.0	8.1	4.1	48.7
22	KGDL	61.8	33.5	45.8	6.5	3.9	41.0
23	JUDL-1	144.4	67.7	53.1	12.0	8.2	31.2
24	ABTDL	99.9	55.5	44.4	12.5	4.7	62.8
25	JUDL-2	132.7	57.9	56.3	6.7	3.8	42.4
26	SKLS-1	65.3	60.9	6.8	5.0	1.2	75.7
27	SKLS-2	95.8	48.7	49.1	4.6	2.6	42.6
28	SSLS-1	80.7	29.6	63.3	5.6	5.4	3.5
29	SSLS-2	69.9	32.2	53.9	3.3	2.8	16.2
30	WRLS	66.5	37.2	44.0	5.4	3.1	42.2
31	NMLS	20.1	32.1	-60.1	7.8	0.8	90.2
32	SKLS-3	92.7	80.8	12.9	7.9	5.1	34.9
33	GYPSR	13.5	8.5	37.3	1.3	1.4	-2.0
34	MRLSR	5.4	2.1	60.7	0.8	0.3	57.4

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА ПРОЧНОСТЬ ПОРОДЫ

На рис. 2 показаны графики регрессии предела прочности на сжатие UCS_{sat} и предела прочности на растяжение BTS_{sat} в сравнении с UCS_{dry} и BTS_{dry} соответственно. Установленные корреляции демонстрируют общее снижение предела прочности на сжатие на 57% и предела прочности на растяжение на 50% образцов горных пород при испытании как в условиях насыщения водой, так и при высушивании воздухом. Из табл. 2 видно, что для большинства исследованных горных пород значительное снижение пределов прочности на сжатие и растяжение наблюдалось при полном насыщении образцов из их исходного состояния, высушенного воздухом, и полностью согласуется с результатами, полученными в [2, 6, 11, 13, 15, 18, 35–49]. Данный факт отражается на рис. 2, где большинство точек данных находится ниже линии 1:1. Выявлено небольшое число случаев, при которых измеренные пределы прочности на сжатие и растяжение для водонасыщенных пород совпадают или даже увеличиваются по сравнению с данными параметров у сухих образцов.

ТАБЛИЦА 3. Физические свойства водонасыщенных и сухих образцов горных пород

Образец	Код	$V_{p(dry)}$	$V_{p(sat)}$	$V_{s(dry)}$	$V_{s(sat)}$	ρ_{dry}	ρ_{sat}	n	V_v
		км/с		г/см ³		%		см ³	
1	TBSIS	5.60	5.88	2.36	2.58	2.60	2.64	3.63	2.22
2	MUSIS	5.31	5.17	1.90	2.26	2.69	2.71	1.03	0.73
3	MUSS-1	5.85	5.25	2.11	2.33	2.62	2.64	1.17	0.90
4	MUSS-2	5.58	5.84	2.43	2.56	2.63	2.65	2.82	0.94
5	TBSS-1	3.79	4.95	1.69	2.03	2.63	2.70	6.87	3.90
6	TBSS-2	2.64	3.01	1.09	1.25	2.25	2.37	12.22	7.93
7	KHSS	2.30	1.90	1.00	0.85	2.19	2.31	11.74	7.26
8	KUSS	4.39	4.91	1.73	2.19	2.50	2.57	6.82	4.44
9	DDSS	3.38	4.94	1.49	2.02	2.53	2.57	3.12	1.94
10	TBSS-3	4.86	4.44	1.56	1.96	2.57	2.62	4.73	2.95
11	CHSS	6.64	5.87	2.36	2.83	2.57	2.62	4.79	2.99
12	WASS	2.06	1.86	1.16	0.82	2.29	2.40	10.83	6.19
13	LMSS	2.79	2.71	1.13	1.21	2.11	2.26	15.05	9.12
14	HNSS	2.05	2.93	0.89	1.27	2.16	2.26	10.26	7.51
15	DTSS	2.73	3.28	1.27	1.45	2.18	2.31	12.10	7.37
16	WASS-S	2.60	3.17	1.12	1.25	2.28	2.38	10.70	6.76
17	AMSS	4.41	3.86	1.97	1.66	2.22	2.33	11.40	6.72
18	NGSS	1.98	2.58	0.86	1.17	2.48	2.61	12.77	7.43
19	WASS-R	5.12	5.27	2.50	2.35	2.60	2.64	3.61	2.26
20	HZSS	3.66	6.00	1.46	2.55	2.64	2.66	1.63	1.11
21	CHCS	3.61	3.89	1.57	1.70	2.62	2.82	20.02	12.97
22	KGDL	6.29	5.97	2.41	2.43	2.58	2.64	6.15	3.94
23	JUDL-1	5.90	6.48	2.04	2.80	2.77	2.78	1.23	0.83
24	ABTDL	7.26	7.29	2.72	3.05	2.81	2.82	0.38	0.25
25	JUDL-2	5.77	5.77	1.99	2.51	2.49	2.56	6.43	4.11
26	SKLS-1	6.36	6.42	2.71	2.75	2.61	2.64	3.47	0.99
27	SKLS-2	6.12	6.08	2.68	2.58	2.67	2.68	0.79	0.48
28	SSLS-1	6.43	7.00	2.75	3.06	3.17	3.20	2.81	1.57
29	SSLS-2	6.47	6.40	2.75	2.81	2.65	2.66	1.37	0.86
30	WRLS	7.49	6.30	3.26	2.77	2.69	2.70	1.17	0.78
31	NMLS	4.78	5.09	2.14	2.14	2.50	2.57	6.53	4.13
32	SKLS-3	5.41	5.06	2.35	2.24	2.47	2.54	7.15	4.11
33	GYPSR	5.38	5.18	2.23	2.26	2.07	2.25	18.37	10.70
34	MRLSR	2.29	2.06	0.90	0.91	2.00	2.25	24.70	14.95

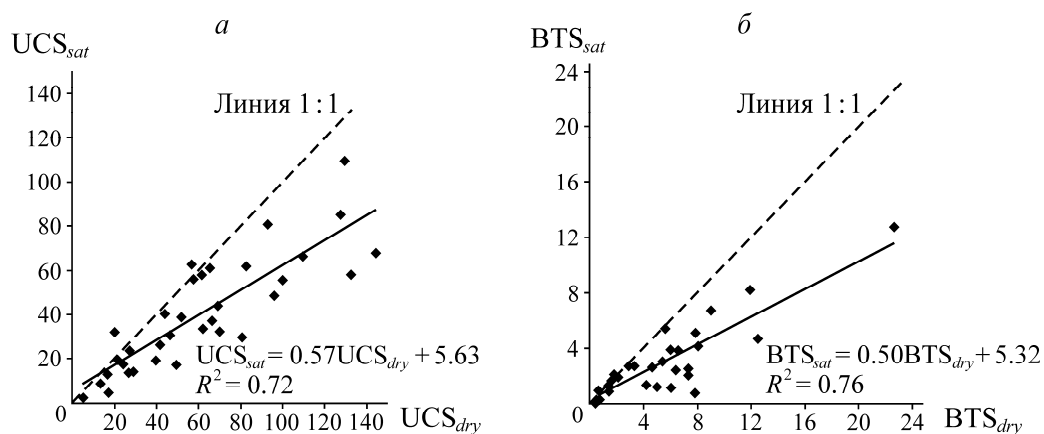
Рис. 2. Регрессии пределов прочности на сжатие UCS_{sat} и UCS_{dry} (а) и пределов прочности на растяжение BTS_{sat} и BTS_{dry} (б) водонасыщенных и сухих образцов

ТАБЛИЦА 4. Петрография исследуемых образцов горных пород, %

Образец	Код	Кварц	Полевой шпат	Матрица	Фрагменты породы	Слюда	Окись железа	Доломит	Кальцит	Микрит	Глауколит и хлорит	Минералы-спутники	Гипс	Ø, мм
1	TBSIS	22.0	35.0	6.0	0	2.0	1.5	33.0	0	0	0	0.5	0	0.21
2	MUSIS	15.2	13.0	37.0	0	5.0	5.0	0	24.8	0	0	0	0	0.29
3	MUSS-1	64.0	15.0	2.0	9.0	7.0	3.0	0	0	0	0	0	0	0.58
4	MUSS-2	61.0	20.0	0	7.0	3.0	2.0	0	7.0	0	0	0	0	0.25
5	TBSS-1	68.0	9.5	10.5	0	4.0	0	0	2.5	0	5.0	0.5	0	0.73
6	TBSS-2	78.0	17.0	0.5	0	4.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0.39
7	KHSS	67.0	20.0	10.0	0	1.5	1.0	0	0	0	0.5	0	0	0.20
8	KUSS	78.0	17.0	0.5	0	4.0	0.5	0	0	0	0	0	0	0.25
9	DDSS	62.3	28.0	1.5	4.7	1.5	0.5	0	0	0	0	1.5	0	0.48
10	TBSS-3	70.1	1.7	1.0	23.9	1.0	0.4	0	1.1	0	0.5	0.3	0	0.81
11	CHSS	67.5	2.1	26.5	2.6	0	0	0	0	0	0	1.3	0	0.26
12	WASS	55.0	27.0	16.0	0	1.0	0.5	0	0	0	0.5	0	0	0.38
13	LMSS	78.0	12.0	0	9.0	0.5	0	0	0	0	0.5	0	0	0.67
14	HNSS	75.0	4.5	17.0	0	2.0	1.0	0	0	0	0.5	0	0	0.37
15	DTSS	73.0	16.0	5.5	1.5	2.5	1.0	0	0	0	0	0.5	0	0.59
16	WASS-S	55.5	19.9	13.4	6.7	4.0	0	0	0	0	0	0.5	0	0.82
17	AMSS	77.0	17.5	0.5	0	3.7	0.8	0	0	0	0	0.5	0	0.60
18	NGSS	72.5	18.0	2.5	4.0	2.0	0.5	0	0	0	0	0.5	0	0.54
19	WASS-R	56.0	28.0	9.0	3.0	1.0	3.0	0	0	0	0	0	0	0.53
20	HZSS	95.0	3.0	0	0	1.0	0.5	0	0	0	0.5	0	0	0.26
21	CICS	13.0	0	2.0	0	1.0	84.0	0	0	0	0	0	0	0.17
22	KGDL	1.0	0	0	0	2.5	0.5	96.0	0	0	0	0	0	0.17
23	JUDL-1	2.0	0	0	0	3.0	1.0	94.0	0	0	0	0	0	0.24
24	ABTDL	2.5	0	0	0	1.0	0	92.0	4.5	0	0	0	0	0.43
25	JUDL-2	10.0	9.0	2.0	0	1.0	3.0	75.0	0	0	0	0	0	0.21
26	SKLS-1	0	0	0	0	0.5	0.5	16.0	27.5	55.5	0	0	0	0.49
27	SKLS-2	0	0	0	0	0.5	0.5	16.0	28.0	55.0	0	0	0	0.49
28	SSLS-1	0	0	0	0	0	1.0	36.0	25.0	38.0	0	0	0	1.51
29	SSLS-2	0	0	0	0	0	1.0	35.0	25.0	39.0	0	0	0	0.75
30	WRLS	0	0	0	0	0.5	0	0.5	90.0	9.0	0	0	0	0.70
31	NMLS	0	0	0	0	0	1.0	25.0	20.0	54.0	0	0	0	0.13
32	SKLS-3	0	0	0	0	1.0	0.5	0	7.5	91.0	0	0	0	0.44
33	GYP SR	0	0	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	99	0.36
34	MRLSR	21.0	0	74.0	0	1.0	0	4.0	0	0	0	0	0	0.17

Основной механизм снижения прочности осадочных пород с водонасыщением — деградация или ослабление минерального скелета породы или цементов (глины или карбоната), которые связывают минеральные зерна, включая кварц, полевые шпаты, слюды, оксиды железа и другие минералы вместе [2, 4, 10, 11]. Например, алевролиты образования Мерри (MUSIS) показали значительное снижение одноосной прочности на сжатие (65 %) и прочности на растяжение (72 %), вероятно из-за его высокой глинистой составляющей (37 %). Увеличение прочности горных песчаников при насыщении и соответствующее снижение их чувствительности к уменьшению прочности можно отнести к минералогическим характеристикам, текстуре и ткани горных пород, т. е. цементируемому материалу [2, 11].

ВЛИЯНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОДЫ

Скорости продольных V_p и поперечных V_s упругих волн водонасыщенных образцов колеблются от 1.98 до 7.49 и от 0.86 до 3.26 км/с соответственно, а сухих — от 1.86 до 7.29 и от 0.82 до 3.06 км/с. Для выявления корреляции между измеренными скоростями V_p и V_s в сухих и водонасыщенных образцах проведен регрессионный анализ (рис. 3). В большинстве случаев водонасыщенность фактически увеличивала как V_p , так и V_s по сравнению с их значениями, измеренными в условиях сухой породы. Это можно наблюдать по уравнениям на рис. 3, где $V_{p(dry)}$ и $V_{s(dry)}$ составляют 99 и 87% от значений $V_{p(sat)}$ и $V_{s(sat)}$ соответственно. Уместно упомянуть, что линейная зависимость, предложенная в [26] для скоростей упругих волн V_p сухих и водонасыщенных пород травертина как для однородных, так и для многослойных сортов также указывает на общее увеличение скоростей упругих волн при насыщении породы.

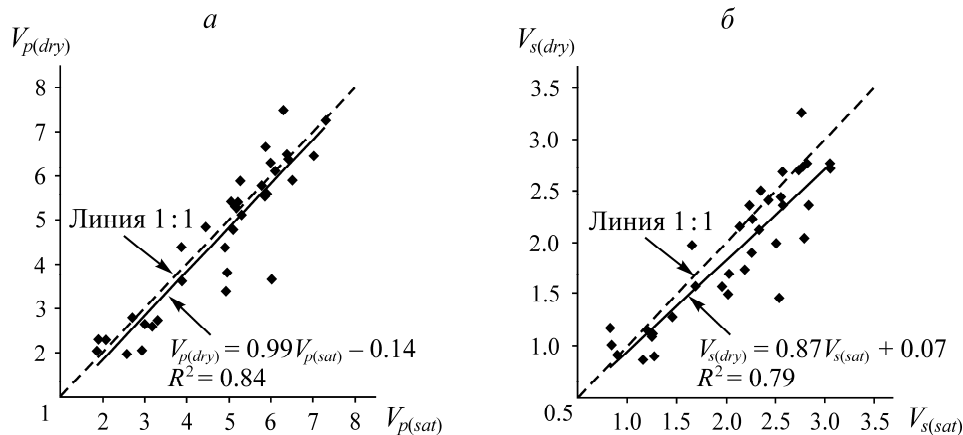


Рис. 3. Связь между скоростью продольных V_p (а) и поперечных V_s (б) упругих волн водонасыщенных и сухих пород

Статистически сопоставлялись плотности сухих и водонасыщенных образцов горных пород (рис. 4) и наблюдалась значительная корреляция ($R^2=0.96$). Корреляция демонстрирует увеличение плотности водонасыщенных образцов ρ_{sat} осадочных пород на 36% по сравнению с плотностью в высушенном состоянии ρ_{dry} . Сопоставимая корреляция показана в [26] с целью объяснить влияние содержания воды на здания из травертина и штучные камни в Венгрии.

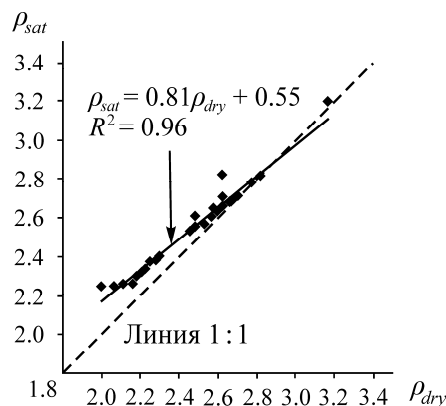


Рис. 4. Соотношение между измеренными плотностями сухих и водонасыщенных пород

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ НА ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ СУХИХ И ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

Цель исследования заключалась также в определении связи между пористостью и пределом прочности на сжатие образцов горной породы, насыщенных водой и высушенных воздухом. Использование регрессионного анализа позволило найти оптимальные отрицательные экспоненциальные корреляции между пористостью и одноосной прочностью на сжатие как для сухих, так и для водонасыщенных пород (рис. 5). Согласно данному анализу, существует слабая взаимосвязь между пористостью породы и пределом прочности на сжатие сухих и водонасыщенных пород. Уравнения представлены следующим образом:

$$UCS = xe^{-y(n)}, \tag{3}$$

где x, y — константы материала (табл. 5).

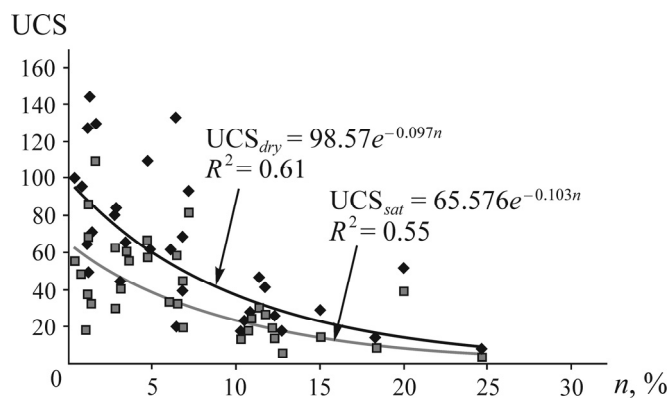


Рис. 5. Сравнение пределов прочности на сжатие сухих и водонасыщенных образцов с пористостью породы

ТАБЛИЦА 5. Константы материала

Состояние образца	UCS = $xe^{-y(n)}$		
	x	y	R^2
Высушенный	98.57	0.097	0.61
Насыщенный водой	65.57	0.103	0.55

Результаты настоящего исследования подтверждены данными работ [50, 51], в которых выявлено экспоненциальные отношения между пределом прочности на сжатие и пористостью. При этом в [26] предложена отрицательная силовая зависимость между пористостью и пределом прочности на сжатие сухих и водонасыщенных травертинов.

МНОЖЕСТВЕННЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

Модель множественной линейной регрессии описывает корреляции между зависимой и независимыми переменными. В [52] утверждается, что линейное уравнение множественной регрессии в общей форме имеет следующий вид:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_p X_{ip}, \tag{4}$$

где Y_i — зависимая переменная; X_1, X_2, \dots, X_p — независимые переменные или регрессоры; β_0 — константа уравнения, т. е. точка пересечения прямой линии с осью Y .

В настоящей работе использовался пакет программ для статистической обработки данных SPSS-21.0 модели множественной линейной регрессии для прогнозирования UCS_{sat} в зависимости от механических, физических и петрографических свойств породы, полученных в ходе лабораторных испытаний. Предел прочности на сжатие UCS_{sat} рассматривался как зависимая переменная, а UCS, BTS, пределы прочности на сжатие и растяжение сухой породы, плотность ρ_{dry} , пористость n , объем порового пространства V_v , V_p и V_s в сухом состоянии, а также петрографические параметры, включая матрицу M и общий средний размер зерен минералов $\bar{\phi}$ — как независимые переменные. Метод множественной регрессии включает в себя прямой выбор и обратное исключение, позволяющие переменным регрессора быть введенными в модель поочередно в порядке убывания их парциальных значений статистики F , если они остаются значимыми при заданном уровне значимости входа SLE. На каждом этапе уравнение оценивается, когда переменная (из списка независимых переменных) вводится в модель с наименьшим значением p для F , и эта процедура продолжается. Переменные, находящиеся в модели, удаляются, если их значения p становятся больше заданного уровня значимости, чтобы оставаться SLS. Этот итерационный процесс заканчивается, когда выбор дополнительной переменной значительно увеличивает значение R^2 на заранее выбранном уровне значимости [53, 54]. Для предела прочности на сжатие UCS_{sat} наиболее подходящая эмпирическая модель находится на выбранном уровне значимости $\alpha = 0.1$ и представляет ($R^2 = 0.82$):

$$UCS_{sat} = 84.110 + 0.385UCS_{dry} + 2.282BTS_{dry} - 28.727\rho_{dry} - 1.727V_v. \quad (5)$$

Точность и значимость модели регрессии, установленной в (5), проверялась с применением статистических данных стандартных испытаний. Коэффициент детерминации, рассчитанный для всей модели ($R^2 = 0.82$), показывает, что 82% дисперсии предела прочности на сжатие UCS_{sat} можно оценить с помощью регрессоров UCS_{dry} , BTS_{dry} , ρ_{dry} и V_v . Аналогично коэффициент детерминации ($R = 91\%$) указывает на прочную взаимосвязь между откликом и независимыми переменными. Стандартная ошибка оценки или среднеквадратичная ошибка объясняет стандартное отклонение погрешности [52], которое в случае производной модели (уравнение (5)) составляет 11.66. Наконец, скорректированное значение R^2 указывает, что на предлагаемую модель приходится 79% общего изменения значений предела прочности на сжатие UCS_{sat} .

Подробные результаты анализа дисперсии ANOVA представлены в табл. 6. Проверка гипотез для предлагаемой модели (уравнение (5)) применены вместе с F -тестом в ANOVA. Нулевая гипотеза H_0 означает, что не существует зависимости между пределом прочности на сжатие UCS_{sat} и четырьмя независимыми переменными. В противном случае альтернативный H_a имеет нулевую гипотезу. Две гипотезы H_0 и H_a имеют следующее объяснение:

$$\begin{aligned} \text{если } F_{model} < F_{critical}, \text{ тогда принимается } H_0 \text{ и отвергается } H_a, \\ \text{если } F_{model} > F_{critical}, \text{ тогда отвергается } H_0 \text{ в пользу } H_a. \end{aligned}$$

ТАБЛИЦА 6. ANOVA для выходной переменной предела прочности на сжатие UCS_{sat}

Показатель	Сумма квадратов	df	Средний квадрат	F	Sig
Регрессия	17221.251	4	4305.313	31.665	0
Остаток	3942.928	29	135.963		
Общее	21164.179	33			

С использованием табличного распределения F при $\alpha = 0.1$, $df_1 = 4$, $df_2 = 29$ рассчитано значение $F_{critical} = 2.15$, что намного меньше значения $F_{model} = 31.67$, тем самым отвергнута нулевая гипотеза. Это доказывает существование линейной зависимости между пределом прочности на сжатие UCS_{sat} и четырьмя независимыми переменными. В табл. 7 приведены результаты (коэффициенты и сумма) других параметров для зависимой переменной предела прочности на сжатие UCS_{sat} .

В работе применяется метод статистического вывода для отдельной переменной β_j . Например, статистический вывод для параметра β_0 определяется следующим образом:

$$A_s, t_{table} = t_{\alpha/2}^{n-k} = t_{0.1/2}^{34-5} = 1.699.$$

ТАБЛИЦА 7. Результаты некоторых параметров, влияющих на качество модели для выходной переменной предела прочности на сжатие UCS_{sat}

Параметр	Нестандартизированный коэффициент		$t_{коэф}$	t_{table}	Фактор, увеличивающий дисперсию VIF
	B	Std			
β_0	84.110	35.645	2.360	1.699	—
UCS_{dry}	0.385	0.088	4.397	1.699	2.660
BTS_{dry}	2.282	0.658	3.469	1.699	2.075
Прочность ρ_{dry}	-28.727	13.576	-2.116	1.699	2.727
Объем порового пространства V_v	-1.727	0.893	-1.933	1.699	2.750

Значение $t_{коэф} = 2.360$ для β_0 больше расчетного значения $t_{table} = 1.699$, что является индикатором его значимости на заранее определенном уровне значимости, т. е. $\alpha = 0.1$. Когда аналогичный процесс принимается для β_1 , β_2 , β_3 и β_4 , можно видеть, что все абсолютные значения $t_{коэф}$ больше, чем t_{table} , показывающие их статистическую значимость, и, следовательно, они — наиболее значимые параметры при определении зависимости предела прочности на сжатие UCS_{sat} в условиях эксперимента (табл. 7). Между тем независимые переменные n , V_p , V_s , M и \emptyset удаляются из регрессионного анализа (уравнение (5)) из-за отсутствия их статистической значимости на заданном уровне ($\alpha = 0.1$).

Кроме того, мультиколлинеарность проверялась в пошаговом анализе регрессии в программном обеспечении SPSS. Модели множественной регрессии могут содержать мультиколлинеарность, которая существует, когда две или более независимых переменных сильно коррелированы, и наиболее часто используемыми инструментами для обнаружения степени мультиколлинеарности является фактор, увеличивающий дисперсию VIF [52]. В качестве верхнего предела для VIF в множественном регрессионном анализе рекомендуется значение 10 [55, 56]. В табл. 7 показано, что значения VIF для UCS_{dry} , BTS_{dry} , ρ_{dry} и V_v разумно ниже допустимого коэффициента VIF = 10, который подтверждает, что достоверность уравнения (5) не ухудшается из-за наличия мультиколлинеарности. Можно сделать вывод, что UCS_{sat} в первую очередь зависит от UCS_{dry} , BTS_{dry} , плотности и объема порового пространства осадочных пород, включенных в настоящее исследование.

ОЦЕНКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Предпринята попытка определить механические и физические свойства пород UCS_{dry} , BTS_{dry} , ρ_{dry} , V_v для оценки значений UCS водонасыщенных образцов с помощью многомерной модели прогнозирования. В табл. 8 представлены измеренные в лабораторных условиях и прогнозируемые значения UCS_{sat} с использованием выбранных моделей (данные [12] и уравнение (5)). На рис. 6 показаны графики фактического и спрогнозированного UCS_{sat} . Видно, что оценки UCS_{sat} , основанные на модели множественной регрессии, наиболее точно соотносятся с лабораторными значениями UCS_{sat} .

ТАБЛИЦА 8. Сравнение фактических и прогнозируемых пределов прочности на сжатие UCS_{sat} , МПа

Образец	Код	Фактическое UCS_{sat}	Прогнозируемое UCS_{sat}	
			Данные [12], $UCS_{sat} = 0.759UCS_{dry}$, $R^2 = 0.906$	Данное исследование, уравнение (5)
1	TBSIS	56.071	43.931	48.442
2	MUSIS	17.305	37.419	41.091
3	MUSS-1	85.328	96.848	70.887
4	MUSS-2	61.970	62.824	52.611
5	TBSS-1	19.101	30.208	21.435
6	TBSS-2	13.569	20.288	19.337
7	KHSS	26.199	31.536	25.837
8	KUSS	43.733	52.401	45.199
9	DDSS	40.273	33.398	31.421
10	TBSS-3	66.296	83.285	61.225
11	CHSS	58.031	46.686	45.595
12	WASS	23.602	20.558	21.716
13	LMSS	14.154	22.041	23.171
14	HNSS	13.040	12.668	17.135
15	DTSS	19.737	16.076	21.448
16	WASS-S	17.549	18.368	19.335
17	AMSS	30.648	35.218	30.231
18	NGSS	4.845	12.956	8.590
19	WASS-R	60.900	43.081	36.889
20	HZSS	109.675	98.513	107.951
21	CHCS	38.792	39.252	24.806
22	KGDL	33.504	46.937	42.009
23	JUDL-1	67.750	109.619	85.953
24	ABTDL	55.522	75.845	69.922
25	JUDL-2	57.936	100.722	71.510
26	SKLS-1	60.851	49.530	44.006
27	SKLS-2	48.742	72.694	53.892
28	SSLS-1	29.635	61.251	34.252
29	SSLS-2	32.245	53.047	40.978
30	WRLS	37.209	50.436	43.418
31	NMLS	32.132	15.237	30.750
32	SKLS-3	80.792	70.393	59.828
33	GYPSS	8.475	10.265	14.513
34	MRLSR	2.100	4.061	4.626

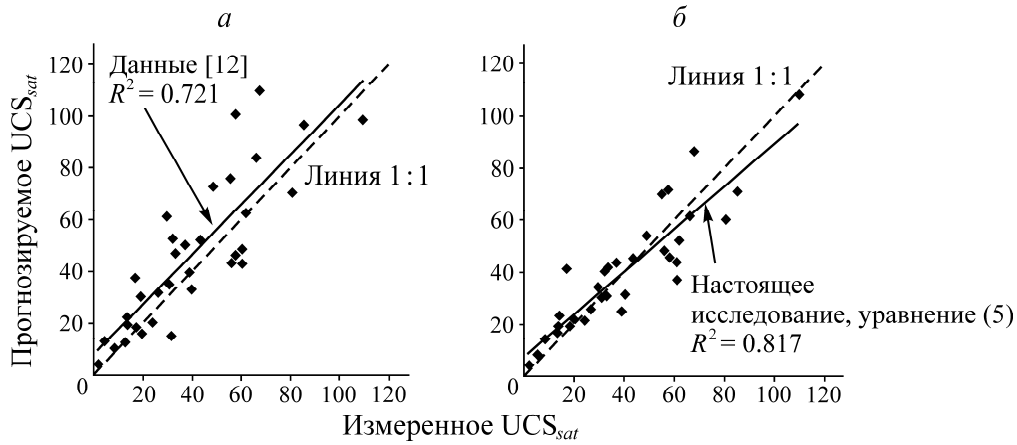


Рис. 6. Сравнение измеренных и прогнозируемых значений UCS_{sat}

Для дальнейшего изучения эффективности оценки выбранных моделей (табл. 8) использовались данные о дисперсии для VAF и среднее квадратичное значение RMSE:

$$VAF = \left(1 - \frac{\text{дисперсия}(y_i - \hat{y}_i)}{\text{дисперсия}(y_i)} \right) \cdot 100\%, \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2},$$

где y_i, \hat{y}_i — измеренное и прогнозируемое значение; N — общее количество образцов.

ТАБЛИЦА 9. Значения VAF и RMSE для выбранных моделей

Модель	VAF, %	RMSE
Данные [12]	63.81	16.20
Настоящее исследование, уравнение (5)	81.76	10.63

Более высокие значения VAF показывают, что регрессионная модель обеспечивает лучшие результаты прогнозирования, более низкие значения RMSE демонстрируют лучшую прогностическую эффективность модели. В отличие от VAF, RMSE также объясняет погрешности в модели [15, 52, 57–59]. В табл. 9 представлены рассчитанные значения индексов эффективности VAF и RMSE, которые подтверждают лучшую эффективность прогнозирования для модели с множественной регрессией (уравнение (5)), разработанной в данном исследовании.

ВЫВОДЫ

Оценено влияние водонасыщенности на механические и физические свойства горных пород. Выполнена серия лабораторных испытаний, включающих петрографию и определение физико-механических свойств пород в сухих и полностью водонасыщенных состояниях.

Разработаны взаимосвязи для оценки UCS_{sat} и BTS_{sat} по сравнению с соответствующими значениями для сухих образцов. Показано, что общие значения UCS и BTS осадочных пород, измеренные в водонасыщенном состоянии, в 1.75 и 2 раза ниже значений UCS и BTS в сухом состоянии соответственно. Рекомендуется нормализовать значения UCS и BTS, полученные на сухих породах, для учета различий в водонасыщенной породе при оценке крепости и извлекаемости горных пород.

Статистическое исследование результатов испытаний свойств пород продемонстрировало сильные линейные корреляции. Полученные корреляционные зависимости показали, что $V_{p(dry)}$ и $V_{s(dry)}$ в 1.18 и 1.15 раз меньше $V_{p(sat)}$ и $V_{s(sat)}$ соответственно. Обнаружено, что плотность водонасыщенной породы ρ_{sat} примерно на 36% выше, чем соответствующие значения плотности сухой породы ρ_{dry} .

Экспоненциальные корреляции вида $UCS = xe^{-y(n)}$ установлены между UCS_{dry} , UCS_{sat} и пористостью горных пород.

Предложена модель множественной линейной регрессии для прогнозирования UCS_{sat} в зависимости от геомеханических свойств UCS_{dry} , BTS_{dry} , ρ_{dry} и V_v сухой осадочной породы. Эта модель обеспечивает 82% от общего изменения зависимой переменной UCS_{sat} и может использоваться для прогнозирования UCS осадочных пород в водонасыщенных условиях. В предыдущих исследованиях использовались только двумерные корреляции, т. е. соотношения UCS_{sat} с UCS_{dry} .

Эффективность модели множественной регрессии (5), разработанной в данной работе, и существующей корреляции, предложенной в [12], проверена с помощью набора данных, полученных в настоящем исследовании. Сравнение показало, что многопараметрическая модель статистически более надежна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Abu Bakar M. Z., Majeed Y., and Rostami J.** Effects of rock water content on CERCHAR abrasivity index, *Wear*, 2016, Vol. 368–369. — P. 132–145. DOI: 10.1016/j.wear.2016.09.007.
2. **Dyke C. G. and Dobereiner L.** Evaluating the strength and deformability of sandstones, *Quarterly J. of Eng. Geology and Hydrogeology*, 1991, Vol. 24. — P. 123–134.
3. **Yilmaz I.** Gypsum/anhydrite: some engineering problems, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 2001, Vol. 60, No. 3. — P. 227–230.
4. **Abu Bakar M. Z. and Gertsch L. S.** Evaluation of saturation effects on drag pick cutting of a brittle sandstone from full scale linear cutting tests, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, Vol. 34. — P. 124–134.
5. **Rehbinder P. and Lichtman V.** Effect of surface active media on strains and rupture in solids, *Proc. 2nd Int. Congress on Surface Activity*, 1957. — P. 563–582.
6. **Colback P. S. B. and Wiid B. L.** The influence of moisture content on the compressive strength of rocks, *Proc. of the 3rd Rock Mech. Symp.*, Toronto, Canada, 1965. — P. 65–83.
7. **Brace W. F. and Martin R. J.** A test of the law of effective stress for crystalline rocks of low porosity, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1968, Vol. 5. — P. 415–426.
8. **Vutukuri V. S.** The effect of liquids on the tensile strength of limestone, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1974, Vol. 11. — P. 27–29.
9. **Van Eeckhout E. M.** The mechanisms of strength reduction due to moisture in coal mine shales, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1976, Vol. 13. — P. 61–67.
10. **Broch E.** Changes in rock strength caused by water, *Proc. of 4th Congress of Int. Society for Rock Mech.*, Montreux, Switzerland, 1979, Vol. 1. — P. 71–75.
11. **Hawkins A. B. and McConnell B. J.** Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content, *Quarterly J. of Eng. Geology and Hydrogeology*, 1992, Vol. 25. — P. 115–130.

12. **Vasarhelyi B.** Some observations regarding the strength and deformability of sandstones in dry and saturated conditions, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 2003, Vol. 62. — P. 245–249.
13. **Erguler Z. A. and Ulusay R.** Water induced variations in mechanical properties of clay bearing rocks, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2009, Vol. 46. — P. 355–370.
14. **Mammen J., Saydam S., and Hagan P. A.** Study on the effect of moisture content on rock cutting performance, *Proc. of the Coal Operators Conference, University of Wollongong and the Australian Institute of Mining and Metallurgy*, 2009. — P. 340–347.
15. **Yilmaz I.** Influence of water content on the strength and deformability of gypsum, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2010, Vol. 47. — P. 342–347.
16. **Perera M. S. A., Ranjith P. G., and Peter M.** Effects of saturation medium and pressure on strength parameters of Latrobe Valley brown coal: Carbon dioxide, water and nitrogen saturations, *Energy*, 2011, Vol. 36. — P. 6941–6947.
17. **Poulsen B. A., Shen B., Williams D. J., Huddlestone-Holmes C., Erarslan N., and Qin J.** Strength reduction on saturation of coal and coal measures rocks with implications for coal pillar strength, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2014, Vol. 71. — P. 41–52.
18. **Soni D. K.** Effect of saturation and deformation rate on split tensile strength for various sedimentary rocks, *Int. conference Data Mining, Civil and Mechanical Engineering, Bali, Indonesia*, 2015. — P. 53–55.
19. **Li Z. and Reddish D. J.** The effect of ground water recharge on broken rocks, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2004, Vol. 41, No. 3. — P. 1B 14.
20. **Duperretl A., Taibil S., Mortomore R. N., and Daigneault M.** Effect of groundwater and sea water weathering cycles on the strength of chalk rock from unstable coastal cliffs of NW France, *Eng. Geol.*, 2005, Vol. 78. — P. 321–343.
21. **Li Z., Reddish D. J., and Sheng Y.** Experimental investigation of the effect of water on the strength evolution of fractured siltstone, *In Geotech. Spec Pub 150 ASCE*, 2006. — P. 177–183.
22. **Vasarhelyi B. and Van P.** Influence of water content on the strength of rock, *Eng. Geol.*, 2006, Vol. 84. — P. 70–74.
23. **D4543.** Standard practices for preparing rock core as cylindrical test specimens and verifying conformance to dimensional and shape tolerances, *ASTM*, 2008.
24. **US Army Corps of Engineers:** <http://gsl.erdc.usace.army.mil/SL/MTC/handbook/RT/RTH/116-95.pdf>, 1995, accessed 9 July, 2012.
25. **Roxborough F. F. and Rispin A.** The mechanical cutting characteristics of the lower chalk, *Tunnels and Tunnelling*, 1973. — P. 45–67.
26. **Torok A. and Vasarhelyi B.** The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary, *Eng. Geol.*, 2010, Vol. 115. — P. 237–245.
27. **Abu Bakar M. Z. and Gertsch L. S.** Saturation effects on disc cutting of sandstone, *American Rock Mech. Association, 45th US Rock Mech., Geomech. Symp., San Francisco, CA*, 2011, Vol. 254. — P. 1–9.
28. **ISRM.** Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials, *Int. J. of Rocks Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1979a, b, Vol. 16. — P. 135–140.
29. **ISRM.** Suggested methods for determining tensile strength of rock materials, *Int. J. of Rocks Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1978a, b, Vol. 15. — P. 99–103.
30. **Khandelwal M. and Ranjith P. G.** Correlating index properties of rocks with *P*-wave measurements, *J. of Applied Geophysics*, 2010, Vol. 71. — P. 1–5.
31. **ISRM.** Suggested methods for determining sound velocity, *Int. J. of Rocks Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1978, Vol. 15. — P. 53–58.
32. **Karakus M., Kumral M., and Kilic O.** Predicting elastic properties of intact rocks from index tests using multiple regression modelling, *Int. J. of Rocks Mech. and Min. Sci.*, 2005, Vol. 42. — P. 323–330.

33. **ISRM.** Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties, *Int. J. of Rocks Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1979a, b, Vol. 16. — P. 141–156.
34. **Paschen D.** Petrographic and geomechanical characterization of Ruhr area carboniferous rocks for the determination of their wear behavior, PhD dissertation, Technische Unversitat Claustahl, 1980. — P. 202.
35. **Wiid B. L.** The influence of moisture content on the pre-rupture fracturing of two rock types, *Proc. of the 2nd Congress of the Int. Society of Rock Mech.*, Belgrade, 1970, Vol. 3. — P. 239–245.
36. **Kitaowa M., Endo G., and Hoshino K.** Influence of moisture on the mechanical properties of soft rock, *Proc. of the 5th National Symp. on Rock Mech.*, Japan, 1977.
37. **Bell F. G.** The physical and mechanical properties of the Fell sandstones, Northumberland, England, *Eng. Geol.*, 1987, Vol. 12. — P. 1–29.
38. **Hassani F. P., Whittaker B. N., and Scoble M. J.** Strength characteristics of rocks associated with open cast coal mining in the UK, *Proc. of the 20th U. S. Symp. on Rock Mech.*, Austin, 1979. — P. 347–356.
39. **Ferreira R., Monteiro L. C. C., Peres J. E., and Prado Jr. F. A. de A.** Analise de alguns fatores que infleum na Resistencia a compressao do arenito Bauru, 3rd Brazilian Congress of Engineering Geology, ABGE, Itapema, 1981, Vol. 3. — P. 89–102.
40. **Priest S. D. and Selvakumar S.** The failure characteristics of selected British rocks, A Report to the Transport and Research Laboratory, Department of Environment and Transport, Imperial College, London, 1982.
41. **Koshima A., Frota R. G. Q., Lorano M. H., and Hoshisk J. C. B. de F.** Comportamento e propriedades geomechanicas do arenito Bauru, Simposio Geotecnico Sobre Bacio Alto Parana, ABGE-ABMS-CBMR, Sanpaulo, 1983, 2b. — P. 173–189.
42. **Pells P. J. N. and Ferry M. J.** Needless stringency in sample preparation standards for laboratory testing of weak rocks, *Proc. of the 5th Congress of the Int. Society of Rock Mech.*, Melbourne, 1983. — P. 203–207.
43. **Dobereiner L.** Engineering geology of weak sandstones, PhD, Thesis, Imperial College London, 1984.
44. **Dyke C. G.** The pre-peak deformation characteristics of sandstone at varying moisture contents, M. Sc. Thesis, Imperial College London, 1984.
45. **Gunsallus K. L. and Kulhawy F. H.** A comparative evaluation of rock strength measures, *Int. J. of Rock Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1984, Vol. 21. — P. 233–248.
46. **Denis A., Durville J. L., Massieu E., and Thorin R.** Problemes poses par un calcaire tres poreux dans l'etude de la stabilite d'une carrier souterraine, *Proc. of the 5th Congress of the Int. Association of Eng. Geology*, Buenos Aires, 1986. — P. 549–557.
47. **Howarth D. F.** The effect of pre-existing microcavities on mechanical rock performance in sedimentary and crystalline rocks, *Int. J. of Rock Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1987, Vol. 24. — P. 223–233.
48. **Pells P. J. N.** Substance and mass properties for the design of engineering structures in the Hawkesbury sandstone, *Aust. Geomech.*, 2004, Vol. 39. — P. 1–21.
49. **Hui Y., Xueliang J., and Na L.** Experimental study on mechanical property of peridotite under water-rock interaction, *EJGE*, 2014, Vol. 19. — P. 1179–1188.
50. **Tugrul A.** The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey, *Eng. Geol.*, 2004, Vol. 75. — P. 215–227.
51. **Sabataskakis N., Koukis G., Tsiambaos G., and Papanakli S.** Index properties and strength variations controlled by microstructure for sedimentary rocks, *Eng. Geol.*, 2008, Vol. 97. — P. 80–90.
52. **Yilmaz N. G., Yurdakul M., and Goktan R. M.** Prediction of radial bit cutting force in high-strength rocks using multiple linear regression analysis, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2007, Vol. 44. — P. 962–970.

53. **Samaranayake V. A.** Statistical data analysis, STAT-353 course, Missouri University of Science and Technology, Rolla, MO, USA, 2009.
54. **Majeed Y. and Abu Bakar M. Z.** Statistical evaluation of Cerchar Abrasivity Index (CAI) measurement methods and dependence on petrographic and mechanical properties of selected rocks of Pakistan, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 2016, Vol. 75, No. 3. — P. 1341 – 1360.
55. **Kennedy P.** A guide to econometrics, 6th Edition Oxford, Willey Blackwell, 2008.
56. **Hair J. F., Black W. C., Babin B. J., and Anderson R. E.** Multivariate data analysis, 7th Edition, Prentice Hall, New York, 2009.
57. **Grima M. A. and Babuska R.** Fuzzy model for the prediction of unconfined compressive strength of rock samples, *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 1999, Vol. 36. — P. 339 – 349.
58. **Gokceoglu C.** A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of Ankara agglomerates from their petrographic composition, *Eng. Geol.*, 2002, Vol. 66. — P. 39 – 51.
59. **Gokceoglu C. and Zorlu K.** A fuzzy model to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity of a problematic rock, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2004, Vol. 17. — P. 61 – 72.

*Поступила в редакцию 13/VI 2018
После доработки 12/VII 2018
Принята к публикации 28/XI 2018*