

УДК 539.42+ 622.23.01

МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ СКВАЖИНЫ НА УСТАНОВКЕ ИСТИННО ТРЕХОСНОГО НАГРУЖЕНИЯ

© 2024 г. В. И. Карев^а, Ю. Ф. Коваленко^{а, *}

^аИнститут проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

*e-mail: perfolinkgeo@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.04.2024 г.

После доработки 26.04.2024 г.

Принята к публикации 27.04.2024 г.

При проведении лабораторных испытаний образцов горных пород, имеющих целью определение их механических и прочностных свойств, одна из основных проблем состоит в переносе результатов испытаний образцов, имеющих относительно малые размеры, на достаточно большие участки горного массива, часто имеющего сложную структуру. Это связано с тем, что обобщенных численных показателей, характеризующих степень влияния структурных неоднородностей различных размеров на деформирование и разрушение горных пород и массивов, пока не имеется. Кроме того, на изучаемые процессы, помимо неоднородностей, оказывают и другие факторы, такие как напряженное состояние массива, наличие геологических нарушений, макротрещиноватость и др. В работе эти вопросы изучены на основе сравнения результатов экспериментов, выполненных на Испытательной системе трехосного независимого нагружения ИПМех РАН по схеме “полый цилиндр” на образцах с центральным отверстием диаметром 10 и 20 мм, и физического моделирования деформационных процессов в окрестности скважин при понижении давления на их забое для пород-коллекторов нефтяного месторождения Приразломное. Полученные результаты иллюстрируют проявление масштабного эффекта.

Ключевые слова: масштабный эффект, установка истинно трехосного нагружения, схема “полый цилиндр”, физическое моделирование, скважина, образец, вынос песка

DOI: 10.31857/S1026351924040118, EDN: UCLBPL

1. Введение. По определению, данному М.И. Койфманом в работе [1], “Масштабный эффект — это принципиальные закономерности, а также конкретные для различных пород количественные зависимости, характеризующие изменение в зависимости от линейных размеров (площади сечения, объема) образцов горных пород или частей горного массива реальных механических свойств...” Он проявляется в той или иной мере у всех

неоднородных по составу и структуре материалов. Данное понятие применяется в научных работах главным образом при изучении механических свойств горных пород. Масштабный эффект сказывается практически на всех известных свойствах материалов: механических, фильтрационных, волновых и т.д.

Данный вопрос изучался многими специалистами и учеными, но до сих пор оценка влияния размеров образцов на прочность горных пород является актуальной задачей ввиду многообразия видов горных пород и их структурных особенностей, приобретенных в зависимости от условий образования в ходе различных геологических процессов. Имеющиеся данные экспериментов в массивах, сложенных различными породами, показывают, что для геоматериалов и горных пород наблюдается общая тенденция — с увеличением объемов, вовлекаемых в процесс деформирования, модули деформации массива существенно снижаются. Это же относится и к прочностным характеристикам пород [2–7].

Количественные показатели масштабного эффекта изучались пока на малом числе объектов и преимущественно в отношении предела прочности породы при одноосном сжатии. Еще в меньшей степени масштабный эффект изучен в отношении деформационных свойств пород.

Наиболее сильно масштабный эффект проявляется в условиях концентрации напряжений у отверстий, полостей, выработок, когда характерный размер неоднородности напряжений сопоставим с характерными размерами структуры материала. В работах [8, 9] теоретически и экспериментально исследовано влияние диаметра отверстия в изотропной однородной линейно-упругой пластине из квазихрупкого геоматериала на возникновение трещины отрыва на ее контуре при неравномерно распределенном сжатии на бесконечности с учетом масштабного фактора. В ходе опыта определялась критическая нагрузка, при которой в пластине достигалось предельное состояние (образование трещин отрыва, исходящих от отверстия) в зависимости от диаметра отверстия. Опыты выявили существенный масштабный эффект, заключающийся в значительном влиянии диаметра отверстия на локальную прочность материала. С его уменьшением критическое давление (давление образования трещины отрыва) возрастало, достигая предела прочности на сжатие.

На Испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН) была проведена серия экспериментов по изучению влияния диаметра центрального отверстия в кубических образцах на их деформирование и разрушение в ходе проведения экспериментов по схеме “полый цилиндр”.

Для понимания соответствия величин критических депрессий, полученных при испытаниях образцов по схеме “полый цилиндр”, предельным депрессиям в скважине приведены результаты физического моделирования на установке ИСТНН деформационных процессов в окрестности скважины при понижении давления на ее забое.

2. Экспериментальная установка. Установка ИСТНН создана в ИПМех РАН и представляет собой исследовательский комплекс для изучения деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик горных пород в условиях истинно трехосного независимого нагружения [10]. Установка ИСТНН позволяет нагружать образцы горных пород в форме куба с ребром

40 и 50 мм по любым траекториям нагружения независимо по каждому из трех направлений. Это дает возможность осуществлять прямое физическое моделирование процессов деформирования и разрушения породы в окрестности нефтяных и газовых скважин при изменении давления на их забое.

По сравнению с другими испытательными машинами, осуществляющими сложное нагружение с использованием жестких нажимных плит, установка ИСТНН обеспечивает равномерное приложение нагрузок по всей площади образца в течение всего процесса деформирования, включая стадию разрушения. Существенно упрощается анализ результатов экспериментов, так как отпадает необходимость учета возможности концентрации напряжений вблизи ребра образца

Наибольшее давление рабочей жидкости в гидроцилиндре установки составляет 200 МПа, при этом гидроцилиндр развивает усилие 500 кН. Это позволяет на образцах с гранью 40 мм создавать напряжения до 280 МПа. Образцы для испытания на установке ИСТНН изготавливаются на специально созданном обрабатывающем комплексе, включающем два станка — камнерезный и шлифовальный. Этот комплекс позволяет изготавливать кубические образцы высокой точности и любой ориентации относительно оси скважины.

3. Методика проведения экспериментов по модифицированной схеме “полый цилиндр”. В классических опытах по схеме “полый цилиндр” используются цилиндрические образцы длиной около 10–12 см и диаметром около 4–5 см. По центру каждого цилиндра просверливается отверстие диаметром 8–10 мм. Нагружение проводится по схеме Кармана, т.е. нагрузка на образец осуществляется равномерным боковым обжатием и осевой сжимающей нагрузкой. В ходе испытания боковая и вертикальная сжимающие нагрузки на образец увеличиваются с постоянной скоростью до момента выявления признаков выноса песка. В ходе эксперимента фиксируется момент начала выноса песка и непрерывно измеряется вес выносимого песка, поступающего из отверстия на весы под действием силы тяжести.

Установка ИСТНН позволяет проводить специальные эксперименты, аналогичные экспериментам по схеме “полый цилиндр” на установках с кармановской схемой нагружения, на кубических образцах с центральным отверстием. С этой целью в нагружающем узле установки ИСТНН используются специально изготовленные две нажимные плиты с центральными каналами, рис. 1.

В образцах, предназначенных для испытаний по схеме “полый цилиндр”, по центру грани в направлении одной из осей просверливается отверстие диаметром 10 или 20 мм. В ходе эксперимента через канал в наконечнике верхней активной нажимной плиты, совпадающий с отверстием в образце, продувается воздух под давлением около 1 ат. Для отвода прошедшего через канал в образце газа в наконечнике нижней нажимной плиты также имеется отверстие, совпадающее с каналом в образце. Через него образовавшийся при разрушении отверстия песок под действием продуваемого воздуха по специальной трубке поступает на электронные весы, соединенные с компьютером.

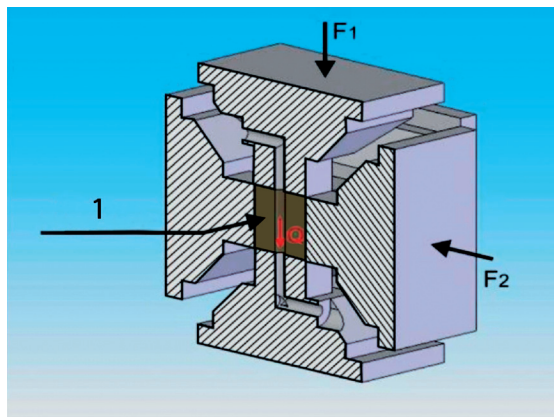


Рис. 1. Схематичное изображение нагружающего узла установки ИСТНН для проведения испытаний по схеме “полый цилиндр”: 1 — образец.

В ходе эксперимента к граням образца прикладываются равные сжимающие напряжения s , которые ступенчато увеличиваются в ходе опыта. При этом регистрируются деформации образца в трех направлениях и измеряется вес песка, выносимого из образца потоком воздуха. Точность электронных весов составляет 0.001 г, а запись осуществляется через каждые 2 с. Испытание образца продолжается до разрушения отверстия.

Проведение на установке ИСТНН опытов по схеме “полый цилиндр” можно рассматривать как моделирование создания депрессии на забое горизонтальной скважины. При этом величина обжатия образца отвечает разности между горным давлением и забойным давлением, так что ситуация, когда давление в скважине практически отсутствует (“осушение скважины”), отвечает всестороннему обжатию образца напряжением, равным горному давлению на глубине отбора керна.

Испытания на установке ИСТНН обладают значительными преимуществами:

- ИСТНН позволяет нагружать кубический образец независимо по каждой из трех осей по любой программе нагружения, отвечающей реальным напряжениям, действующим в пласте;

- в ходе испытания образца установка ИСТНН позволяет измерять деформации образца по каждой из трех осей и фиксировать начало разрушения стенок отверстия по отклонению кривых деформирования образца от линейности. Как показали опыты, это обстоятельство дает дополнительную важную информацию об устойчивости стенок скважины.

Подробно ознакомиться с результатами экспериментов по схеме “полый цилиндр”, выполненных на установке ИСТНН, можно в работах [11, 12].

4. Результаты экспериментальных исследований с использованием нагружения по схеме “полый цилиндр”. На рис. 2 и 3 показаны результаты испытания по схеме “полый цилиндр” образца породы П10-5 с центральным отверстием

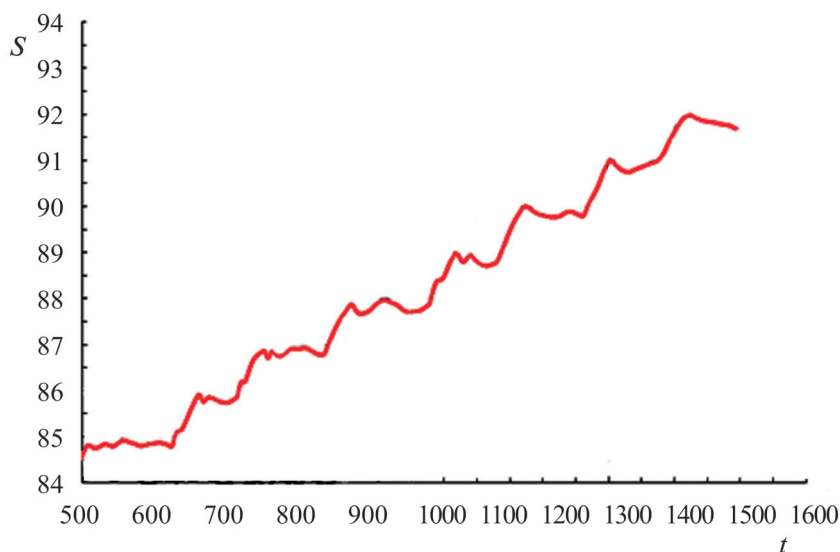


Рис. 2. Программа нагружения образца с отверстием 10 мм: S — напряжение обжатия образца, МПа; t — время, с.

диаметром 10 мм, отобранного из коллектора Приразломного нефтяного месторождения с глубины 2537.5 м.

На рис. 2 показана программа нагружения образца, а на рис. 3 — кривые деформирования образца по трем осям во время опыта. Ось 3 была направлена вдоль отверстия, а оси 1 и 2 — перпендикулярно его оси.

Из рис. 3 видно, что неупругое деформирование образца, которое привело к его разрушению, началось при внешнем сжатии около 70 МПа. Тогда из решения задачи Ламе [13] для толстостенного цилиндра с внешним радиусом 20 мм и внутренним радиусом 5 мм, нагруженного внешним давлением 70 МПа, для кольцевого напряжения на контуре отверстия имеем $S_0^* = 149.3$ МПа. Использование решения Ламе здесь правомерно, поскольку установка ИСТНН при нагружении обеспечивает равномерное приложение нагрузок по всей площади образца в течение всего процесса нагружения, что обеспечивает однородность полей деформаций и напряжений внутри образца в ходе эксперимента.

На рис. 4 приведена фотография образца после опыта. На ней видно, что отверстие в образце после испытания оказалось сильно деформированным и забитым разрушенной породой.

В таблице представлены результаты испытания на установке ИСТНН по схеме “полый цилиндр” образцов породы с центральным отверстием 10 мм, отобранных с разных глубин коллектора Приразломного нефтяного месторождения.

В табл. 1 горное давление $q = \gamma H$, где H — глубина залегания пласта, γ — средний удельный вес вышележащих пород, $\gamma = 2.3$ г/см³. Из таблицы видно, что разрушение отверстия в большинстве образцов происходило при

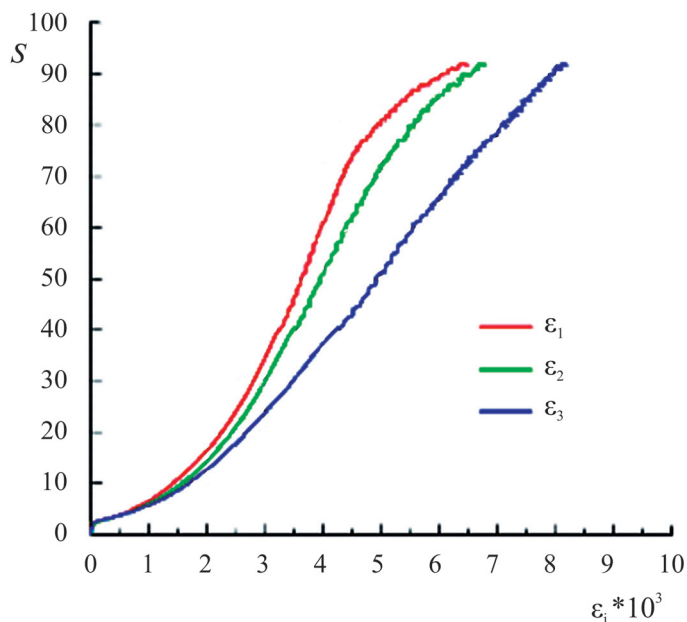


Рис. 3. Кривые деформирования образца с отверстием 10 мм: S — напряжение обжатия образца, МПа; ε_i — деформации по трем осям образца.

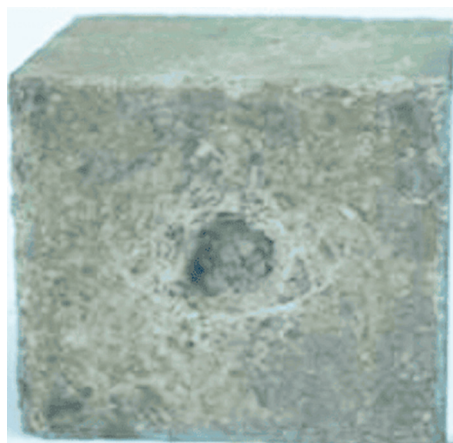


Рис. 4. Образец с отверстием после испытания.

величинах внешнего обжатия S^* выше горного. Применительно к скважине это означает, что разрушение ее стенок не произойдет вплоть до полного “осушения” скважины, т.е. полного сброса давления на ее забое. Однако это не соответствует наблюдаемым на практике фактам, согласно которым на Приразломном месторождении разрушение стенок необсаженных скважин зачастую начиналось при небольших депрессиях.

Таблица 1. Результаты экспериментов по схеме “полый цилиндр” для образцов с отверстием 10 мм

№ образца	Глубина отбора керна, м	Горное давление q , МПа	Напряжение S^* начала разрушения отверстия, МПа
П1-5	2542.75	58.5	65
П2-5	2548.5	58.6	63
П3	2453.6	56.4	68
П4-5	2566.75	59.0	62
П5-5	2514.75	57.8	53
П6-5	2521	58.0	70
П7-5	2517	57.9	62
П10-5	2537.5	58.4	70
П11-5	2528.75	58.2	51

Такое различие между полученными в опытах результатах и наблюдаемым на практике становится понятным, если принять во внимание масштабный эффект. Дело в том, что в опытах по схеме “полый цилиндр” диаметр ствола скважины (около 220 мм) моделируется отверстием диаметром 10 мм. Совершенно очевидно, что при таком моделировании на первый план выходят вопросы влияния на прочность породы кривизны отверстия, величина зерна породы (тем более, как показали эксперименты, размер зерна в изучаемых породах достаточно большой), размера образца по сравнению с диаметром отверстия и т.д. Все эти факторы влияют на механические свойства в одну сторону, а именно приводят к значительному увеличению прочностных характеристик породы, извлекаемых из опытов, по сравнению с реальными.

Чтобы выявить влияние размера отверстия на величину масштабного эффекта в проведенных экспериментах, было проведено испытание по схеме “полый цилиндр” образца П 10 с отверстием диаметром 20 мм. Образец П 10 был изготовлен из того же куска керна, что и образец П 10-5 с отверстием диаметром 10 мм, а опыт проводился абсолютно по той же схеме, что и испытание образца П 10-5.

Результаты испытания образца П10 по схеме “полый цилиндр” приведены на рис. 5 и 6. На рис. 5 показана программа нагружения образца, а на рис. 6 – кривые его деформирования по трем осям во время опыта. Ось 3 была направлена вдоль отверстия, а оси 1 и 2 – перпендикулярно его оси.

Из рис. 6 видно, что уже при внешнем сжатии около 30 МПа началось неупругое деформирование образца. Тогда из решения задачи Ламе [13] для толстостенного цилиндра с внешним радиусом 20 мм и внутренним радиусом 10 мм, нагруженного внешним давлением 30 МПа, для кольцевого напряжения на контуре отверстия имеем $S_0^* = 80$ МПа.

Эти значения значительно ниже, чем для образца с отверстием 10 мм (соответственно 70 и 149 МПа). Применительно к скважине напряжение разрушения отверстия отвечает давлению на забое 28.4 МПа.

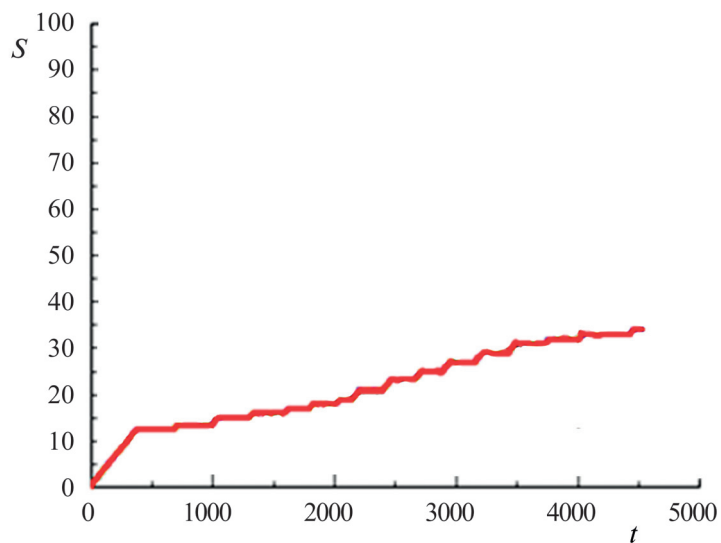


Рис. 5. Программа нагружения образца с отверстием 20 мм: S – напряжение обжатия образца, МПа; t – время, с.

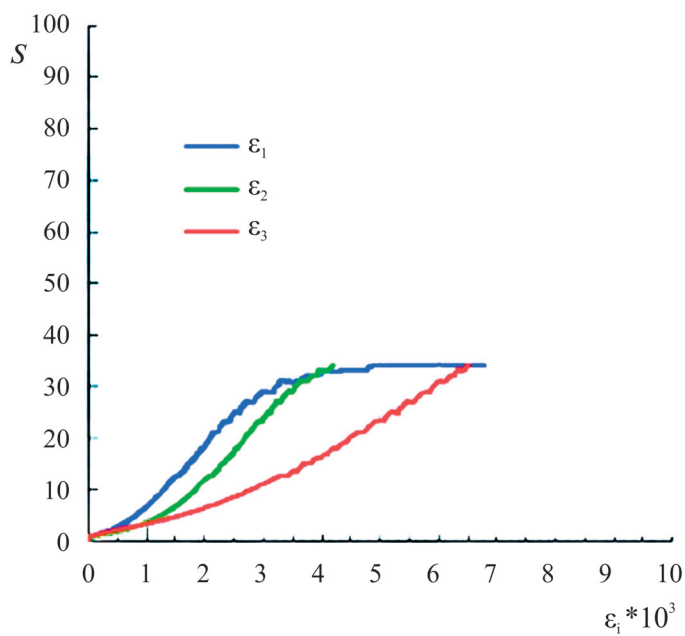


Рис. 6. Кривые деформирования образца с отверстием 20 мм: S – напряжение обжатия образца, МПа; ε_i – деформации по трем осям образца.

Таким образом, увеличение диаметра отверстия в два раза резко снизило величину напряжения разрушения, что подтверждает сделанный выше вывод о значительном влиянии масштабного эффекта на прочность образцов с отверстиями малого диаметра в сторону ее существенного завышения.

5. Эксперименты по прямому физическому моделированию механических процессов в окрестности скважины при понижении давления в ней. Чтобы понять, насколько полученные в опытах по схеме “полый цилиндр” значения напряжений, при которых происходит разрушение отверстий, близки к реально наблюдаемым на скважинах, на установке ИСТНН было выполнено прямое физическое моделирование процессов деформирования и разрушения породы в окрестности скважины при различных режимах ее работы. В этих экспериментах кубический образец с гранью 40 мм фактически моделирует “точку” на контуре скважины. В этом случае влияние масштабного эффекта на изучаемые механические и прочностные свойства породы сводится к минимуму, поскольку размер образца и размер исследуемой области на контуре скважины совпадают.

На рис. 7 показана программа нагружения образца на установке ИСТНН, отвечающая моделированию деформационных процессов на контуре необсаженной скважины при понижении давления на ее забое [14]. Представлены зависимости от времени напряжений S_1 , S_2 , S_3 , прикладываемых в ходе опыта к граням образца по осям 1, 2, 3 в нагружающем узле установки ИСТНН и

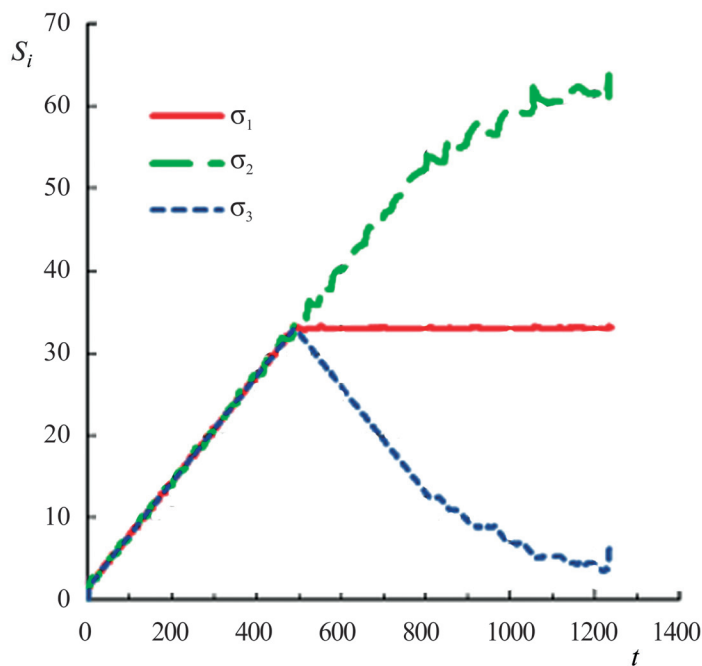


Рис. 7. Программа нагружения образца П 10-4: S_i – напряжения, прикладываемые к граням образца, МПа; t – время, с.

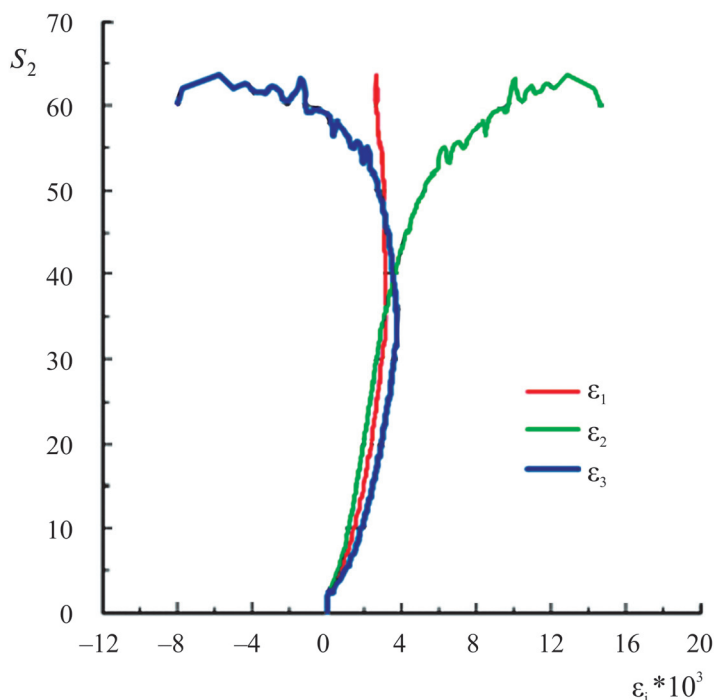


Рис. 8. Кривые деформирования образца П 10-4 в ходе опыта: S_2 — параметр нагружения, МПа; ε_i — деформации по трем осям образца.

отвечающих эффективным напряжениям $|S_z|$, $|S_\theta|$, $|S_r|$, действующим на контуре скважины. Испытанный образец П10-4 был отобран из коллектора Приразломного нефтяного месторождения практически с той же глубины, что и два предыдущих.

На рис. 8 приведены кривые деформирования образца П 10-4 по трем осям в зависимости от параметра нагружения S_2 .

Из рис. 8 видно, что разрушение образца П 10-4 в опыте по физическому моделированию произошло при значении напряжения S_2 , отвечающему кольцевому напряжению S_θ^w на контуре скважины, около 64 МПа, что близко к величине напряжения $S_\theta^* = 80$ МПа, при котором произошло разрушение отверстия диаметром 20 мм в образце П10 в опыте по схеме “полый цилиндр”.

Поскольку горное давление q на глубине отбора образца П10-4 составляет около 58 МПа, а величина давления на забое скважины p_w связана с кольцевым напряжением S_θ^w на ее контуре соотношением $p_w = q - S_\theta^w/2$ [14], для давления на забое скважины, при котором начинается разрушение на ее контуре, находим $p_w = 26$ МПа. Это значение близко к значению 28.4 МПа, полученному из испытания образца с отверстием 20 мм по схеме “полый цилиндр”.

Эти факты являются еще одним подтверждением, что повышенная прочность образцов с отверстиями 10 мм в опытах по схеме “полый цилиндр” объясняется влиянием масштабного эффекта.

Закключение. Выполненные на установке ИСТНН испытания образцов пород из коллектора Приразломного нефтяного месторождения по схеме “полый цилиндр” с центральными отверстиями 10 и 20 мм и эксперименты по физическому моделированию деформационных процессов на контуре необсаженной скважины при понижении давления на ее забое показали:

— эксперименты по схеме “полый цилиндр”, которые можно рассматривать как прямое моделирование процесса понижения давления на забое необсаженной скважины, при малой величине отверстия (около 10 мм) в силу масштабного эффекта не позволяют количественно определить величину допустимых депрессий, не приводящих к разрушению отверстия;

— увеличение диаметра отверстия в два раза (до 20 мм) резко снизило величину напряжения разрушения, что подтверждает сделанный выше вывод о значительном влиянии масштабного эффекта на прочность образцов с отверстиями малого диаметра в сторону ее существенного завышения;

— еще одним подтверждением того, что завышенная прочность образцов с отверстиями 10 мм в опытах по схеме “полый цилиндр” объясняется влиянием масштабного эффекта, является то обстоятельство, что напряжение разрушения образца с отверстием 20 мм очень близко к тем значениям, которые получились при физическом моделировании процессов деформирования и разрушения породы в окрестности необсаженной скважины при понижении давления на ее забое;

— полученные результаты о значительном увеличении прочности отверстий небольшого диаметра вследствие масштабного эффекта объясняют, почему на практике, даже при создании глубоких депрессий, в обсаженных скважинах не наблюдается растрескивание и разрушение породы в окрестности перфорационных отверстий, приводящих к росту продуктивности скважин. Это вполне объяснимо малым диаметром перфорационных отверстий – при кумулятивной перфорации он составляет 8–12 мм (при длине до 350 мм), что сопоставимо с диаметром отверстий в опытах “полый цилиндр”;

Работа выполнена по теме госзадания (№ госрегистрации 124012500441-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Койфман М.И., Протодяконов М.М., Тедер Р.И. Механические свойства горных пород. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 169 с.
2. Койфман М.И. О влиянии размеров на прочность горных пород / Исследование физико-механических свойств горных пород применительно к задачам управления горным давлением. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 6–14.
3. Ермолович Е.А., Овчинников А.В., Анисеев А.А., Хаустов В.В. Влияние размеров образца на прочность мела // Изв. Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 2. С. 263–271.
4. Komurlu E. Loading rate conditions and specimen size effect on strength and deformability of rock materials under uniaxial compression // Int. J. Geo-Eng. 2018. V. 9. № 17. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1186/s40703-018-0085-z>

5. *Kun Du, Xuefeng Li, Rui Su, Ming Tao, Shizhan Lv, Jia Luo, Jian Zhou.* Shape ratio effects on the mechanical characteristics of rectangular prism rocks and isolated pillars under uniaxial compression // *Int. J. Min. Sci. Technol.* 2022. V. 32. № 2. P. 347–362.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.01.004>
6. *Усольцева О.М., Цой П.А., Семенов В.Н.* Влияние размера образцов на деформационно-прочностные свойства горных пород // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* 2020. Т. 7. № 2. С. 53–59.
<https://doi.org/10.15372/FPVGN2020070209>
7. *Durmeková T., Bednarik M., Dikejová P., Adamcova R.* Influence of specimen size and shape on the uniaxial compressive strength values of selected Western Carpathians rocks // *Environmental Earth Sciences.* 2022. V. 81. Article 247.
<https://doi.org/10.1007/s12665-022-10373-1>
8. *Сукнев С.В.* Разрушение хрупкого геоматериала с круговым отверстием при двухосном нагружении // *ПМТФ.* 2015. Т. 56. № 6. С. 166–172.
9. *Сукнев С.В.* Применение подхода механики конечных трещин для оценки разрушения квазихрупкого материала с круговым отверстием // *Изв. РАН. МТТ.* 2021. № 3. С. 13–25. <http://doi.org/10.31857/S0572329921020161>
10. *Karev V., Kovalenko Yu.* Triaxial loading system as a tool for solving geotechnical problems of oil and gas production // *True Triaxial Testing of Rocks.* Leiden: Taylor & Francis / Balkema. 2013. P. 301–310.
11. *Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б., Карев В.И.* Геомеханический анализ образования вывалов на стенках скважин // *Изв. РАН. МТТ.* 2022. № 6. С. 148–163.
<https://doi.org/10.31857/S0572329922060125>
12. *Устинов К.Б., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Барков С.О., Химуля В.В., Шевцов Н.И.* Экспериментальное исследование влияния анизотропии на ориентацию вывалов в скважинах // *Изв. РАН. МТТ.* 2023. № 3. С. 21–35.
<https://doi.org/10.31857/S0572329922600384>
13. *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. М.: Наука, 1979. 576 с.
14. *Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K.* Geomechanics of Oil and Gas Wells. ↑ Springer. 2020. 184 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-26608-0>

SCALE EFFECT IN MODELING OF MECHANICAL PROCESSES IN THE VICINITY OF A BORHOLE ON A TRUE TRIAXIAL LOADING SETUP

V. I. Karev^a, Yu. F. Kovalenko^a

^a*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia*

*e-mail: perfolinkgeo@yandex.ru

Abstract — One of the main problems when conducting laboratory tests of rock specimens aimed at determining their mechanical and strength properties is to transfer the test results of relatively small specimens to sufficiently large areas of a rock massif, often with a complex structure. This is due to the fact that generalized numerical indicators characterizing the degree of influence of structural heterogeneities of various sizes on the deformation and destruction of rocks and massifs are not yet available. In addition to heterogeneity, other factors also affect the pro-

cesses under study, such as the stress state of the massif, the presence of geological disturbances, macrofractures, etc. These issues are studied in this paper based on a comparison of the results of experiments performed on the Triaxial Independent Loading Test System of the Institute of Problems in Vechanics of the Russian Academy of Sciences using the “hollow cylinder” scheme on specimens with a central hole of 10 and 20 mm in diameter and physical modeling of deformation processes in the vicinity of wells with a decrease in pressure at their bottomhole for reservoir rocks of the Prirazlomnoye oil field.

Keywords: scale effect, true triaxial loading setup, hollow cylinder scheme, physical modeling, borehole, specimen, sand production

REFERENCES

1. *Koifman M.I., Protodyakonov M.M., Teder R.I.* Mechanical Properties of Rocks. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1963, p. 169. [in Russian].
2. *Koifman M.I.* About the influence of dimensions on the strength of rocks / Research of physical and mechanical properties of rocks in relation to the tasks of mountain pressure control. M.: Izd. of the USSR Academy of Sciences, 1962. P. 6–14. [in Russian].
3. *Ermolovich E.A., Ovchinnikov A.V., Anikeev A.A., Haustov V.V.* Influence of the specimen size on the strength of chalk // Proceedings of Tula State University. Earth Sciences. 2020. № 2. P. 263–271. [in Russian].
4. *Komurlu E.* Loading rate conditions and specimen size effect on strength and deformability of rock materials under uniaxial compression // Geo-Engineering. 2018. V. 9. № 17. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1186/s40703-018-0085-z>
5. *Kun Du, Xuefeng Li, Rui Su, Ming Tao, Shizhan Lv, Jia Luo, Jian Zhou.* Shape ratio effects on the mechanical characteristics of rectangular prism rocks and isolated pillars under uniaxial compression // International Journal of Mining Science and Technology. 2022. V. 32. P. 347–362.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.01.004>
6. *Usoltseva O.M., Tsoi P.A., Semyonov V.N.* Influence of specimen size on deformation and strength properties of rocks // Fundamental and Applied Issues of Mining Sciences. 2020. V. 7. № 2. P. 53–59.
<https://doi.org/10.15372/FPVGN2020070209> [in Russian].
7. *Durmeková T., Bednarik M., Dikejová P., Adamcova R.* Influence of specimen size and shape on the uniaxial compressive strength values of selected Western Carpathians rocks // Environmental Earth Sciences. 2022. V. 81. № 9.
<https://doi.org/10.1007/s12665-022-10373-1>. 17
8. *Suknev S.V.* Fracture of a brittle geomaterial with a circular hole under biaxial loading // PMTF. 2015. V. 56. № 6. P. 166–172. [in Russian].
9. *Suknev S.V.* Application of Finite Crack Mechanics Approach for Fracture Assessment of Quasi-brittle Material with a Circular Hole // Izv. RAS. MTT. 2021. № 3. P. 13–25. [in Russian].

10. *Karev V., Kovalenko Yu.* Triaxial loading system as a tool for solving geotechnical problems of oil and gas production // True Triaxial Testing of Rocks. Leiden: Taylor & Francis / Balkema. 2013. P. 301–310.
11. *Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B., Karev V.I.* Geomechanical analysis of formation of breakouts in well walls // Izv. RAS. MTT. 2022. № 6. P. 148–163. [in Russian].
12. *Ustinov K.B., Karev V.I., Kovalenko Yu.F., Barkov S.O., Khimulya V.V., Shevtsov N.I.* Experimental study of the effect of anisotropy on the orientation of breakouts in wells // Izv. RAS. MTT. 2023. № 3. P. 21–35. [in Russian].
13. *Timoshenko S.P., Goodyear J.* Theory of Elasticity. Moscow: Nauka, 1979. 560 p. [in Russian].
14. *Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K.* Geomechanics of Oil and Gas Wells. Springer. 2020. 184 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-26608-0>