

УДК 624.131

ВЛИЯНИЕ РАССОЛОНЕНИЯ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ НА ИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ И ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НА ПРИМЕРЕ ЧАЯНДИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

© 2024 г. В. И. Карев*, Ю. Ф. Коваленко

Представлено академиком РАН Д.М. Климовым 29.01.2024 г.

Поступило 29.01.2024 г.

После доработки 01.02.2024 г.

Принято к публикации 05.02.2024 г.

На Испытательной системе независимого трёхосного нагружения ИПМех РАН (ИСТНН) проведены испытания образцов пород из kernового материала коллектора Чайандинского нефтегазоконденсатного месторождения с целью экспериментального изучения влияния рассолонения пород-коллекторов на их деформационные, прочностные и фильтрационные характеристики. Показано, что рассолонение резко повышает проницаемость пород. При этом деформационные и прочностные свойства исследованных пород меняются в сторону разупрочнения (за исключением угла внутреннего трения), оставаясь тем не менее достаточно высокими. Опыты по физическому моделированию на ИСТНН процесса понижения давления на забое горизонтальной скважины показали, что некоторое снижение упругих и прочностных свойств пород-коллекторов Чайандинского НГКМ после их рассолонения не должно повлиять на устойчивость стенок скважин. Полученные результаты позволяют сделать важный практический вывод, что при эксплуатации месторождения на стадии вымывания соли вследствие фильтрации воды не следует ожидать существенного увеличения рисков, связанных с разрушением коллектора и ростом пескопроявления.

Ключевые слова: горная порода, испытательный стенд, напряжения, деформации, прочность, проницаемость, поровое пространство, рассолонение, геомеханическое моделирование

DOI: 10.31857/S2686739724050054

Отличительной особенностью коллекторов нефтегазовых месторождений Восточной Сибири является наличие солей в поровом пространстве [1, 2]. Нефтегазоносные отложения Непско-Ботубинской НГП зачастую засолены, в отдельных случаях поровое пространство практически целиком заполнено солью. В результате в начальном равновесном состоянии пластовой системы часть взаимосвязанных пор выключена из фильтрационного процесса, что снижает фильтрационно-емкостные свойства пород. При разработке месторождения в процессе фильтрации воды происходит вымывание соли и изменение пустотного пространства. Очевидно, что вымывание соли из порового пространства может привести к увеличению проницаемости породы за счёт увеличения пористости и образования локальных трещин.

С другой стороны, следует опасаться ухудшения прочностных характеристик породы при изменении структуры пустотного пространства, которое может привести к объёмному разрушению породы.

Ниже указанные вопросы рассмотрены на примере Чайандинского нефтегазоконденсатного месторождения, одного из крупнейших в Непско-Ботубинской нефтегазоносной провинции и основной ресурсной базы российско-китайского проекта “Сила Сибири” [3–7].

ИСПЫТАННЫЕ ОБРАЗЦЫ И ПОДГОТОВКА ИХ К ЭКСПЕРИМЕНТАМ

Для изучения влияния рассолонения пород-коллекторов Чайандинского НГКМ на их фильтрационные и деформационно-прочностные свойства была проведена серия экспериментов на Испытательной системе трёхосного независимого нагружения ИСТНН [8], созданной

*Институт проблем механики Российской Академии наук
им. А.Ю. Ишлинского, Москва, Россия
E-mail: wikarev@ipmnet.ru

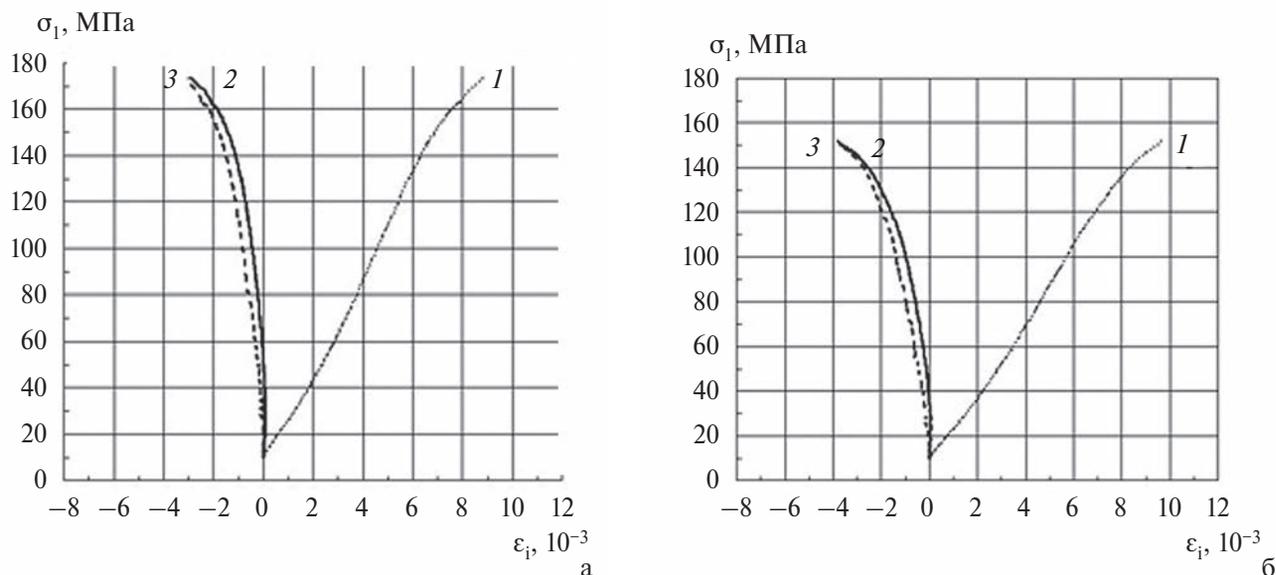


Рис. 1. Кривые деформирования двух образцов в ходе второго цикла испытаний: а – нерассолонённый образец; б – рассолонённый образец; 1 – деформация по оси 1, 2 – деформация по оси 2, 3 – деформация по оси 3.

в Институте проблем механики РАН. Установка ИСТНН представляет собой уникальный исследовательский комплекс для изучения деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик горных пород в условиях истинно трёхосных напряжённых состояний, реально возникающих в массивах горных пород при разбурировании и эксплуатации месторождений. Она позволяет нагружать кубические образцы пород с гранью 40 или 50 мм независимо по трём осям и при этом непрерывно измерять проницаемость образца в ходе опыта по одной из осей.

Из кернового материала, отобранного из коллектора Чайнинского НГКМ с глубин 1600–1800 м, с высокой точностью были изготовлены кубические образцы с гранью 40 мм, непараллельность граней не превышала 20 мкм. Образцы представляли собой песчаник с содержанием солей менее 30%. Образцы маркировались следующим образом: ось 1 образца совпадала с осью керна, ориентация осей 2 и 3 была произвольной. Образцы были вырезаны из 3 кусков керна, по два из каждого куска.

Из каждой пары образцов один был рассолонён. Вымывание соли происходило в две стадии. Обеспечивалась прокачка через пористую среду значительного объёма слабоминерализованной воды (до 10 поровых объёмов и более), что приводило к частичному удалению солей из порового пространства породы-коллектора. Для снижения воздействия воды на цемент горной породы вместо дистиллированной воды использовался

3%-ный водный раствор NaCl. На второй стадии образцы экстрагировались в растворе спирто-бензола, чем достигалось окончательное вымывание солей.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Было проведено два типа испытаний. Испытания первого типа (трёхосные испытания) имели целью определение упругих характеристик (модуля Юнга и коэффициента Пуассона) и показателей объёмной прочности (модуля сцепления и угла внутреннего трения) [9, 10] пород-коллекторов Чайнинского НГКМ до и после их рассолонения. На первом этапе трёхосных испытаний к образцу прикладывалась гидростатическая (одинаковая по всем 3 осям) нагрузка (давление обжима). Затем нагрузка по осям 2 и 3 образца поддерживалась постоянной, а нагрузка σ_1 по оси 1 образца увеличивалась, причём управление нагружением образца по данной оси на этом участке осуществлялось по перемещению. Нагружение по первой оси доводилось до уровня начала неупругого деформирования образца, а затем осуществлялась его разгрузка до исходного уровня напряжений. Далее нагрузка по всем осям увеличивалась до следующего значения, и цикл нагружения по оси 1 повторялся. Далее аналогичным образом осуществлялось нагружение на третьем цикле. Затем образец разгружался. Таким образом, каждый опыт состоял из трёх циклов, отвечающих трём значениям

Таблица 1. Обработка трёхосных опытов нерассолонённого образца Ч2

Цикл	Начальное обжатие, МПа	E , 10^4 МПа	ν	σ_1^* , МПа	Начальная проницаемость, мД	K , МПа	ρ , град
1	2	1.43	0.34	130	—	27	43
2	10	2.37	0.33	174	—		
3	20	2.44	0.33	236	—		

Таблица 2. Обработка трёхосных опытов рассолонённого образца Ч2-2

Цикл	Начальное обжатие, МПа	E , 10^4 МПа	ν	σ_1^* , МПа	Начальная проницаемость, мД	K , МПа	ρ , град
1	2	0.97	0.33	87	923	17	45
2	10	1.75	0.29	152	852		
3	20	1.97	0.28	212	540		

всестороннего обжима образца. Уровни начального всестороннего обжатия образцов для трёх циклов испытания составляли 2 МПа, 10 МПа и 20 МПа соответственно. В ходе опытов на каждом цикле регистрировались деформации образца по трём осям и измерялись предельные значения напряжения сжатия σ_1^* по оси 1.

Важной особенностью трёхосных испытаний кубических образцов на установке ИСТНН по сравнению с трёхосными испытаниями цилиндрических образцов на других установках является возможность регистрации деформации образцов в трёх направлениях, что важно при определении деформационно-прочностных свойств анизотропных горных пород.

В качестве примера на рис. 1 приведены кривые деформирования для второго цикла нагружения двух образцов – № Ч2 (нерассолонённого) и № Ч2-2 (рассолонённого), вырезанных из одного куска керна, отобранного с глубины 1663,5 м. На рисунке σ_1 – возрастающее напряжение, прикладываемое вдоль оси керна, ε_i – деформации по осям образца.

В таблицах 1 и 2 приведены результаты обработки трёхосных испытаний образцов Ч2 и Ч2-2. В них σ_1^* – предельные значения возрастающего напряжения σ_1 на каждом из циклов испытания, E – касательный (дифференциальный) модуль Юнга в направлении максимальной нагрузки, ν – коэффициент Пуассона.

Из таблиц видно, что рассолонение образцов пород привело к резкому увеличению их проницаемости. При этом деформационные и прочностные свойства исследованных пород изменились в сторону их разупрочнения

(за исключением угла внутреннего трения ρ), оставаясь тем не менее достаточно высокими.

Для ответа на вопрос, достаточно ли прочности породы после рассолонения для сохранения устойчивости стенок скважин Чаяндинского НГКМ при эксплуатации, на установке ИСТНН был выполнен второй тип экспериментов, заключающийся в прямом физическом моделировании деформированных состояний, возникающих в различных точках контура горизонтальной скважины при понижении давления на её забое, и изучении процесса разрушения породы в этих точках под действием создаваемых напряжений. В ходе экспериментов моделировались напряжённо-деформированные состояния в верхней и боковой точках вертикального сечения горизонтальной скважины. Программы нагружения образцов и методика проведения таких экспериментов подробно изложены в [11].

Для испытаний из двух кусков керна, отобранных с глубины 1784,4 м из коллектора Чаяндинского НГКМ, были вырезаны по два кубических образца с гранью 40 мм – образцы Ч6.1 и Ч6.2 из одного куска и Ч7.1 и Ч7.2 – из другого. Затем по одному образцу из каждого куска (Ч6.2 и Ч7.2) были рассолонены. Начальная проницаемость нерассолонённых образцов Ч6.1 и Ч7.1 была 1,7 мД и 6,1 мД соответственно, а рассолонённых образцов Ч6.2 и Ч7.2 – 900 мД и 211 мД соответственно, т.е. проницаемость образцов в результате рассолонения резко возросла.

На образцах Ч6.1 и Ч6.2 на установке ИСТНН было выполнено физическое моделирование процесса понижения давления на забое горизонтальной скважины в верхней точке её контура, а на образцах Ч7.1 и Ч7.2 – в боковой

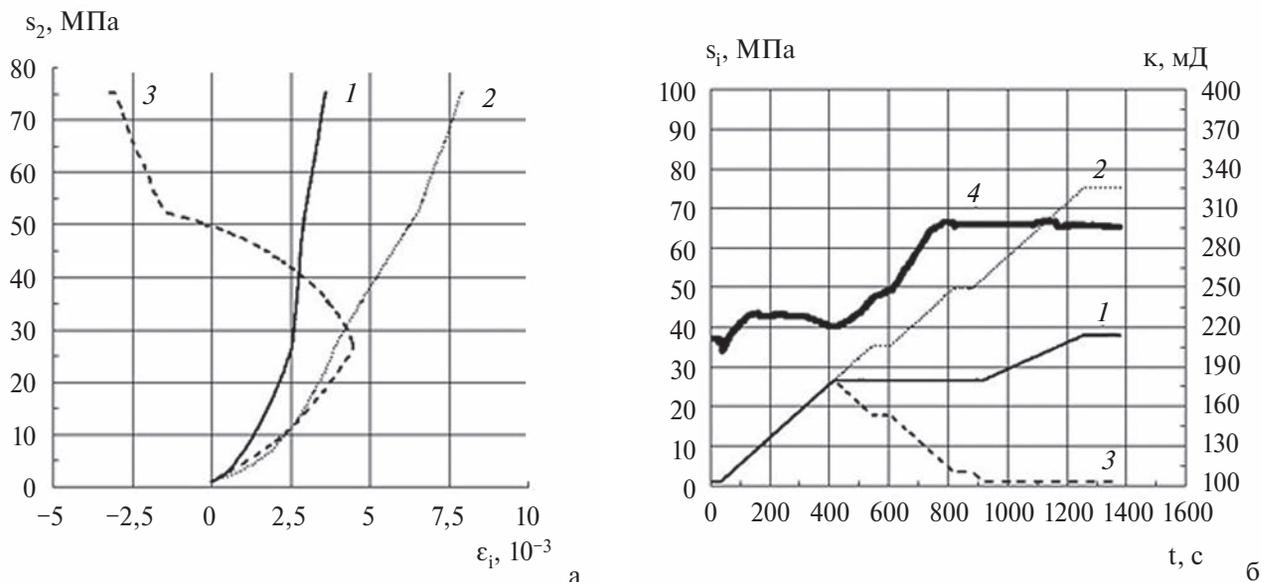


Рис. 2. Результаты испытания образца Ч7.2: а) программа испытания образца и изменение его проницаемости в ходе опыта; 1 – напряжение по оси 1, 2 – напряжение по оси 2, 3 – напряжение по оси 3, 4 – проницаемость вдоль оси 1; б) кривые деформирования образца; 1 – деформация по оси 1, 2 – деформация по оси 2, 3 – деформация по оси 3.

точке контура. На рис. 2 приведены результаты испытаний рассолонённого образца Ч7.2. На рис. 2 б показана программа нагружения образца, отвечающая моделированию деформационных процессов на контуре горизонтальной скважины при понижении давления на её забое, и изменение проницаемости k образца в ходе опыта. 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 отвечающих напряжениям $|s_{z_i}|, |s_{\theta}|, |s_r|$, действующим на контуре горизонтальной скважины. На рис. 2 а приведены кривые деформирования образца по трём осям в зависимости от параметра нагружения s_2 .

Из рис. 2 а видно, что образец деформировался упруго в ходе всего опыта и не разрушился вплоть до напряжений, отвечающих полному “осушению” скважины, т.е. полному сбросу давления на её забое. Аналогичный результат получился и при испытании рассолонённого образца Ч6.2 по программе, отвечающей верхней точке на контуре горизонтальной скважины – он также не разрушился в ходе опыта, а кривые его деформирования полностью совпали с показанными на рис. 2 а. Более того, кривые деформирования нерассолонённых образцов также оказались идентичны кривым деформирования рассолонённых образцов.

ВЫВОДЫ

На основании проведённых испытаний кернового материала из коллектора Чаяндинского НГКМ на установке ИСТНН можно сделать следующие выводы:

- рассолонение образцов привело к резкому увеличению проницаемости образцов;
- породы-коллектора Чаяндинского НГКМ до рассолонения характеризуются высокими деформационными (модуль Юнга и коэффициент Пуассона) и прочностными (модуль сцепления и угол внутреннего трения) свойствами;
- рассолонение образцов приводит к изменению деформационных и прочностных свойства исследованных пород в сторону их разупрочнения (за исключением угла внутреннего трения ρ). Как следует из таблиц 1 и 2, модули Юнга, коэффициенты сцепления и пределы прочности рассолонённых образцов оказались существенно ниже, чем в образцах до рассолонения. В то же время величина угла внутреннего трения несколько увеличилась.
- несмотря на снижение прочностных свойств пород-коллекторов после их рассолонения, они тем не менее остались достаточно высокими;
- опыты по физическому моделированию на установке ИСТНН процесса понижения

давления на забое горизонтальной скважины показали, что некоторое снижение упругих и прочностных свойств пород-коллекторов Чайандинского НГКМ после их рассолонения не должно повлиять на устойчивость стенок скважин и вызвать их разрушение;

Суммируя сказанное, можно сделать главный практический вывод: рассолонение пород-коллекторов Чайандинского НГКМ, вызывая резкий рост проницаемости пород-коллекторов, не приводит к критическому уменьшению их прочностных свойств. Это даёт основание утверждать, что при эксплуатации месторождения на стадии вымывания соли вследствие фильтрации воды не следует ожидать существенного увеличений рисков, связанных с разрушением коллектора и ростом пескопроявления.

БЛАГОДАРНОСТИ.

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства образования и науки России № 123021700046-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анциферов А. С.* Причины засоления коллекторов нефти и газа в Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции // ДАН. 2000. Т. 370. № 1. С. 80–82.
2. *Воробьев В. С., Клиновая Я. С.* Причины засоления терригенных пород в пределах Верхнечонского месторождения (Восточная Сибирь) // Газовая промышленность. 2017. № 4 (751). С. 36–41.
3. *Рыжов А. Е., Перунова Т. А., Орлов Д. М.* Структур порового пространства пород-коллекторов ботубинского горизонта Чайандинского месторождения // Вести газовой науки. 2011. №1(6). С. 162–174.
4. *Рыжов А. Е.* Типы и свойства терригенных коллекторов венда Чайандинского месторождения // Вести газовой науки. 2013. № 1(12). С. 145–160.
5. *Рыжов А. Е., Крикунов А. И., Филиппова Л. А., Канунникова Н. Ю.* Выяснение закономерностей в распределении засоленности ботубинского продуктивного горизонта Чайандинского нефтегазоконденсатного месторождения // Вести газовой науки. 2016. № 4 (28). С. 127–132.
6. *Крекнин С. Г.* Современная геолого-геофизическая модель Чайандинского нефтегазоконденсатного месторождения / С. Г. Крекнин, А. В. Погрецкий, Д. Н. Крылов и др. // Геология нефти и газа. 2016. № 2. С. 44–55.
7. *Чурикова И. В., Пылёв Е. А., Семёнов Е. О., Чуриков Ю. М., Семёнова Е. В., Чудина А. А., Симонов А. В.* Особенности распространения и свойства засоленных коллекторов венда Чайандинского нефтегазоконденсатного месторождения // Вести газовой науки. 2019. № 4 (41). С. 153–162.
8. *Karev V., Kovalenko Yu.* Triaxial loading system as a tool for solving geotechnical problems of oil and gas production / In True Triaxial Testing of Rocks. Leiden: Taylor & Francis // Balkema. 2013. P. 301–310.
9. *Тимошенко С. П., Гудьер Дж.* Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
10. *Терцаги К.* Теория механики грунтов. М.: Госстройиздат, 1961. 507 с.
11. *Karev V. I., Kovalenko Y. F., Ustinov K. B.* Geomechanics of Oil and Gas Wells. Advances in Oil and Gas Exploration and Production. Springer International Publishing Cham: Switzerland. 2020. 166 p. doi: 10.1007/978-3-030-26608-0

THE INFLUENCE OF DESALINIZATION OF RESERVOIR ROCKS ON THEIR MECHANICAL AND FILTRATION PROPERTIES USING THE EXAMPLE OF THE CHAYANDINSKOYE FIELD

V. I. Karev[#], Yu. F. Kovalenko

Presented by Academician of the RAS D.M. Klimov January 29, 2024.

Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

[#]*E-mail: wikarev@ipmnet.ru*

Using the Independent Triaxial Loading Test System of the Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (TILTS), rock specimens from the core material of the reservoir of the Chayandinskoye oil and gas condensate field were tested in order to experimentally study the effect of desalinization of reservoir rocks on their deformation, strength and filtration characteristics. It has been shown that desalinization sharply increases the permeability of rocks. At the same time, the deformation and strength properties of the studied rocks change towards softening (with the exception of the angle of

internal friction), nevertheless remaining quite high. Experiments on physical modeling of the process of reducing pressure at the bottom of a horizontal well using TILTS showed that a slight decrease in the elastic and strength properties of the reservoir rocks of the Chayandinskoye oil and gas condensate field after their desalinization should not affect the stability of the well walls. The results obtained allow us to draw an important practical conclusion that when operating a field at the stage of salt washing out due to water filtration during operation, one should not expect a significant increase in the risks associated with reservoir destruction and increased sand production.

Keywords: rock, test set, stress, deformation, strength, permeability, pore space, desalinization, geomechanical modeling