

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Использование компьютерного моделирования позволило оперативно определить параметры вытеснения для скважины № 36 Южно-Александровского месторождения, задаваясь лишь значениями начальной водонасыщенности и остаточной нефтенасыщенности.

2. Системы компьютерной математики позволяют реализовать сложные математические модели, что дает возможность повысить точность решения задач нефтегазовой отрасли, в частности, при разработке месторождений.

Литература

1. Григорян, Л. А. Математическое моделирование задачи разработки нефтяных месторождений. / Л. А. Григорян, Е. Ф. Тимофеева // Естественные и математические науки в современном мире : сб. ст. по материалам XVIII Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2014. – 218 с.
2. Собин, А. М. Регулирование разработки нефтяных месторождений на основе выявленных закономерностей фильтрации флюидов в призабойной зоне скважины : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.17 / А. М. Собин ; Ухт. гос. техн. ун-т. – Ухта, 2015. – 137 с.
3. Хайруллин, А. А. Разработка и исследование модели двухфазного непоршневого вытеснения нефти водой : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.17 / А. А. Хайруллин ; Тюм. гос. нефтегаз. ун-т. – Тюмень, 2014. – 147 с.

УДК 620.172.242

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ СЖИМАЕМОСТИ НИЗКОПОРИСТЫХ ИЗВЕСТНЯКОВ

**И. Н. Степанкин, Р. Е. Гутман, А. М. Жуковский, А. Ю. Кравченко,
Е. Н. Ходьков, А. А. Василенко**

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»,
г. Гомель*

Посвящена оценке результативности комплексного исследования свойств горных пород, включающего тесты на сжимаемость по методам эффективного напряжения и истощения керновых образцов известняка с низкой пористостью.

Ключевые слова: горные породы, известняк, общая сжимаемость, сжимаемость зерна и порового пространства, пористость.

TO THE QUESTION OF ASSESSING THE COMPRESSION OF LOW-POROUS LIMESTONES

**I. Stsiapankin, R. Hutman, A. Zhukouski, A. Kravchenko,
Y. Khadz Kou, A. Vasilenka**

BelNIPIneft RUE «Production Association “Belorusneft”, Gomel

The work is devoted to assessing the effectiveness of a comprehensive study of the properties of rocks, including tests for compressibility using the methods of effective stress and depletion of core samples of limestone with low porosity.

Keywords: rocks, limestone, total compressibility, grain and pore space compressibility, porosity.

Актуальность определения показателей сжимаемости обусловлена необходимостью учета полученных данных при создании моделей месторождений, динамики их эволюции в процессе добычи, а также оценки состояния взаимных деформаций

пласта и ствола скважины. Данные о сжимаемости порового пространства позволяют уточнить долю извлекаемых запасов из исследованных коллекторов.

Объекты исследований и методики испытаний. Исследования по оценке сжимаемости проводили на установке RTR 1000. Объектами исследования выступили стандартные образцы керна размерами $\varnothing 30 \times 60$ мм. Образцы отобраны из Воронежского горизонта Речицкого нефтяного месторождения. Отличительной особенностью образцов является их низкая пористость в совокупности с однородностью строения. Минералогический состав – известняк.

Результаты исследований и их обсуждение. Коллекторские свойства известняков зависят от пористости. Она классифицируется как трещинная ($m < 3 \%$), трещиновато-поровая ($3 < m < 8 \%$) и поровая ($m > 8 \%$) [1].

При оценке сжимаемости горных пород особое внимание уделяется деформационным процессам, которые происходят при смыкании трещин на стадии испытания эффективным напряжением. Величина сжимаемости порового пространства, определенная при увеличении эффективного напряжения и постоянном поровом давлении, суммируется из двух показателей – сжимаемости трещинного пространства и собственно поровой сжимаемости (пороупругости). Выявление количественных долей указанных показателей, как правило, достигается путем сравнения полученных данных при проведении тестов эффективным напряжением и истощением. Во втором случае, процесс сжимаемости порового пространства оценивается при снижении порового давления, в то время как остальные показатели – вертикальное (горное) и боковое давление соответствуют пластовым условиям. Трещины, объем которых увеличился за счет извлечения керна из скважины, смыкаются на предварительной стадии нагружения образца. Эта часть сжимаемости, как правило, и отождествляется с трещиной [2].

Очевидно, что эксперименты, проведенные по методу эффективного напряжения и истощения, должны дать различные показатели, причем сжимаемость на стадии истощения C_{bp} должна быть ниже аналогичного параметра, определенного на стадии эффективного напряжения C_{bc} [3].

Отмеченные различия считаются общей закономерностью независимо от величины пористости горной породы и ее трещиноватости. В том случае, когда современные методы оценки морфологии керна не выявляют видимых макротрещин в образцах, считается, что присутствие микротрещин, не выявляемых методами компьютерной томографии в стандартном керновом образце, не требует отдельного обоснования, а трещиноватая микропористость величиной менее 3 % является одним из элементов структуры керна.

В нашем случае лабораторные образцы имели пористость 1,06 и 0,92 %, а их поведение при оценке показателей сжимаемости имело существенные различия. В частности, испытания керна с наименьшей пористостью – 0,92 % показали аномальное изменение показателей сжимаемости на стадии определения сжимаемости зерна C_g и общей сжимаемости C_{bc} (табл. 1).

Таблица 1

Телеметрические данные для прямого расчета показателей сжимаемости образца с исходной пористостью 0,92 % на стадии эффективного напряжения

<i>Time, c</i>	<i>Saxial, МПа</i>	<i>Sconf, МПа</i>	<i>Ppore, МПа</i>	<i>Smean, МПа</i>	<i>e_v, %</i>	<i>C, 1/бар</i>	<i>Smean_eff, МПа</i>	<i>Ф, доли ед.</i>
<i>Сжимаемость зерна C_g – этап эффективного напряжения</i>								
6367,12	4	3	1,6	3,33	0,0867	6,022e-6	1,73	0,00854
6867,09	16,51	15,5	14,1	15,84	0,1613		15,88	0,00875
<i>Общая сжимаемость C_{bc} – этап эффективного напряжения</i>								
6867,09	16,51	15,5	14,1	15,83666667	0,1613	4,81179e-06	15,88	0,00875
8306,8	52,5	51,5	14,1	51,83333333	0,3343		49,09	0,00897

Величина сжимаемости зерна относится к наиболее стабильным деформационным показателям горной породы. Считается, что эта величина имеет наименьшее значение по сравнению с показателями общей сжимаемости (C_{bc} или C_{bp}) и сжимаемостью порового пространства (C_{pc} или C_{pp}) [1]. Однако в рассматриваемом случае выявлена обратная закономерность. В частности, сжимаемость зерна, определенная на стадии изостатического сжатия, при повышении среднего значения внешнего давления с 3,33 до 15,84 МПа и порового давления – с 1,6 до 14,1 МПа составила $C_g = 6,022 \times 10^{-5}$ 1/МПа ($\times 10^{-6}$ 1/бар). Дальнейшее повышение изостатического давления – с 15,84 до 51,84 МПа при сохранении неизменного значения порового давления на уровне 14,1 МПа сопровождалось уменьшением показателя сжимаемости до значения $C_{bc} = 4,812 \times 10^{-5}$ 1/МПа ($\times 10^{-6}$ 1/бар). Следует отметить, что именно второй этап нагружения соответствует условиям определения общей сжимаемости. Полученное противоречивое соотношение между двумя показателями сжимаемости можно трактовать как единый тренд изменения общей сжимаемости, величина которой снижается по мере возрастания внешнего давления [4]. При этом компенсирующая роль порового давления оказалась настолько низкой, что общая деформация образца достаточно полно реализовалась за счет взаимодействия зерен породы между собой. Очевидно, что при достаточно низкой исходной пористости закономерно принимать механику взаимодействия твердых частиц породы между собой в качестве основного процесса, сопровождающего деформацию зерна. Отдельного внимания заслуживает изменение величины пористости образца на обеих стадиях испытания. Как видно из табл. 1, она возрастала. Отмеченное противоречие объясняется двумя аспектами. Во-первых, на стадии оценки сжимаемости зерна величина порового давления должна компенсировать внешнее давление на образец, создавая условия для деформации собственно зерен породы. Этот постулат, используемый для оценки сжимаемости зерна, требует считать неизменной величину порового объема на данной стадии испытания. Следовательно, уменьшение общего объема образца при неизменном объеме пор сопровождается увеличением такого относительного показателя, как пористость. Во-вторых, величина общей сжимаемости указанного образца оказалась ниже, чем сжимаемость зерна. В такой ситуации изменение величины объема зерен и порового объема происходит с разной скоростью по мере возрастания эффективного напряжения. Уменьшение объема зерен опережает уменьшение объема пор и, естественно, величина пористости также возрастает.

102 Секция 6. Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений

Отдельного внимания заслуживает переходный этап, на котором после достижения пластового значения бокового давления перед окончательным повышением осевого давления до величины горного была проведена выдержка для стабилизации деформационных параметров. Оказалось, что на этом этапе образец проявил некоторую ползучесть, величина общей деформации возросла с 0,3343 до 0,3464 %. В итоге перед началом этапа истощения величина пористости уменьшилась до 0,885 % (табл. 2). Сравнительный анализ показателей сжимаемости порового пространства показывает, что указанная характеристика, определенная на стадия эффективного напряжения и истощения, имеет практически одинаковую величину около $2,6 \times 10^{-5} 1/\text{МПа}$ ($\times 10^{-6} 1/\text{бар}$). Это значение более чем на порядок ниже минимальной величины пороупругости известняка, приведенной в работе [1] ($4 \times 10^{-4} 1/\text{МПа}$ ($\times 10^{-5} 1/\text{бар}$)).

Таблица 2

Телеметрические данные для прямого расчета показателей сжимаемости порового пространства образца с исходной пористостью 0,92 % на стадиях эффективного напряжения и истощения

Time, с	Saxial, МПа	Sconf, МПа	Ppore, МПа	Smean, МПа	e_v , %	C, 1/бар	Smean_eff, МПа	φ, доли ед.
<i>Сжимаемость порового пространства C_{pc} – этап эффективного напряжения</i>								
6867,09	16,51	15,55	14,1	15,84	0,1613	2,58799E-06	1,73	0,00854
8306,8	49,76	48,76	14,1	49,09	0,3343	2,60482E-06	34,99	0,00875
<i>Сжимаемость порового пространства C_{pp} – этап истощения</i>								
8938,91	56,7	51,51	14,1	53,24	0,3541	2,60482E-06	39,14	0,00885
17285,5	56,7	50,42	7,0	52,51	0,3575	2,60096E-06	45,5	0,00878

Приведенные ниже результаты оценки сжимаемости образца с исходной пористостью 1,06 %, показывают, что с увеличением объема пор результаты оценки всех показателей сжимаемости соответствуют теоретическим предпосылкам и их практической апробации, приведенной в специальной литературе (табл. 3 и 4). Это позволяет сделать вывод об проявлении аномального деформирования при испытаниях образцов известняка только в случаях, когда их исходная пористость, определенная в атмосферных условиях, достаточно низка. В нашем случае подобный результат зафиксирован при пористости 0,92 %.

Таблица 3

Телеметрические данные для прямого расчета показателей сжимаемости образца с исходной пористостью 1,06 % на стадии эффективного напряжения

Time, с	Saxial, МПа	Sconf, МПа	Ppore, МПа	Smean, МПа	e_v , %	C, 1/бар	Smean_eff, МПа	φ, доли ед.
<i>Сжимаемость зерна C_g – этап эффективного напряжения</i>								
8953,86	4	3	1,6	3,33	0,1317	3,678E-05	1,73	0,0106
9453,83	16,5	15,49	14,1	15,83	0,1776		1,73	0,0093
<i>Общая сжимаемость C_{bc} – этап эффективного напряжения</i>								
9453,83	16,5	15,49	14,1	15,83	0,1776	5,196E-05	1,73	0,0093
11256,3	52,51	51,5	14,1	51,84	0,3648		37,74	0,0089

Телеметрические данные для прямого расчета показателей сжимаемости порового пространства образца с исходной пористостью 0,92 % на стадиях эффективного напряжения и истощения

<i>Time, c</i>	<i>Saxial, МПа</i>	<i>Sconf, МПа</i>	<i>Ppore, МПа</i>	<i>Smean, МПа</i>	<i>e_v, %</i>	<i>C, 1/бар</i>	<i>Smean_eff, МПа</i>	<i>φ, доли ед.</i>	<i>α</i>
<i>Сжимаемость порового пространства C_{pc} – этап эффективного напряжения</i>									
9455,83	16,53	15,54	14,1	15,87	0,1778	7,56E-05	1,73	0,0093	–
11256,3	52,51	51,5	14,1	51,84	0,3648	0,001713	1,73	0,0089	–
<i>Сжимаемость порового пространства C_{pp} – этап истощения</i>									
11424,5	56,71	51,5	14,1	53,24	0,372	0,0015	39,187	0,0089	0,9694
11706,7	56,72	50,31	7	52,45	0,3778	0,0013	45,45	0,0088	0,5022

Литература

1. Карманский, А. Т. Коллекторские свойства горных пород при изменении вида напряженного состояния / А. Т. Карманский // Зап. горн. ин-та. – 2009. – Т. 183. – С. 289–292. – Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/6913/4820>.
2. Жуков, В. С. Экспериментальная оценка коэффициентов сжимаемости трещин и межзерновых пор коллектора нефти и газа / В. С. Жуков, Ю. О. Кузьмин // Зап. горн. ин-та. – 2021. – Т. 251. – С. 658–666. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.5>
3. МакФи, К. Лабораторные исследования керна: гид по лучшим практикам / К. МакФи, Дж. Рид, И. Зубизаретта. – М. – Ижевск : Ин-т компьютер. исслед., 2018. – 924 с.
4. Zoback, M. D. Reservoir geomechanics / M. D. Zoback. – New York : Cambridge University Press, 2007. – 505 p. – Mode of access: Sci-Hub|Reservoir Geomechanics|10.1017/CBO9780511586477.

УДК 622.276.6

АНАЛИЗ И ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМАТИКИ, СВЯЗАННОЙ С ВЫПАДЕНИЕМ КОНДЕНСАТА В ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТАХ ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

А. В. Минаков, К. С. Карсеко

*БелНИПИнефть РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»,
г. Гомель*

Рассмотрено негативное влияние ретроградного конденсата на разработку залежи. Основная проблема этого явления заключается в снижении продуктивности и засорении призабойной зоны скважины. Проведена оценка эффективности обработки скважины газоконденсатного месторождения в украинском регионе различными агентами, подобран наиболее эффективный газ для воздействия на призабойную зону и рассчитан оптимальный объем закачки.

Ключевые слова: газоконденсатное месторождение, гидродинамическая модель, конденсатная банка, обработка призабойной зоны, закачка газа.