

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2020.3.68-84>

УДК 622.276.1/.4(571.1)

Влияние деформаций коллектора на разработку месторождений Западной Сибири

Макаренков Е.С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Influence of collector deformations on the development of Western Siberia

E.S. Makarenkov

Perm national research polytechnic university, Perm, Russia

E-mail: 124makarenkove@mail.ru

Аннотация. Начиная с этапов разведки и освоения месторождений, а также в самом процессе разработки равновесное состояние горных пород непостоянно – оно все время претерпевает какие-либо изменения. Процессы и явления возникновения деформаций земной коры, ее поверхности и горных массивов на различных стадиях разработки нефтяных и газовых месторождений довольно популярны в мировой практике, особенно в странах, занимающихся добычей углеводородов и других полезных ископаемых. Диапазоны и масштабы проявления всевозможных деформационных процессов имеют достаточно широкие границы: возможны оседания земной плоскости от нескольких миллиметров до нескольких десятков метров. Данная проблема является актуальной на территории всей России, в особенности на территории Западной Сибири, где разрабатывается большая часть месторождений страны.

В данной статье приводятся основные причины и факторы возникновения деформации горной породы, способы их определения, задачи, достигаемые с помощью решения данной проблемы. Также проводится оценка исходных данных для достоверности исследований.

В качестве примеров влияния деформаций коллектора на разработку месторождений приводятся расчеты, проведенные в лабораторных условиях на образцах горных пород и керне с пластов Ю₁₋₁ – ЮВ₆ Хохряковского, Пермьковского и Кошильского месторождений. В частности, определены и построены зависимости влияния напряжения и эффективного давления на горную породу от коллекторских свойств, а именно - пористости и проницаемости породы.

Данные исследования показывают, что деформацию коллектора необходимо активно изучать и искать способы ее снижения. Решение данной проблемы актуально при формировании и построении систем разработки.

Ключевые слова: деформация, порода-коллектор, эффективное давление, напряжение на горную породу, проницаемость, керн.

Для цитирования: Макаренков Е.С. Влияние деформаций коллектора на разработку месторождений Западной Сибири//Нефтяная провинция.-2020.-№3(23).-С.68-84. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2020.3.68-84>

Abstract. In the process of developing exploration and development of deposits, as well as in the process of developing the equilibrium state of rocks, it is not constant - it undergoes any changes all the time. The processes and phenomena that cause deformation of the earth's crust, its surface and mountain ranges at various stages of development of oil and gas fields are quite popular in world practice, especially in countries involved in the extraction of hydrocarbons and other minerals. The ranges and scales of manifestation of all kinds of deformation processes have rather wide boundaries: subsidence of the earth's plane is possible from a few millimeters to several tens of meters. This problem is relevant throughout Russia, especially in Western Siberia, where most of the country's fields are being developed.

This article presents the main causes and factors of the occurrence of rock deformation, methods of their determination, the tasks achieved by solving this problem. It also evaluates the baseline data for the validity of the studies.

As examples of the influence of reservoir deformations on the development of fields, calculations are given that were carried out in laboratory conditions on rock samples and cores from layers J1-1 - JV6 of the Khokhryakovskoye, Permyakovskoye and Koshilskoye fields. In particular, the dependences of the influence of stress and effective pressure on the rock on the reservoir properties, namely, the porosity and permeability of the rock, have been determined and built.

Research data shows that reservoir deformation should be actively studied and ways to reduce it should be sought. The solution to this problem is relevant in the formation and construction of development systems.

Key words: deformation, rock reservoir, effective pressure, shear of rocks, permeability, saturated core.

For citation: E.S. Makarenkov Vliyanie deformacij kollektora na razrabotku mestorozhdenij Zapadnoj Sibiri [Influence of collector deformations on the development of Western Siberia]. Neftyanaya Provintsiya, No. 3(23), 2020. pp.68-84. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2020.3.68-84> (in Russian)

При извлечении флюида на поверхность происходит незначительное оседание земной поверхности. В результате чего вероятны опасные следствия деформации: разрушение наземных сооружений, смятие обсадных колонн скважины, разрыв коммуникаций, оползневые явления и другие, более

интенсивные деформации горных массивов.

Научная практика во всем мире, показывает, что на многих объектах разработки существует слабая и недостаточная гидродинамическая связь между добывающими и нагнетательными скважинами, неравномерное распределение пластового давления в коллекторах, наличие участков с аномально высокой проницаемостью пород, аномально высокой вязкостью нефти и зоны, неохваченные дренированием, в результате чего снижается добыча. Вероятно, указанные факты связаны с образованием зон со структурной неоднородностью — зон повышенной трещиноватости, разломы, каверны и т. д. Кроме того, в некоторых случаях относительную деформацию горных пород определяют различные технологические процессы разработки, связанные с повышением пластового давления, например, закачка воды, горячей нефти, пара или любых других реагентов в пласт. Это приводит к гидроразрыву горных пород, которые, в первую очередь, уже пребывали в процессе формирования структуры и были подвержены размягчению, собственно, что и приводило к образованию отрывных каналов и трещинок, а также их дальнейшей кольматацией (засорением).

В коллекторе могут начать возникать упругие волны (продольные или поперечные) значительной интенсивности, которые изменяют физические свойства горных пород, вплоть до разрушения коллекторов, в то время как система пласта начинает проявлять себя как нелинейная среда. Отличительной особенностью данного процесса является то, что в пространственно-неоднородном коллекторе распространяющаяся упругая волна практически не проникает в области с низкой и средней проницаемостью, а чаще всего встречается в высокопроницаемых участках [1].

Чаще всего, ведущей и основной предпосылкой деформации горных пород при разработке месторождений нефти и газа считается понижение начального пластового давления. При значимом падении пластового давления происходят процессы объемного сжатия пор и переупаковки отдельных

зерен, что вызывает уплотнение коллектора и деформирование находящихся вокруг его пород [2].

Образующиеся в коллекторе деформации, в зависимости от геологии, механических характеристик коллектора, покрывающих пород, а еще от режимов эксплуатации месторождений и способов добычи, имеют возможность распространяться в кровлю коллектора, покрывающие его слои, вплоть до плоскости, где они появляются, по большей части, преимущественно в виде вертикальных смещений. При этом возможны различные случаи:

- деформация резервуара будет небольшой; близка к упругой, если резервуар состоит из жестких твердых горных пород (такие как: твердые песчаники, твердые доломиты, известняки);
- деформация будет значительно выходить за пределы упругости, если резервуар будет представлен породами со слабым уплотнением частиц в породе (рыхлые песчаники, песок) [3].

В настоящее время установление степени влияния снижения пластового давления на фильтрационно-емкостные свойства коллекторов, а также на показатели разработки месторождений является одной из серьезных, часто исследуемых и наиболее важных задач, обусловленных:

- разнообразием природных условий, в которых находятся нефть и газ, выражаемые в различии пространственного расположения, климатических условий, горно-геологических условий, в степени неоднородности коллекторов, в свойствах пластовых флюидов и др.;
- воздействием на деформацию коллектора одновременно большого количества техногенных и природных факторов;
- характеристик и параметров, характеризующих объект, условия и степень его разработки, изменяющихся во времени;
- необходимости сбора, подготовки, анализа и обработки объема геолого-промысловой информации. Исследование нередко осложняется

по причине низкого качества геолого-промысловых материалов. [4]

Для всего этого используют теоретические, промысловые и экспериментально-лабораторные исследования в зависимости от конкретных целей и задач для изучения процессов деформации.

Промысловые исследования (результаты гидродинамических исследований) в основном направлены на изучение причин снижения коэффициента продуктивности и разработку мероприятий по восстановлению и увеличению его величины, соответствующей вероятным и потенциальным возможностям продуктивного пласта.

Теоретические исследования чаще всего используются для изучения изменения процесса абсолютной деформации пород-коллекторов и, как следствие, получение аналитических выражений для определения степени снижения фильтрационно-емкостных свойств с уменьшением и падением пластового давления.

Экспериментальные исследования ориентированы на исследования изменений и определение зависимостей механических и упругих свойств пород-коллекторов во всевозможных горно-геологических условиях [5].

В естественных условиях залегания нефтяные и газовые резервуары находятся под напряжением из-за влияния давления породы и упругих свойств самого резервуара-коллектора. Тектонические силы также могут оказывать сильное влияние, главным образом в периоды сейсмотектонической активности.

Естественное напряженное состояние можно определить двумя методами:

1. Косвенный метод. Выполняется по распределению волн напряжений в горных породах. Основными факторами являются зависимость плотности и модуля упругости от сжимающих напряжений.
2. Прямой метод. Проводят измерения горного давления в скважинах с последующим расчетом напряжённого состояния вдали от них.

В случае если в пустотном пространстве пород имеется давление жидкостей и газов, то эффективная часть горного давления ($P_{эф}$ – показывает величину эффективного давления сжатия скелета горной породы или уплотняющего давления) равна разности между абсолютным горным давлением (P_g) и пластовым давлением ($P_{пл}$), т.е.

$$P_{эф} = P_g - P_{пл}$$

Вертикальная составляющая горного давления или вертикальная компонента пород равна:

$$P_g = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot g \cdot h_i ,$$

где ρ_i – средняя плотность слоев вышележащих пород; g – ускорение свободного падения; h_i – толщина вышележащих слоев.

Учеными было установлено, что полное горное давление не всецело передается в горизонтальном направлении, как следствие боковое горное давление равно:

$$P_{гб} = P_g \cdot \alpha_{бр} ,$$

где $\alpha_{бр}$ – коэффициент бокового распора горных пород. Определяется следующим образом:

$$\alpha_{бр} = \frac{\nu}{1-\nu} .$$

Здесь ν – коэффициент Пуассона, изменяется от 0 до 0,5, - показывает отношение относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению. При значении равном 0,5, коэффициент соответствует более упругим телам, ведущим себя аналогичным образом, а нулевое значение присуще телам, не обладающим упругостью, то есть хрупким породам.

Данная проблема является достаточно сложной и в то же время очевидной и актуальной. В пласте происходят различные типы деформационных процессов в ходе фильтрации жидкости — от упругого деформирования до пластического разрушения пород. Используя теории упругого режима фильтрации, рассчитывается, что пористая среда испытывает только

обратимые деформации, однако данное утверждение может приводит к значительным расхождениям и ошибочным суждениям в оценке емкостных и фильтрационных свойств в горных породах. Сегодня существующие модели упругопластического режима недостаточно точно отражают все деформационные процессы, которые происходят в пласте при отборе флюида, что нарушает правильность процесса разработки.

Подводя итоги данного раздела, можно сделать вывод, что деформации коллектора достаточно распространены и значительно влияют на процесс разработки, снижая добычу нефти. Необходимо понять, на какие именно фильтрационно-емкостные параметры влияет деформация и в какой степени. Для этого разберем несколько опытов, которые проводились на месторождениях Западной Сибири.

В качестве примеров для оценки влияния деформаций коллектора на разработку месторождений Западной Сибири приведены примеры изучения образцов керна, отобранных с пластов Ю₁₋₁ – ЮВ₆ на месторождениях Пермязковской группы ХМАО.

Анализ исследований.

Для оценки воздействия деформаций коллектора на разработку месторождений Западной Сибири были проанализированы исследования, проводившиеся на месторождениях Пермязковской группы ХМАО, а именно, Хохряковское, Пермязковское и Кошильское.

В структурно-тектоническом отношении месторождения ограничены Александровским мегавалом. Ведущими являются отложения васьюганской и тюменской свит, с которыми в основном и связывают нефтегазовый потенциал (Рис. 1).

Рядом находятся Окуневское и Котыгъеганское месторождения. Месторождения имеют сходное геологическое строение. В промышленной разработке находятся примерно с середины 80-х годов. Наиболее крупным является Хохряковское месторождение, в следствии этого как раз оно взято в

качестве примера изучения. Нефть найдена в пластах верхнеюрских отложений васюганской и тюменской свит.

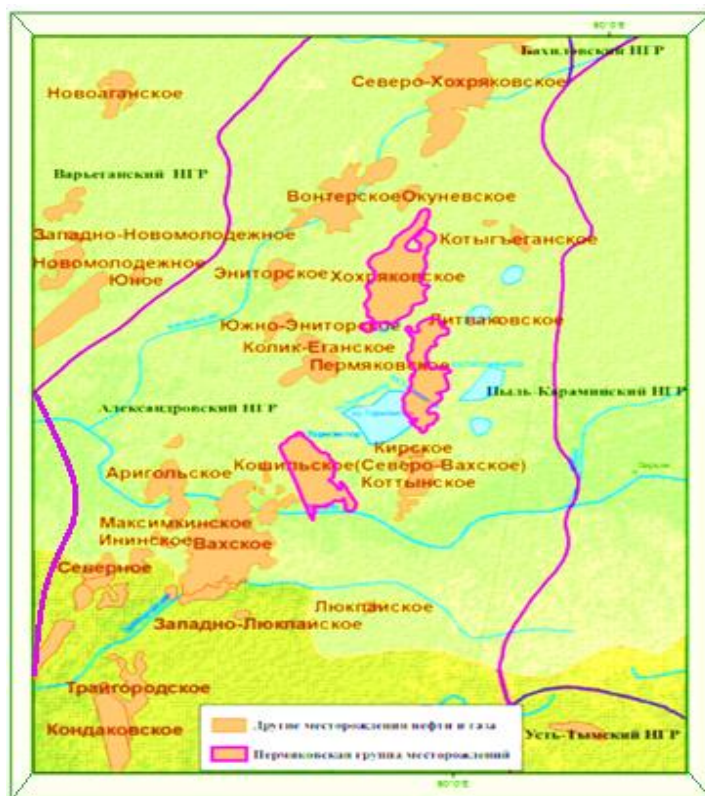


Рис. 1. Пермская группа месторождений. Александровский нефтегазоносный район.

Основными эксплуатационными объектами являются пласты ЮВ₁, ЮВ₂, ЮВ₃ васюганской свиты и пласт ЮВ₂ тюменской свиты. В 1985 году Хохряковское месторождение было введено в эксплуатацию. Падение пластового давления, и, как следствие, снижение дебитов у добывающих скважин является одной из самых основных проблем разработки этого месторождения. Из приведенных на рисунке данных видно, что гидродинамическая связь в пласте недостаточная, что видно на эпюре давлений (Рис. 2) [6].

Отложения нефти и газа – ЮВ наглядно демонстрируют нам, что снижение пластового давления оказывает плохое воздействие на фильтрационно-емкостные характеристики продуктивных пластов. В этих случаях породы подвергаются пластической деформации, которая носит необратимый характер. Проведенные исследования демонстрируют, что изменение фильтрационно-емкостных свойств пластов Хохряковского месторождения

в зависимости от напряжения на горную породу, говорят о том, что уменьшение проницаемости при понижении пластового давления может достигать 26-30% (Рис. 3) [7, 8].

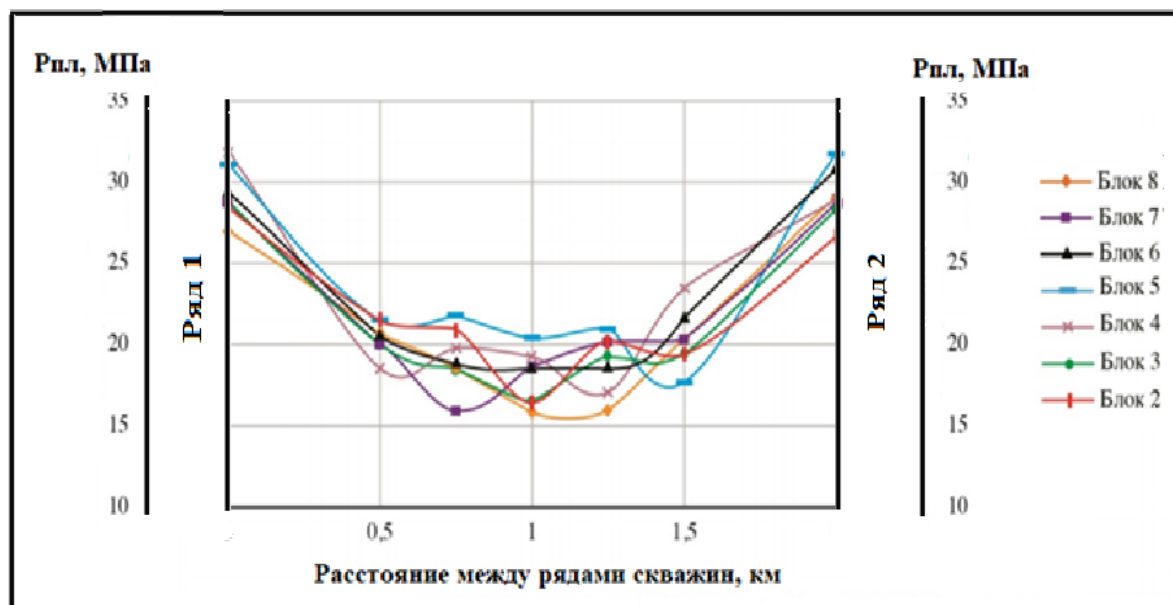


Рис. 2. Изменение пластового давления между рядами скважин. Блок 2-8.

Хохряковское месторождение, объект ЮВ₁.

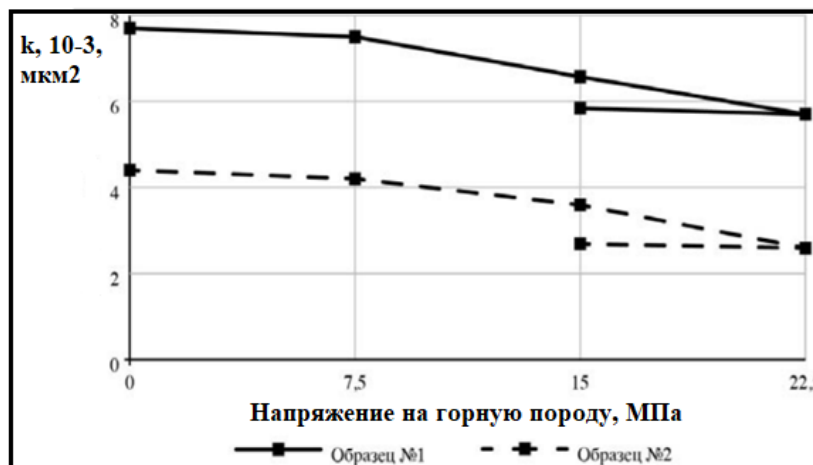


Рис. 3. Связь между проницаемостью и напряжением на горную породу.

Корреляционная зависимость. Хохряковское месторождение, пласт ЮВ₁.

Специалисты СургутНИПИнефть также проводили некоторые исследования, в ходе которых были получены похожие результаты и сделан аналогичный вывод. В этих экспериментах участвовало более 220 образцов песчаных и песчано-алевритовых пород при различных значениях давления

всестороннего сжатия (от 5 до 20 МПа) и времени непрерывного нагружения (от 20 до 4300 ч), при этом относительное снижение проницаемости призабойной зоны скважины от пластической деформации коллектора в этих опытах равно 20 % (Рис. 4) [8].

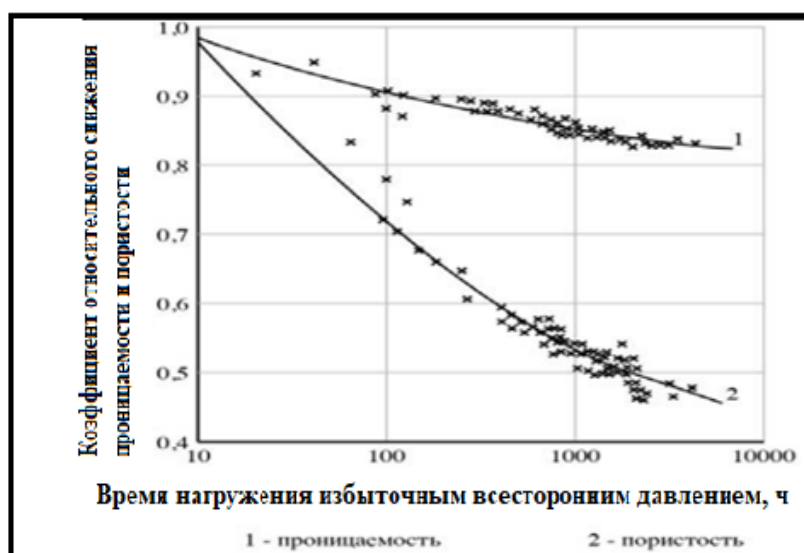


Рис. 4. Связь между снижением проницаемости и пористости во времени образцов пород при их перегрузке давлением 10 Мпа. Самотлорское и Федоровское месторождения.

Исходя из рис. 3, при изменении напряжения на горную породу от 0 до 7,5 МПа для образца №1 значение проницаемости изменяется от $8 \cdot 10^{-3}$ до $7,7 \cdot 10^{-3}$ мкм², для образца №2 значение проницаемости изменяется от $4,3 \cdot 10^{-3}$ до $4 \cdot 10^{-3}$ мкм². При дальнейшем уменьшении напряжении с 22,5 МПа до 15 МПа проницаемость не восстанавливается до первоначального значения.

При анализе рис. 4 заметно, что за 1000 часов, коэффициент относительного снижения проницаемости уменьшается от 1 до 0,85, а коэффициент относительного снижения пористости уменьшается от 1 до 0,55.

Одни и те же исследования на керне в разное время были проведены по коллекторам ачимовской пачки Уренгойского и тюменской свиты Талинского месторождений, характеризующихся сходными значениями коллекторских свойств к залежам Хохряковского месторождения. У коллекторов с

пористостью 14-15 %, слагающих юрские отложения Западной Сибири, наблюдается максимальный уровень пластической деформации. По этим коллекторам относительное снижение коэффициента проницаемости предполагается в пределах 32-62 %.

В результате проведения данного опыта, можно сделать вывод, что деформация коллектора значительно уменьшает значения пористости и проницаемости пород, что приводит к значительному ухудшению фильтрационно-емкостных характеристик коллектора. Таким образом, при формировании и построении системы разработки нужно учитывать факторы, которое очень часто проявляются в динамических условиях (т.е. упругие свойства породы). Условно говоря, порода формально остается коллектором, но может перестать отдавать нефть при разработке, собственно, что понижает не только продуктивные характеристики пластов, но и сокращает конечную добычу нефти [8].

Опыты с керном

В другом эксперименте описывается опыт, в котором воспроизводят процесс разработки нефтяного месторождения, путем снижения пластового давления при отборе флюидов. Для этого используют кернадержатель. В него помещают образец керна (Рис. 5), в котором создаются все необходимые условия, отображающие условия пласта: давление всестороннего сжатия, поровое давление, пластовая температура. Далее постепенно изменяют давление, т.е. варьируют значениями эффективного давления и определяют пористость и проницаемость.

В результате данного опыта было установлено, что с увеличением эффективного давления от 0 МПа до 37 МПа у всех образцов значение пористости уменьшается на 2,5-10 %, а проницаемость до 90 % (Рис 6, 7). Плюсом отмечается, чем больше порода содержит глинистую составляющую в своем составе, тем значительнее воздействие Рэф (Рис. 8) [9].

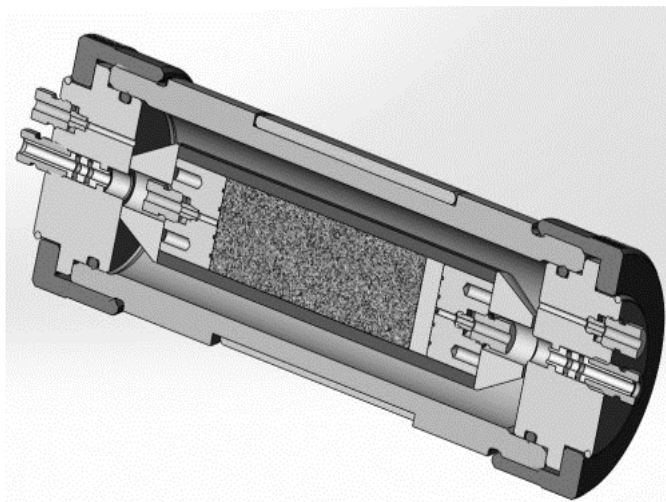


Рис. 5. Целик керна в кернодержателе.

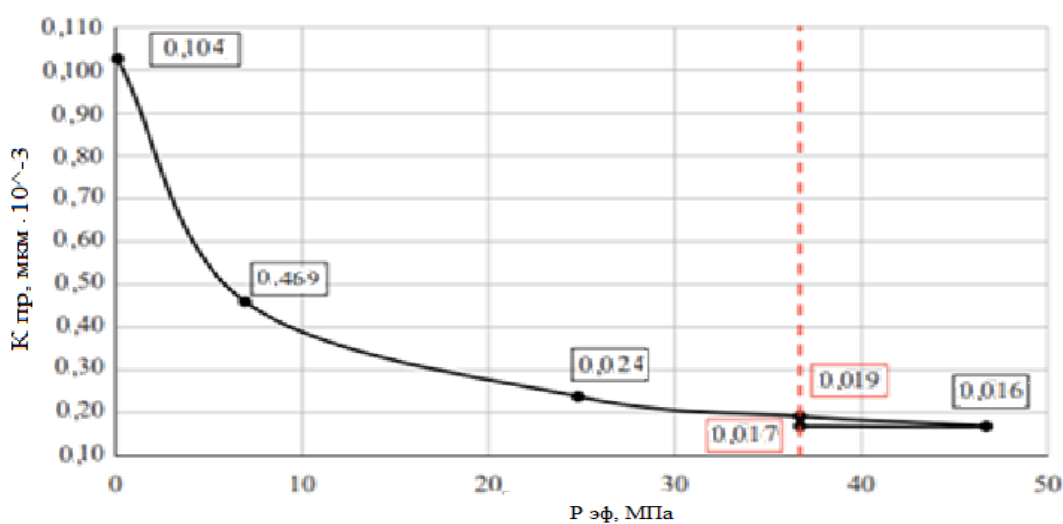


Рис. 6. Зависимость проницаемости от эффективного давления.
Песчаник мелкозернистый.

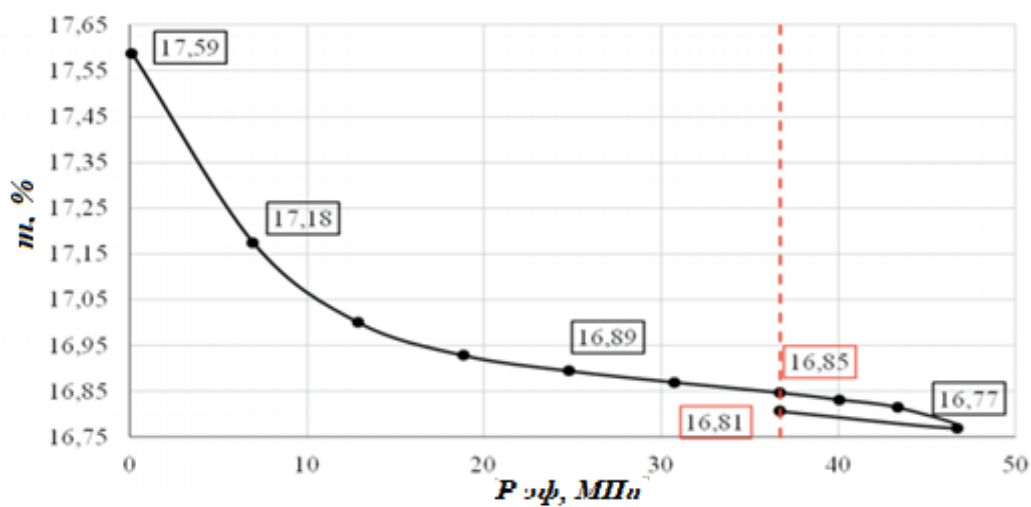


Рис. 7. Зависимость пористости от эффективного давления.
Песчаник мелкозернистый.



Рис. 8. Зависимость изменения проницаемости от глинистости.

По существу, изменение проницаемости при понижении пластового давления связано с ростом сил, передаваемых скелету породы от веса вышележащих слоев породы и изменением структуры скелета, которое происходит при попадании зерен в поровое пространство.

Также заметно, что при постепенном повышении эффективного давления, а затем при его снижении, пористость и проницаемости не достигают своей первоначальной величины, т.е. происходит ухудшение их значений.

Так при испытании образца керна для значения эффективного давления 10 МПа коэффициент проницаемости равен $0,0408 \cdot 10^{-3}$ мкм², а при давлении 30 МПа проницаемость равна $0,029 \cdot 10^{-3}$ мкм². При уменьшении эффективного давления с 47 МПа до 40 МПа коэффициент проницаемости не восстанавливается до изначального значения.

Так при испытании образца керна для значения эффективного давления 10 МПа значение пористости равно 17,05 %, а при давлении 15 МПа пористость равна 16,95 %. При уменьшении эффективного давления с 47 МПа до 40 МПа пористость восстанавливается незначительно с 16,75 до 16,85 %.

Для образца керна при значении глинистости 13 %, изменение проницаемости при возрастании эффективного давления равно 74 %, при значении глинистости 25 %, изменение проницаемости при возрастании эффективного давления равно 85 %.

Таким образом, породы продуктивного пласта, чаще всего это призабойная около скважинная зона, при отборе из них жидкости или газа испытывают постоянные возрастающие во времени нагрузки. Деформации, возникающие в результате сжимающих усилий, носят полностью необратимый характер и отрицательно сказываются на коллекторских свойствах горной породы, что в результате приводит к снижению добычи как по отдельным скважинам, так и в целом по залежи и всему месторождению. Данные выводы были подтверждены на примерах Губкинского, Хоряковского и других месторождений, а также, в частности, на пластах Ю₁₋₁ – ЮВ₆. Данные исследования показывают, что деформацию коллектора необходимо активно изучать и искать способы ее снижения. Особенно, данная проблема актуальна для месторождений Западной Сибири, где добывают 70 % российской нефти.

Список литературы

1. Аноп А.А., Щемелин Ю.А. Упругие характеристики коллекторов Крапивинского месторождения Томской области. Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т.318, №1. – С. 106-108.
2. Макаренков Е.С. Повышение эффективности разработки тульской залежи Альняшского нефтяного месторождения. Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. - 2019. Т. 1. С. 172-174.
3. Карев В.И., Химуля В.В. Влияние напряженно-деформированного состояния на фильтрационные характеристики пород-коллекторов нефтегазовых месторождений. Ученые записки физического факультета московского университета. – 2018. - №4.
4. Жуков В.С. Основные причины изменения комплекса физических свойств коллекторов при разработке месторождений углеводородов. Вести газовой науки. – 2014. №4. – С.174-183.
5. Агзамов А.А. Оценка степени снижения коэффициента продуктивности скважин вследствие деформации коллектора. Нефтепромысловое дело.-2011. -№4. – С.13-17.
6. Шпуров И.В. Научно-методическое обоснование эффективной разработки трудноизвлекаемых запасов нефти юрских отложений Западной Сибири на основе детального геолого-технологического моделирования: дис. на соискание ученой степени доктора технич. наук.- Т., 2015. – с. 18-22.
7. Карманский Д.А., Петраков Д.Г. Лабораторное моделирование изменения механических и фильтрационных свойств пород коллекторов на различных этапах разработки месторождений нефти. Вестник ПНИПУ. – 2020. – Т.20, №1. – С. 49-59.
8. Костерин А. В., Скворцов Э. В. Напряженно-деформированное состояние горных пород и фильтрация в неоднородных пластах. Вычислительные технологии. – 1999. – Т.4, №2. – С. 42-50.

9. Григорьев Б.В., Шубин А.А. Влияние изменения эффективного давления на фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов. Вестник Тюменского государственного университета. – 2015. – Т.1, №2. – С. 15-21.

References

1. Anop A.A., Schemelin Yu.A. *Uprugie kharakteristiki kollektorov Krapivinskogo mestorozhdeniya Tomskoy oblasti* [Elastic reservoir characteristics of Krapivinskoye field in the Tomsk Region]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2011, Vol. 318, No.1, pp. 106-108. (in Russian)
2. Makarenkov E.S. *Povyshenie effektivnosti razrabotki tulskoy zalezhi Alnyashskogo nefryanogo mestorozhdeniya*. [Improvements in development efficiency of the Tulsian reservoir of Alnyashskoye oil field]. Proceedings of the Conference Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh [Topical issues related to development of hydrocarbon and ore mineral deposits], 2019. Vol. 1, pp. 172-174. (in Russian)
3. Karev V.I., Khimulya V.V. *Vliyanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya na filtratsionnye kharakteristiki porod-kollektorov neftegazovykh mestorozhdeniy* [Effects of stress-strain state on fluid flow characteristics of reservoir rocks of oil and gas fields]. Moscow University Physics Bulletin, 2018, No. 4. (in Russian)
4. Zhukov V.S. *Osnovnye prichiny izmeneniya kompleksa fizicheskikh svoystv kollektorov pri razrabotke mestorozhdeniy uglevodorodov* [Main causes of changes in physical reservoir properties in the course of development of oil and gas fields]. Vesti gazovoy nauki, 2014, No.4, pp.174-183. (in Russian)
5. Agzamov A.A. *Otsenka stepeni snizheniya koeffitsienta produktivnosti skvazhin vsledstvie deformatsii kollektora* [Evaluation of the extent of reduction in well productivity index due to reservoir rock deformation]. Neftepromyslovoye delo, 2011, No.4, pp.13-17. (in Russian)
6. Shpurov I.V. *Nauchno-metodicheskoe obosnovanie effektivnoy razrabotki trudnoizvlekaemykh zapasov nefti yurskikh otlozheniy Zapadnoy Sibiri na osnove detalnogo geologo-tekhnologicheskogo modelirovaniya* [Scientific substantiation of efficient development of hard-to-recover Jurassic oil reserves of Western Siberia based on detailed geological and reservoir simulation modeling]. Extended abstract of Dr.Sc. thesis, 2015, pp. 18-22. (in Russian)
7. Karmansky D.A., Petrakov D.G. *Laboratornoye modelirovanie izmeneniya mekhanicheskikh i filtratsionnykh svoystv porod kollektorov na razlichnykh etapakh razrabotki mestorozhdeniy nefti* [Laboratory modeling of the changes in mechanical and fluid flow properties of reservoir rocks at different stages of oil field development]. Bulletin of Perm University, 2020, Vol.20, No.1, pp. 49-59. (in Russian)
8. Kosterin A.V., Skvortsov E.V. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie gornykh porod i filtratsiya v neodnorodnykh plastakh* [Stress-strain state of rocks and fluid flow in heterogeneous reservoirs]. Vychislitelnye tekhnologii, 1999, Vol. 4, No.2, pp. 42-50. (in Russian)
9. Grigorev B.V., Shubin A.A. *Vliyanie izmeneniya effektivnogo davleniya na filtratsionno-emkostnye svoystva porod-kollektorov* [Effects of changes in net overburden pressure on reservoir quality]. Bulletin of Tyumen State University, 2015, Vol.1, No.2, pp. 15-21. (in Russian)

Сведения об авторах

Макаренков Евгений Сергеевич, магистр, Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29
E-mail: 124makarenkove@mail.ru

Authors

E.S. Makarenkov, master, Perm national research polytechnic university
29, Komsomolsky Prospekt, Perm, 614990, Russian Federation
E-mail: 124makarenkove@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 21.07.2020;
Принята к публикации 23.09.2020;
Опубликована 30.09.2020*