

УДК 550.8.05:553.98

Динамика физических свойств коллекторов при разработке месторождений нефти и газа

В.С. Жуков^{1*}, Е.О. Семёнов¹, Ю.О. Кузьмин²

¹ ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, с.п. Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Российская Федерация, 123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1

* E-mail: V_Zhukov@vniigaz.gazprom.ru

Ключевые слова: петрофизика, разработка месторождений, пластовые условия, современная геодинамика, напряженное состояние.

Тезисы. При разработке месторождений происходят значительные изменения гидродинамического режима и напряженно-деформированного состояния, что влияет на физико-механические свойства горных пород, которые определяют эксплуатационные характеристики пластов-коллекторов. Дополнительные воздействия изменяют состояние горных пород и могут вызывать как уплотнение, так и разуплотнение коллекторов и покрышек, что необходимо учитывать при выборе оптимальных способов воздействия на пласт, таких как законтурное заводнение и гидроразрыв. С изменениями напряженно-деформационного состояния пласта в процессе разработки связаны и такие явления, как обширные просадки земной поверхности, техногенные землетрясения на нефтегазовых месторождениях, подвижки по разломам, прогнозирование которых является актуальной задачей.

Петрофизика определяет физические свойства образцов горных пород в нормальных (атмосферных) условиях и в условиях, моделирующих пластовые. Вариации физических свойств образцов одной и той же горной породы петрофизика обычно объясняет изменениями их общего минерального и химического состава и структурно-текстурными особенностями. В то же время структурные изменения в горных породах возникают и при силовом воздействии (снижении пластового давления), что является предметом исследований динамической петрофизики.

Кроме изменения давления пластового флюида к характерным процессам, сопровождающим разработку месторождений, относятся изменение температуры при интенсификации добычи и обводнение пласта. Изменения физических свойств в основном исследуют путем определения физических свойств (фильтрационно-емкостных, упругих, электрических, деформационно-прочностных) в стандартных (атмосферных) условиях и при физическом моделировании пластовых условий и процессов. Показано, что снижение пластового давления на 10 МПа может изменить значения различных петрофизических параметров от 0,1 (плотность породы) до 80 % (удельное электрическое сопротивление), что необходимо учитывать в проектах разработки месторождений и при интерпретации повторных или мониторинговых геофизических исследований скважин.

Развиваются новые направления исследования физических свойств: определение трещинной пористости горных пород; оценка влияния трещинной пустотности на физические свойства горных пород; оценка изменений физических свойств коллекторов при моделировании процесса разработки месторождений углеводородов со снижением пластового давления; моделирование условий разрушения призабойной зоны скважин в процессе снижения пластового давления; определение водонасыщенности и трещиноватости коллекторов по затуханию амплитуды упругих волн.

При разработке месторождений существенно меняются гидродинамический режим и напряженно-деформированное состояние горных пород, что влияет на их физико-механические свойства, определяющие эксплуатационные характеристики пластов-коллекторов. Любые дополнительные воздействия на геологическую среду приводят к изменениям состояния горных пород, которые могут сопровождаться как уплотнением, так и разуплотнением коллекторов и покрышек, что обязательно следует учитывать при выборе оптимальных условий воздействия. Знание этих изменений особенно необходимо в случае применения таких методов интенсификации, как законтурное заводнение и гидроразрыв пласта. С изменениями напряженно-деформационного состояния в процессе разработки связаны и такие явления, как обширные просадки земной поверхности и техногенные землетрясения на нефтегазовых месторождениях, подвижки по разломам, прогнозирование которых также является немаловажной задачей.

В процессе добычи нефти и газа зачастую отмечается снижение пластового давления не только в продуктивных пластах, но и в подстилающих их водоносных пластах. Обычно исследуют только процессы, происходящие в продуктивной части пласта при снижении пластового давления [1–17], поэтому основные факторы, влияющие на изменения физических свойств горных пород при разработке месторождений углеводородов (УВ) [18], недостаточно полно рассмотрены и проанализированы.

Физические свойства горных пород, т.е. присущие им характерные качества – пористость, плотность, упругость, электропроводность, проницаемость, радиоактивность и др., являются предметом исследований петрофизики. Обычно петрофизика занимается определением физических свойств образцов горных пород, находящихся в нормальных (комнатных) условиях. Однако для интерпретации геофизических данных при исследовании коллекторов месторождений УВ физические свойства горных пород изучаются в условиях, моделирующих пластовые (всестороннее и поровое давление, температура).

Вариации физических свойств образцов одной и той же горной породы петрофизика обычно объясняет изменениями их общего минерального и химического состава и структурно-текстурными особенностями. В то же время структурные изменения в горных породах могут возникать и при силовом воздействии на них. В этом заключается одна из основных предпосылок возникновения динамической петрофизики как раздела общей петрофизики.

Предметом исследований динамической петрофизики служат физические свойства горных пород и модельных материалов, а объектом исследований являются процессы их изменения во времени и пространстве. Применительно к разработке месторождений это процессы длительностью до нескольких десятков лет и с пространственным масштабом в десятки километров, а в лабораторных условиях процесс реализуется в течение нескольких минут или часов на образцах характерным размером в несколько сантиметров.

Изменения физических свойств образцов горных пород во времени зависят от характера силового воздействия на них. Основным методом изучения влияния силового воздействия является физическое моделирование имеющегося силового воздействия на пласт, включая

моделирование всестороннего и порового давления, температуры, осевого сжатия, фильтрации флюидов.

Корпоративный центр исследования пластовых систем (керна и флюиды) ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в основном развивает такое направление динамической петрофизики, как исследование изменений физических свойств горных пород при техногенных воздействиях. Сюда относятся исследования динамики физических свойств коллекторов при разработке месторождений нефти и газа, включая и методы повышения их фильтрационно-емкостных свойств (ФЕЭС).

Основные причины изменения физических свойств коллекторов при разработке месторождений УВ. При разработке месторождений газа, как правило, происходит снижение пластового давления, и так как горное давление вышележащих пород остается без изменений, то растет эффективное давление, и ту часть нагрузки, которую принимал флюид, содержащийся в порах горных пород, будет воспринимать уже скелет породы, ее твердая матрица. В результате снижаются пористость и проницаемость пласта, могут деформироваться обсадные колонны. Характерны также изменение температуры при интенсификации добычи (закатке вытесняющих жидкостей и др.) и обводнение пласта-коллектора, существенно меняющее его физические свойства и провоцирующее вытеснение нефти. Изменения температуры коллектора в прискважинной зоне, приводящие к повышению пластичности горных пород и снижению вязкости флюидов, могут быть вызваны либо дроссельным эффектом при резком снижении пластового давления, либо термическим воздействием на пласт для увеличения его углеводородоотдачи.

Каждый из факторов изменения физических свойств горных пород необходимо учитывать при подготовке проектов разработки месторождений УВ. Применяемые в настоящее время методы геофизических исследований скважин (ГИС) не позволяют напрямую изучать весь комплекс процессов (включая деформационные), происходящих в пласте при разработке месторождений. Поэтому остается актуальным физическое моделирование этих процессов в лабораторных условиях.

К основным методам исследования изменений физических свойств относятся:

1) определение широкого комплекса физических свойств в стандартных (атмосферных)

условиях. Без этих массовых определений невозможно достоверно и надежно оценить состав и свойства пласта по всему разрезу и площади распространения;

2) экспериментальное определение физических свойств горных пород в условиях, моделирующих пластовые. Имеет большое значение как для подсчета запасов и интерпретации данных ГИС, так и для подготовки проектов разработки месторождений УВ. Исследование процессов изменения физических свойств при создании контролируемых термобарических условий позволяет не только достоверно определять их, но и оценить динамику их изменений в зависимости от того или иного термобарического состояния (значений всестороннего, порового давлений, температуры). Возможно прямое моделирование процесса разработки месторождения со снижением пластового давления и получение надежных зависимостей изменений физических свойств от эффективного давления.

Практикуют два подхода к моделированию процесса разработки месторождения со снижением пластового давления: снижение пластового давления и повышение всестороннего давления; в обоих случаях происходит рост эффективного давления.

Под эффективным давлением $P_{эф}$ понимается разница между геостатическим, или всесторонним, давлением ($P_{вс}$) и поровым (пластовым) давлением ($P_{пл}$):

$$P_{эф} = P_{вс} - nP_{пл}, \quad (1)$$

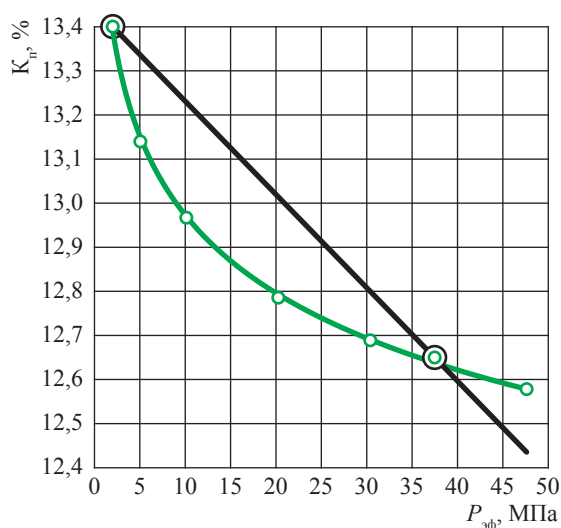
где n – коэффициент, зависящий от свойств скелета породы и слагающих ее минералов (обычно $n = 1$);

3) определение деформационно-прочностных свойств (прочности, статических упругих модулей, пластичности, изменения деформации во времени при постоянной нагрузке) в атмосферных условиях и при моделировании пластовых условий. Помогает прогнозировать изменение прочности коллектора и его разрушение (пескообразование, гидроразрыв, «георыхление»). Необходимо определять зависимости деформационно-прочностных и упругих свойств от вида напряженного состояния: одноосного сжатия / растяжения; осевого сжатия при радиальном обжатии цилиндрических образцов; трехосного неравномерного сжатия.

Оценка изменений ФЕС и физических свойств коллекторов при моделировании процесса разработки месторождений УВ

Процесс разработки месторождения (на примере Тас-Юряхского нефтегазоконденсатного) моделировался путем увеличения $P_{эф}$ с начального значения до значения, наблюдающегося после снижения $P_{пл}$ на 10,0 МПа. Для каждого физического свойства по ядерным данным построены зависимости от $P_{эф}$, затем из массива полученных значений выделялись максимальные и минимальные и рассчитывались средние. Это показано на рис. 1, 2 на примере коэффициента пористости (K_n).

Также для средних значений исследуемых физических свойств рассчитаны зависимости от изменения $P_{эф}$ и оценены относительные изменения (таблица, рис. 3). Принципы построения всех графиков аналогичны, однако зависимости для каждого физического свойства уникальны. Максимальный рост отмечается у электрических параметров – удельного электрического сопротивления ($УЭС$) и параметра пористости, а максимальное снижение – для сжимаемости порового пространства. Минимальные изменения наблюдались для объемного веса и K_n .



Аппроксимация:

$$y = -0,0212x + 13,443; R^2 = 1;$$

в абсолютном выражении $\Delta K_n = 0,203 \%$;

в относительном выражении $\Delta K_n = 0,161 \%$

$$y = 13,579x^{-0,02}; R^2 = 0,9992;$$

в абсолютном выражении $\Delta K_n = 0,072 \%$;

в относительном выражении $\Delta K_n = 0,057 \%$

Рис. 1. Изменение коэффициента пористости (ΔK_n) с ростом $P_{эф}$:
 R – достоверность аппроксимации

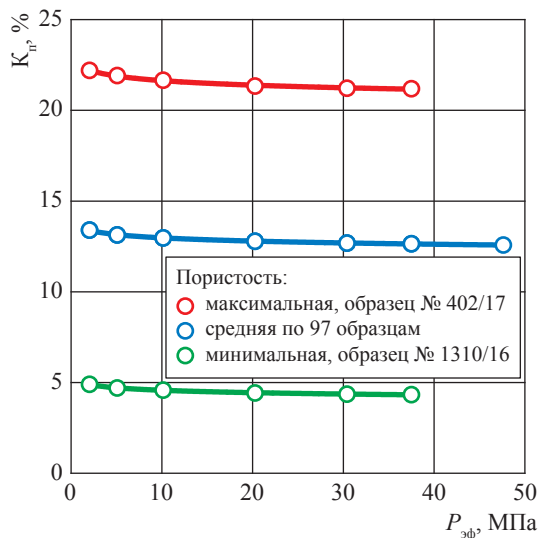


Рис. 2. Изменения максимального, минимального и среднего K_p при росте $P_{эф}$

Оценка геодинамических последствий разработки месторождений

Основные формы негативных геодинамических последствий длительной разработки месторождений УВ можно разделить на четыре группы [19, 20]: обширные просадки территории месторождения, техногенная сейсмичность, техногенно-индуцированная сейсмичность, а также активизация разломных зон, контролирующих месторождение (рис. 4).

Кроме явно заметных негативных последствий длительного освоения месторождений УВ (загрязнения нефтепродуктами гидросферы и почв, загрязнения атмосферы продуктами сгорания попутного газа, разрывов нефте-, газо- и продуктопроводов) в последнее время внимание ученых, промышленников, экологов стали привлекать геодинамические последствия

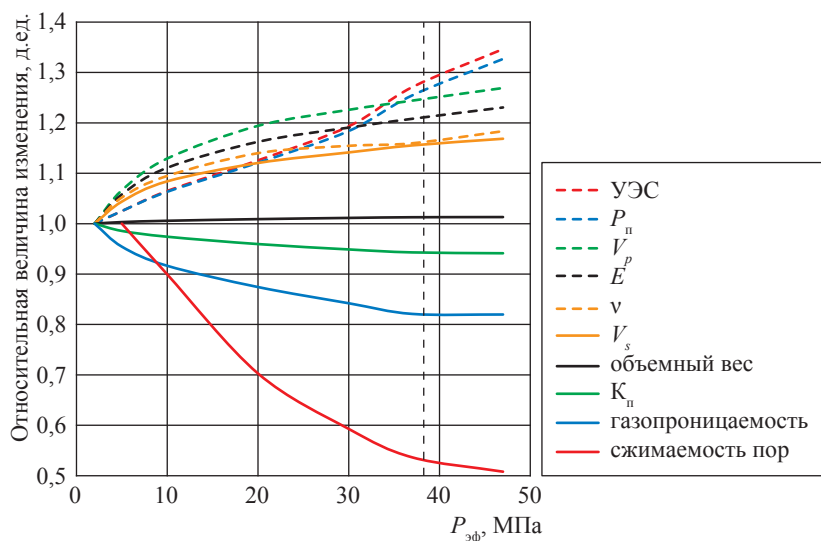


Рис. 3. Относительные изменения комплекса петрофизических параметров при росте $P_{эф}$

Абсолютные и относительные изменения комплекса петрофизических параметров при росте эффективного давления

Параметр	Падение (↓) / рост (↑)	Изменение в абсолютном выражении	Изменение в относительном выражении, %
K_n	↓	0,038 %	0,18
Объемная масса	↑	0,0017 г/м ³	0,083
Сжимаемость порового пространства	↓	8,27·10 ⁻⁶ 1/атм	5,3
УЭС	↑	0,128 Ом·м	5,93
Параметр пористости (P_n)	↑	1,053	5,754
Скорость продольной волны (V_p)	↑	0,070 км/с	2,02
Скорость поперечной волны (V_s)	↑	0,0205 км/с	1,143
Модуль Юнга (E)	↑	0,1826 ГПа	1,86
Коэффициент Пуассона (v)	↑	0,0066	2,064
Газопровицаемость	↓	0,24	0,14

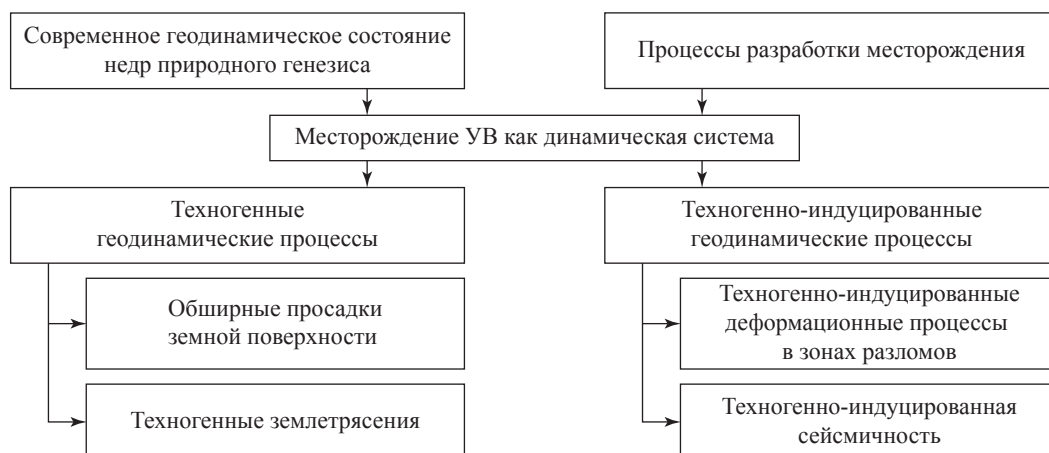


Рис. 4. Схема формирования аномальных сейсмических и деформационных последствий разработки месторождений УВ

освоения месторождений, такие как аномальные деформации (просадки) земной поверхности и проявление сейсмической активности в районах разрабатываемых месторождений УВ и подземных хранилищ газов (ПХГ) [19–26]. Хорошо известны случаи аномальных (более метра) деформаций (просадок) земной поверхности на длительно разрабатываемых нефтяных и газовых месторождениях в США, Венесуэле, на Северном море и в других регионах, которые связывают с добычей нефти и газа и снижением пластового давления.

Современная аномальная геодинамика недр – это деформационные и сейсмические процессы, которые формируются под воздействием суперпозиции природных и техногенных факторов и реализуются в наиболее аномальной форме в зонах разломов [19]. В последнее время стало очевидно, что современное аномальное геодинамическое состояние разломных зон возникает под воздействием малых природных и/или техногенных процессов. Оказалось, что современная аномальная геодинамика разломов относится к существенно нелинейным, индуцированным явлениям [19, 24, 25].

Взаимосвязь деформационных и сейсмических процессов можно представить как две стороны проявления современной геодинамики региона при разработке месторождений УВ. Тектоническая энергия выделяется либо в виде деформационных процессов при возможности перемещений по имеющимся нарушениям сплошности среды (разломам), либо в виде сейсмического процесса при отсутствии такой возможности [19, 20, 26].

Общеизвестно, что процессы разработки газовых и нефтяных месторождений и эксплуатации ПХГ сопровождаются и деформационными процессами. Наиболее привычны два сценария развития этих процессов. Первый: просадки земной поверхности отсутствуют. Скорее всего, это означает, что напряжения накапливаются в массиве прочных горных пород (как правило, карбонатных), слагающих объект. А после достижения определенного порога – это может быть либо предел длительной прочности, либо предел усталостной малоцикловой прочности какой-либо из пород разреза – произойдет разрядка накопленных напряжений в виде одного или нескольких землетрясений со всеми сопутствующими деформационными и социально-экономическими последствиями.

При втором сценарии деформационные процессы на поверхности имеют место (обычно в случае рыхлых терригенных коллекторов), и их амплитуда достаточно мала (первые десятки сантиметров) для того, чтобы вызвать существенные экологические последствия, связанные с изменением рельефа земной поверхности. В этом случае сохраняется негативное влияние концентрации напряжений вблизи скважин, приводящих время от времени к утечкам и прорывам газа за пределы обсадных колонн.

Также следует иметь в виду и возможную активизацию разломных зон на территории разрабатываемых месторождений, обусловленную изменениями напряженного состояния пластов-коллекторов и покрывающих их пластов. В этом случае выделение тектонической

энергии может пройти как в виде деформационных процессов (подвижек) зон разломов, так и в виде активизации сейсмической активности этих зон.

Новые направления исследований физических свойств коллекторов нефти и газа

Определение трещинной пористости горных пород. Как известно, пористость является одним из основных параметров нефтегазоносного пласта, который необходимо определить при подсчете запасов или при подготовке проекта разработки месторождения УВ. В частности, программы гидродинамического моделирования процессов разработки месторождений, такие как Eclipse, VIP Landmark и др., предусматривают наличие данных о трещинной пористости, представляя общую пористость как сумму двух компонент: межзерновой и трещинной пористости. Но зачастую основное внимание уделяется определению только межзерновой, или гранулярной, пористости, а другим видам пустотности (трещинной, кавернозной) уделяется мало внимания.

Свойства породы без пор, трещин и других неоднородностей зависят только от свойств составляющих ее минералов. Рассматривая изотропные или слабо анизотропные породы, сложенные определенным комплексом изотропных минералов с пространственно случайной ориентировкой зерен, можно рассчитать скорость упругой волны по формуле

$$V_{p, \text{расч}} = V_{p1} C_1 + V_{p2} C_2 + \dots + V_{pn} C_n, \quad (2)$$

где $V_{p1}, V_{p2}, \dots, V_{pn}$ – скорости продольных волн в породообразующих минералах 1, 2, ..., n, км/с; C_1, C_2, \dots, C_n – содержание соответствующего минерала в породе, д.ед.

В этом случае получим расчетное значение скорости продольной волны в горной породе, сложенной породообразующими минералами без нарушений сплошности, т.е. без пор и трещин. Процентное отношение измеренных на образцах горных пород значений скоростей продольных волн ($V_{p, \text{изм}}$) к расчетным, называемое добротностью горной породы Q [27], будет характеризовать интегральное воздействие пор и трещин на породу:

$$Q = 100 (V_{p, \text{изм}} / V_{p, \text{расч}}). \quad (3)$$

В горной породе поры и трещины вместе создают общую пористость:

$$K_{п.о} = K_{п.мз} + K_{п.тр}, \quad (4)$$

где $K_{п.о}$ – коэффициент общей открытой пористости; $K_{п.мз}$ – коэффициент межзерновой пористости; $K_{п.тр}$ – коэффициент трещинной пустотности (пористости).

Ряд исследователей [27–30] получили зависимость добротности от пористости и трещинной пустотности в виде:

$$Q = 100 - 1,6K_{п.мз}, \quad (5)$$

$$Q = 100 - 22K_{п.тр}. \quad (6)$$

Влияние наличия пор и трещин на скорости распространения упругих волн различно. Для каждого конкретного образца или горных пород одного типа в первом приближении нужно знать, какая доля общей пористости $K_{п.о}$ приходится на поры ($K_{п.мз}$), а какая на трещины ($K_{п.тр}$). Использование понятия добротности и значений пористости горных пород позволяет проводить такое разделение [27].

С учетом предположения одновременно наличия пор и трещин в породе и уравнения (3) можно получить зависимость добротности от общей пористости в виде, аналогичном тому, который приведен К. Туранком и др. [27]:

$$Q = 100 - 1,6K_{п.мз} - 22K_{п.тр}. \quad (7)$$

В повседневной практике точный минералогический состав горных пород зачастую неизвестен, так как его обычно определяют только для ограниченного числа образцов и на небольшом объеме материала этих образцов. Но фактические данные о скорости распространения упругих волн в образцах, имеющих достаточно широкий диапазон пористости, позволяют аналитически определить скорость продольной волны в образцах с нулевой пористостью – так называемую скорость продольной волны в минеральном скелете (рис. 5).

Подставляя в формулу (3) вместо $V_{p, \text{расч}}$ для основных породообразующих минералов значение скорости продольной волны в скелете горной породы, определенное при давлениях, действующих в пласте, получим оценку значения Q , наиболее близко отвечающую смыслу этого параметра (рис. 6) [31].

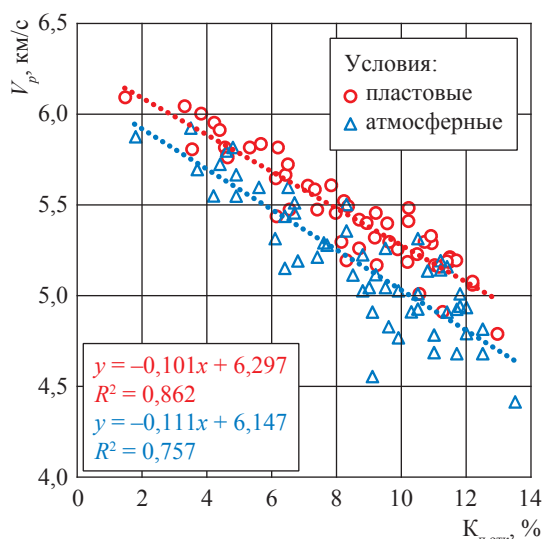


Рис. 5. Зависимость скорости продольных волн от коэффициента общей пористости

Влияние трещинной пустотности на физические свойства горных пород. Физической основой применения методов электрического каротажа для определения K_n гранулярных коллекторов является зависимость параметра пористости породы, насыщенной электропроводящим флюидом, от K_n и структуры порового пространства¹.

Существуют несколько подходов к определению УЭС и P_n пород с двойной пористостью. Так, приводится уравнение, связывающее параметр пористости P_n породы, имеющей двойную пористость, с ее суммарной (общей) пористостью $K_{п.о}$ [32, 33]. При этом предполагается, что порода содержит две параллельные системы (межзерновые поры и трещины), проводящие электрический ток,

$$P_n = \frac{\left(\frac{\rho_w \rho_0}{v K_{п.о} \rho_0 + \rho_w (1 - v)} \right)}{\rho_w}, \quad (8)$$

где ρ_0 – УЭС породы, Ом·м; ρ_w – УЭС электропроводящего раствора, заполняющего поровое пространство, Ом·м; $v = K_{п.тр} / K_{п.о}$, д.ед.

При отсутствии трещин $v = 0$ и уравнение (8) преобразуется к обычному виду:

$$P_n = \rho_0 / \rho_w. \quad (9)$$

¹ См. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом / под ред. В.И. Петерилье, В.И. Пороскуна, Г.Г. Яценко. – М.: ВНИГНИ; Тверь: Тверьгеофизика, 2003. – 259 с.

В случае чисто трещинных коллекторов, когда отсутствует межзерновая (гранулярная) пористость, $v = 1$ и уравнение (8) приобретает вид:

$$P_n = 1 / K_{п.тр}. \quad (10)$$

С учетом полученных значений общей и трещинной пористости для исследованной коллекции горных пород параметры пористости рассчитаны по Р. Агилере (см. формулу (8) [33]) и по фактическим данным, полученным при моделировании пластовых условий (рис. 7):

$$P_n = 1,14 K_{п.о}^{-1,83} \text{ – по Агилера;} \quad (11)$$

$$P_n = 1,37 K_{п.о}^{-1,72} \text{ – по фактическим данным 37 образцов;} \quad (12)$$

$$P_n = 1,00 K_{п.о}^{-2,36} \text{ – для межзерновой пористости;} \quad (13)$$

$$P_n = 1,00 K_{п.о}^{-1,00} \text{ – для трещинной пористости 1-го типа;} \quad (14)$$

$$P_n = 3118,13 K_{п.о}^{-0,64} \text{ – для фактической трещинной пористости.} \quad (15)$$

Сопоставление расчетных и фактических значений P_n (см. рис. 7) показало их хорошую сходимость.

На рис. 7 приведены и зависимость (10), и полученные расчетным путем значения P_n (см. формулы (13), (14)). Сопоставление P_n для трещин 1-го типа (трещины открыты и взаимосвязаны, см. формулу (14)) и рассчитанного авторами (см. формулу (15)) говорит о том, что выявленная авторами трещинная пористость весьма далека от предельного случая взаимосвязанных трещин. Параметр трещинной пористости при этом не имеет явно выраженной и надежной статической зависимости от $K_{п.тр}$.

Оценка изменений физических свойств коллекторов при моделировании процесса разработки месторождений УВ со снижением пластового давления. Наиболее интересной представляется разработка подхода к прогнозированию изменения структуры порового пространства – изменения $K_{п.мз}$ и $K_{п.тр}$ – с увеличением $P_{эф}$. Обусловлено это практически потребностями учета таких изменений,

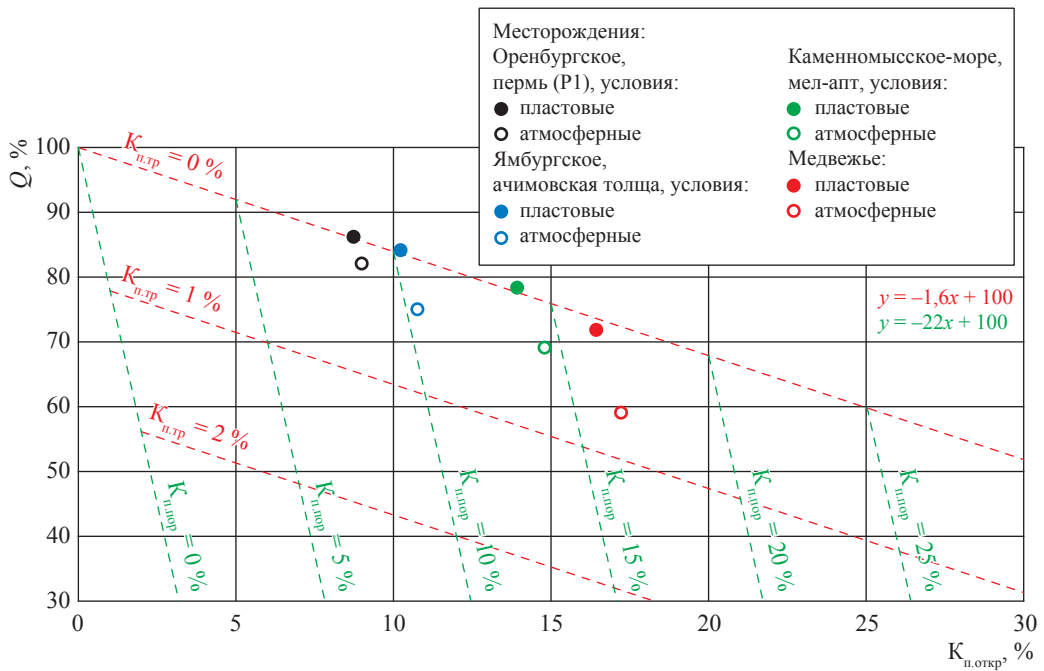


Рис. 6. Средние значения Q в зависимости от среднего значения $K_{p,о}$ по ряду месторождений Западной Сибири

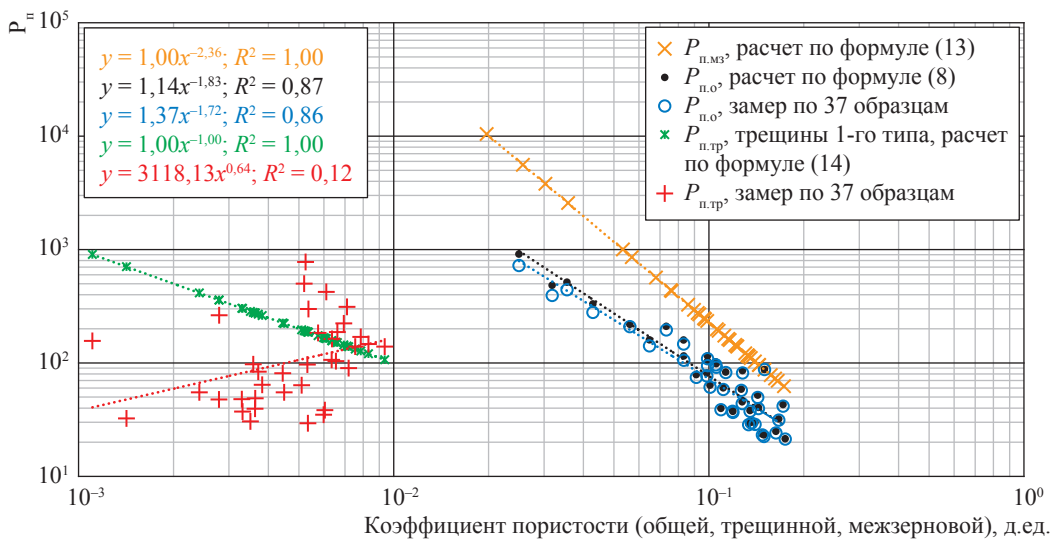


Рис. 7. Зависимость параметра пористости от пористости образцов горных пород с двойной пористостью

сопровождающих процессы разработки истощенных месторождений УВ или при снижении пластового давления.

Исследованы образцы коллектора талахского горизонта вендского возраста Восточной Сибири, представленные песчаниками мелко-, средне-, крупнозернистыми, слоистыми, с $K_{п.о} = 4,5...12,1$ % в атмосферных условиях и газопроницаемостью от 1,6 до 19,1 мД. Изменения структуры порового пространства этих образцов при переходе от атмосферных

условий к пластовым можно представить в виде зависимости добротности от пористости (рис. 8) [34, 35].

Результаты исследований пяти образцов талахского горизонта показали (см. рис. 9), что угловой коэффициент линейной функции изменения пористости образца № 551 равен $-21,68$ и наиболее близок к угловому коэффициенту функции изменения трещинной пористости ($-22,0$). Очевидно, что наибольшие изменения трещинной пористости происходили

в образце № 551. Также видно, что наименьшие изменения трещинной пористости отмечены в образце № 582, для которого угловой коэффициент линейной зависимости добротности от пористости составляет $-7,69$. В случае изменения только межзерновой пористости угловой коэффициент был бы равен $-1,6$. Гистограммы, построенные для каждого их образцов, отражают изменение пористости каждого из них и вклад в это изменение каждого из видов пористости (межзерновой и трещинной).

Аналогичные исследования при моделировании роста $P_{эф}$ выполнены и на образцах горных пород дагинского горизонта [35]. По данным о пористости и V_p определены значения

$K_{п.мз}$ и $K_{п.тр}$ в атмосферных условиях и в условиях, моделирующих пластовые. Представленное на рис. 9 распределение показывает, что в атмосферных условиях $K_{п.мз}$ образцов варьирует от 2,8 до 28 % (в среднем 21,5 %), $K_{п.тр}$ – от 0,145 до 1,067 % (в среднем 0,752 %). В условиях, моделирующих пластовые, диапазоны распределения и той, и другой компоненты пористости смещаются в сторону уменьшения.

Так, среднее значение $K_{п.мз}$ в пластовых условиях составило 20,7 %, т.е. уменьшилось на 0,78 % в абсолютном выражении или на 3,63 % относительно аналогичного значения в атмосферных условиях. В пластовых условиях $K_{п.тр}$ в среднем составил 0,26 %,

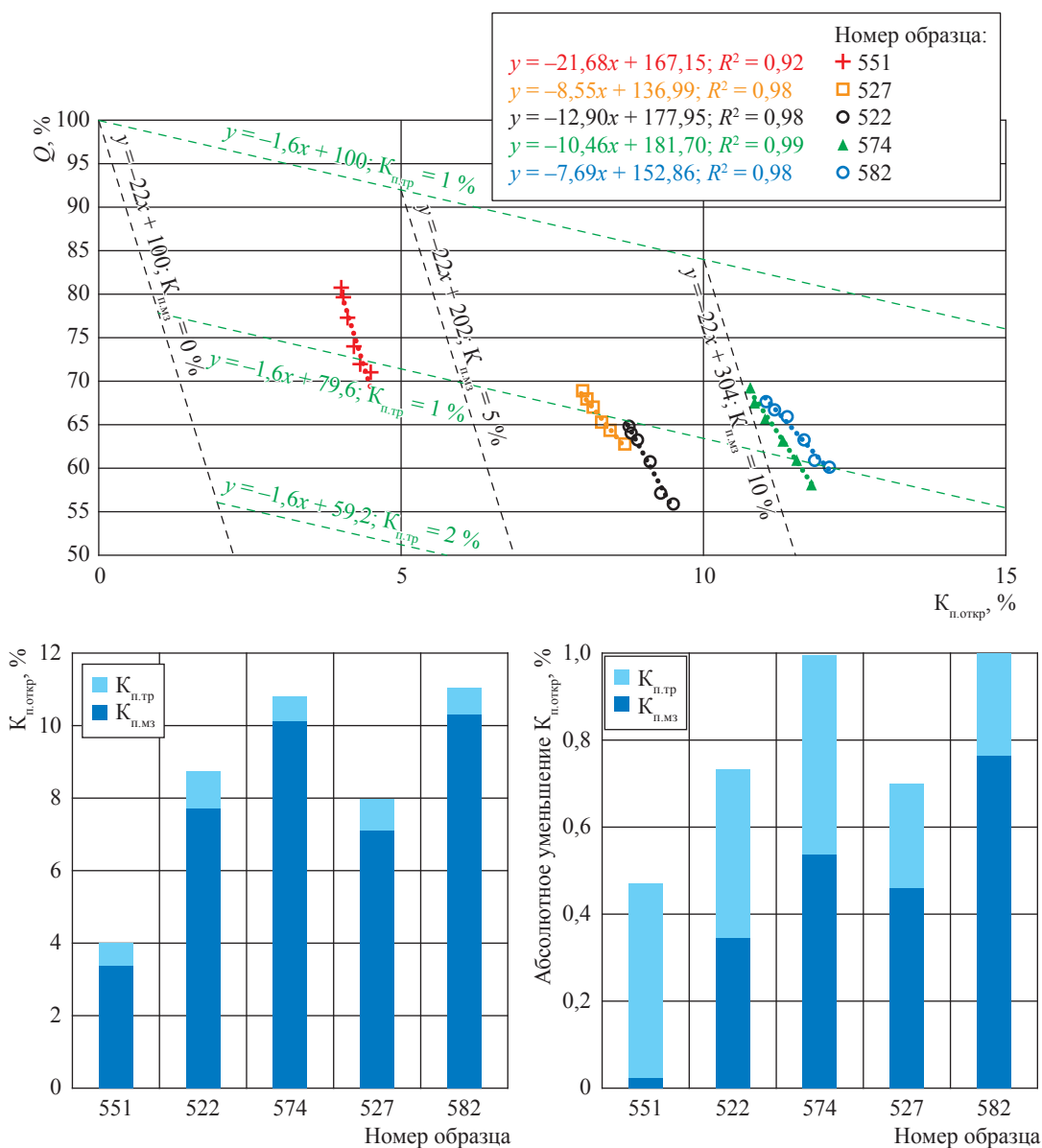


Рис. 8. Изменение структуры порового пространства образцов талахского горизонта при переходе от атмосферных условий к пластовым при $P_{эф} = 37,0$ МПа

т.е. уменьшился на 0,493 % в абсолютном выражении или на 65,5 % относительно собственного значения в атмосферных условиях.

С ростом $P_{эф}$ снижение пористости для различных образцов варьирует от 0,254 до 2,164 % в абсолютном выражении, в среднем оно составило 1,28 % (рис. 10). Значения обеих компонент пористости – межзерновой и трещинной – тоже уменьшились, но уже в разной степени. Видно (см. рис. 9), что в структуре пористости преобладает межзерновая пористость, доля трещинной пористости составляет в среднем

3,53 % в атмосферных условиях и 1,33 % в условиях, моделирующих пластовые.

Более подробный анализ изменений пористости и добротности (рис. 11) показал следующее. Зависимости добротности от пористости имеют вид:

$$Q = 100 - 2,27K_{п} \text{ в атмосферных условиях;} \tag{16}$$

$$Q = 100 - 1,84K_{п} \text{ при моделировании пластовых условий.} \tag{17}$$

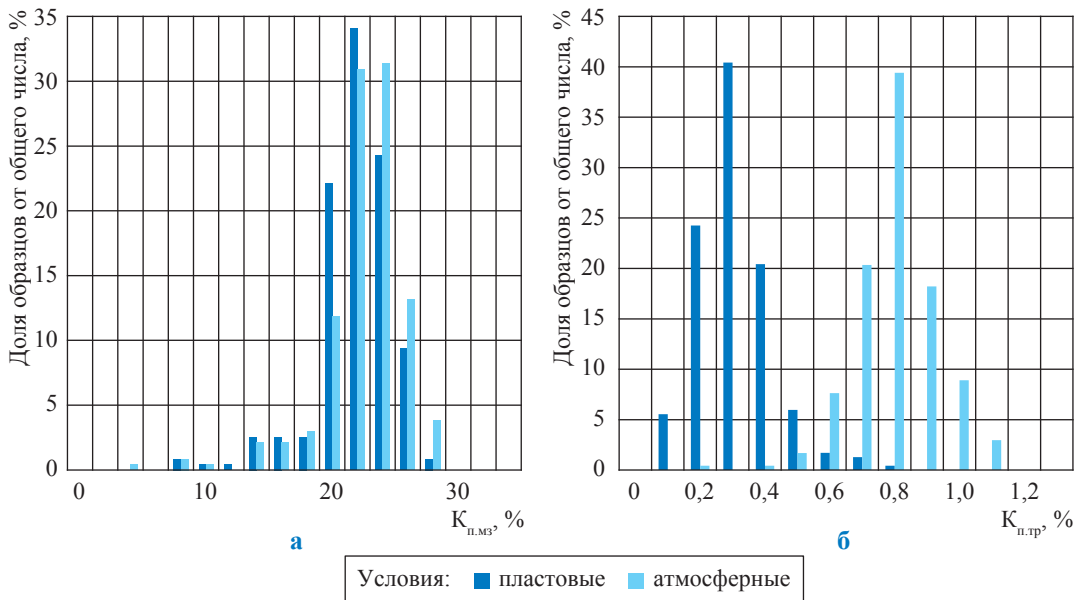


Рис. 9. Распределения межзерновой (а) и трещинной (б) пористости исследованных образцов горных пород (236 шт.) по диапазонам пористости в атмосферных условиях и при моделировании пластовых условий

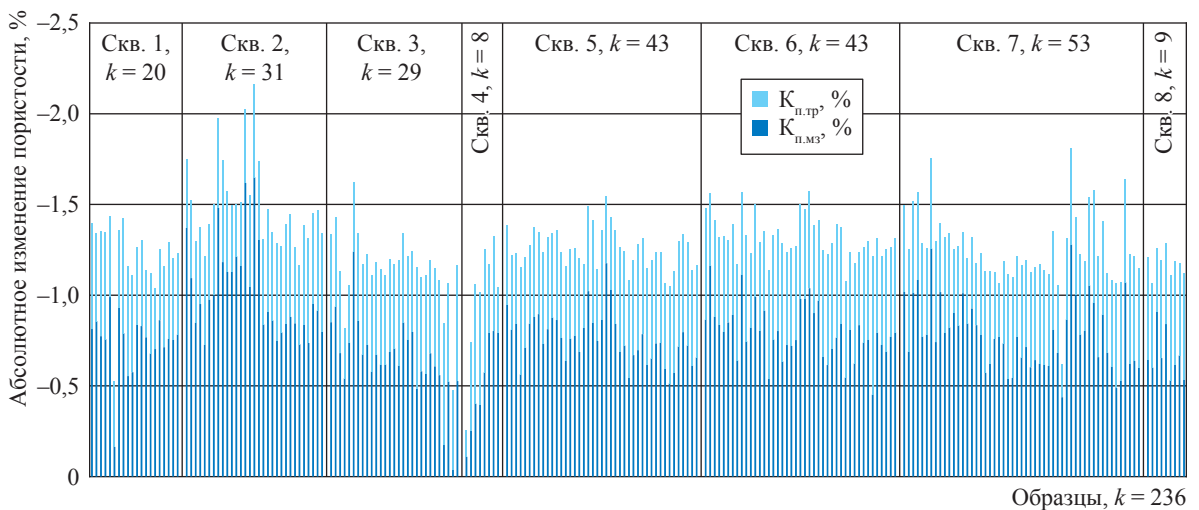


Рис. 10. Изменения $K_{п.откр}$, $K_{п.мз}$, $K_{п.тр}$ с ростом $P_{эф}$, сопровождающим переход к пластовым условиям: k – количество образцов

Преобладающим (основным) фактором изменения общей пористости в пластовых условиях является $K_{п.мз}$, так как угловой коэффициент в уравнении (17) равен $-1,84$, а если он равен $-1,6$, трещинная пористость отсутствует полностью. Обусловлено это тем, что микро-трещины, имеющиеся в образцах исследованных горных пород при атмосферных условиях, в основном закрываются при переходе к условиям, моделирующим пластовые. Доля трещинной пористости в открытой пористости при атмосферных условиях несколько выше, чем при пластовых условиях: угловой коэффициент уравнения (16) равен $-2,27$.

Показанная красным пунктиром на рис. 11 зависимость изменения добротности от пористости при переходе от атмосферных условий к пластовым

$$Q = -9,35K_{п} + 257,16 \quad (18)$$

подтверждает высказанное выше предположение о том, что с ростом $P_{эф}$ уменьшается объем как микро-трещин, так и межзерновых пор. В уравнении (18) угловой коэффициент равен $-9,35$. Отметим, что если он равен $-22,0$, межзерновая пористость не изменяется, а все изменения происходят только за счет трещинной пористости.

Результаты исследований при моделировании пластовых условий позволили выявить соотношение двух компонент (межзерновой

и трещинной) пористости и показать изменение структуры пористости при переходе к пластовым условиям. Показана доминирующая роль межзерновой компоненты общей пористости как в атмосферных условиях, так и в условиях, моделирующих пластовые. Установлено, что трещинная пористость в пластовых условиях частично сохраняется, несмотря на ее значительное снижение (на 65,4 %) при росте $P_{эф}$ при моделировании пластовых условий. Оценено влияние $P_{эф}$ на $K_{п.мз}$ и $K_{п.тр}$, получены оценки распределения двух компонент пористости (межзерновой и трещинной) как в атмосферных условиях, так и в условиях, моделирующих пластовые условия, которые могут быть использованы при подсчете запасов и при подготовке проектов разработки месторождений.

Моделирование условий разрушения призабойной зоны скважин в процессе снижения пластового давления. Главной задачей динамической петрофизики в области разработки месторождений нефти и газа является создание в исследуемых образцах коллекторов и покрышек напряженного состояния, адекватного действующему в пласте, и определение изменений физических свойств, соответствующих этому состоянию [36].

Академику С.А. Христиановичу принадлежит идея метода георыхления. В дальнейшем специалисты и ученые компании «Перфолинк ГЕО» и Института проблем механики РАН разработали метод направленной разгрузки

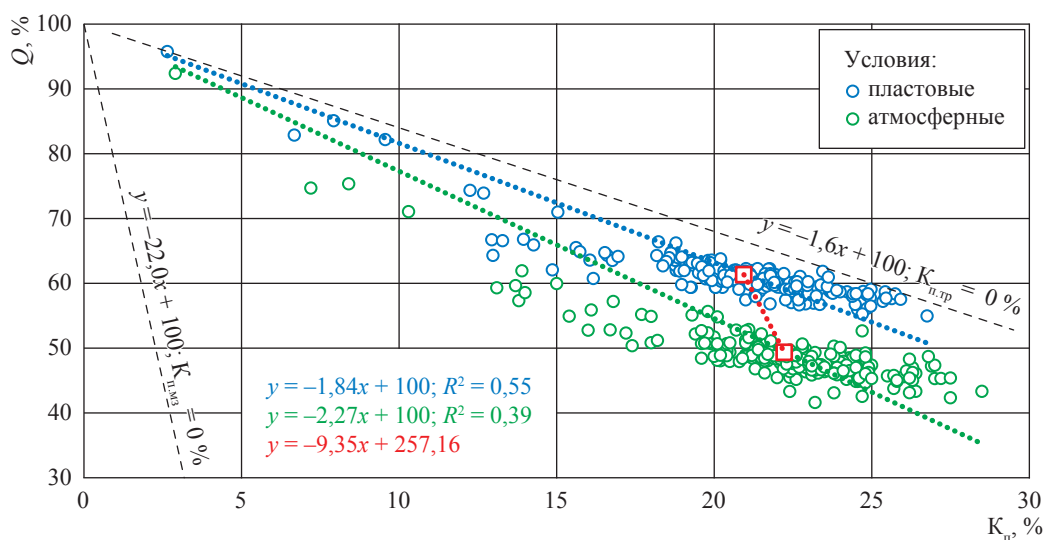


Рис. 11. Зависимости добротности исследованных образцов горных пород дагинского горизонта Южно-Киринского месторождения ($k = 236$) от пористости при атмосферных и пластовых условиях

пласта (НРП), в основе которого лежит увеличение проницаемости призабойной зоны пласта за счет создания в ней необходимых напряжений [37].

Идея метода НРП состоит в том, что надо не восстанавливать проницаемость естественных фильтрационных каналов, засоренных в процессе бурения и эксплуатации скважины, а дополнительно создавать в породе новую систему трещин – фильтрационных каналов. При этом проницаемость этих каналов может превосходить естественную проницаемость в десятки и даже сотни раз.

При гидроразрыве пласта (ГРП) в него закачивается жидкость под большим давлением, в результате чего на кончике трещины образуются высокие напряжения отрыва и она прорастает дальше. Метод НРП предполагает неравномерную разгрузку породы от сжимающих ее напряжений в разных направлениях, и при этом возникают сдвиговые напряжения. При достаточной величине этих напряжений порода начинает растрескиваться. Но в отличие от ГРП, когда зачастую образуются одна или несколько протяженных трещин, при НРП в призабойной зоне пласта появляется большое количество трещин. Растрескивание и разрыхление породы осуществляется за счет высвобождения запасенной в ней упругой энергии сжатия горным давлением.

Для определения уровня напряжений, которые необходимы для инициации процесса трещинообразования, испытаны цилиндрические образцы двух видов – сплошные и полые (с отверстием в центре цилиндра, рис. 12, 13), изготовленные из керна алевролита песчанистого пористостью 12,8 %, проницаемостью 0,34 мД и плотностью 2,35 г/см³. Испытания образцов проводились на установке всестороннего сжатия ПУМА-650 [38]. Поскольку давление на образец по осевой составляющей равно всестороннему давлению обжима, то обычно разрушения материала образцов, изготовленных в форме целого цилиндра, не происходит. При испытаниях образцов в форме полого цилиндра возникает дополнительная нагрузка вдоль оси цилиндра за счет уменьшения площади поперечного сечения образца, на которую действует давление всестороннего сжатия:

$$\sigma_{\text{ос}} = \sigma_{\text{вс}} \frac{R^2}{R^2 - r^2}, \quad (19)$$

где $\sigma_{\text{ос}}$, $\sigma_{\text{вс}}$ – осевое и боковое (всестороннее) давление на образец соответственно; R и r – внешний и внутренний радиусы образца соответственно.

Результаты измерений V_p и V_s в целом и полом цилиндрах при увеличении $P_{\text{эф}}$ приведены на рис. 14. Видно, что зависимости скоростей упругих волн для полого и целого цилиндров несколько отличаются. Так, при достижении $P_{\text{эф}} = 350$ атм в полом цилиндре скорость V_p начала снижаться, в то время как в сплошном цилиндре ее рост продолжался; скорость V_s в сплошном цилиндре продолжала увеличиваться, а в полом – оставалась на одном уровне.

В связи с тем что значения V_s и V_p напрямую не зависят от объема вытесненной жидкости, авторы сначала получили достоверную оценку связи динамического коэффициента Пуассона ν и изменений объема порового пространства, а затем – зависимость изменений объема пор от изменений ν для сплошного цилиндра, по которой рассчитали изменение объема пор в полом цилиндре, зная изменение в нем ν .

Анализируя рис. 15, можно сделать вывод о том, что на начальном этапе роста $P_{\text{эф}}$ объем пор уменьшился на 0,57 см³, а в дальнейшем, при растрескивании материала образца вокруг внутреннего отверстия, объем увеличился в этой локальной зоне как минимум на 0,18 см³. Для сравнения: объем порового пространства сплошного цилиндра в аналогичных условиях уменьшился почти в два раза меньше – на 0,25 см³.

С целью улучшения ФЕС коллекторов при разработке месторождений выполнены экспериментальные исследования на полых



Рис. 12. Внешний вид образца № 1 с внутренним отверстием до (справа) и после (слева) испытаний при увеличении $P_{\text{эф}}$



Рис. 13. Внешний вид образца № 3 с внутренним отверстием после испытаний при увеличении $P_{эф}$

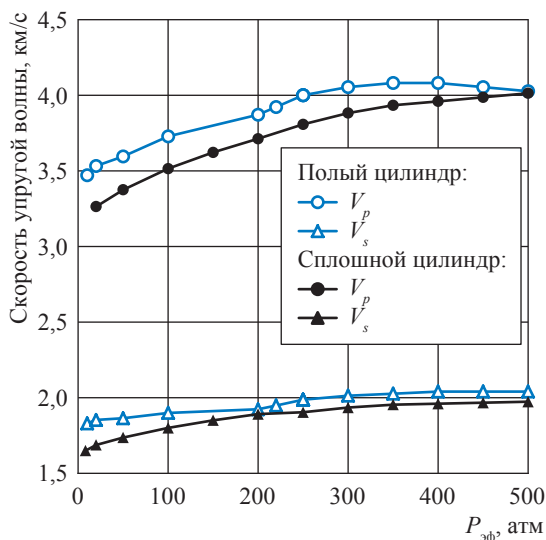


Рис. 14. Скорость распространения упругих продольных и поперечных волн при росте $P_{эф}$

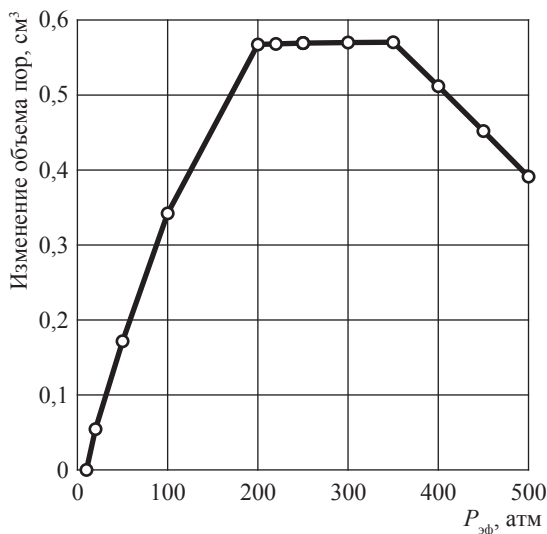


Рис. 15. Изменение объема пор полого цилиндра, рассчитанное по данным об изменениях ν сплошного цилиндра, при увеличении $P_{эф}$

цилиндрических образцах горных пород, позволившие дополнительно создать в породе новую систему трещин – фильтрационных каналов – путем создания неравномерного сжатия и высвобождения упругой энергии сжатия всестороннего давления. Выявлены характерные изменения физических свойств, сопровождающие образование трещин в локальной зоне вокруг внутреннего отверстия в образце: снижение скорости продольных упругих волн и динамического коэффициента Пуассона.

Определение водонасыщенности и трещиноватости коллекторов по затуханию

амплитуды упругих волн. Амплитуда A упругих колебаний связана с пройденным волной расстоянием L экспоненциально:

$$A = A_0 e^{-\alpha_{AK} L}, \quad (20)$$

где A_0 – амплитуда упругих колебаний вблизи источника; α_{AK} – коэффициент поглощения упругих волн.

Величина α_{AK} в горных породах зависит от монолитности их скелета, пористости, трещиноватости, вещественного состава заполнителя пор и других параметров и вместе

со скоростью широко используется при изучении пород. Поглощающие свойства пород связаны с литологией еще более тесно, чем скорость распространения упругих волн. Интенсивность поглощения породой упругих колебаний зависит также от характера жидкости, заполняющей поровое пространство. В слабосцементированных нефтеносных и газоносных породах с хорошей пористостью затухание колебаний происходит более интенсивно, чем в таких же породах, но водоносных. Это особенно заметно в газоносных породах из-за большой разницы скоростей распространения упругих волн в минеральном скелете породы и заполняющем поровое пространство газе. Наибольшее затухание претерпевают упругие волны в трещиноватых и кавернозных породах.

Список литературы

1. Антипов В.И. Модель напряженного состояния горных пород над продуктивным пластом / В.И. Антипов, Б.И. Медведев, В.Б. Нагаев и др. // Газовая промышленность. – 1997. – № 4. – С. 40–44.
2. Гаттенбергер Ю.П. Причины и прогноз проседаний земной поверхности в районах разрабатываемых нефтяных и газовых месторождений / Ю.П. Гаттенбергер // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отделение геологии. – 1984. – Т. 59. – Вып. 1. – С. 108–118.
3. Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти: сб. ст. / под ред. В. Мори и Д. Фурментро; пер. с фр. и англ. – М.: Мир: ЭльфАкитен, 1994. – 416 с.
4. Добрынин В.М. Деформации и изменения физических свойств коллекторов нефти и газа / В.М. Добрынин. – М.: Недра, 1970. – 239 с.
5. Ентов В.М. Об изменении напряженно-деформированного состояния горных пород при изменении давления в насыщенном жидкостью пласте / В.М. Ентов, Т.А. Малахова // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1974. – № 6. – С. 53–65.
6. Желтов Ю.П. Прогнозирование деформации массива горных пород при разработке месторождений / Ю.П. Желтов, В.С. Анциферов // Нефтяное хозяйство. – 1990. – № 1. – С. 37–42.
7. Жуков В.С. Оценка процессов проседания земной поверхности при разработке газовых месторождений (на примере Северо-Ставропольского месторождения) / В.С. Жуков, Ю.О. Кузьмин, Г.А. Полоудин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2002. – № 7. – С. 54–60.
8. Мазницкий А.С. Влияние параметров упругости пород на уплотнение коллектора и оседание земной поверхности при разработке нефтяных месторождений / А.С. Мазницкий, Л.М. Середницкий // Нефтяное хозяйство. – 1991. – № 6. – С. 14–16.
9. Петренко В.И. О механизме просадки земной поверхности при добыче жидких и газообразных полезных ископаемых / В.И. Петренко, Л.А. Ильченко, В.Ф. Канащук // Советская геология. – 1983. – № 7. – С. 109–115.
10. Терновой Ю.В. О деформации земной поверхности на разрабатываемом Северо-Ставропольском месторождении газа / Ю.В. Терновой, В.Н. Сергеев, В.Г. Гниловской // ДАН СССР. – 1965. – Т. 164. – № 4. – С. 885–888.
11. Черных В.А. Гидрогеомеханика нефтегазодобычи / В.А. Черных. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2001. – 249 с.
12. Гончаров В.С. Оценка влияния депрессионных воронок в водонапорных системах разрабатываемых газовых и газоконденсатных месторождений на проседание земной поверхности / В.С. Гончаров, В.С. Жуков, С.П. Перепеличенко и др. // Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа. Нефтегазоносные системы осадочных бассейнов: м-лы 8-й международной конференции. – М.: Геос, 2005. – С. 116–118.
13. Жуков В.С. Оценка геодинамических факторов при разработке месторождений нефти и газа без поддержания пластового давления / В.С. Жуков, Ю.О. Кузьмин // Разработка месторождений углеводородов: сб. ст. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2008. – С. 242–255.
14. Abdurraheem A. A finite element model for Ekofisk field subsidence / A. Abdurraheem, M. Zaman, J-C. Roegiers // Journal of petroleum science and engineering. – 1994. – № 10. – С. 299–310.
15. Geertsma J. Land subsidence above compacting oil and gas reservoir / J. Geertsma // Journal of petroleum technology. – 1973. – № 6. – С. 734–744.

16. Kovach R. Source mechanisms for Wilmington oil field, California, subsidence earthquakes / R. Kovach // *Bull. Seismol. Soc. of Amer.* – 1974. – Т. 64. – № 3. – С. 699–711.
17. Segall P. Stress and subsidence from subsurface fluid withdrawal in the epicenter region of the 1983 Coalinga earthquake // *Journal of geophysical research.* – 1985. – Т. 90. – С. 6801–6815.
18. Жуков В.С. Основные причины изменения комплекса физических свойств коллекторов при разработке месторождений УВ / В.С. Жуков // *Вести газовой науки: Проблемы разработки газовых, газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений.* – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2014. – № 4 (20). – С. 174–183.
19. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании / Ю.О. Кузьмин. – М.: Агентство экономических новостей, 1999. – 220 с.
20. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород / Ю.О. Кузьмин, В.С. Жуков. – М.: Горная книга, 2004. – 256 с.
21. Касьянова Н.А. Современная аномальная геодинамика недр и ее влияние на объекты нефтегазового комплекса / Н.А. Касьянова, Ю.О. Кузьмин. – М.: Геоинформмарк, 1996. – 56 с.
22. Сидоров В.А. Концепция «Геодинамическая безопасность освоения углеводородного потенциала недр России» / В.А. Сидоров, Ю.О. Кузьмин, А.М. Хитров. – М.: ИГиРГИ, 2000. – 56 с.
23. Сидоров В.А. Природно-техногенные геодинамические явления, индуцированные разработкой месторождений нефти и газа / В.А. Сидоров // *Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности.* – М.: Наука, 2000. – С. 334–344.
24. Кузьмин Ю.О. Современные суперинтенсивные деформации земной поверхности в зонах платформенных разломов / Ю.О. Кузьмин // *Геологическое изучение и использование недр.* – М.: Геоинформмарк, 1996. – Вып. 4. – С. 43–53.
25. Кузьмин Ю.О. Современное геодинамическое состояние недр / Ю.О. Кузьмин // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – М.: МГТУ, 2000. – № 6. – С. 55–65.
26. Кузьмин Ю.О. Геодинамическая природа аварийности скважин и трубопроводных систем / Ю.О. Кузьмин, А.И. Никонов // *Перспективы развития экологического страхования в газовой промышленности: сб. ст.* М.: Газпром ВНИИГАЗ, 1998. – С. 315–328.
27. Туранк К. Распространение волн и границы раздела в породах / К. Туранк, Д. Фурментро, А. Денни // *Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти: сб. ст. / пер. с англ. и фр. под ред. В. Мори и Д. Фурментро.* – М.: Мир, 1994. – С. 176–184.
28. Walsh J.B. The effect of cracks on the compressibility of rocks / J.B. Walsh // *Journal of geophysical research.* – 1965. – Т. 70. – № 2. – С. 381–411.
29. Walsh J.B. Cracks and pores in rocks / J.B. Walsh, W.F. Brace // *1-er Congres int. de mecanique des roches, Lisbonne. 25.09–01.10.1966.* – Т. 1. – С. 643–646.
30. Willie M.R.J. Studies of elastic wave attenuation in porous media / M.R.J. Willie, G.H.F. Gardner, A.R. Gregory // *Geophysics.* – 1962. – Т. XXVII. – №. 5. – С. 569–589.
31. Жуков В.С. Оценка трещиноватости коллекторов по скорости распространения упругих волн / В.С. Жуков // *Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г.: сб. ст.* – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. – С. 148–152.
32. Тиаб Дж. Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов / Дж. Тиаб, Э.Ч. Дональдсон; пер. с англ. – М.: Премиум инжиниринг, 2011. – 868 с.
33. Aguilera R. Analysis of naturally fractured reservoirs from conventional well log / R. Aguilera // *Journal of petroleum technology.* – 1976. – SPE-5342-PA. – С. 764–772.
34. Жуков В.С. Изменения структуры порового пространства коллекторов талахского горизонта при переходе от атмосферных условий к пластовым / В.С. Жуков, В.В. Моторыгин, Ю.Г. Пименов и др. // *Вести газовой науки: Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов.* – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2017. – № 2 (30). – С. 83–92.
35. Жуков В.С. Изменения структуры порового пространства коллекторов дагинского горизонта при моделировании пластовых условий / В.С. Жуков, Ю.М. Чуриков, В.В. Моторыгин // *Вести газовой науки: Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России.* – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2017. – № 3 (31). – С. 238–246.

36. Жуков В.С. Динамика физико-механических свойств горных пород (динамическая петрофизика) / В.С. Жуков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 9. – С. 59–63.
37. Христианович С.А. Увеличение продуктивности нефтяных скважин с помощью метода георыхления / С.А. Христианович, В.И. Карев, Ю.Ф. Коваленко и др. // Проблемы теории пластичности и геомеханики: к 100-летию со дня рождения акад. С.А. Христиановича. – М.: Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского: Наука, 2008. – С. 381–386.
38. Жуков В.С. Физическое моделирование разрушения призабойной зоны скважин при неравномерном сжатии образцов горных пород / В.С. Жуков, О.В. Иселидзе // Материалы 3-й Всероссийской конференции «Современная геодинамика недр и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса», Москва, 25–29 ноября 2013 г. – М.: Отделение наук о Земле РАН: ИПНГ РАН: ИФЗ РАН: ООО «ТиРу», 2013. – С. 69–75.

Dynamics of physical properties of reservoirs at development of oil and gas fields

V.S. Zhukov^{1*}, Ye.O. Semenov¹, Yu.O. Kuzmin²

¹ Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Projektiruemyy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

² O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Bld. 1, Est. 10, Bolshaya Gruzinskaya street, Moscow, 123242, Russian Federation

* E-mail: V_Zhukov@vniigaz.gazprom.ru

Abstract. When deposits are being developed, their hydrodynamic regime and stress-strain behavior of rocks considerably change, thus affecting the physical-mechanical properties of rocks which determine the working characteristics of reservoirs. Additional exposures also change the state of rocks, and can cause either packing, or deconsolidation of reservoirs and caps. So, it must be considered when the optimal methods of intensification are selected, namely waterflooding, or hydrofracturing. Changing of bed's stress-strain behavior can also rouse such phenomena as the vast subsidence of the Earth's surface, the manmade earthquakes nearby the hydrocarbon fields, crustal movements along the faults. Forecasting of the listed phenomena is a topical challenge.

Petrophysics is to find out physical properties of rock samples in normal (atmospheric) and modelled in-situ conditions. Variations of such properties for different samples of the same rock are usually explained by changes in their general mineral and chemical compositions, and by their special structural-textural features. At the same time, structural transformations of rocks can be induced by a force impact (for example, by reduction of the pore pressure). This is an object of dynamical petrophysics.

Besides changing of pore fluid pressure, field development is often accompanied with temperature changes during stimulation of wells, and waterflooding of a bed. Transformation of physical properties (porosity and permeability, elasticity, electric and structural behavior) is mainly studied by measuring these properties in standard (atmospheric) conditions and in the modelled in-situ conditions. It is shown that reduction of porous pressure in 10 MPa can change values of various petrophysical parameters from 0,1 (rock density) to 80 % (specific electrical resistance), and this fact must be taken into consideration in the projects of field development and while interpreting repeated or real-time well logs.

There are some new trends in studying physical properties, namely: determination of rock fracture porosity and estimation of its impact to the physical behavior of rocks; estimation of changes of the reservoir's physical properties in case of pore pressure reduction; modelling of conditions favorable for destruction of wellbottom zone; determination of water saturation and fracturing of reservoirs by attenuation of elastic waves.

Keywords: petrophysics, development of fields, in-situ conditions, recent geodynamics, stress.

References

1. ANTIPOV, V.I., B.I. MEDVEDEV, V.B. NAGAYEV et al. A model of stress condition of rocks over a productive layer [Model napryazhennogo sostoyaniya gornyx porod nad produktivnym plastom]. *Gazovaya Promyshlennost*. 1997, no. 4, pp. 40–44. ISSN 0016-5581. (Russ.).
2. GATTENBERGER, Yu.P. Reasons for and prediction of Earth surface subsidence in the regions of the oil and gas fields under development [Prichiny i prognoz prosedaniy zemnoy poverkhnosti v rayonakh razrabatyvayemykh neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy]. *Byulleten Moskovskogo Obshchestva Ispytateley Prirody. Otdel Geologicheskoy*. 1984, vol. 59, is. 1, pp. 108–118. (Russ.).

3. MORI, V., FURMENTRO D. (eds.). *Rock mechanics in respect of issues in oil exploration and production* [Mekhanika gornykh porod primenitelno k problemem razvedki i dobychi nefiti]: collected papers. Translated from English and French. Moscow: Mir: ElfAkiten, 1994. (Russ.).
4. DOBRYNIN, V.M. *Deformations and changes of physical properties of oil and gas reservoirs* [Deformatsii i izmeneniya fizicheskikh svoystv kollektorov nefi i gaza]. Moscow: Nedra, 1970. (Russ.).
5. YENTOV, V.M., T.A. MALAKHOVA. On changing of the stressed-deformed state of rocks at changing of pressure in a liquid-saturated bed [Ob izmenenii napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gornykh porod pri izmenenii davleniya v nasyshchennom zhidkostyu plaste]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Mekhanika Tverdogo Tela*. 1974, no. 6, pp. 53–65. (Russ.).
6. ZHELTOV, Yu.P., V.S. ANTSIFEROV. Prognostication of rock mass deformation during development of fields [Prognozirovaniye deformatsii massiva gornykh porod pri razrabotke mestorozhdeniy]. *Neftyanoye Khozyaystvo*. 1990, no. 1, pp. 37–42. ISSN 0028-2448. (Russ.).
7. ZHUKOV, V.S., Yu.O. KUZMIN, G.A. POLOUDIN. Estimation of Earth surface subsidence processes during development of gas fields (on example of Severo-Stavropolskoye field). [Otsenka processov prosedaniya zemnoy poverkhnosti pri razrabotke gazovykh mestorozhdeniy (na promere Severo-Stavropolskogo mestorozhdeniya)]. *Geologiya, Geofizika i Razrabotka Neftyanyykh i Gazovykh Mestorozhdeniy*. 2002, no. 7, pp. 54–60. ISSN 2413-5011. (Russ.).
8. MAZNITSKIY, A.S., L.M. SEREDNITSKIY. Effect of rock elasticity parameters on settlement of a reservoir and subsidence of the Earth surface during development of oil fields [Vliyaniye parametrov uprugosti porod na uplotneniye kollektora i osedaniye zemnoy poverkhnosti pri razrabotke neftyanyykh mestorozhdeniy]. *Neftyanoye Khozyaystvo*. 1991, no. 6, pp. 14–16. ISSN 0028-2448. (Russ.).
9. PETRENKO, V.I., L.A. ILCHENKO, V.F. KANASHCHUK. About a mechanism for subsidence of the Earth's surface during production of liquid and gaseous minerals [O mekhanizme prosadki zemnoy poverkhnosti pri dobyche zhidkikh i gazoobraznykh poleznykh iskopayemykh]. *Sovetskaya Geologiya*. 1983, no. 7, pp. 109–115. (Russ.).
10. TERNOVOY, Yu.V., V.N. SERGEYEV, V.G. GNILOVSKOY. About deformation of the Earth surface at the Severo-Stavropolskoye gas field being under development [O deformatsii zemnoy poverkhnosti na razrabatyvayemom Severo-Stavropolskom mestorozhdenii gaza]. *Doklady AN SSSR*. 1965, vol. 164, no. 4, pp. 885–888. (Russ.).
11. CHERNYKH, V.A. *Hydromechanics of oil-gas production* [Gidromekhanika neftegazodobychi]. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2001. (Russ.).
12. GONCHAROV, V.S., V.S. ZHUKOV, S.P. PEREPELICHENKO et al. Evaluation of the influence of depression pits in the water-driven systems of gas and gas-condensate fields under development on the subsidence of the Earth's surface [Otsenka vliyaniya depressionnykh voronok v vodonapornyykh sistemakh gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniy na prosedaniye zemnoy poverkhnosti]. In: *New ideas in the petroleum geology and geochemistry. Oil-gas-bearing systems of sedimentary basins* [Novyye idei v geologii i geokhimii nefi i gaza. Neftegazonosnyye sistemy osadochnyykh basseynov]: proc. Of the 8th International conference. Moscow: Geos, 2005, pp. 116–118. (Russ.).
13. ZHUKOV, V.S., Yu.O. KUZMIN. Estimation of geodynamic factors at development of the oil-and-gas fields without maintenance of pore pressure [Otsenka geodinamicheskikh faktorov pri razrabotke mestorozhdeniy nefi i gaza bez podderzhaniya plastovogo davleniya]. In: *Development of hydrocarbon fields* [Razrabotka mestorozhdeniy uglevodorodov]: collected papers. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2008, pp. 242–255. (Russ.).
14. ABDULRAHEEM, A., M. ZAMAN, J-C. ROEGIERS. A finite element model for Ekofisk field subsidence. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 1994, no. 10, pp. 299–310. ISSN 0920-4105.
15. GEERTSMA, J. Land subsidence above compacting oil and gas reservoir. *Journal of Petroleum Technology*. 1973, no. 6, pp. 734–744. ISSN 0149-2136.
16. KOVACH, R. Source mechanisms for Wilmington oil field, California, subsidence earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. of Amer.* 1974, vol. 64, no. 3, pp. 699–711. ISSN 0037-1106.
17. SEGALL, P. Stress and subsidence from subsurface fluid withdrawal in the epicenter region of the 1983 Coalinga earthquake. *Journal of Geophysical Research*. 1985, vol. 90, pp. 6801–6815. ISSN 0148-0227.
18. ZHUKOV, V.S. Principal causes of change of a complex of physical properties of producing formation by oil and gas fields development [Osnovnyye prichiny izmeneniya kompleksa fizicheskikh svoystv kollektorov pri razrabotke mestorozhdeniy uglevodorodov]. *Vesti Gazovoy Nauki*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2014, no. 4 (20): Problems of development of gas, gas condensate and oil/gas/condensate fields, pp. 174–183. ISSN 2306-8949. (Russ.).
19. KUZMIN, Yu.O. *Modern geodynamics and estimation of geodynamical risk during subsoil management* [Sovremennaya geodinamika i otsenka geodinamicheskogo riska pri nedropolzovanii]. Moscow: Agentstvo ekonomicheskikh novostey, 1999. (Russ.).
20. KUZMIN, Yu.O., V.S. ZHUKOV. *Recent geodynamics and variations of rocks' physical properties* [Sovremennaya geodinamika i variatsii fizicheskikh svoystv gornykh porod]. Moscow: Gornaya kniga, 2004. (Russ.).
21. KASYANOVA, N.A., Yu.O. KUZMIN. *Abnormal contemporary subsoil geodynamics and its impact to the oil-gas facilities* [Sovremennaya anomalnaya geodinamika nedr i eye vliyaniye na obyekty neftegazovogo kompleksa]. Moscow: Geoinformmark, 1996. (Russ.).

22. SIDOROV, V.A., Yu.O. KUZMIN, A.M. KHITROV. *A concept "Geodynamical security of development of Russian subsoil hydrocarbon potential"* [Kontseptsiya "Geodinamicheskaya bezopasnost osvoineniya uglevodородного potentsiala nedr Rossii"]. Moscow: Institute for geology and development of fossil fuels (IGiRGI), 2000. (Russ.).
23. SIDOROV, V.A. Natural-and-man-caused geodynamical phenomena induced by oil and gas production [Prirodno-tekhnogennyye geodinamicheskiye yavleniya, indutsirovannyye razrabotkoy mestorozhdeniy nefi i gaza]. In: *Foundation of new technologies in the petroleum-and-gas industry* [Fundamentalnyy basis novykh tekhnologiy nefyanoy i gazovoy promyshlennosti]. Moscow: Nauka, 2000, pp. 334–344. (Russ.).
24. KUZMIN, Yu.O. Modern superintensive deformations of the Earth's surface in the zones of the platform faults [Sovremennyye superintensivnyye deformatsii zemnoy poverkhnosti v zonakh platformennykh razlomov]. *Geologicheskoye Izucheniye i Ispolzovaniye Nedr*. Moscow: Geoinmmark, 1996, is. 4, pp. 43–53. ISSN 0868-4502. (Russ.).
25. KUZMIN, Yu.O. *Contemporary geodynamic state of subsoil* [Sovremennoye geodinamicheskoye sostoyaniye nedr]. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2000, no. 6, pp. 55–65. ISSN 0236-1493. (Russ.).
26. KUZMIN, Yu.O., A.I. NIKONOV. Geodynamic nature of wells' and pipelines' failure rate [Geodinamicheskaya priroda avariynosti skvazhin i truboprovodnykh system]. In: *Outlooks for development of ecological insurance in the gas industry* [Perspektivy razvitiya ekologicheskogo strakhovaniya v gazovoy promyshlennosti]: collected papers. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 1998, pp. 315–328. (Russ.).
27. TURANK, K., D. FURMENTRO and A. DENNY. Propagation of waves and demarcation line in rocks [Rasprostraneniye voln i granits razdela v prodakh] In: MORI, V., FURMENTRO D. (eds.). *Rock mechanics in respect of issues in oil exploration and production* [Mekhanika gornyykh porod primenitelno k problemem razvedki i dobychi nefi]: collected papers. Translated from English and French. Moscow: Mir, 1994, pp. 176–184. (Russ.).
28. WALSH, J.B. The effect of cracks on the compressibility of rocks. *Journal of Geophysical Research*. 1965, vol. 70, no. 2, pp. 381–411. ISSN 0148-0227.
29. WALSH, J.B., W.F. BRACE. Cracks and pores in rocks. In: *1-er Congres int. de mecanique des roches, Lisbonne*. 25.09–01.10.1966, vol. 1, pp. 643–646.
30. WILLIE, M.R.J., G.H.F. GARDNER, A.R. GREGORY. Studies of elastic wave attenuation in porous media. *Geophysics*. 1962, vol. XXVII, no. 5, pp. 569–589. ISSN 0016-8033.
31. ZHUKOV, V.S. Estimation of reservoir fracture pattern by elastic wave propagation velocity [Otsenka treshchinovatosti kollektora po skorosti rasprostraneniya uprugikh voln]. In: *Resource support problems of Russian oil-producing regions up to 2030*: collected sc. articles. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2012, pp. 148–152. (Russ.).
32. TIAB, Dj. and Erle C. DONALDSON. *Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Translated from English. 2nd ed. Moscow: Premium inzhiniring, 2011. (Russ.).
33. AGUILERA, R. Analysis of naturally fractured reservoirs from conventional well log. *Journal of Petroleum Technology*. 1976. SPE-5342-PA, pp. 764-772. ISSN 0149-2136.
34. ZHUKOV, V.S., V.V. MOTORYGIN, Yu.G. PIMENOV et al. Changes of porous space structure in reservoirs of Tala horizon at transition from atmospheric conditions to in-situ ones [Izmeneniya struktury porovogo prostranstva kollektorov talakhsogo gorizonta pri perekhode ot atmosferykh usloviy k plastovym]. *Vesti Gazovoy Nauki*: collected scientific technical papers. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2017, no. 2 (30): Actual issues in research of bedded hydrocarbon systems, pp. 83–92. ISSN 2306-8949. (Russ.).
35. ZHUKOV, V.S., Yu.M. CHURIKOV, V.V. MOTORYGIN. Modification of porous space structure in reservoirs of Dagi horizon at transition from atmospheric conditions to in-situ ones [Izmeneniya struktury porovogo prostranstva kollektorov daginskogo gorizonta pri modelirovaniy plastovyykh usloviy]. *Vesti Gazovoy Nauki*: collected scientific technical papers. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2017, no. 3 (31): Issues for resource provision of gas-extractive regions of Russia, pp. 238–246. ISSN 2306-9849. (Russ.).
36. ZHUKOV, V.S. Dynamics of physical-mechanical properties of rocks (dynamical petrophysics) [Dinamika fiziko-mekhanicheskikh svoystv gornyykh porod (dinamicheskaya petrofizika)]. *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Bulletin*. 2002, no. 9, pp. 59–63. ISSN 0236-1493. (Russ.).
37. KHRISTIANOVICH, S.A., V.I. KARAYEV, Yu.F. KOVALENKO et al. To increase productivity of oil wells by means of a georipping method [Uvelicheniye produktivnosti nefyanykh skvazhin s pomoshchyu metoda georykhleniya]. In: *Challenges of the plasticity theory and geomechanics* [Problemy teorii plastichnosti i geomekhniki]: to the centenary of the birth of academician S.A. Khristianovich. Moscow: A.Yu. Ishlinskiy Institute for Problems in Mechanics: Nauka, 2008, pp. 381–386. (Russ.).
38. ZHUKOV, V.S., O.V. ISELIDZE. Physical modelling of destruction of wellbottom zones with non-uniform compression of rock samples [Fizicheskoye modelirovaniye razrusheniya prizaboynoy zony skvazhin pri neravnomernom szhatii obraztsov gornyykh porod]. In: Proc. of the 3rd All-Russia conference "Modern geodynamics of subsoil and environmental-industrial safety of the oil-gas facilities" [Sovremennaya geodinamika nedr i ekologo-promyshlennaya bezopasnost obyektov neftegazovogo kompleksa], Moscow, November 25–29, 2013. Moscow: Department of Earth sciences of RAS: Institute of oil and gas problems of RAS: Institute of Physics of the Earth of RAS: TiRu LLC, 2013, pp. 69–75. (Russ.).