



Научная статья
УДК 622.276.6

Определение параметров метода направленной разгрузки пласта на основе физического моделирования на установке истинно трехосного нагружения

В.И.КАРЕВ, Ю.Ф.КОВАЛЕНКО, В.В.ХИМУЛЯ✉, Н.И.ШЕВЦОВ

Институт проблем механики РАН, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Химуля В.В., Шевцов Н.И. Определение параметров метода направленной разгрузки пласта на основе физического моделирования на установке истинно трехосного нагружения // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 906-914. DOI: 10.31897/PMI.2022.95

Аннотация. Представлен способ теоретического и экспериментального обоснования возможности применения метода направленной разгрузки пласта на месторождениях с низкопроницаемыми коллекторами. Актуальность статьи обусловлена сокращением ресурсной базы углеводородного сырья в современных условиях и необходимостью создания новых эффективных экологически чистых технологий разработки месторождений углеводородов с трудноизвлекаемыми запасами, прежде всего с низкопроницаемыми коллекторами. Приведены результаты теоретического изучения напряженно-деформированного состояния в окрестности скважины, как обсаженной, так и необсаженной, необходимые для разработки программ лабораторных испытаний образцов керна исследуемых месторождений. Описана методика физического моделирования деформационных процессов в призабойной зоне при понижении давления на забое скважины на установке истинно трехосного нагружения с целью определения параметров технологического воздействия на пласт, приводящего к увеличению продуктивности скважины. Способ был применен для условий низкопроницаемого коллектора Верхневилючинского нефтегазоконденсатного месторождения, расположенного на юго-западе Республики Саха (Якутия). Экспериментальные исследования проводились на созданной в ИПМех РАН уникальной научной установке истинно трехосного нагружения – Испытательной системе трехосного независимого нагружения. Проведена адаптация метода направленной разгрузки для исследуемого месторождения, определены технологические параметры успешного применения метода: конструкция забоя, величины депрессии, необходимые для увеличения проницаемости призабойной зоны пласта.

Ключевые слова: истинно трехосные испытания; горные породы; скважина; перфорационное отверстие; напряжения; направленная разгрузка пласта

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018 (соглашение 075-15-2020-802).

Поступила: 01.09.2021

Принята: 07.10.2022

Онлайн: 29.12.2022

Опубликована: 29.12.2022

Введение. В условиях сокращения ресурсной базы углеводородного сырья, когда крупные и доступные месторождения в основном исчерпаны, возникает необходимость добычи трудноизвлекаемых запасов, прежде всего из низкопроницаемых коллекторов [1, 2]. В этой связи все большую актуальность приобретает разработка и адаптация к условиям конкретных месторождений новых и эффективных технологий [3]. Среди таких технологий можно назвать: многостадийный гидроразрыв пласта [4, 5], волновое воздействие [6, 7], метод направленной разгрузки пласта [8, 9]. Совершенствованием научных основ метода многостадийного гидроразрыва сегодня занимаются как отечественные [10], так и зарубежные коллективы [11, 12]. Основные направления исследований: численное моделирование распространения трещин [12], создание моделей для изучения эволюции параметров гидравлического разрыва пласта (ГРП) и расчета продуктивности скважин с учетом изменения различных технологических факторов [11, 13], экспериментальное изучение развития трещин в пласте [14, 15]. Особое внимание уделяется поиску новых методических основ для оценки и учета параметров низкопроницаемых пластов [16], совершенствованию подходов



к планированию мероприятий по ГРП [17, 18] и способов мониторинга применения ГРП [19]. При исследовании волнового воздействия на пласт учитывают влияние амплитуды и частоты колебаний на характеристики пласта [20, 21] и флюидов [22], градиент давления нефти, межфазное натяжение капилляров [23] и др. Применение волновых методов зачастую рассматривают в совокупности с другими методами воздействия на пласт [24, 25]. Существуют также альтернативные экологичные методы воздействия, например технология воздействия электрическим полем на пласт [26, 27], применение полимерного заводнения [28], закачка углекислого газа [29, 30], плазменно-импульсное воздействие на продуктивный пласт [31].

Методология. В Институте проблем механики РАН в течение последних 30 лет проводятся интенсивные научные исследования в области создания инновационных технологий добычи углеводородного сырья. Развивается геомеханический подход к разработке месторождений с низко-проницаемыми коллекторами, заключающийся в увеличении проницаемости продуктивного пласта путем управления напряженным состоянием пласта за счет его направленной разгрузки от горного давления. На напряженное состояние в пласте в окрестности скважины влияют два фактора – давление в скважине и геометрия забоя (наличие обсадки и щелей, плотность и вид перфорации). Результатом этих исследований явилось создание нового способа повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин – метода направленной разгрузки пласта (НРП).

Метод НРП успешно испытан на ряде нефтяных месторождений Западной Сибири и Пермского края [32]. При реализации метода НРП прежде всего следует определить напряжения, которые необходимо создать в породе для ее растрескивания и разрушения, и ответить на вопрос, какие технологические операции для этой цели необходимы. Для различных пород-коллекторов, условий их залегания, пластовых давлений эти условия различны [33]. Поэтому для адаптации метода НРП к условиям конкретного месторождения на Испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН) [34], позволяющей в кубических образцах породы воссоздавать реально возникающие в пластах нефтегазовых месторождений напряженные и деформированные состояния, проводится серия испытаний образцов породы из данного месторождения по специальным программам нагружения. Результатом опытов является заключение о наиболее эффективных условиях реализации метода НРП на данном месторождении идается оценка ожидаемого эффекта.

Использование метода НРП на месторождениях с низкопроницаемыми коллекторами в силу их повышенной прочности может потребовать предварительного внесения в пласт концентраторов напряжений – перфорации определенного вида и плотности, что необходимо для инициации процесса растрескивания в пласте, а также его интенсификации. Это необходимо даже на скважинах с необсаженными стволами, для которых применение технологии НРП наиболее эффективно.

Установка ИСТНН представляет собой уникальный экспериментальный стенд для изучения деформационных и фильтрационных свойств горных пород. Его отличительной особенностью является возможность создания в кубических образцах горных пород истинно трехосных напряженных состояний. Кроме того, такая установка позволяет изучать влияние возникающих в горных породах напряжений на их фильтрационные свойства.

Перед проведением экспериментов необходимо составить программы нагружения образцов на установке ИСТНН, отвечающие реально возникающим в пласте напряжениям в ходе эксплуатации скважин. С этой целью проводятся математические расчеты, как аналитические, так и численные. На их основании составляются программы нагружения образцов. Затем каждая из этих программ реализуется на ИСТНН. При испытаниях для каждой из программ устанавливается, на каком ее участке, соответственно при какой величине депрессии, происходит неупругое деформирование породы с ее растрескиванием или разрыхлением, сопровождающимся увеличением проницаемости. Таким образом, составление программ нагружения образцов представляет собой важную задачу.

Далее приведены расчеты для определения напряжений, действующих в окрестности перфорационных отверстий в обсаженных и необсаженных скважинах. Напряженное состояние в окрестности перфорационного отверстия определяется внешним напряжением (вдали от скважины или перфорационного отверстия), давлением флюида внутри скважины и перфорационного отверстия для необсаженной скважины и противодавлением на породу со стороны цементного камня и давлением флюида внутри перфорационного отверстия для обсаженной скважины.

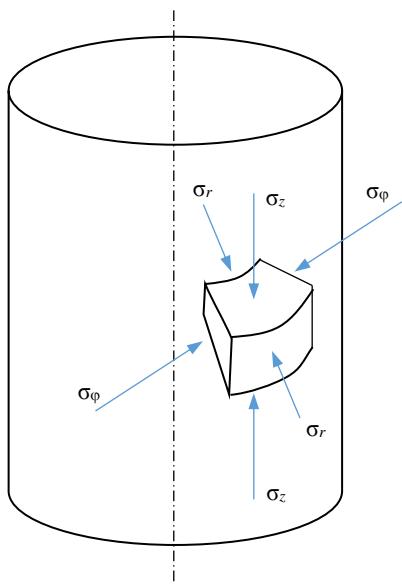


Рис.1. Напряжения в окрестности скважины

Напряжения в окрестности необсаженного ствола вертикальной скважины. Внешним напряжением для скважины являются напряжения от горного давления в глубине пласта q (рис.1).

В случае равномерного всестороннего сжатия напряжения вокруг необсаженной скважины в системе координат r, z, φ , связанной со скважиной, согласно решению задачи Ламе [35], равны:

$$\begin{aligned}\sigma_r(r) &= -(q + p_w)(R/r)^2 + q; \\ \sigma_\varphi(r) &= (q + p_w)(R/r)^2 + q; \\ \sigma_z(r) &= q,\end{aligned}\quad (1)$$

где p_w – давление в скважине; R – радиус скважины; r – расстояние от оси скважины до рассматриваемой точки; $p_w > 0$, $q < 0$ (здесь и далее сжимающие напряжения считаются отрицательными). Эффективные напряжения, которыми нагружен грунтовый скелет:

$$\begin{aligned}s_r(r) &= -(q + p_w)(R/r)^2 + q + p(r); \\ s_\varphi(r) &= (q + p_w)(R/r)^2 + q + p(r); \\ s_z(r) &= q + p(r).\end{aligned}\quad (2)$$

Таким образом, при уменьшении давления в скважине, т.е. при росте депрессии, компоненты напряжения s_φ и s_z в призабойной зоне пласта (ПЗП) по абсолютной величине растут, а радиальное напряжение s_r уменьшается.

Эффективные напряжения на стенке ($r = R$) необсаженной скважины с учетом того, что на ней $p(r) = p_w$, из (2) равны:

$$\begin{aligned}s_r &= 0, \quad s_z = q + p_w, \\ s_\varphi &= 2(q + p_w).\end{aligned}\quad (3)$$

Напряжения в окрестности обсаженного ствола вертикальной скважины. Со стороны цементного камня на стенку скважины действует противодавление p_c , $p_c > 0$. Эффективные напряжения в окрестности скважины:

$$\begin{aligned}s_r(r) &= -(q + p_c)(R/r)^2 + q + p(r); \\ s_\varphi(r) &= (q + p_c)(R/r)^2 + q + p(r); \\ s_z(r) &= q + p(r).\end{aligned}\quad (4)$$

Полагая, что на контуре обсаженной скважины после затвердевания цементного раствора давление восстанавливается полностью до значения горного давления, т.е. $p_c = |q|$, из формул (4) имеем

$$s_r = s_\varphi = s_z = q + p_0, \quad (5)$$

где p_0 – пластовое давление.

Таким образом, изменение давления в обсаженной скважине, не имеющей перфорационных отверстий, не оказывается на напряженном состоянии в ее окрестности.

Напряжения на поверхности перфорационного отверстия в необсаженной скважине. Внешним напряжением для перфорационного отверстия являются уже не напряжения от горного давления в глубине пласта, а напряжения (1), действующие вокруг необсаженного ствола скважины (рис.2).



Напряжения в окрестности перфорационного отверстия определяются суперпозицией решений задачи Ламе [34] и задачи, аналогичной задаче Кирша [36] (рис.3).

В системе координат r' , z' , φ' на контуре перфорационного отверстия, т.е. при $r' = R_h$, где R_h – радиус перфорационного отверстия (рис.3, а), для изменения напряжений в зависимости от расстояния от оси скважины имеем

$$\sigma_{r'}^{(1)}(r) = -p_w, \quad \sigma_{z'}^{(1)}(r) = \sigma_r(r), \quad \sigma_{\varphi'}^{(1)}(r) = 2\sigma_z + p_w. \quad (6)$$

В верхней точке N вертикального сечения перфорационного отверстия (рис.3, б) для изменения напряжений в зависимости от расстояния от оси скважины имеем

$$\sigma_{r'}^{(2)}(r) = 0, \quad \sigma_{z'}^{(2)}(r) = 0, \quad \sigma_{\varphi'}^{(2)}(r) = 3(\sigma_\varphi(r) - \sigma_z). \quad (7)$$

Сумма компонент (6) и (7) при суперпозиции полей напряжений в точке N :

$$\sigma_{r'}(r) = -p_w, \quad \sigma_{z'}(r) = \sigma_r(r), \quad \sigma_{\varphi'}(r) = 3\sigma_\varphi(r) - \sigma_z + p_w. \quad (8)$$

С учетом (1)

$$\begin{aligned} \sigma_{r'}(r) &= -p_w, \quad \sigma_{z'}(r) = -(q + p_w)(R/r)^2 + q; \\ \sigma_{\varphi'}(r) &= 3(q + p_w)(R/r)^2 + 2q + p_w. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда эффективные напряжения на поверхности перфорационного отверстия с учетом того, что на ней $p(r) = p_w$, равны:

$$\begin{aligned} s_{r'}(r) &= 0, \quad s_{z'}(r) = -(q + p_w)(R/r)^2 + q + p_w; \\ s_{\varphi'}(r) &= 3(q + p_w)(R/r)^2 + 2(q + p_w). \end{aligned} \quad (10)$$

Из выражений (10) видно, что напряжения вдоль поверхности перфорационного отверстия меняются в зависимости от расстояния от скважины.

При $r = R$

$$s_{r'} = s_{z'} = 0, \quad s_{\varphi'} = 5(q + p_w). \quad (11)$$

При $r = 2R$

$$s_{r'} = 0, \quad s_{z'} = 3/4(q + p_w), \quad s_{\varphi'} = 11/4(q + p_w). \quad (12)$$

При $r = 3R$

$$s_{r'} = 0, \quad s_{z'} = 8/9(q + p_w), \quad s_{\varphi'} = 7/3(q + p_w). \quad (13)$$

Напряжения на поверхности перфорационного отверстия в обсаженной скважине. Как следует из формулы (5), перфорационное отверстие в обсаженной скважине находится под действием внешнего напряжения, возникающего в окрестности обсаженной скважины и совпадающего с природным напряжением от горного давления в глубине пласта. Поэтому напряжения в его окрестности даются соотношениями, аналогичными выражениям для необсаженной скважины (1) и (2), в которых радиус скважины надо заменить на радиус перфорационного отверстия, а расстояние от оси скважины – на расстояние от оси перфорационного отверстия. Имеем:

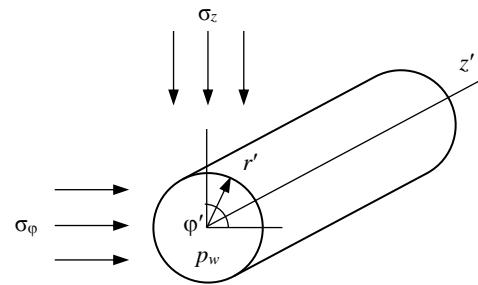


Рис.2. Напряжения в окрестности перфорационного отверстия в необсаженной скважине

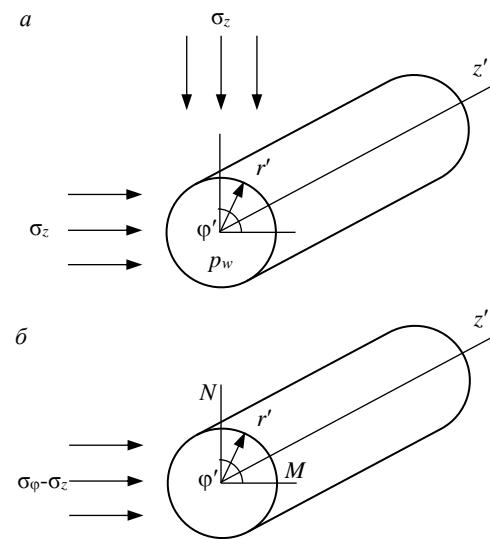


Рис.3. Напряжения в окрестности перфорационного отверстия для задачи 1 Ламе (а) и задачи 2 Кирша (б)



$$\begin{aligned}\sigma_{r'} &= -(q + p_w) \left(R_h / r' \right)^2 + q; \\ \sigma_{\theta'} &= (q + p_w) \left(R_h / r' \right)^2 + q; \\ \sigma_z' &= q,\end{aligned}\quad (14)$$

для эффективных напряжений

$$\begin{aligned}s_{r'} &= -(q + p_w) \left(R_h / r' \right)^2 + q + p(r'); \\ s_{\phi'} &= (q + p_w) \left(R_h / r' \right)^2 + q + p(r'); \\ s_z' &= q + p(r').\end{aligned}\quad (15)$$

Таким образом, в обсаженной скважине напряжения вдоль поверхности перфорационного отверстия постоянны и равны (полагая в (15) $r' = R_h$, $p(r') = p_w$):

$$\begin{aligned}s_{r'} &= 0; \\ s_{\phi'} &= 2(q + p_w); \\ s_z' &= q + p_w.\end{aligned}\quad (16)$$

Из (1), (2) и (14), (15) видно, что распределение напряжений в окрестности перфорационного отверстия в обсаженной скважине в зависимости от относительного расстояния от центра перфорационного отверстия совпадает с распределением напряжений в окрестности необсаженной скважины в зависимости от относительного расстояния от ее центра.

Из выражений (11)-(13) и (16) следует, что концентрация максимального сжимающего эффективного напряжения $\alpha = S_\phi/q$ на части поверхности перфорационного отверстия для необсаженной скважины значительно выше, чем обсаженной. Если при полном осушении скважины ($p_w = 0$) на всей поверхности перфорационного отверстия в обсаженной скважине $\alpha = 2$, то на всей поверхности перфорационного отверстия в необсаженной скважине величина α превосходит 2. На стенке скважины при $r = R$ концентрация максимальна ($\alpha = 5$) и постепенно уменьшается по мере удаления от скважины: при $r = 2R$ $\alpha = 2,75$, при $r = 3R$ $\alpha = 2,33$ и т.д.

Программы испытания образцов. Для испытаний на установке ИСТНН были изготовлены кубические образцы породы из низкопроницаемого коллектора Верхневилюанского нефтегазо-конденсатного месторождения с проницаемостью в диапазоне $0,01\text{--}49,4 \cdot 10^{-3}$ мкм². Юрхский продуктивный горизонт месторождения стратиграфически приурочен к карбонатным отложениям, сложен доломитами и доломитовыми известняками. Пластовое давление близко к гидростатическому 17,5 МПа. Керновый материал для испытаний был отобран с глубины около $h = 1750$ м, на которой абсолютное значение горного давления $|q| = \gamma h$ при средней плотности вышележащих пород $\gamma = 2,3$ г/см³ составляет 40,25 МПа.

В ходе испытаний образцы нагружались по программам, отвечающим напряжениям, возникающим в окрестности скважины для трех конструкций ее забоя: необсаженный ствол, перфорация в обсаженной скважине, перфорация в необсаженной скважине.

Напряжения на контуре необсаженной скважины. Соответствующая программа нагружения образцов показана на рис.4, а и построена на основе соотношений (2), в которых положено $r = R_c$. По оси ординат отложены напряжения s_1 , s_2 , s_3 , прикладываемые в нагружающем узле ИСТНН к образцам по трем осям. Для необсаженной скважины они соответствуют абсолютным значениям напряжений s_z , s_ϕ , s_r , действующим в окрестности скважины (см. рис.1). Точка A на рис.4, а отвечает напряжениям в грунтовом скелете до пробуривания скважины; точка B – состоянию, когда скважина пробурена и давление в ней равно пластовому; точки на отрезке BC – понижению давления на забое скважины (точка C – полное «осушение» скважины).



В ходе эксперимента измеряются компоненты деформации образца по трем осям и его проницаемость в плоскости напластования.

Напряжения вблизи перфорационного отверстия в обсаженной скважине. Если длина перфорационного отверстия достаточно велика, то напряженное состояние, возникающее в окрестности стенок отверстия, аналогично действующему вблизи необсаженной скважины. Поэтому и программы испытаний образцов для этих двух случаев будут одинаковы. Однако если длина отверстия невелика, то для описания напряжений в его непосредственной окрестности можно воспользоваться решением задачи о поле напряжений в окрестности полой сферы, находящейся под действием внутреннего давления p_w и нагруженной вдали всесторонней сжимающей нагрузкой q [36].

В этом случае вблизи кончика перфорационного отверстия действует радиальное напряжение σ_r и два окружных напряжения σ_θ и σ_ϕ . Соответственно грунтовый скелет породы нагружен эффективными напряжениями s_r , s_θ , s_ϕ .

На рис.4, *б* представлена программа нагружения образцов, отвечающая изменению напряжений вблизи кончика перфорационного отверстия при уменьшении давления p_w на забое скважины, s_1 , s_2 , s_3 – напряжения, прикладываемые по осям 1, 2, 3 к образцу в установке ИСТНН. Они отвечают абсолютным значениям напряжений s_ϕ , s_θ , s_r , действующим в кончике перфорационного отверстия $s_r = 0$, $s_\theta = s_\phi = 3/2(q + p_w)$ [36].

Напряжения вблизи перфорационного отверстия в необсаженной скважине. Показано, что напряжения вдоль поверхности перфорационного отверстия в необсаженной скважине меняются в зависимости от расстояния от оси скважины по выражениям (8)-(10). Они максимальны у стенки скважины и минимальны около кончика отверстия. В эксперименте моделировалось изменение напряжения в точке на поверхности перфорационного отверстия, отстоящего от оси скважины на расстояние $r = 1,25R$.

На рис.4, *в* приведена программа испытания образца, построенная на основе соотношений (10). Отложенные на нем напряжения s_1 , s_2 , s_3 отвечают абсолютным значениям напряжений s_z' , s_ϕ' , s_z' , действующим в окрестности перфорационного отверстия.

Результаты испытания образцов. На установке ИСТНН по приведенным программам были испытаны три образца из Верхневилючанского НГКМ. При испытаниях по программам, моделирующим изменение напряжений в окрестности необсаженной скважины (рис.4, *а*) и перфорационного отверстия в обсаженной скважине (рис.4, *б*), образцы в ходе всего опыта деформировались упруго без увеличения проницаемости

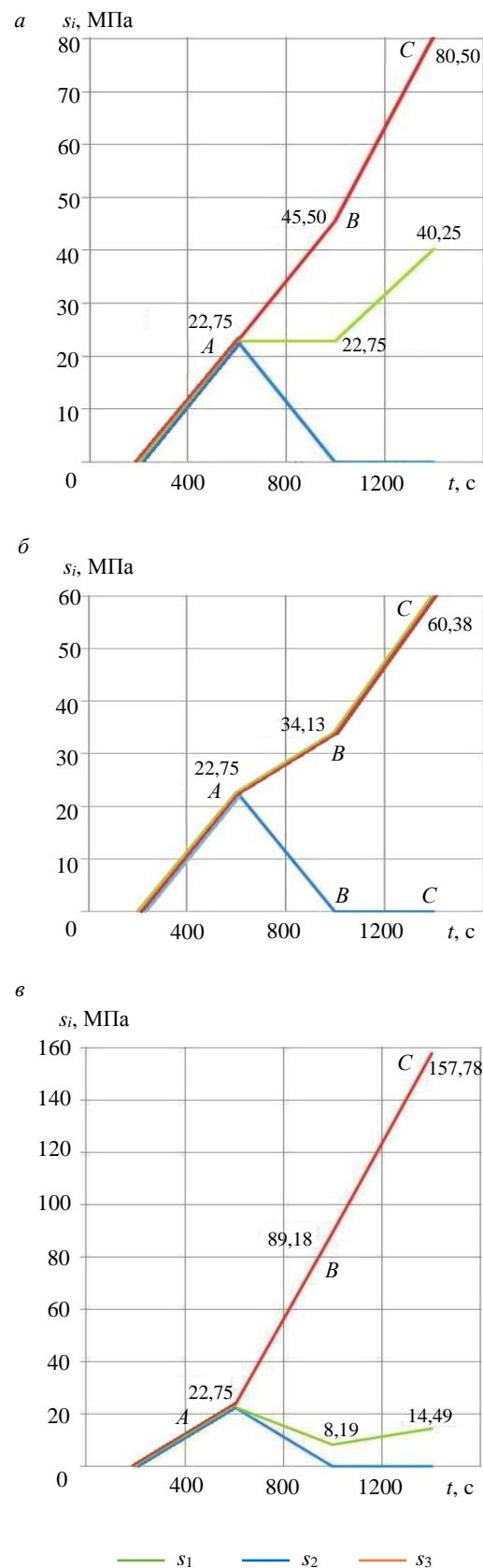


Рис.4. Программа нагружения «необсаженная скважина» (*а*), «перфорационное отверстие в обсаженной скважине» (*б*), «перфорационное отверстие в необсаженной скважине» (*в*)

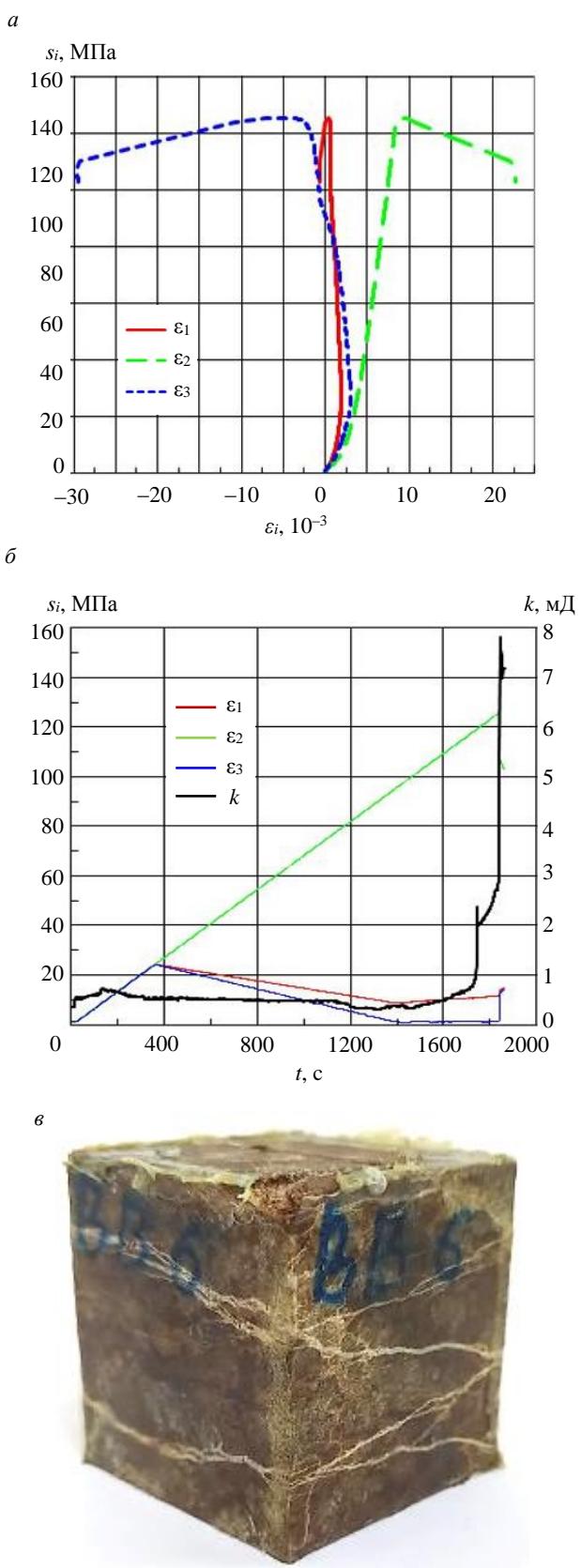


Рис.5. Результаты испытаний образца по программе «перфорационное отверстие в необсаженной скважине»: а – кривые деформирования образца; б – изменение проницаемости образца в ходе опыта; в – фотография образца после испытания

вплоть до напряжений, отвечающих полному осушению скважины. Начальная проницаемость образцов составляла 11,5 и 1,4 мД.

Иная картина наблюдалась при испытании образца по программе «перфорационное отверстие в необсаженной скважине», показанной на рис.4, в и моделирующей изменение напряжения в точке на поверхности перфорационного отверстия, отстоящего от оси скважины на расстояние $r = 1,25R$. На рис.5 приведены кривые деформирования образца в ходе опыта и изменение его проницаемости.

На рис.5, а видно, что при моделировании понижения давления в окрестности перфорационного отверстия в необсаженной скважине образец до напряжения $s_2 = 120$ МПа деформировался упруго, а затем началось его неупругое деформирование и образец разрушился при $s_2 = 126$ МПа. Поскольку прикладываемое к образцу в нагружающем узле установки ИСТН напряжение s_2 соответствует абсолютному значению кольцевого напряжения $|s_\varphi|$ в окрестности перфорационного отверстия, то из выражения (10) имеем $p_w = |q| - (25/98)s_2$. Соответственно, начало неупругого деформирования образца отвечает давлению на забое скважины $p_w = 9,6$ МПа, а разрушение образца – давлению $p_w = 8,1$ МПа.

Начальная проницаемость образца k_0 составила 0,4 мД, и в процессе нагружения образца на этапе его разрушения она увеличилась до 7,8 мД (рис.5, б).

На рис.5, в приведена фотография образца после испытания. На ней хорошо видна образовавшаяся в образце система трещин, которая привела к увеличению его проницаемости.

Выводы. 1. Из практики эксплуатации газовых скважин, особенно на месторождениях с низкопроницаемыми коллекторами, известно, что понижение давления на забое обсаженных скважин с перфорированным забоем практически до их осушки не приводит к росту дебита скважин. Аналогичная картина часто наблюдается и для необсаженных скважин.

Из соотношений (3) и (16) следует, что при полном осушении скважины, т.е. при $p_w = 0$, на поверхности необсаженного ствола, как и перфорационного отверстия в обсаженном стволе, возникают максимальные сжимающие кольцевые напряжения, равные $2q$. Отсутствие при этом увеличения дебита скважин свидетельствует о том, что создание в скважинах с такой



конструкцией забоя глубоких депрессий не приводит к возникновению в пласте напряжений, достаточных для инициации процесса растрескивания и разрушения породы в ПЗП. Иными словами, увеличить продуктивность скважин при такой конструкции забоя с помощью метода НРП не удастся.

В этом случае может помочь предварительная перфорация необсаженного ствола скважины, поскольку при этом, как следует из (10)-(13), в окрестности перфорационного отверстия возникают сжимающие напряжения, значительно превосходящие напряжения при других конструкциях забоя скважины.

Этот вывод подтверждают результаты приведенных в работе экспериментов.

2. Из формул (10)-(13) следует, что существенная концентрация напряжений на поверхности перфорационного отверстия в необсаженной скважине возникает не более, чем на расстоянии 2-3 радиусов скважины от ее оси. При радиусе скважины 75 мм это составляет 150-225 мм от ее оси. Кроме того, зона растрескивания и разрушения породы тем больше, чем больше радиус перфорационного отверстия (15).

Следовательно, оптимальные для реализации метода НРП перфорационные отверстия в необсаженной скважине должны быть достаточно короткими, но широкими. В этом случае эффект от использования НРП будет максимальным.

3. Геомеханический подход с использованием физического моделирования процессов деформирования, разрушения и фильтрации в продуктивных пластах может служить основой для разработки новых эффективных и экологически чистых технологий повышения продуктивности нефтегазовых скважин и увеличения нефтеотдачи пластов с трудноизвлекаемыми запасами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.Д., Жуков В.В., Стрижнев К.В., Черевко С.А. Изучение трудноизвлекаемых и нетрадиционных объектов согласно принципу «фабрика коллектора в пласте» // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 695-704. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.695
2. Yan Song, Zhuo Li, Lin Jiang, Feng Hong. The concept and the accumulation characteristics of unconventional hydrocarbon resource // Petroleum Science. 2015. Vol. 12. P. 563-572. DOI: 10.1007/s12182-015-0060-7
3. Повжик П.П., Сердюков Д.В., Галай М.И., Демяненко Н.А. Увеличение КИН на истощенных залежах с низким пластовым давлением // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2018. № 6 (78). С. 64-68.
4. Галеев Р.Р., Зорин А.М., Колонских А.В. и др. Выбор оптимальной системы разработки низкопроницаемых пластов с применением горизонтальных скважин с множественными трещинами гидроразрыва // Нефтяное хозяйство. 2013. № 10. С. 62-65.
5. Говзич А.Н., Билинчук А.В., Файзуллин И.Г. Опыт проведения многостадийных ГРП в горизонтальных скважинах ОАО «Газпром нефть» // Нефтяное хозяйство. 2012. № 12. С. 59-61.
6. Ганиев Р.Ф., Ганиев О.Р., Украинский Л.Е. Резонансная макро- и микромеханика нефтяного пласта. Интенсификация добычи нефти и повышение нефтеотдачи. М.: Институт компьютерных исследований, 2014. 225 с.
7. Ganiev R.F., Ukrainskiy L.E. Nonlinear wave mechanics and technologies. Wave and oscillatory phenomena on the Basis of High Technologies. Danbury: Begell Hause, 2012. 527 р.
8. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. Увеличение продуктивности нефтяных скважин с помощью метода георыхления // Нефть и газ Евразия. 2000. № 2. С. 90-94.
9. Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K. Directional unloading method is new approach to enhancing oil and gas well productivity // Advances in Oil and Gas Exploration and Production. Switzerland: Springer International Publishing, 2020. P. 155-166. DOI: 10.1007/978-3-030-26608-0_10
10. Serdyukov S., Degtyareva N., Patutin A., Shilova T. Open-hole multistage hydraulic fracturing system // Journal of Mining Science. 2016. Vol. 52. P. 1210-1215. DOI: 10.1134/S1062739116061759
11. Xu D.J., Liao R.Q., Li Z.W. et al. Research on productivity for multi-stage fracturing of horizontal wells // Chemical Engineering Transactions. 2015. Vol. 46. P. 1189-1194. DOI: 10.3303/CET1546199
12. Lecampion B., Desroches J. Simultaneous initiation and growth of multiple radial hydraulic fractures from a horizontal wellbore // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2015. Vol. 82. P. 235-258. DOI: 10.1016/j.jmps.2015.05.010
13. Zhiming Chen, Xinwei Liao, Xiaoliang Zha et al. Performance of multiple fractured horizontal wells with consideration of pressure drop within wellbore // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2016. Vol. 146. P. 677-693. DOI: 10.1016/j.petrol.2016.07.009
14. Jianguang Wei, Saipeng Huang, Guangwei Hao et al. A multi-perforation staged fracturing experimental study on hydraulic fracture initiation and propagation // Energy Exploration & Exploitation. 2020. Vol. 38. Iss. 6. P. 2466-2484. DOI: 10.1177/0144598720914991



15. Jianye Mou, Xuezhi Hui, Lei Wang et al. Experimental Investigation on Tool-Free Multi-Stage Acid Fracturing of Open-Hole Horizontal Wells by Using Diversion Agents // SPE International Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, 16-18 October 2018, Muscat, Oman. OnePetro, 2018. № SPE-191415-18IHFT-MS. DOI: 10.2118/191415-18IHFT-MS
16. Галкин С.В., Кривоцеков С.Н., Козырев Н.Д. и др. Учет геомеханических свойств пласта при разработке многопластовых нефтяных месторождений // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 408-417. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.3
17. Вотинов А.С., Середин В.В., Колычев И.Ю., Галкин С.В. Возможности учета трещиноватости каширо-верейских карбонатных объектов при планировании пропантного гидроразрыва пласта // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 861-871. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.8
18. Буренина И.В., Авдеева Л.А., Соловьев А.А. и др. Совершенствование методического подхода к планированию мероприятий по гидроразрыву пласта на нефтяных месторождениях // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 344-353. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.343
19. Григорьев Г.С., Салищев М.В., Сенчина Н.П. О применимости способа электромагнитного мониторинга гидроразрыва пласта // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 492-500. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.2
20. Galimzyanova A.R., Gataullin R.N., Marfin E.A., Fasfiev B.R. The inflow of liquid to a horizontal well with acoustic impact on the formation // Engineering and Mining Geophysics. 2018. Vol. 2018. P. 1-6. DOI: 10.3997/2214-4609.201800531
21. Marfin E.A., Kadyirov A.I. Increase in Oil Production under Acoustic Stimulation of the Reservoir // European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings. 2021. Vol. 2021. P. 1-5. DOI: 10.3997/2214-4609.202150014
22. Dehshibi R.R., Mohebbi A., Riazi M., Danafar F. Visualization study of the effects of oil type and model geometry on oil recovery under ultrasonic irradiation in a glass micro-model // Fuel. 2019. Vol. 239. P. 709-716. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.11.071
23. Yongjun Hou, Ran Zhou, Xiaokang Long et al. The design and simulation of new downhole vibration device about acoustic oil recovery technology // Petroleum. 2015. Vol. 1. Iss. 3. P. 257-263. DOI: 10.1016/j.petlm.2015.09.001
24. Гамаулдин Р.Н., Кадыров А.И. Интенсификация добычи нефти методами волнового воздействия на продуктивные пласти // SOCAR Proceedings. 2020. № 2. С. 78-90. DOI: 10.5510/OGP20200200434
25. Hossein Hamidi, Amin Sharifi Haddad, Ephraim Wisdom Otumudia et al. Recent applications of ultrasonic waves in improved oil recovery: A review of techniques and results // Ultrasonics. 2021. Vol. 110. № 106288. DOI: 10.1016/j.ultras.2020.106288
26. Taheri-Shakib J., Shekarifard A., Naderi H. et al. Characterization of the wax precipitation in Iranian crude oil based on Wax Appearance Temperature (WAT): Part 1. The influence of electromagnetic waves // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. Vol. 161. P. 530-540. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.12.012
27. Taheri-Shakib J., Shekarifard A., Naderi H. et al. Experimental investigation of the asphaltene deposition in porous media: Accounting for the microwave and ultrasonic effects // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. Vol. 163 P. 453-462. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.01.017
28. Palyanitsina A., Safiullina E., Byazrov R. et al. Environmentally safe technology to increase efficiency of high-viscosity oil production for the objects with advanced water cut // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 3. № 753. DOI: 10.3390/en15030753
29. Shanyue Jiang, Yuening Li, Fang Wang et al. A state-of-the-art review of CO₂ enhanced oil recovery as a promising technology to achieve carbon neutrality in China // Environ Research. 2022. Vol. 210. № 112986. DOI: 10.1016/j.envres.2022.112986
30. Núñez-López V., Gil-Egui R., Hosseini S.A. Environmental and Operational Performance of CO₂-EOR as a CCUS Technology: A Cranfield Example with Dynamic LCA Considerations // Energies. 2019. Vol. 12. Iss. 3. № 448. DOI: 10.3390/en12030448
31. Молчанов А.А., Агеев П.Г. Внедрение новых технологий – надежный путь извлечения остаточных запасов месторождений углеводородов // Записки Горного института. 2017. Vol. 227. С. 530-539. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.530
32. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б. Моделирование геомеханических процессов в окрестности нефтяных и газовых скважин. М.: ИПМех РАН, 2018. 472 с.
33. Darvishpour A., Seifabad M.C., Wood D.A., Ghorbani H. Wellbore stability analysis to determine the safe mud weight window for sandstone layers // Petroleum Exploration and Development. 2019. Vol. 46. Iss. 5. P. 1031-1038. DOI: 10.1016/S1876-3804(19)60260-0
34. Kariev V.I., Kovalenko Yu.F. Triaxial loading system as a tool for solving geotechnical problems of oil and gas production // True Triaxial Testing of Rock. London: CRC Press, 2012. P. 301-310.
35. Ляяв А. Математическая теория упругости. М., Л.: Объединенное научно-техническое издательство НКТП СССР, 1935. 674 с.
36. Тимошенко С.П. Теория упругости. М.: Наука. 1979. 560 с.

Авторы: В.И.Карев, д-р техн. наук, заместитель директора, <https://orcid.org/0000-0003-3983-4320> (Институт проблем механики РАН, Москва, Россия), Ю.Ф.Коваленко, д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, <https://orcid.org/0000-0002-6128-1737> (Институт проблем механики РАН, Москва, Россия), В.В.Химуля, канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, valery.khimi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2116-6483> (Институт проблем механики РАН, Москва, Россия), Н.И.Шевцов, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0792-2262> (Институт проблем механики РАН, Москва, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.