

УДК 532.54 + 532.546

© 2004 г. Е. В. БАИШЕВ, Е. В. ГЛИВЕНКО, В. А. ГУБАРЬ, В. М. ЕНТОВ, Т. Б. ЕРШОВ

О ГАЗО-ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПРИЗАБОЙНУЮ ЗОНУ СКВАЖИН

Эффективность разработки нефтяных месторождений зависит прежде всего от продуктивности скважин, а потому от состояния призабойной зоны пласта. Таким образом, значительная часть современных методов увеличения нефтедобычи состоит в воздействии на призабойную зону. В данной работе исследуется один из таких методов – газо-импульсное воздействие, основанное на обработке призабойной зоны кратковременным нагнетанием газа высокого давления. Цель газо-импульсной обработки состоит в улучшении фильтрационных характеристик продуктивного пласта в окрестности скважины. Динамическое воздействие на пласт описывается системой Френкеля – Био. В статье быстрая волна Френкеля – Био не исследуется, а медленная волна приближается уравнением пьезопроводности.

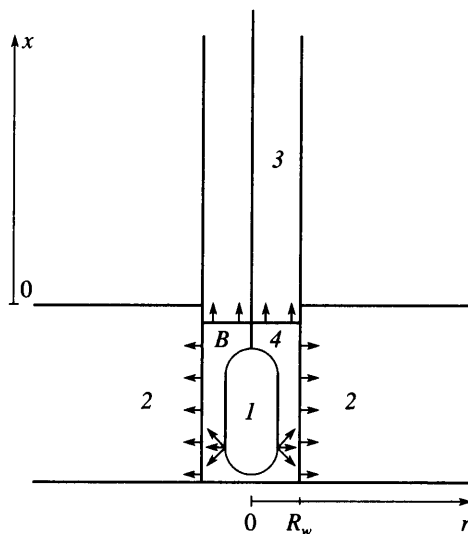
Ключевые слова: Газо-импульсное воздействие, призабойная зона, фильтрационные характеристики, распространение волн в трубах.

1. Метод газо-импульсной обработки. Для газо-импульсной обработки скважина заполняется водой и в нее до продуктивной зоны спускается генератор импульсов давления, который дистанционно управляется с поверхности. В генераторе имеется капсула с газом высокого давления (10–30 кг азота, объем около 0.013 м^3 при давлении от 60 до 100 МПа). Газ выходит из капсулы через отверстия, которые открываются на 0.1–0.2 с, и заполняет зазор между корпусом генератора и внутренней стеной скважины, образуя газовый пузырь с давлением, превышающим пластовое. Предполагается, что под действием этого давления происходит очистка призабойной зоны пласта и улучшение ее фильтрационных свойств.

Описанная разработка защищена патентом Российской Федерации [1]. Опытно-промышленные испытания газо-импульсного воздействия и оборудования для его реализации проводились на нефтяных месторождениях Западной Сибири, Поволжья и Северного Кавказа. Обработке подвергались песчаники и известняки с проницаемостью от 0.017 до 0.3 мкм^2 , пористостью 18–30%, залегающие на глубинах от 1100 до 3200 м. Воздействие во многих случаях было успешным, т.е. дебит низкопродуктивных скважин повышался в несколько раз при длительности эффекта около 6 месяцев. В части обработанных скважин повышение дебита нефти сопровождалось снижением обводненности. Тем не менее, ясное понимание механизма воздействия и факторов, определяющих его эффективность, отсутствует.

В данной работе строится количественная модель процесса и обсуждаются основные факторы, влияющие на его механизм и эффективность.

2. Постановка задачи. Рассмотрим упрощенную модель пласта и скважины (фиг. 1). Будем считать, что горизонтальный нефтяной пласт постоянной толщины h на глубине L полностью вскрыт вертикальной скважиной радиуса R_w без обсадных труб. Скважина заполнена водой, давление на устье равно атмосферному. Пузырь газа, вышедшего из генератора, частично оттесняет жидкость в скважине вверх и в пласт, занимая при этом объем V . Расширяющийся газ граничит с жидкостью в скважине и в



Фиг. 1. Схема модели газо-импульсного воздействия: 1 – генератор, 2 – призабойная зона пласта, 3 – скважина, 4 – пузырь газа

пласте, поэтому для описания явления необходимо рассмотреть совокупную динамику трех механических объектов: пузыря газа, жидкости в скважине и продуктивного пласта около скважины.

Процесс будем считать изотермическим, а газ совершенным, следующим уравнению состояния Клапейрона – Менделеева.

Массовый расход газа из генератора определяется по формуле истечения из затопленного отверстия [2]:

$$Q(t) = \mu_q A \sqrt{\rho_g(t)(p_g(t) - p_b(t))}$$

Здесь μ_q – коэффициент расхода газа, A – суммарная площадь выходных отверстий, $\rho_g(t)$ – плотность газа в генераторе, $p_b(t)$ – давление в пузыре газа, $p_g(t)$ – давление газа в генераторе.

Газ из генератора попадает в скважину, где он вытесняет жидкость и частично фильтруется в пласт. Изменение массы газа в генераторе $M_g(t)$ и пузыре $M_b(t)$ и объема газа в пузыре $V_b(t)$ описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dM_g(t)}{dt} &= -Q(t) \\ \frac{dM_b(t)}{dt} &= Q(t) - 2\pi R_w H_b(t) w(t) \rho_b(t) \\ \frac{dH_b(t)}{dt} &= v(t) \end{aligned} \tag{2.1}$$

Здесь $\rho_b(t)$ – плотность газа в пузыре, $w(t)$ – скорость фильтрации газа в пласт, $H_b(t)$ – высота пузыря газа в скважине, $v(t)$ – скорость движения границы пузыря в скважине. Объем газового пузыря $V_b(t)$ определяется его высотой $H_b(t)$ и геометрическими размерами скважины и генератора.

Неустановившееся течение слабосжимаемой жидкости в скважине в гидравлическом приближении описывается системой [3]

$$\frac{\partial p_w}{\partial t} = -c^2 \rho_w \frac{\partial v_w}{\partial x} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial v_w}{\partial t} = -\frac{\partial p_w}{\partial x} - \frac{\lambda \rho_w v_w^2}{4R_w} - \rho_w g \quad (2.3)$$

Здесь $p_w = p_w(x, t)$ – давление жидкости, $v_w = v_w(x, t)$ – скорость жидкости, ρ_w – плотность жидкости в скважине, g – ускорение свободного падения, λ – коэффициент гидравлического сопротивления труб скважины, c – скорость звука в упругой жидкости в трубе.

До начала газо-импульсного воздействия скорость жидкости v_w во всех сечениях скважины равна нулю, а давление p_w распределено гидростатически, причем на устье скважины оно равно атмосферному; это задает начальные условия для уравнений (2.2) и (2.3). На верхней границе давление равно атмосферному, на нижней – давлению газа в пузыре, а скорость границы газового пузыря равна скорости жидкости на нижней границе. Нижнее граничное условие можно снести в точку с координатой $x = 0$, пренебрегая при этом перемещением границы газа и жидкости, не превышающим нескольких метров:

$$p_w(0, t) = p_g(t); \quad p_w(L, t) = p_a; \quad v(t) = v_w(0, t)$$

В призабойной зоне пласта под действием давления газа возникает нестационарный фильтрационный поток, который в рассматриваемых быстрых процессах можно считать однофазным и плоскорадиальным. Жидкость считается слабосжимаемой и упругой, горная порода – упругой. Тогда распределение давления в пласте описывается уравнением пьезопроводности [4, 5]

$$\frac{\partial p_r(r, t)}{\partial t} = \kappa \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial p_r(r, t)}{\partial r} \right] \quad (2.4)$$

Здесь $p_r = p_r(r, t)$ – давление в пласте; κ – коэффициент пьезопроводности.

Начальное давление во всех точках равно пластовому давлению, а на границе пузыря газа и пластовой жидкости давление равно давлению в газе. Газ проникает в пласт и вытесняет жидкость, поэтому граница находится в призабойной зоне на некотором расстоянии от скважины. Однако оценки показывают, что это расстояние очень мало (несколько сантиметров), поэтому можно снести условие сопряжения на границу скважины и пласта: $p_r(R_w, t) = p_b(t)$.

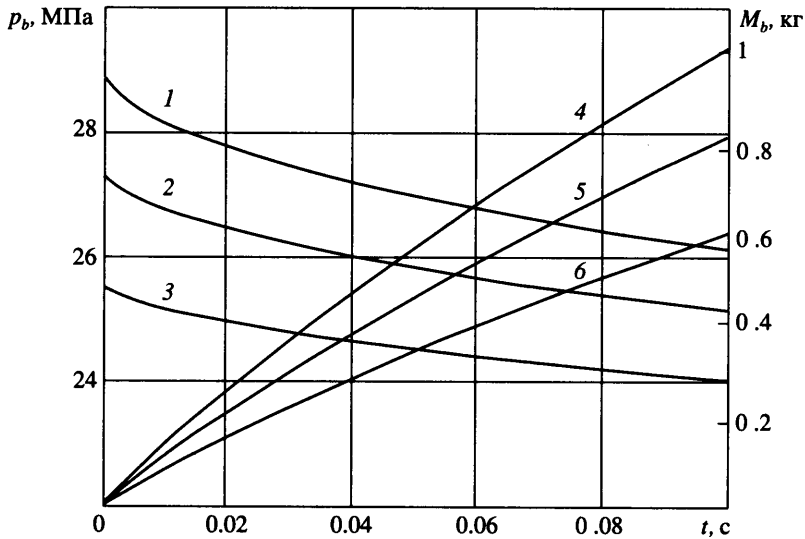
Решение дифференциального уравнения (2.4) с описанными начальными и граничными условиями дает распределение давления в пласте $p_r(r, t)$, с помощью которого можно определить скорость фильтрации на границе скважины и продуктивного пласта:

$$w(t)^0 = \left. -\frac{k_r}{\eta_r} \frac{\partial p_r}{\partial r} \right|_{r=R_w}$$

Здесь k_r – проницаемость продуктивного пласта, η_r – вязкость пластовой жидкости.

Скорость фильтрации на входе в пласт $w(t)^0$ должна быть равна скорости проникновения в пласт газа из скважины $w(t)$ (2.1); при этом вытеснение жидкости газом предполагается поршневым.

Описанная выше модель состоит из трех механических подсистем, отвечающих различным физическими процессам. Подсистемы для продуктивного пласта и для



Фиг. 2. Давление в газовом пузыре (кривые 1–3) и масса свободного газа на стадии истечения (кривые 4–6): 1, 4 – при $p_g(0) = 100$ МПа; 2, 5 – при $p_g(0) = 80$ МПа; 3, 6 – при $p_g(0) = 6$ МПа

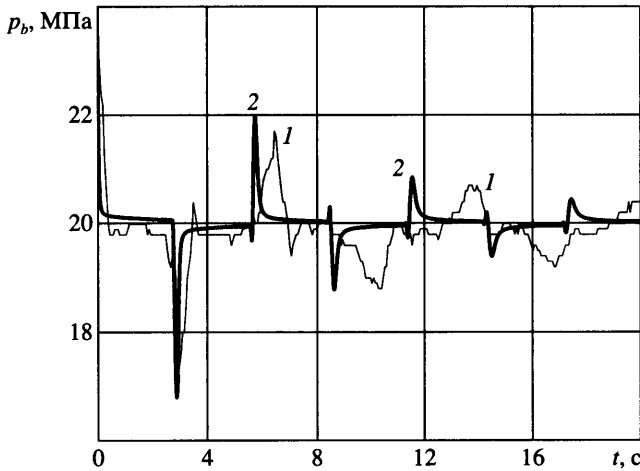
скважины являются системами с распределенными параметрами, причем процессы в скважине описываются с помощью гиперболической системы волновых уравнений, а в пласте – с помощью параболического уравнения пьезопроводности. Эти две системы связаны третьей системой, описывающей эволюцию давления и расширение пузыря газа.

Дифференциальные уравнения решаются с помощью конечно-разностных алгоритмов, учитывающих их специфику. В подсистеме для пласта используется неявная разностная схема в сочетании с методом прогонки [6]. В подсистеме для скважины используется явная разностная схема с введением искусственной вязкости по методу Лакса – Вендроффа [7].

3. Обсуждение результатов. В расчетах за исходные данные принимались параметры используемого в настоящее время генератора импульсов давления.

Первоначально предполагалось, что давление в пузыре газа будет близким к давлению газа в генераторе (60–100 МПа), однако результаты измерений и моделирования показали, что давление в вышедшем газе $p_b(t)$ намного ниже. При воздействии на глубине 2 км и при начальном давлении в генераторе 80 МПа давление в свободном газе находилось в пределах 25–27 МПа. Расчет показал также, что за время воздействия (0.1 с) из генератора выходит не более 10% газа (около 1 кг). Массовый расход газа был около 8 кг/с, и за время воздействия его значение менялось слабо, что объясняется близким к критическому режимом истечения газа из генератора. На фиг. 2 изображены графики давления свободного газа $p_b(t)$ и его массы $M_b(t)$ во время воздействия при различных начальных давлениях в генераторе. Расчеты показали, что высота пузыря газа $H_b(t)$ к моменту окончания выпуска газа составляет ~ 1 м.

После закрытия клапанов генератора свободный газ продолжает расширяться. На фиг. 3 изображена зависимость давления свободного газа $p_b(t)$ от времени. Из графика видно, что после окончания воздействия ($t = 0.1$ с) давление в свободном газе начинает быстро падать, так что при $t = 0.3$ с его давление уже мало отличается от гидростатического.



Фиг. 3. Давление в пузыре газа. 1 – результаты измерений, 2 – расчет

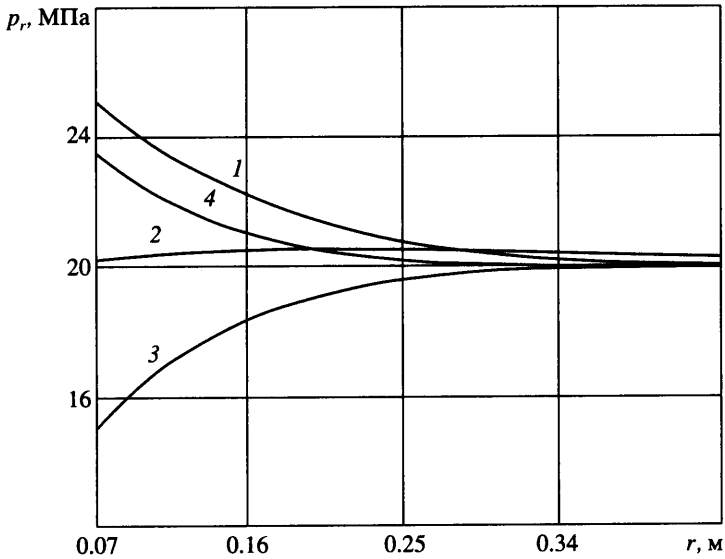
В результате расширения газа в жидкости, заполняющей скважину, образуется волна повышенного давления, которая распространяется в сторону устья со скоростью звука (около 1400 м/с). В скважине происходит гидравлический удар. Волна давления совершает движение от забоя к устью и обратно со сменой знака волны на устье и без смены знака на забое, причем каждый приход волны к забою вызывает кратковременное (0.1–0.2 с) изменение давления в пузыре газа. Волна давления со временем затухает из-за трения в скважине, однако расчеты показывают, что до затухания волна может пройти до устья и обратно 5–6 раз. На фиг. 3 сопоставлены данные замеров давления в зоне воздействия и данные расчета, находящиеся в качественном соответствии друг с другом. Характерные пики давления в свободном газе, происходящие с интервалом примерно в 3 с, являются следствием прихода к забою скважины отраженной волны давления.

Колебания давления в пузыре газа приводят к возмущениям давления в призабойной зоне продуктивного пласта (фиг. 4). (Проницаемость пласта 0.1 мкм², вязкость пластовой жидкости 5 мПа · с.) Около скважины возникают фильтрационные потоки, направленные попеременно в сторону скважины или от нее. Зона распространения возмущений в пласте имеет порядок $2\sqrt{\kappa T}$ (κ – коэффициент пьезопроводности в уравнении (2.4), T – время выпуска газа из генератора).

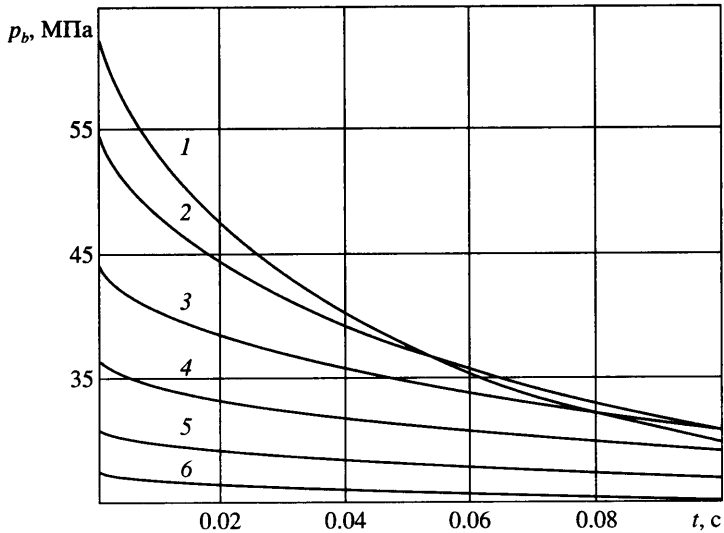
Расчет фильтрации свободного газа в призабойную зону показал, что при существующих параметрах в пласт уходит не более 20% газа, вышедшего из генератора. Это говорит о том, что основная энергия воздействия расходуется не на призабойную зону, а на вытеснение жидкости в скважине.

Из сказанного следует, что газо-импульсная обработка представляет собой фактически серию кратковременных локальных воздействий, проникающих в пласт на глубину порядка $2\sqrt{\kappa T}$. Время между этими воздействиями имеет порядок $2L/c$, что для двухкилометровой скважины составляет ~ 3 с, а длительность их чуть больше времени выпуска газа из генератора (0.1–0.2 с). Жидкость в скважине ограничивает расширение пузыря газа, и волновые процессы в ней оказывают основное влияние на динамику процесса.

Низкое значение давления воздействия $p_b(t)$ по сравнению с начальным давлением в генераторе $p_g(0)$ объясняется малой площадью выходных отверстий. Была проведе-



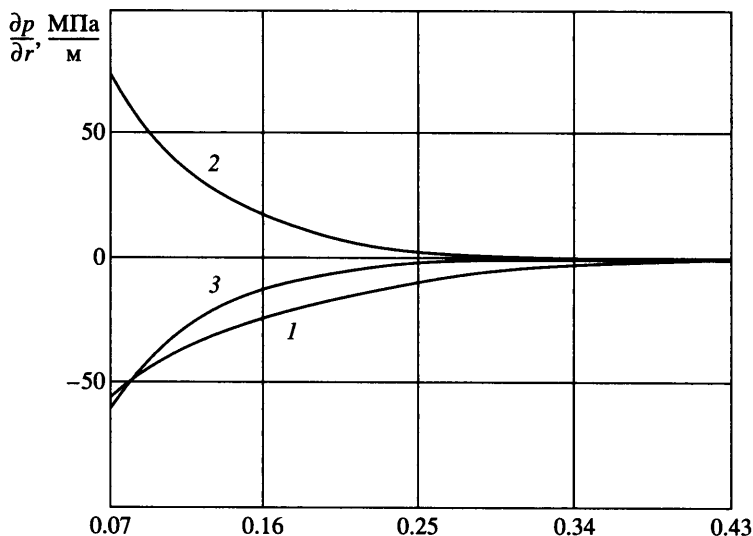
Фиг. 4. Распределение давления в пласте в моменты времени $t = 0.1, 0.3, 3, 6$ с (кривые 1–4)



Фиг. 5. Давление в пузыре газа при диаметрах выходных отверстий $d = 2 \cdot 10^{-2}, 1.5 \cdot 10^{-2}, 1 \cdot 10^{-2}, 7 \cdot 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}, 3.8 \cdot 10^{-3}$ м (кривые 1–6)

на серия расчетов с различными диаметрами выходных отверстий генератора. На фиг. 5 показано давление в пузыре во время выпуска газа. При увеличении диаметра отверстий от $3.8 \cdot 10^{-3}$ до $1.5\text{--}2 \cdot 10^{-2}$ м можно достичь увеличения давления в пузыре газа в 2–2.5 раза.

На начальном этапе исследования правдоподобная гипотеза о механизме положительного эффекта воздействия состояла в том, что импульсы давления формируют в призабойной зоне сеть микротрещин, что и приводит к увеличению продуктивности



Фиг. 6. Градиент давления в пласте в моменты времени $t = 0,1, 3, 6$ с (кривые 1–3)

скважины. Однако анализ результатов расчетов показал, что в скважине возникает волновой процесс, который приводит лишь к кратковременным колебаниям давления на забое скважины, причем превышения забойного давления над пластовым (5–7 МПа) недостаточно для образования трещин. По-видимому, положительный эффект возникает из-за высоких градиентов давления (до 80 МПа/м) в призабойной зоне (фиг. 6); такие градиенты, возможно, способствуют выносу в скважину капиллярно удерживаемой воды или мелких твердых частиц, засоряющих призабойную зону. (Эти частицы могли появиться в процессе бурения и эксплуатации скважины.) Вынос частиц приводит к увеличению проницаемости, что прямо влияет на продуктивность и обводненность скважины. Эта гипотеза представляется сейчас наиболее правдоподобной.

Заключение. С помощью математического моделирования исследован процесс газо-импульсной обработки для определенного типа генератора и диапазона параметров пласта и воздействия. Показано, что процесс представляет собой серию кратковременных воздействий на призабойную зону пласта, где из-за разницы пластового давления и давления в пузыре газа возникают высокие разнонаправленные градиенты давления. Динамика процесса в основном определяется волновыми процессами в стволе скважины, в результате которых на пласт действует серия импульсов повышения и понижения давления.

Высокие градиенты давления в призабойной зоне, возможно, приводят к выносу воды и мелких частиц, засоряющих околоскважинное пространство продуктивного пласта, однако в данной работе оценка очистки призабойной зоны не проводилась.

Расчеты показали, что в настоящее время при газо-импульсной обработке большая часть газа остается в генераторе и не участвует в воздействии, поэтому рекомендовано увеличить размер выходных отверстий генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губарь В.А. Способ обработки призабойной зоны пласта скважин: Патент № 2105875(13) С 1. М.: Российское агентство по патентам и товарным знакам, 1998. (Регистр. номер заявки 96108620/03).

2. Рабинович Е.З. Гидравлика. М.: Недра, 1980. 278 с.
3. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М.: Недра, 1975. 296 с.
4. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. М.: Гостоптехиздат, 1963. 396 с.
5. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 208 с.
6. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. М.: Наука, 1977. 439 с.
7. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир, 1972. 418 с.

Москва

Поступила в редакцию
25.XI.2003