УДК 532.685

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОМ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЗАКАЧКИ В НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ КОЛЛЕКТОРАХ

SIMULATION OF RESEARCH BY METHOD OF SET MODE INJECTION INTO LOW-PERMEABILITY COLLECTORS

Э. З. Валеева, Г. Ф. Асалхузина, А. Я. Давлетбаев
E. Z. Valeeva, G. F. Asalkhuzina, A. Ya. Davletbaev

Башкирский государственный университет, г. Уфа,

Ключевые слова: гидроразрыв пласта, низкопроницаемый коллектор; индикаторная диаграмма; пластовое давление; гидродинамические исследования
Key words: hydraulic fracturing; low-permeability collector; indicator diagram; layer pressure; hydrodynamic research

Разработка низкопроницаемых коллекторов, как правило, осуществляется с проведением гидроразрыва пласта (ГРП) во всех добывающих и нагнетательных скважинах. Проведение гидродинамических исследований в низкопроницаемых коллекторах с протяженными магистральными трещинами гидроразрыва может привести к существенным потерям в добыче и закачке жидкости. На практике активно применяются и развиваются «малозатратные» технологии гидродинамических исследований скважин (ГДИС). Одним из наиболее распространенных методов «малозатратного» вида ГДИС в нагнетательных скважинах является исследования на установившихся режимах закачки (методом построения индикаторных диаграмм). При данной технологии проведения исследований значительно сокращаются потери в добыче и закачке, так как при проведении исследования не требуется останавливать работу скважины.

При проведении ГДИС режимы закачки в нагнетательной скважине, как правило, изменяются путем смены проходного сечения штуцера на устье скважины. Интерпретация исследования может быть выполнена путем построения индикаторной диаграммы (ИД), которая представляет собой графическую зависимость величины расхода закачиваемой жидкости от забойного давления в конце каждого режима закачки [1–3]. По графику ИД можно определить величину пластового давления путем экстраполяции уравнения прямой, которая получается по точкам «расход — давление», до оси давлений, то есть при нулевом значении расхода жидкости. По наклону уравнения прямой можно оценить коэффициент приемистости нагнетательной скважины.

Рассматривается случай нагнетательной скважины с вертикальной техногенной трещиной гидроразрыва. Ввиду симметрии задачи относительно скважины по оси *X* и *Y* рассматривается ¼ расчетной области.

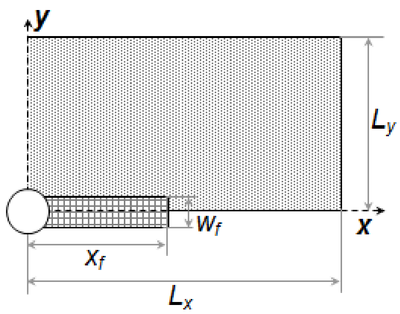

Рис. 1. ***Расчетная область***

Геометрия задачи представлена на рис.1. Полагается, что течение жидкости в пласте и в трещине подчиняется закону фильтрации Дарси. Уравнение для распределения давления в трещине (область $0 \le x \le x_f$, $0 \le y \le w_f/2$) имеет вид

$$\varphi_f \beta_{ft} \frac{\partial P_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{k_f}{\mu}\frac{\partial P_f}{\partial x}\right) + \frac{q}{w_f h}, \qquad (1)$$

где ϕ_f — пористость техногенной трещины, доли ед.; β_{ft} — общая сжимаемость трещины, 1/Па; k_f — проницаемость трещины, м^2; μ — вязкость, Па·с; w_f — раскрытие трещины, м; h — высота продуктивного пласта, м; P_f — давление в трещине, МПа; q — расход жидкости на границе «трещина-пласт», м^2/с; t — время, сут.

Распределение давления в продуктивном пласте описывается уравнением пьезопроводности

$$\varphi_m \beta_{mt} \frac{\partial P_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{k_m}{\mu}\frac{\partial P_m}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{k_m}{\mu}\frac{\partial P_m}{\partial y}\right), \qquad (2)$$

где P_m — давление в пласте (матрице), *МПа*; k_m — проницаемость пласта, м^2; β_{mt} — общая сжимаемость пласта, 1/Па.

Здесь общая сжимаемость в трещинах и в пласте рассчитывается из выражения

$$\beta_{mt} = \beta_m + S_o \cdot \beta_o + S_w \cdot \beta_w, \qquad (3)$$

где β_m — сжимаемость продуктивного пласта, 1/Па; S_o — нефтенасыщенность пласта (в случае длительного нагнетания жидкости в пласт и превышении радиуса заводнения над радиусом исследования скважины, как правило, используется значение остаточной нефтенасыщенности пласта [4]); S_w — водонасыщенность пласта; β_w — сжимаемость воды, 1/Па; β_o — сжимаемость нефти, 1/Па.

Рассматривается случай разработки низкопроницаемых коллекторов с высокой расчлененностью пласта, то есть имеет место чередование песчаных и глинистых пластов. Сжимаемость глин β_c значительно больше, чем сжимаемость песчаника β_r [5], поэтому, сжимаемость продуктивного пласта полагается аддитивной величиной, которая зависит коэффициента песчанистости пласта k_{NTG}

$$\beta_m = k_{NTG} \cdot \beta_r + (1 - k_{NTG}) \cdot \beta_c. \qquad (4)$$

При этом сжимаемость трещины определяется только сжимаемостями трещины и закачиваемой жидкости, которая ее заполняет

$$\beta_{ft} = \beta_f + \beta_w. \qquad (5)$$

Расход жидкости на границе «трещина-пласт» определяется выражением

$$q = -4\int_0^{x_f} \left.\frac{k_m}{\mu}\frac{\partial P_m}{\partial y}\right|_{y=w_f/2} dx - 4\int_0^{w_f/2} \left.\frac{k_m}{\mu}\frac{\partial P_m}{\partial x}\right|_{x=x_f} dy. \qquad (6)$$

В начальный момент времени во всей области задается начальное давление, на границах пласта поддерживается постоянное давление

$$P_m\big|_{t=0} = P_f\big|_{t=0} = P_i, \; P_m\big|_{y=L_y} = P_m\big|_{x=L_x} = P_i, \qquad (7)$$

где P_i — начальное пластовое давление, МПа.

На границах системы «трещина-пласт» уравнения *(1)-(2)* дополнены условиями непрерывности фильтрационного потока, а также условиями равенства давлений:

$$\frac{k_f}{\mu}\frac{\partial P_f}{\partial y}\bigg|_{y=w_f/2} = \frac{k_m}{\mu}\frac{\partial P_m}{\partial y}\bigg|_{y=w_f/2}, \quad P_f\big|_{y=w_f/2} = P_m\big|_{y=w_f/2},$$

$$\frac{k_f}{\mu}\frac{\partial P_f}{\partial x}\bigg|_{x=x_f} = \frac{k_m}{\mu}\frac{\partial P_m}{\partial y}\bigg|_{x=x_f}, \quad P_f\big|_{x=x_f} = P_m\big|_{x=x_f}. \tag{8}$$

На оси *Ox* задано условие симметрии по давлению в системе «трещина — пласт»

$$\frac{\partial P_f}{\partial x}\bigg|_{y=0} = \frac{\partial P_m}{\partial x}\bigg|_{y=0} = 0. \tag{9}$$

На оси *Oy* также задано условие симметрии по давлению

$$\frac{\partial P_m}{\partial y}\bigg|_{x=0} = 0. \tag{10}$$

На первом режиме полагается, что в скважину осуществляется закачки при постоянном давлении, то есть выполняется следующее краевое условие:

$$P_f\big|_{\substack{x=0\\ y=0}} = P_{wf}. \tag{12}$$

После длительной закачки на первом режиме и стабилизации величины расхода в скважине, то есть через t = 100 сут, осуществляется последовательная смена режимов закачки и моделируется гидродинамическое исследование на нескольких режимах закачки со сменой расхода закачиваемой жидкости. Здесь расход жидкости в скважине с трещиной гидроразрыва задается по выражению:

$$(w_f/2)\cdot\frac{k_f}{\mu}\frac{\partial P_f}{\partial x}\bigg|_{x=w_f/2} + (w_f/2)\cdot\frac{k_m}{\mu}\frac{\partial P_m}{\partial y}\bigg|_{y=w_f/2} = \frac{Q_w B_w}{4h}, \tag{13}$$

где B_w — объемный коэффициент закачиваемой жидкости, Q_w — расход закачиваемой жидкости в скважине.

Для оценки применимости результатов ГДИС методом установившихся режимов закачки в нагнетательных скважинах проведено численное моделирование полей давления в скважине с одиночной трещиной гидроразрыва в продуктивном пласте. Расчеты выполнены для различных параметров пласта, параметров трещины и длительностей режимов работы скважины. Задача (1)-(13) решалась конечно-разностным методом по итеративной схеме Ньютона [6]. Моделирование выполнялось при следующих параметрах пласта k_m — 0,1·10^{-15} м^2; 0,5·10^{-15} м^2; 1·10^{-15} м^2; 2,5·10^{-15} м^2; 5·10^{-15} м^2; проницаемостях трещины k_f — 5000·10^{-15} м^2, 250 000·10^{-15} м^2, 50000·10^{-15} м^2, 500 000·10^{-15} м^2, 1 000 000·10^{-15} м^2, 1 500 000·10^{-15} м^2; полудлинах трещины x_f — 10 м, 50 м, 100 м, 125 м, 200 м; раскрытии трещины w_f = 5·10^{-3} м; вязкости жидкости μ = 1,48 Па·с; пористости пласта φ = 0,188; песчанистости пласта k_{NTG} = 0,2; сжимаемости песчаника β_r =5·10^{-10} 1/Па; сжимаемость глины β_c =1·10^{-8} 1/Па; сжимаемости нефти β_o =1.2·10^{-9} 1/Па; сжимаемости закачиваемой жидкости β_w = 5·10^{-10} 1/Па; начальном пластовом давлении P_0 = 25 Мпа; остаточной нефтенасыщенности пласта S_o = 0,41; объемном коэффициенте B_w = 1,005; высоте продуктивного пласта h = 25 м; пористости техногенной трещины φ_f = 0,41.

На рис. 2 представлены 2D распределения давления в системе «трещина-пласт» при x_f =100 м, k_m = 1·10^{-15} м^2, k_f =100·10^{-12} м^2 в моменты времени *а* — 0,1 сут, *б* — 1 сут, *в* — 10 сут, *г* — 100 сут. Из рисунков видно, что с увеличением длительности закачки область повышенного давления распространяется глубже в пласт. При этом эта область вокруг трещины имеет эллиптическую форму. Максимальные абсолютные значения давления имеют место в скважине.

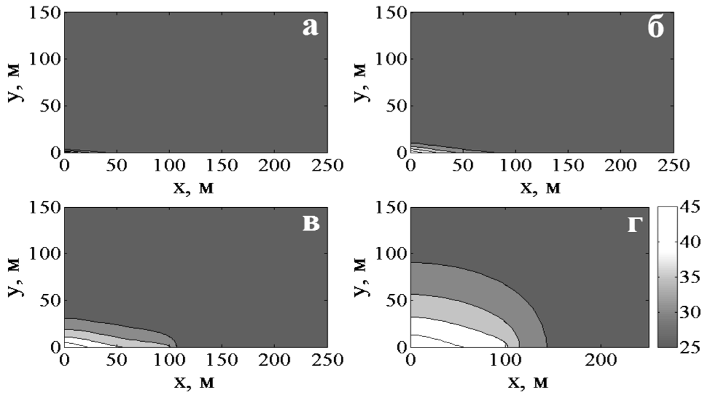

Рис. 2. ***2D распределение давления в системе «трещина – пласт» при*** *$k_m = 1 \cdot 10^{-15}$ м², $k_f = 100 \cdot 10^{-12}$ м², $x_f = 100$ м: а — 0,1 сут, б — 1 сут, в — 10 сут, г — 100 сут*

На рис. 3 приведены кривые изменения давления и расхода закачиваемой жидкости при исследованиях методом установившихся режимов закачки (ИД) для случая $k_m = 1 \cdot 10^{-15}$ м² и $k_m = 5 \cdot 10^{-15}$ м², $x_f = 100$ м, $k_f = 100 \cdot 10^{-12}$ м² при длительности каждого режима закачки по 5 сут. Следует отметить, что с увеличением проницаемости пласта значительно увеличиваются абсолютные значения расхода закачиваемой жидкости в скважину с трещиной гидроразрыва пласта.

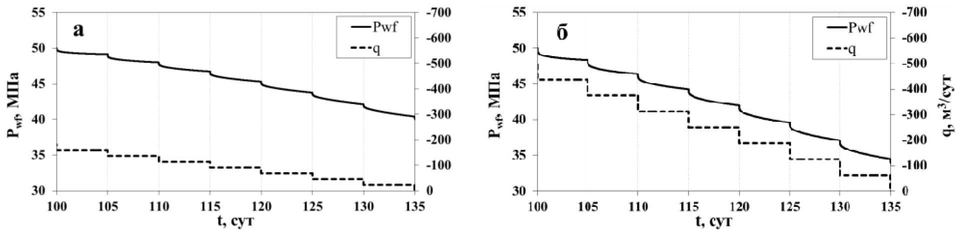

Рис. 3. ***Кривые изменения давления в скважине и расхода закачиваемой жидкости:*** *а — $k_m = 1 \cdot 10^{-15}$ м², б — $k_m = 5 \cdot 10^{-15}$ м²*

На рис. 4 приведены индикаторные диаграммы (зависимости «расход-давление») для случаев а — $k_m = 5 \cdot 10^{-15}$ м², б — $k_m = 1 \cdot 10^{-15}$ м², $k_f = 100 \cdot 10^{-12}$ м², $x_f = 100$ м. Для построения индикаторных диаграмм использовались значения давления в конце каждого режима и расход закачиваемой жидкости из рис. 3. В дальнейшем, эти точки аппроксимировались линейной зависимостью. По точке пересечения с осью давления (то есть при расходе равном нулю) выполнялась оценка величины пластового давления на определенном удалении от трещины (области исследования). Получено, что величина пластового давления по графику ИД при проницаемости пласта $k_m = 1 \cdot 10^{-15}$ м² ($P_{ID} \sim 39{,}14$ МПа) выше, чем при $k_m = 5 \cdot 10^{-15}$ м² ($P_{ID} \sim 32{,}33$ МПа).

Область исследования зависит от коэффициента пьезопроводности пласта и длительности режимов закачки. Для расчета расстояния до области возмущения/исследования использовалось следующее выражение [7]:

$$y_{inv} = 2\sqrt{\frac{k}{\varphi \mu c_t} t} \; . \qquad (14)$$

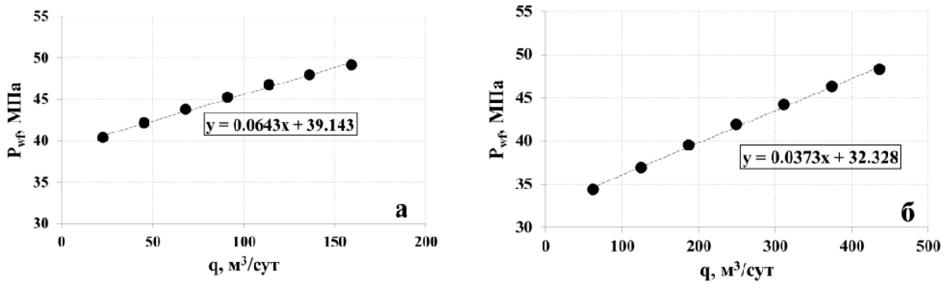

Рис. 4. ***Зависимость давление/расход:*** *а — $k_m = 1{\cdot}10^{-15}$ м^2 и б — $k_m = 5{\cdot}10^{-15}$ м^2*

Выполнено сравнение экстраполированного давления по индикаторной диаграмме с давлением в ячейке численной модели на расстоянии y_{inv} от трещины. При $k_m = 1{\cdot}10^{-15}$ м^2 расстояние до области возмущения/исследования составляет 27 м, а пластовое давление по ИД составляет 39,14 МПа. При этом давление на момент окончания исследования методом ИД в ячейке численной модели составляет 39,1 МПа на расстоянии 27 м от трещины. Для случая с проницаемостью $k_m = 5{\cdot}10^{-15}$ м^2 расстояние до области возмущения/исследования y_{inv} = 59 м, пластовое давление по графику ИД — 32,33 МПа, давление в численной модели — 31,3 МПа, разница в давлениях составляет 1,1 МПа.

Аналогичные расчеты проведены для различных проницаемостей и полудлин трещины, длительности режимов закачки. В таблице обобщены результаты сравнения оценок пластового давления по ИД и давления на расстоянии от границы «трещина-пласт» до области возмущения/исследования.

Результаты сравнения величин пластового давления по графикам «расход — давление» и величине давления в ячейке численной модели на расстояния до области возмущения/исследования по выражению (14)

t, сут	R_{inv}, м	$k_m{*}10^{-15}$, м^2	$k_f{*}10^{-12}$, м^2	x_f, м	P_{inv}, МПа	P_{ID}, МПа	ΔP, МПа
5	8	0,1	100	100	42,3	42,6	0,3
	19	0,5			40,5	40,6	0,1
	27	1			39,1	39,1	0,0
	42	2,5			35,8	35,9	0,1
	59	5			31,3	32,4	1,1
5	27	1	5	100	33,0	33,4	0,4
			50		37,7	37,7	0,0
			250		40,3	40,5	0,2
			500		40,8	41,2	0,4
			1500		41,2	41,5	0,3
			1000		41,2	41,7	0,5
5	27	1	100	10	35,9	34,3	-1,6
				50	39,6	39,1	-0,4
				100	39,1	39,2	0,1
				125	38,2	38,8	0,6
				200	35,6	37,3	1,7
1	27	1	100	100	41,1	42,8	1,7
3					39,9	40,3	0,4
10					37,7	37,3	-0,4
30					35,1	34,6	-0,5
50					33,5	32,8	-0,7

На практике довольно часто возникают случаи отклонения от технологии проведения исследования методом ИД. Как правило, в промысловых условиях все нагнетательные скважины работают при максимальных давлениях закачки и расходах, поэтому, при проведении исследований ограничение закачки, как правило, начинается с максимального расхода закачки жидкости. Далее должно быть осуществлено последовательное пошаговое снижение расхода/давления закачки. Однако в отдельных случаях эта последовательность может быть нарушена. Так, после длительной закачки на первом режиме с максимальным расходом может быть осуществлен переход на режим с минимальным расходом/давлением закачки. Таким образом, на практике может быть нарушена технология проведения исследования из-за изменений последовательности переходов с режима на режим. В этом случае, можно получить кривые изменения давления и расхода, которые представлены на рис. 5. Из рисунка видно, что давление после перехода с режима с максимальным расходом на режим с наименьшим расходом не стабилизировалось и абсолютные давления в скважине могут быть выше, чем на следующем режиме с большей величиной расхода жидкости.

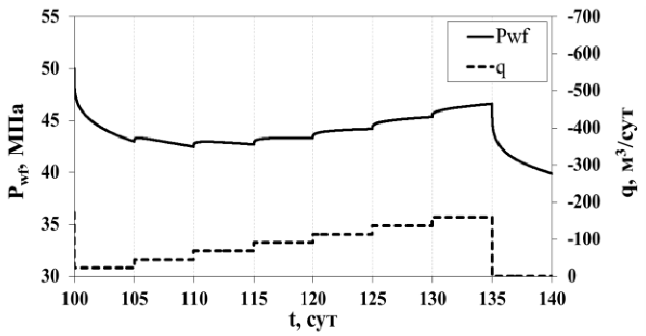

Рис. 5. ***Кривые изменения давления в скважине и расхода закачиваемой жидкости при*** $k_m = 1\cdot10^{-15}$ ***м²***, $k_f = 100\cdot10^{-12}$ ***м²***, $x_f = 100$ ***м*** *(случай отклонения от технологии проведения ИД)*

В подобных случаях отдельные режимы, на которых не была достигнута стабилизация давления, могут быть исключены из анализа (рис. 6). При этом стоит учитывать, что уменьшение количества режимов, принятых к анализу на графике ИД, приводит к снижению достоверности оценки величины пластового давления. При подобных нарушениях последовательности режимов закачки следует увеличить длительность «переходного» режима закачки, дождаться стабилизации давления после перехода с максимального на минимальный режим закачки и затем последовательно проводить переход на следующие режимы закачки жидкости.

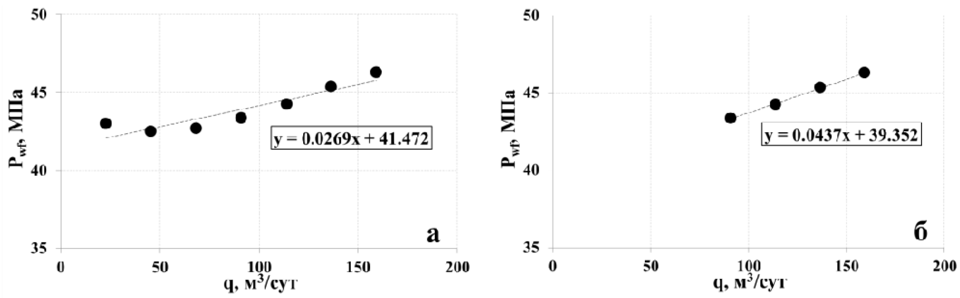

Рис. 6. ***Зависимость давление/расход:*** *а — все режимы приняты к анализу, б — к анализу приняты только режимы со стабилизацией давления*

Численные расчеты показали, что в низкопроницаемых коллекторах $k_m \sim 1\cdot10^{-15}$ м² увеличение длительности «переходного» режима должно быть существенным. Так, на примере рис. 7 длительность увеличена до 15 суток. Однако, даже этой длительности не достаточно для того, чтобы кривая изменения давления стабилизировалась, и был получен установившийся/стабильный режим закачки.

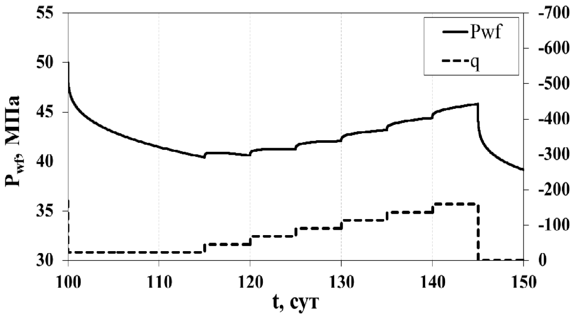

Рис. 7. ***Кривые изменения давления в скважине и расхода закачиваемой жидкости при** $k_m = 1\cdot10^{-15}$ м^2, $k_f = 100\cdot10^{-12}$ м^2, $x_f = 100$ м (случай увеличения Длительности «переходного» режима при проведении ИД)*

При построении индикаторной диаграммы первые два режима не использовались (рис. 8), так как стабилизации давления на них не получено.

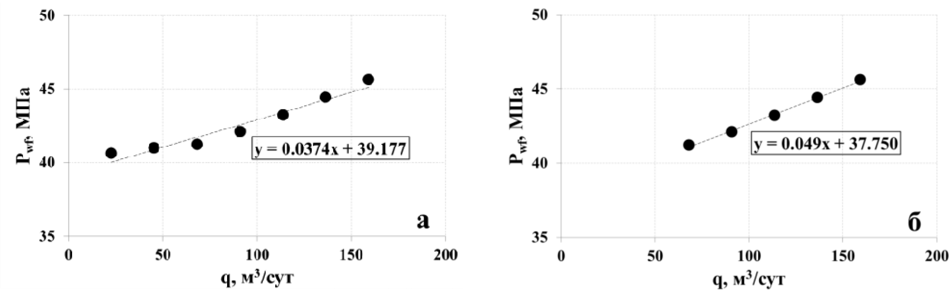

Рис. 8. ***Зависимость давление/расход при** $k_m = 1\cdot10^{-15}$ **м^2**, $k_f = 100\cdot10^{-12}$ **м^2**, x_f **= 100 м:** а — все режимы приняты к анализу, б — к анализу приняты только режимы со стабилизацией давления*

На практике часто имеют место случаи отклонения от плана исследовательских работ, при которых нарушается последовательность смены режимов закачки. Например, штуцер, установленный на скважине, может быть «размыт», то есть диаметр проходного сечения штуцера резко увеличивается из-за трещин и других причин. На рис. 9 приведены результаты моделирования такого случая. В ходе исследования и последовательном понижении расхода закачиваемой жидкости имеет место нарушение последовательности и осуществлен переход на режим с большей величиной расхода, чем планировалось.

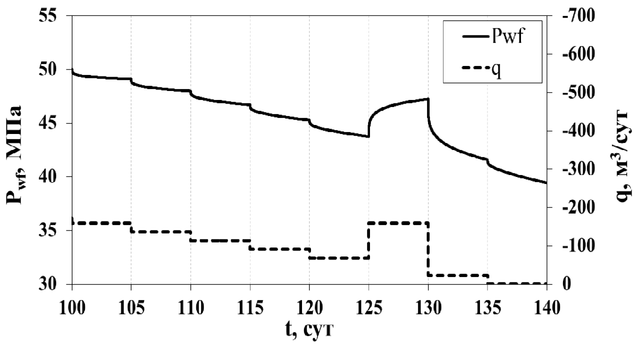

Рис. 9. ***Кривые изменения давления в скважине и расхода закачиваемой жидкости при** $k_m = 1\cdot10^{-15}$ м^2, $k_f = 100\cdot10^{-12}$ м^2, $x_f = 100$ м (случай нарушения последовательности режимов при проведении ИД)*

На рис. 10 а приведены примеры анализа всех режимов закачки и пример анализа ИД (рис. 10 б) при котором режим закачки с нарушением последовательности и последующий режим исключены. Очевидно, что эти два режима закачки необходимо исключать из анализа графика ИД.

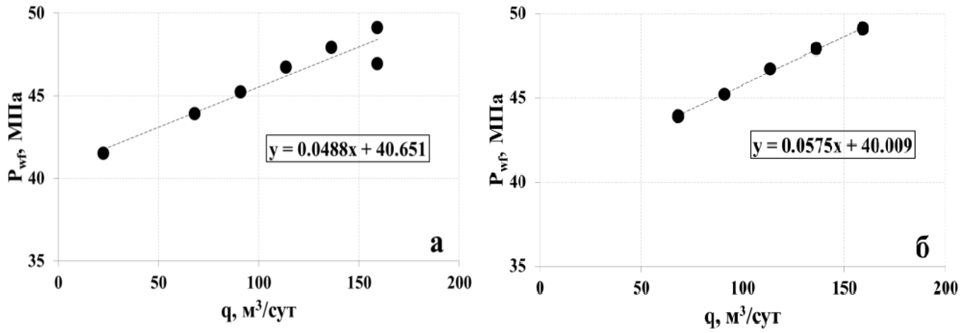

*Рис. 10. **Зависимость давление/расход (график ИД):** а — все режимы приняты к анализу, б — режим с нарушением последовательности исключен*

Выводы

1. В случаях отклонения от технологии проведения исследований необходимо к анализу принимать только те режимы работы скважины, на которых давление стабилизировалось, и исключать из анализа режимы с нарушенной последовательностью.
2. При смене режимов закачки при проведении ГДИС методом ИД должна соблюдаться последовательность: либо строго в сторону увеличения расхода/давления закачки, либо строго в сторону уменьшения.
3. В тех случаях, когда режим работы скважины перед проведением исследования изменился, необходимо дождаться стабильного установившегося режима закачки и повторно планировать последовательные переходы на новые режимы закачки с текущего установившегося режима закачки.

Список литературы

1. Davletbaev A., Ozkan E., Slabetskiy A., Nikishov V., Usmanov T. Testing and Analysis of Wells Producing Commingled Layers in Priobskoye Field // SPE 117411. 2008.
2. Davletbaev A., Baikov V., Ozkan E., Garipov T., Usmanov T., Asmandiyarov R., Slabetskiy A., Nazargalin E. Multi-Layer Steady-State Injection Test with Higher Bottomhole Pressure than the Formation Fracturing Pressure // SPE 136199. 2010.
3. Ипатов А. И., Кременецкий М. И. Геофизический и гидродинамический контроль разработки месторождений углеводородов. – М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных исследований, 2005. – 780 с.
4. Гидродинамические исследования скважин: Анализ и интерпретация данных. / Деева Т. А., Камартдинов М. Р., Кулагина Т. Е. [и др.]. – Томск, 2009. – 240 с.
5. Добрынин В. М. Деформации и изменения физических свойств коллекторов нефти и газа. – М.: Недра, 1970. – 239 с.
6. Aziz K., Settari A. Petroleum reservoir simulation // York: Elsevier Applied Science Publishers. 1979.
7. Басниев К. С., Кочина И. Н., Максимов В. М. Подземная гидромеханика: учебник для вузов. – М.: Недра. 1993. – 416 с.

Сведения об авторах

Валеева Эльвира Зульфаровна, *студентка кафедры прикладной физики, Башкирский государственный университет, г. Уфа, тел. 89625461551, e-mail: kafedrapf@rambler.ru*

Асалхузина Гузяль Фаритовна, *аспирант кафедры прикладной физики, Башкирский государственный университет, г. Уфа, тел. 89178053644, e-mail: guzyal.asalkhuzina@ gmail.com*

Давлетбаев Альфред Ядгарович, *к. ф.-м. н., доцент кафедры прикладной физики, Башкирский государственный университет, г. Уфа, тел. 89174812699, e-mail: davletbaevay@rambler.ru*

Information about the authors

Valeeva E. Z.*, student of Department of Applied Physics, Bashkir State University, Ufa, tel. 89625461551, e-mail: kafedrapf@rambler.ru*

Asalkhuzina G. F.*, Graduate student of Department of Applied Physics, Bashkir State University, Ufa, tel. 89178053644, e-mail: guzyal.asalkhuzina@ gmail.com*

Davletbaev A. Ia., *Candidate of Physics and Mathematics Sciences, associate professor of Department of Applied Physics, Bashkir State University, Ufa, tel. 89174812699, e-mail: davletbaevay@rambler.ru*