

**Арте́м Вале́рьевич КИБИРЕВ** —  
аспирант кафедры моделирования физических процессов и систем  
*kibirev\_Artem@mail.ru*;

**Константи́н Михаи́лович ФЕДОРОВ** —  
зав. кафедрой моделирования физических процессов и систем,  
доктор физико-математических наук, профессор  
*kfedorov@utmn.ru*

Тюменский государственный университет

УДК 532,5.031

## **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗАКОЛОННОГО ПЕРЕТОКА ВОДЫ**

### **ANALYSIS OF AVAILABILITY WELL TEST INFORMATION FOR BEHIND-THE-CASING FLOW IDENTIFICATION**

**АННОТАЦИЯ.** В статье рассмотрены теоретические основы интерпретации гидродинамических исследований скважин для выявления заколонных перетоков.

**SUMMARY.** The high water oil ratio of many oil fields developed in Russia is a significant and wide-spread problem in oil industry. The given article considers the theory of well test information interpretation for the identification of behind-the-casing flow.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА.** Заколонный переток, обводненность, интерпретация, гидродинамические исследования скважин.

**KEY WORDS.** Behind-the-casing flow, watercut, interpretation, well test.

Обводненность продукции большинства разрабатываемых месторождений России является серьезной и распространенной проблемой нефтяной промышленности. Ежегодные расходы на подъем, сепарацию и утилизацию воды, сопутствующие добыче углеводородного сырья на месторождениях в поздней стадии разработки, составляют значительную долю в цене добываемой нефти.

Известно достаточное количество материалов и методов борьбы с обводнением продукции, однако их эффективность остается невысокой. Это связано с недостаточным пониманием причин поступления воды в добывающие скважины и, как следствие, с неправильным подбором материалов и технологий ремонтно-изоляционных работ (РИР). Достоверная диагностика причин обводнения продукции является ключом к успешному и качественному ремонту скважин.

Рассмотрим основные механизмы обводнения продукции скважин. Главными причинами поступления воды в добывающие скважины можно назвать негерметичность обсадного кольца, поступление воды из близлежащих водоносных горизонтов, не являющихся объектами разработки; конусообразование (прорыв) воды в интервал перфорации из подошвы пласта; опережающий прорыв закачиваемой в пласт воды по высокопроницаемым каналам и пропласткам.

Задача выявления механизма обводнения продукции скважин является некорректной, поэтому для выяснения его причин необходим целый комплекс мероприятий. В решении этой задачи можно выделить следующие направления: применение геофизических методов контроля технического состояния



скважин; проведение трассерных исследований, гидродинамических исследований в скважине, исследований химического состава пластовых вод, а также графоаналитического анализа промысловых данных (динамика обводненности продукции, дебиты нефти и воды).

В работе рассмотрены теоретические основы интерпретации гидродинамических исследований скважин для выявления заколонных перетоков, проводимые М.И. Кременецким и его коллегами [1], в основе которых лежит обработка кривых восстановления давления. Типовые кривые изучаются с использованием численного моделирования заколонных перетоков в программном пакете Eclipse. В этих исследованиях показана потенциальная информативность такого рода методов, однако проведение исследований в механизированных скважинах не позволяет с достаточной степенью точности получить сведения о зоне, непосредственно примыкающей к скважине, а, следовательно, и продиагностировать характеристики трещин или распределение в ней водонасыщенных зон.

Более длительным по времени выполнения является метод индикаторных диаграмм, в котором определяется продуктивность нескольких режимов работы скважины и строится зависимость дебита скважины по жидкости от депрессии на пласт (перепада пластового и забойного давлений). Основная идея применения метода индикаторных диаграмм для диагностики заколонных перетоков заключается в следующем. Для нефтяных пластов на практике при характерных значениях депрессий в призабойной зоне скважин наблюдается ламинарное течение жидкостей, подчиняющееся закону Дарси. Однако в трещинах, связывающих продуктивный пласт и расположенный рядом водонасыщенный пласт, даже небольшие расходы жидкости вызывают переход ламинарного течения в турбулентный режим [2]. При увеличении депрессии на пласт поток из продуктивного пласта остается ламинарным, то есть дебит этого пласта меняется пропорционально депрессии. Поток воды, который поступает в перфорированный интервал скважины из трещины, является турбулентным и растет с депрессией гораздо медленнее. Таким образом, суммарный поток, поступающий в скважину, во-первых, будет отклоняться от линейного закона (индикаторная диаграмма отклоняется от прямой), а во-вторых, обводненность продукции должна снижаться.

Для теоретического обоснования этой идеи и оценки степени проявления описанных эффектов была разработана математическая модель процесса. Рассмотрим упрощенную ситуацию, когда перфорированный интервал гидродинамически связан с продуктивным пластом, а через трещины в обсадном кольце скважины — с водоносным пластом (рис. 1).

Замеры забойного давления при проведении данного гидродинамического исследования проводятся после установления стационарного притока жидкости. В этом случае приток жидкости из продуктивного интервала описывается обобщенной формулой Дюпюи [3]:

$$Q_1 = \frac{2\pi k_1 h_1 (p_{k1} - p_{w1})}{\mu_1 [\ln(R_k / R_w) + s_1 + s_* - 0,5]}, \quad (1)$$

где  $p_{w1}$  — давление на забое скважины;  $p_{k1}$  — среднее давление в окрестности (с радиусом  $R_k$ ) скважины в продуктивном пласте;  $r_w$  — радиус скважины;  $s_*$  — скин за счет загрязнения призабойной зоны продуктивного пласта;  $s_1$  — скин факторы за счет слия-



ния потоков в призабойной зоне продуктивного пласта;  $k_1, h_1, \mu_1$  — соответственно проницаемость, мощность продуктивного пласта и вязкость флюидов в нем.

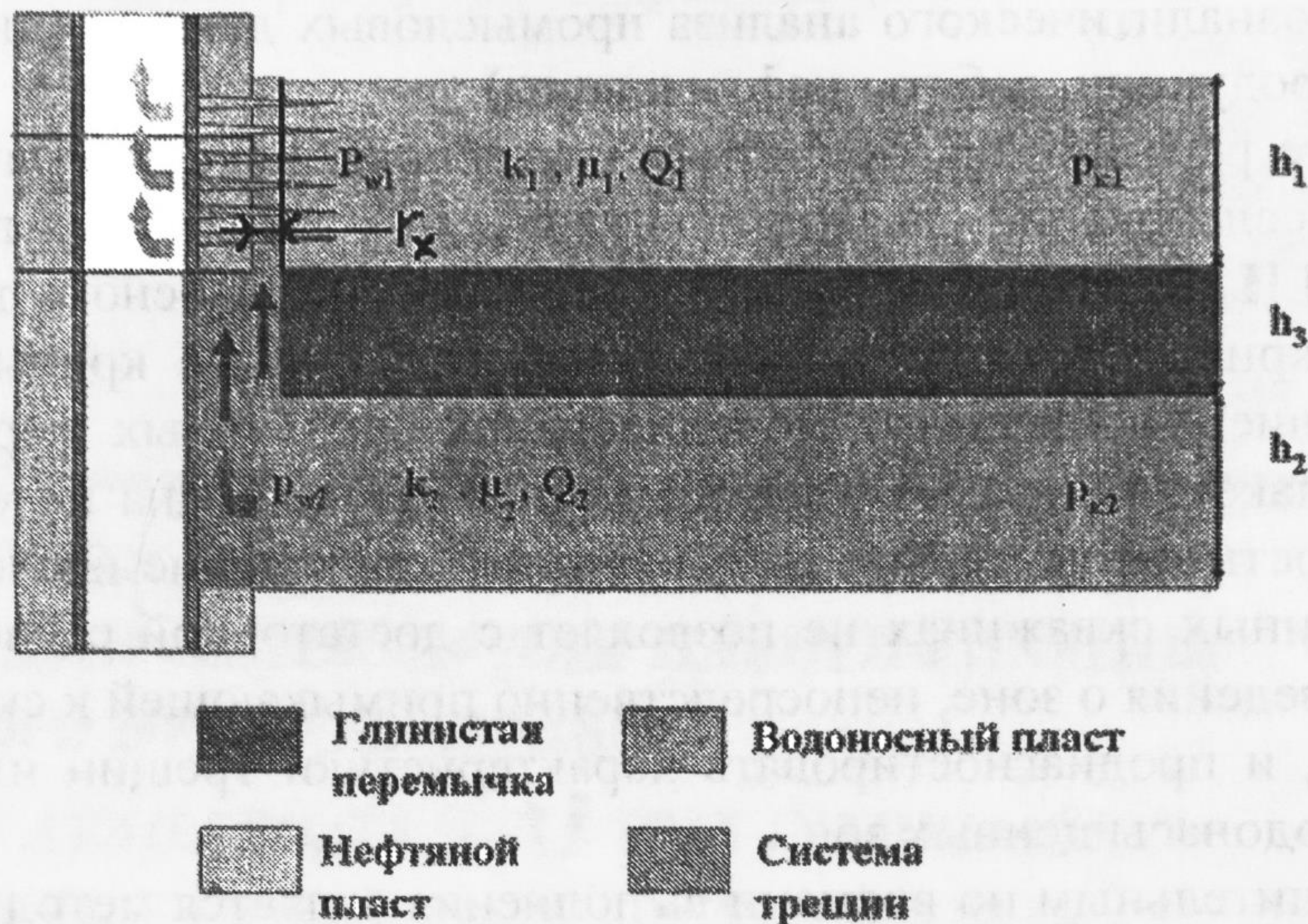


Рис. 1. Схема работы добывающей скважины при наличии заколонного перетока

Формула справедлива для притока жидкости из водонасыщенного пласта:

$$Q_2 = \frac{2\pi k_2 h_2 (p_{k2} - p_{w2})}{\mu_2 [\ln(R_k / R_w) + s_2 - 0,5]}, \quad (2)$$

где  $R_w$  — радиус скважины (внешний радиус цементного кольца);  $R_k$  — радиус контура питания;  $k_2$  — проницаемость пласта;  $\mu_2$  — эффективные значения вязкости флюидов, поступающих из соответствующих пластов;  $p_{k2}$  — среднепластовые давления;  $p_{w2}$  — забойные давления; нижние индексы 1 и 2 обозначают соответствующий параметр в продуктивном и водонасыщенном пластах.

При смешивании двух потоков в призабойной зоне продуктивного пласта образуется дополнительное гидравлическое сопротивление. Для моделирования этого сопротивления используются фазовые проницаемости. Тогда дебиты воды и нефти в области смешивания потоков будут пропорциональны своим фазовым проницаемостям. Учитывая, что гидравлическое сопротивление является аддитивной величиной, то уравнения (1) и (2) преобразуются следующим образом:

$$Q_1 = \frac{2\pi k_1 h_1 (p_{k1} - p_{w1})}{\mu_1 \left[ \frac{1}{f_n(S_x)} \ln(r_x / R_w) + \ln(R_k / r_x) + s_* - 0,5 \right]}, \quad (3)$$

$$Q_2 = \frac{2\pi k_2 h_2 (p_{k2} - p_{w2})}{\mu_2 \left[ \frac{1}{f_e(S_x)} \ln(r_x / R_w) + \ln(R_k / r_x) - 0,5 \right]}, \quad (4)$$

где  $f_n(S_x), f_e(S_x)$  — фазовые проницаемости по нефти и воде соответственно,  $r_x$  — область смешивания потоков.

Для простоты будем считать, что из продуктивного пласта поступает только нефть, а из водонасыщенного — только вода. Предположим, что обводненность продукции можно связать с текущей насыщенностью по воде по следующей формуле:



$$W = \frac{S - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{or}}, \quad (5)$$

где  $S$  — текущая насыщенность воды,  $S_{wr}$  — остаточная насыщенность воды,  $S_{or}$  — остаточная насыщенность нефти.

Чтобы найти связь между фазовыми проницаемостями и обводненностью, воспользуемся эмпирическими формулами Чень Чжун-сяна [4]:

$$f_w = \left( \frac{S - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \right)^{3,5} = \left( W - \frac{WS_{or}}{1 - S_{wr}} \right)^{3,5}, \quad (6)$$

$$f_n = \left( \frac{1 - S - S_{or}}{1 - S_{or}} \right)^{2,8} (1 + 2,4S) =$$

$$= \left( 1 - W - \frac{S_{wr}(1 - W)}{1 - S_{or}} \right)^{2,8} (1 + 2,4(W(1 - S_{or} - S_{wr}) + S_{wr})). \quad (7)$$

Графически формулы (6), (7), при  $S_{or}=0,15$ ,  $S_{wr}=0,2$ , представлены на рис. 2.

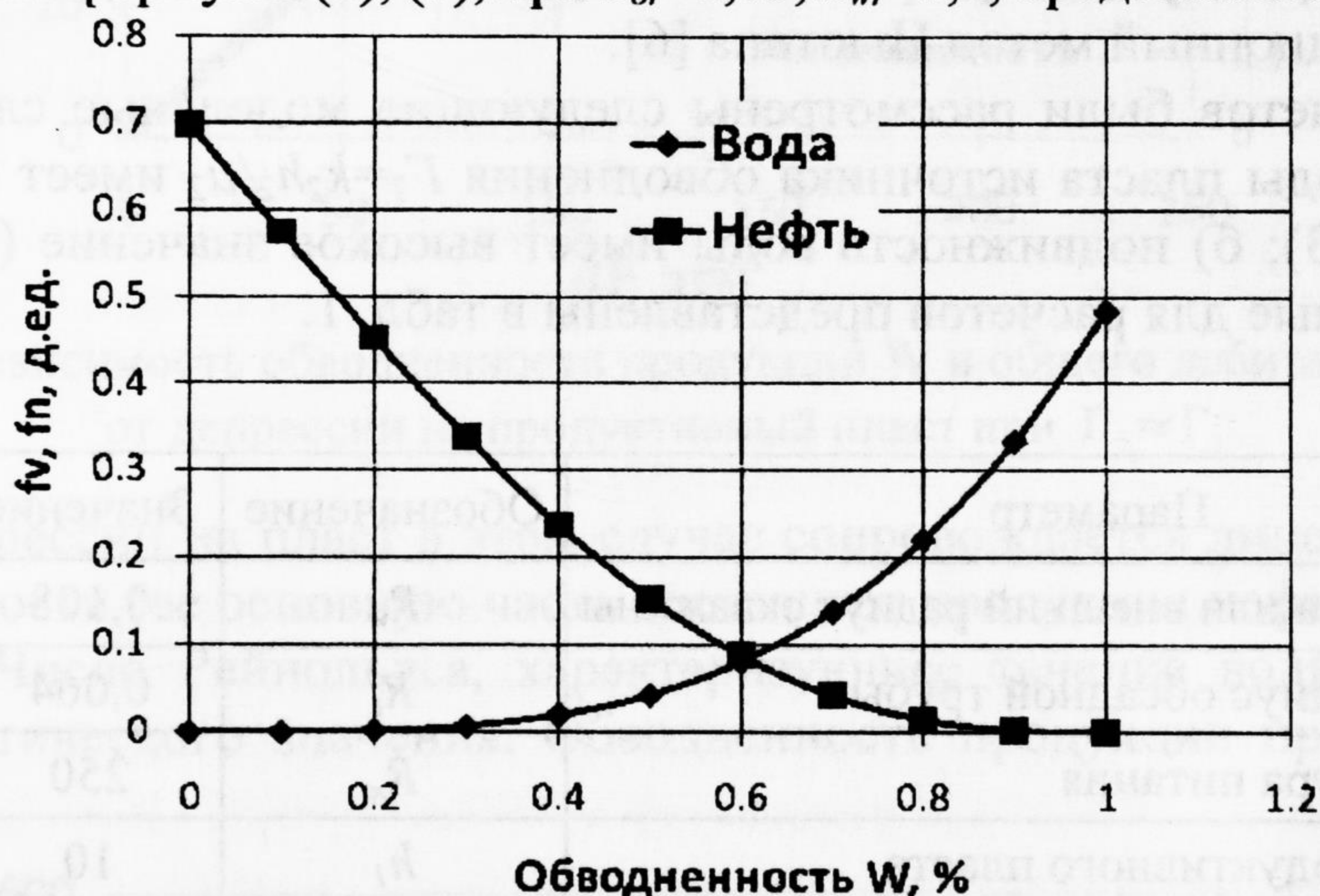


Рис. 2. Зависимость фазовых проницаемостей от обводненности

Будем считать, что по всей высоте перемычки между пластами в цементном камне образовалась кольцевая трещина с эффективной шириной  $\delta$ , прилегающая к обсадной колонне. При установившемся режиме течение в кольцевой трещине можно описать уравнением Дарси-Вейсбаха [2]:

$$p_{w2} - p_{w1} = \lambda (\delta) \frac{h_3 \rho_2 Q_2^2}{2\delta 2S_3^2}, \quad (8)$$

где  $S_3 = \pi(R^2 - R_l^2)$  — площадь сечения кольцевой трещины;  $R = R_l + \delta$  — внешний радиус трещины;  $R_l$  — внешний радиус обсадной трубы;  $Q_2/S_3$  — среднemasсовая скорость течения в трещине;  $\lambda$  — коэффициент гидравлического сопротивления кольцевой трещины.

Ламинарные течения в кольцевой трещине реализуются при числах Рейнольдса, таких, что  $Re < 2000$ , где

$$Re = \frac{2\rho_2 Q_2 \delta}{\mu_2 S_3}. \quad (9)$$



Турбулентные течения реализуются при числах  $Re > 2000$ , а коэффициент гидравлического сопротивления вычисляется по формуле Никурадзе [5]

$$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}}. \quad (10)$$

С учетом выражений (8)-(10) уравнение (4) преобразуется следующим образом:

$$Q_2 = \frac{2\pi k_2 h_2 (p_{k2} - p_{w1})}{\mu_2 \left[ \frac{1}{f_s(S_x)} \ln(r_x / R_w) + \ln(R_k / r_x) - 0,5 \right] + \frac{Q_2 \lambda l \rho_s k_2 h_2}{2\delta \pi (2R_l \delta + \delta^2)^2}}, \quad (11)$$

где  $l = h_3$  — длина трещины.

Таким образом, представленная система уравнений (3), (6), (7), (9), (10) и (11) является замкнутой и позволяет при известных фильтрационных характеристиках пластов, пластовых давлениях найти взаимосвязь между депрессией, суммарным дебитом скважины, обводненностью и построить индикаторную диаграмму. Для разрешения полученной системы уравнений применялся итерационный метод Ньютона [6].

Для расчетов были рассмотрены следующие модельные случаи: а) подвижность воды пласта источника обводнения  $\Gamma_2 = k_2 h_2 / \mu_2$  имеет низкое значение ( $k_2 h_2 < 0,3$ ); б) подвижность воды имеет высокое значение ( $k_2 h_2 > 0,3$ ). Исходные данные для расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Обозначение	Значение	Размерность
Радиус долота или внешний радиус скважины	$R_w$	0,108	м
Внешний радиус обсадной трубы	$R_l$	0,064	м
Радиус контура питания	$R_k$	250	м
Толщина продуктивного пласта	$h_1$	10	м
Толщина водоносного пласта	$h_2$	10	м
Толщина перемычки между пластами	$l$	10	м
Проницаемость продуктивного пласта по нефти	$k_1$	0,2	мкм <sup>2</sup>
Проницаемость водоносного пласта по воде	$k_2$	0,02; 0,1	мкм <sup>2</sup>
Среднепластовое давление в продуктивном пласте	$P_{k_1}$	201	атм.
Среднепластовое давление в водонасыщенном пласте	$P_{k_2}$	211	атм.
Плотность воды	$\rho$	1000	кг/м <sup>3</sup>
Вязкость флюида в продуктивном пласте	$\mu_1$	1	мПа·с
Вязкость воды в водоносном пласте	$\mu_2$	5	мПа·с
Скин фактор в продуктивном пласте	$S^*$	0	—
Приведенная толщина кольцевой трещины	$\delta$	1,0	мм



Первый вариант расчетов представляет не очень актуальный случай, когда подвижность воды в водоносном горизонте представляет собой небольшие величины. При наличии гидродинамической связи пластов по трещинам в цементном кольце дебит избыточной воды из водоносного горизонта незначителен. Размеры трещины также не играют важной роли, так как дебит избыточной воды определяется ее подвижностью в пласте, а не в трещине. Результаты расчетов этого варианта сведены на рис. 3.

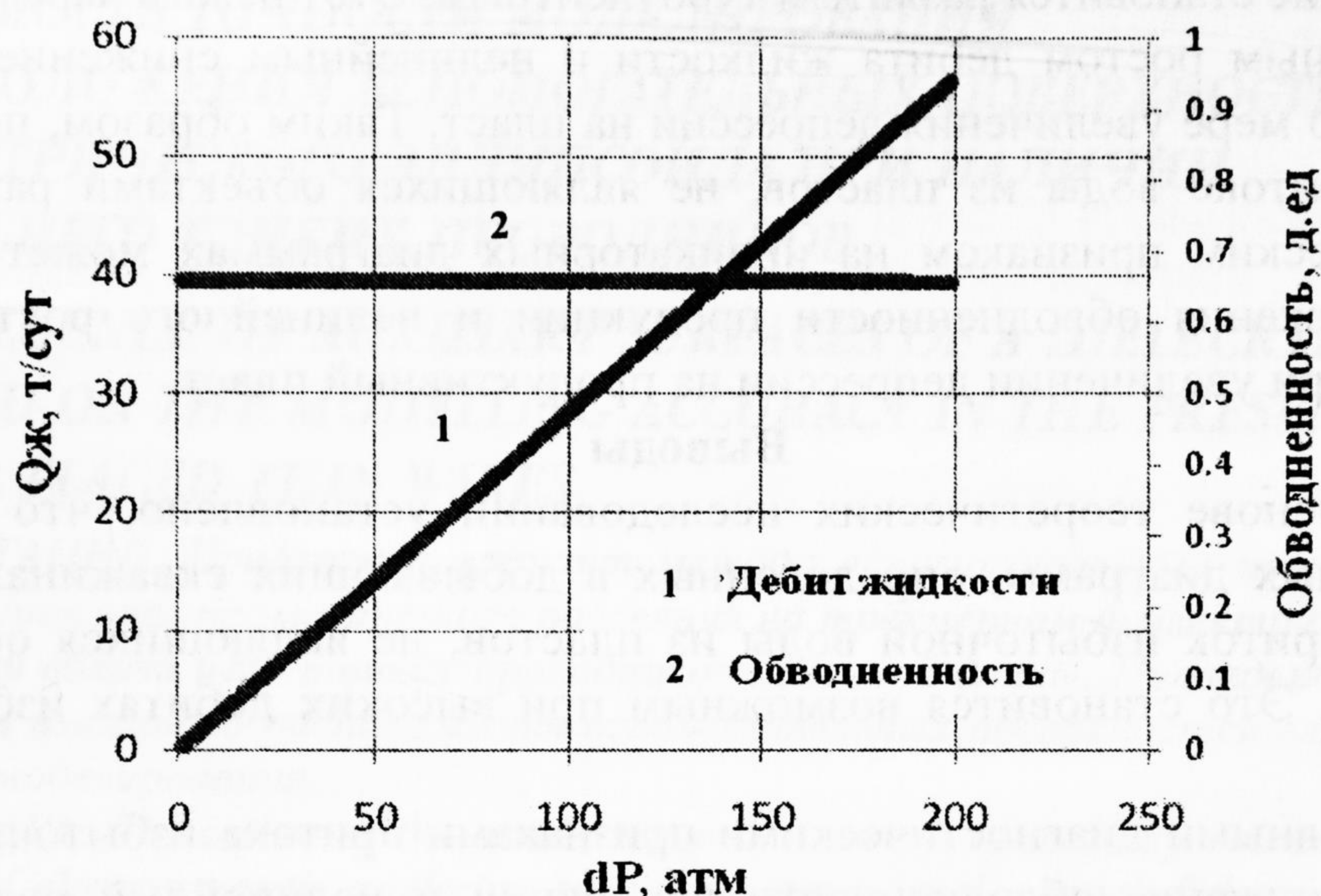


Рис. 3. Зависимость обводненности продукции  $W$  и общего дебита  $Q=Q_1+Q_2$  от депрессии на продуктивный пласт при  $\Gamma_2 \approx \Gamma_1$

Рост депрессии на пласт в этом случае сопровождается линейным ростом дебита жидкости (ее основную часть составляет продукция нефтенасыщенного пласта). Число Рейнольдса, характеризующее течение воды в трещине, меньше критического значения. Обводненность продукции практически не меняется.

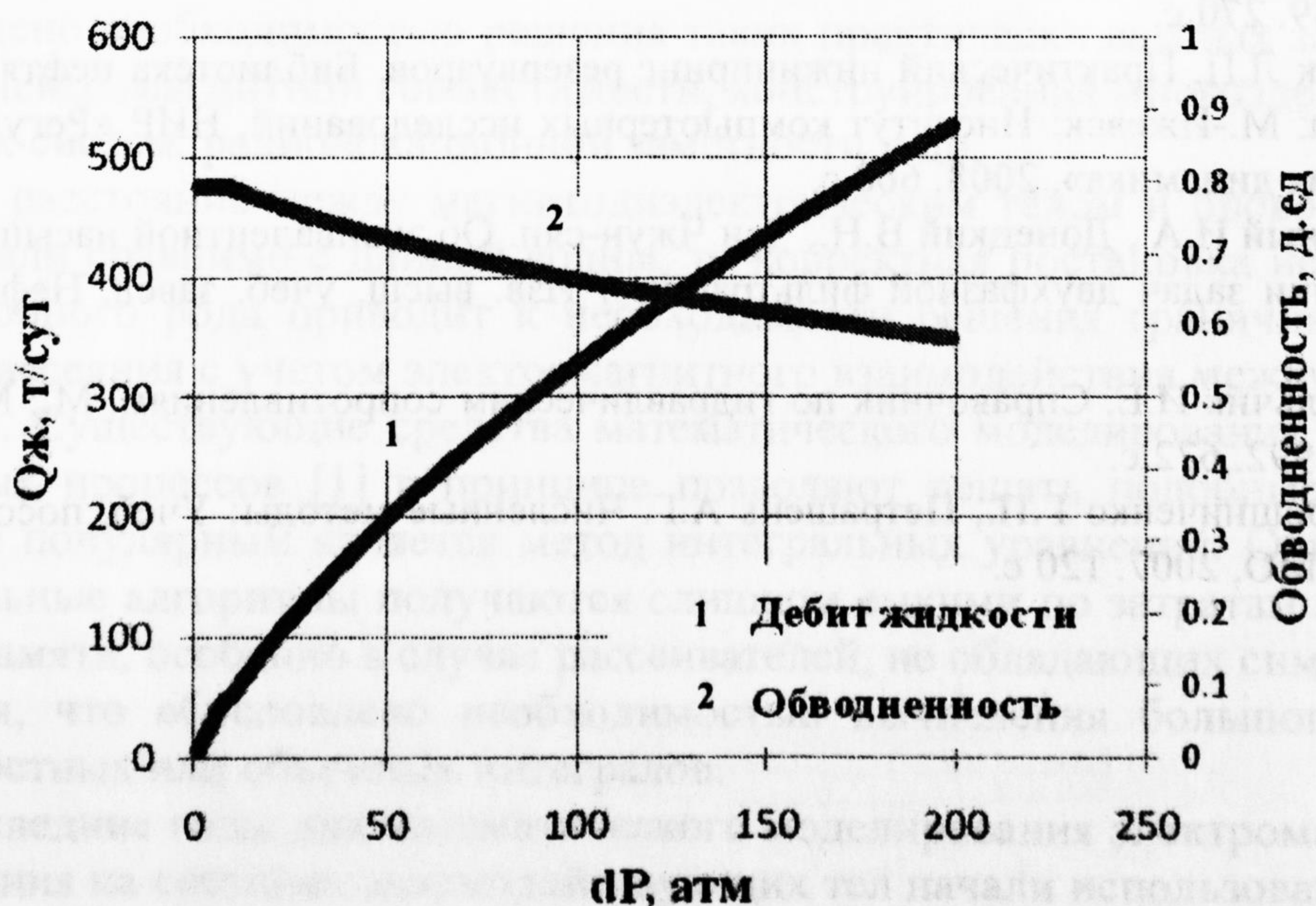


Рис. 4. Зависимость обводненности продукции  $W$  и общего дебита  $Q = Q_1+Q_2$  от депрессии на продуктивный пласт при высоких  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$



Второй вариант — когда подвижность воды имеет высокие значения (результаты расчетов представлены на рис. 4). В этом случае течение жидкости по трещине даже при малых ее размерах переходит в турбулентный режим. Для трещины размером 1 мм это происходит при депрессии на пласт выше значения 8 атм. и сопровождается изломом индикаторной прямой. С ростом депрессии обводненность начинает снижаться. При больших размерах трещины течение становится развитым турбулентным. Этот режим характеризуется нелинейным ростом дебита жидкости и нелинейным снижением обводненности по мере увеличения депрессии на пласт. Таким образом, при значительном притоке воды из пластов, не являющихся объектами разработки, диагностическим признаком на индикаторных диаграммах может служить фактор снижения обводненности продукции и нелинейного роста дебита жидкости при увеличении депрессии на продуктивный пласт.

#### Выводы

1. На основе теоретических исследований установлено, что по виду индикаторных диаграмм, определенных в добывающих скважинах, можно выделить приток избыточной воды из пластов, не являющихся объектами разработки. Это становится возможным при высоких дебитах избыточной воды.

2. Основными диагностическими признаками притока избыточной воды являются снижение обводненности продукции и нелинейный рост дебита жидкости при увеличении депрессии на пласт.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кременецкий М.И., Кокурина В.В. Информативные возможности ГДИС при наличии заколонных перетоков // Современные технологии гидродинамических и диагностических исследований скважин на всех стадиях разработки месторождений: М-лы VI науч.-техн. конф. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2007. С. 7-9.

2. Рабинович Н.Р. Инженерные задачи механики сплошной среды в бурении. М.: Недра, 1989. 270 с.

3. Дейк Л.П. Практический инжиниринг резервуаров. Библиотека нефтяного инжиниринга. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИР «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. 668 с.

4. Чарный И.А., Донецкий В.Н., Чэн Чжун-сян. Об эквивалентной насыщенности при решении задач двухфазной фильтрации // Изв. высш. учеб. завед. Нефть и газ. 1960. № 2.

5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

6. Мирошниченко Г.П., Петрашень А.Г. Численные методы: Учеб. пособ. СПб.: СПбГУИТМО, 2007. 120 с.