

УДК 622.276.66:51-74

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ И УСТОЙЧИВОСТИ ГЕЛЕВЫХ ЭКРАНОВ В МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРЕЩИНАХ

А. М. Ильясов, Г. Т. Булгакова

Уфимский государственный авиационный технический университет, 450008 Уфа, Россия  
E-mails: amilyasov67@gmail.com, bulgakova.guzel@mail.ru

Представлена квазиодномерная нестационарная модель водоизоляции магистральной трещины вязкопластичной жидкостью Хершеля — Балкли. Математическая модель, построенная в одномерном изотермическом приближении с осредненными по сечению трещины гидродинамическими параметрами — давлением и скоростью, позволяет определять оптимальные технологические параметры процесса водоизоляции и размеры гелевых экранов для обеспечения их устойчивости при интенсивном воздействии фильтрационного потока после водоизоляции трещины. Найдены диапазоны расходов, при которых для выбранного геля реализуется процесс водоизоляции трещины с фиксированной шириной. Выполнена оценка устойчивости установленных гелевых экранов (барьеров).

**Ключевые слова:** магистральная трещина, “сшитый” гель, вязкопластичная жидкость, устойчивость гелевого барьера.

DOI: 10.15372/PMTF20180220

**Введение.** В настоящее время при разработке залежей нефти в низкопроницаемых коллекторах широко используется технология гидроразрыва пласта на добывающих скважинах. При этом важной проблемой является ограничение притока воды в добывающие скважины, дренирующие пласты с магистральными трещинами. Также на нагнетательных скважинах, поддерживающих пластовое давление, вследствие превышения предела прочности и вязкости разрушения породы часто происходит самопроизвольное образование магистральных трещин — автогидроразрывов пласта. Трещины гидроразрыва и (или) автогидроразрыва пласта, распространяющиеся от соседних добывающих и нагнетательных скважин, могут объединяться в магистральные трещины, связывая эти скважины. В результате происходит прорыв пластовых и нагнетаемых вод по высокопроницаемым трещинам и моментальное обводнение добывающих скважин, что приводит к необходимости водоизоляции магистральных трещин [1] и создания равномерного фронта потока нагнетаемой воды в нефтеводонасыщенном пласте для более эффективного вытеснения пластовой нефти. Таким образом, наряду с проблемой установки барьера в трещине возникает проблема обеспечения его устойчивости при работе нагнетательной (и добывающей) скважины после водоизоляции. Для создания водоизолирующих гелевых экранов можно использовать гели на основе полиакриламида со “сшивателем”. Как в России, так и за рубежом широко применяется технология, основанная на закачивании оторочек “сшитых”

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-41-020226 р.а).

© Ильясов А. М., Булгакова Г. Т., 2018

водных растворов полимеров, например полиакриламида с массовой долей 0,15–1,00 %, и солей хрома, используемых в качестве “сшивателя” [1–3].

Согласно результатам реологических исследований подобные смеси по реологическим характеристикам близки к вязкопластичной жидкости Хершеля — Балкли, описываемой одномерной моделью с реологическим уравнением, которое в общем случае имеет вид [3, 4]

$$\tau = \tau_0 + K|\dot{\gamma}|^{n-1}\dot{\gamma}$$

( $\tau$  — сдвиговое напряжение;  $\dot{\gamma}$  — скорость сдвига;  $\tau_0$  — предельное напряжение сдвига;  $K$  — показатель консистенции жидкости;  $n \in (0, 1)$  — показатель степени, характеризующий неньютоновское поведение жидкости с предельным напряжением сдвига).

В данной работе рассматривается задача о водоизоляции единичной магистральной трещины со стороны нагнетательной скважины “сшитыми” гелями, а также задача об устойчивости установленных гелевых барьеров. Представлена квазиодномерная изотермическая математическая модель водоизоляции магистральной трещины “сшитым” гелем в пористом коллекторе, а также математическая модель оценки устойчивости установленного гелевого экрана, основанная на стационарном решении задачи о течении пластового флюида в трещине после водоизоляции.

**1. Математическая модель.** Рассматривается прямоугольный участок водонефте-насыщенного пласта с коэффициентом проницаемости  $k$  и коэффициентом пористости  $m$ . Параллельно границам участка на расстоянии  $L_p$  от каждой границы расположена вертикальная магистральная трещина с постоянной длиной  $L$ , шириной  $w_f$  и глубиной  $h_f$ , соединяющая забои нагнетательной и добывающей скважин (рис. 1). Для ширины, глубины и длины трещины выполняются соотношения  $w_f \ll h_f \ll L$ . Система координат выбрана таким образом, что ее начало находится на внешнем радиусе нагнетательной скважины, а ось  $x$  направлена вдоль трещины. В магистральной трещине, первоначально заполненной пластовой водой, при закачивании геля образуются две области течения геля — пластовая вода, разделенные подвижной границей с координатой  $x_f(t)$ . В первой области ( $0 \leq x \leq x_f(t)$ ) находится гель с постоянной плотностью  $\rho_g$ , во второй области

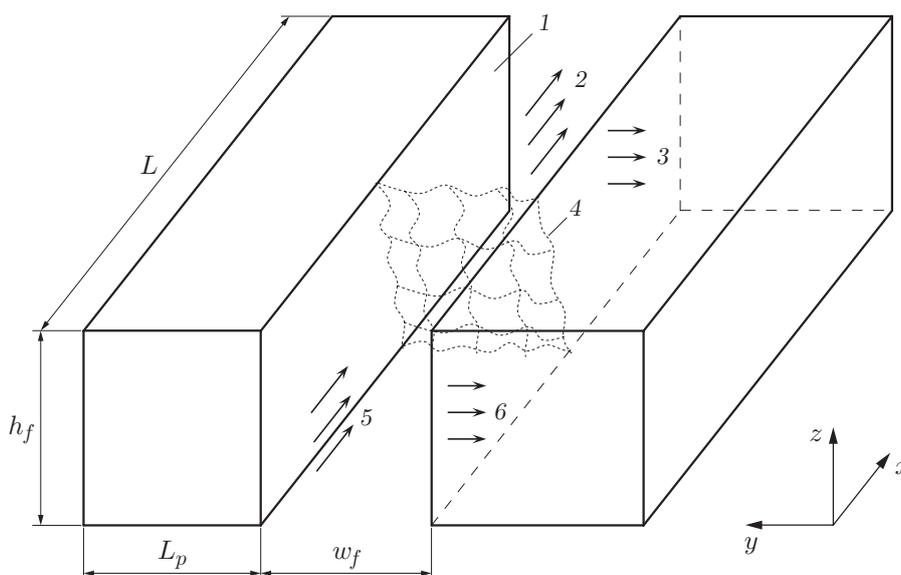


Рис. 1. Геометрия задачи:

1 — боковая поверхность трещины, 2 — пластовая вода, 3 — утечка воды в пласт, 4 — гелевый экран, 5 — закачиваемый гель, 6 — фильтрация геля в пласт

$(x_f(t) \leq x \leq L)$  — пластовая вода с постоянной плотностью  $\rho_w$  и постоянной вязкостью  $\mu_w$ . В первой области происходит фильтрация воды из геля в пласт, а во второй — утечка или приток пластовой воды (в зависимости от знака градиента давления) в направлении, перпендикулярном боковым поверхностям трещины.

При построении математической модели закачивания геля в вертикальную трещину с проницаемыми боковыми поверхностями приняты следующие допущения. В трещине на поверхности раздела пластового флюида и геля не происходит перемешивания (поршневое вытеснение). Предполагается, что в рассматриваемой области пласта большой коэффициент водонасыщенности, вследствие чего свойства пластового флюида близки к свойствам пластовой воды. Пласт считается однородным и изотропным. Фильтрация в пласте является изотермической и подчиняется закону Дарси. На рассматриваемом участке пласта траектории движения пластовой воды из трещины в пласт представляют собой прямые линии, фильтрационное течение является двумерным.

Процесс однофазной изотермической фильтрации в однородном изотропном пласте с достаточной для задач подземной гидродинамики точностью описывается уравнением пьезопроводности [5], при выводе которого скелет породы полагается упругим, а жидкость — слабосжимаемой. В данной работе используется та же модель фильтрации жидкости в пласте.

При изотермическом одномерном течении жидкости в трещине перпендикулярно направлению действия гравитационных сил жидкость можно считать несжимаемой, если для относительного изменения плотности жидкости выполняется неравенство  $\Delta\rho/\rho \ll 1$ . Данное неравенство справедливо, если одновременно выполняются неравенства [6]

$$v_* \ll c, \quad L \ll ct_*,$$

где  $c$  — скорость звука в жидкости;  $v_*$  — характерная скорость течения в трещине;  $t_*$  — характерное время процесса закачивания геля. Скорость звука в воде равна  $c = 1500$  м/с. Если характерный расход равен  $Q = 960$  м<sup>3</sup>/сут = 0,01 м<sup>3</sup>/с, характерная глубина трещины  $h_f = 30$  м, характерная длина трещины  $L = 100 \div 1000$  м, а характерная ширина трещины  $w_f = 10^{-5}$  м, то при характерном времени процесса  $t_* = 1$  ч справедливы оценки  $v_* = Q/(w_f h_f) \approx 33$  м/с  $\ll c = 1500$  м/с,  $L = 10^2 \div 10^3$  м  $\ll ct_* = 5,4 \cdot 10^6$  м.

Таким образом, при закачивании геля жидкости в трещине можно считать несжимаемыми.

Предполагается, что магистральная трещина имеет начальную ширину. Для оценки ширины образующихся в продуктивных пластах магистральных трещин применяется трассерный (индикаторный) метод [7], суть которого заключается в закачивании меченой жидкости в нагнетательную скважину и фиксации времени прихода трассера на добывающую скважину. Ширина трещин оценивается по времени прихода индикатора, расстоянию между добывающей и нагнетательной скважинами, давлению на забоях скважин и физическим характеристикам закачиваемой жидкости. Согласно данным [7] средняя ширина магистральных трещин находится в диапазоне  $w_f = 10^{-6} \div 10^{-3}$  м.

Представленная ниже математическая модель водоизоляции магистральных трещин “сшитыми” гелями применима для глубоких продуктивных пластов, для которых выполняется неравенство

$$p_* - (\Delta p)_{per} < \sigma, \quad (1)$$

где  $p_*$  — критическое давление, при котором гель не может продавливаться в трещину;  $(\Delta p)_{per}$  — потери давления в перфорационных отверстиях;  $\sigma$  — минимальное горизонтальное напряжение в породе в окрестности боковых поверхностей трещины. При выполнении

неравенства (1) в процессе закачивания геля в трещину ее боковые поверхности не деформируются. Следовательно, при установке барьеров ширина трещины остается постоянной и равной начальной ширине.

Математическая модель построена в гидравлическом приближении с осредненными по сечению трещины гидродинамическими параметрами. Вывод квазиодномерной системы уравнений, описывающей изотермическое течение ньютоновской жидкости в вертикальной трещине постоянной ширины с осредненными по ее поперечному сечению параметрами, представлен в работе [8]. Эта система уравнений справедлива и в случае неньютоновской жидкости. Таким образом, течение вязкопластичного геля в трещине в области  $0 \leq x \leq x_f(t)$  описывается системой уравнений ( $\tau > \tau_0$ )

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{2u_g}{w_f}, \quad \frac{\partial v}{\partial t} + (1 + \beta_g) \frac{\partial v^2}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_g} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{(1 - m)C_g v^2}{w_f}, \quad (2)$$

а течение пластовой воды в области  $x_f(t) \leq x \leq L$  — системой уравнений

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{2u_w}{w_f}, \quad \frac{\partial v}{\partial t} + (1 + \beta_w) \frac{\partial v^2}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{(1 - m)C_w v^2}{w_f}. \quad (3)$$

Здесь  $v$  — средняя по сечению скорость в трещине;  $p$  — среднее по сечению давление в трещине;  $u_g, u_w$  — скорости фильтрации воды из геля и пластовой воды в пласт соответственно;  $\beta_g, \beta_w$  — поправки Кориолиса [9] для геля и воды, характеризующие неравномерность распределения скорости по сечению трещины;  $C_g, C_w$  — коэффициенты гидравлического сопротивления геля и воды соответственно.

Закон движения границы контакта гель — пластовая вода определяется из решения уравнения

$$\frac{dx_f}{dt} = v(x_f(t), t). \quad (4)$$

Для вычисления скорости фильтрации воды из геля

$$u_g = At^{-\alpha} \quad (5)$$

используются экспериментальные данные работы [2]:  $A = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot \text{с}^{\alpha-1}$ ,  $\alpha = 0,55$ .

Скорость утечки пластовой воды через боковые поверхности трещины задается соотношениями [8]

$$u_w = \begin{cases} \frac{k}{\mu_w} \frac{p(x, t) - p_k}{\sqrt{\pi\chi(t - t_L)}}, & \sqrt{\pi\chi(t - t_L)} < L_p, \\ \frac{k}{\mu_w} \frac{p(x, t) - p_k}{L_p}, & \sqrt{\pi\chi(t - t_L)} > L_p, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\chi = k/(\mu_w\beta_*)$  — коэффициент пьезопроводности породы;  $\beta_* = \beta_c + m\beta_l$  — коэффициент упругой сжимаемости водонасыщенного пласта;  $\beta_c, \beta_l$  — коэффициенты упругой сжимаемости скелета породы и пластовой воды соответственно;  $t_L = f^{-1}(x_f)$ ;  $x_f = f(t)$  — закон движения фронта потока геля. В формуле (6), в отличие от формулы, приведенной в работе [8], учтено запаздывание утечки вследствие распространения фронта потока геля.

Первое выражение в (6) соответствует неустановившемуся режиму фильтрации в пласте, когда возмущения давления, возникшие на боковых поверхностях трещины, еще не достигли границ участка пласта. Второе выражение в (6) соответствует стационарному режиму фильтрации в пласте, когда возмущения давления, возникшие на боковых поверхностях трещины, достигли границ участка пласта. Поскольку жидкости в трещине

считаются несжимаемыми, фильтрация жидкости в пласт, как и фильтрация воды из геля, происходит одновременно на всей длине трещины  $L$ .

Экспериментальные исследования процесса закачивания “сшитого” геля в трещины [2, 3] показывают, что при используемых расходах закачиваемых гелей в трещинах в основном реализуются ламинарные режимы течения.

Решение осесимметричной стационарной краевой задачи при ламинарном режиме течения жидкости Хершеля — Балкли в круглой трубе для заданного перепада давления  $\Delta p$ , постановка которой аналогична постановке задачи о течении жидкости Шведова — Бингама [10], используется при вычислении коэффициента гидравлического сопротивления  $C_g$  из трансцендентного уравнения, полученного с помощью уравнения Дарси — Вейсбаха. Поскольку в случае течения вязкопластичной жидкости выполняется неравенство  $\Delta p = 4L\tau_w/D_H > 4L\tau_0/D_H$ , справедливо неравенство  $\Lambda/C_g = 2\tau_0/(\rho v^2 C_g) = 4\tau_0 L/(D_H \Delta p) < 1$ . Полагая справедливым более сильное неравенство  $\Lambda/C_g \ll 1$ , получаем асимптотическое выражение для коэффициента  $C_g$ :

$$C_g = \frac{1}{2} \left( \frac{(1+3n)\Lambda}{1+2n} + \frac{A^n}{\text{Re}_g} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{(1+3n)\Lambda}{1+2n} + \frac{A^n}{\text{Re}_g} \right)^2 + \frac{8n^2(n^2+n+1)\Lambda^2}{(1+2n)(1+n)}}, \quad (7)$$

$$A = 2^{(1+n)/n} \frac{1+3n}{n}, \quad \text{Re}_g = \frac{\rho D_H^n v^{2-n}}{K}, \quad \Lambda = \frac{2\tau_0}{\rho v^2}.$$

Это выражение зависит от двух безразмерных критериев: числа Рейнольдса степенной жидкости  $\text{Re}_g$  и отношения предельного напряжения сдвига к динамическому давлению  $\Lambda$ .

При ламинарном режиме течения ( $\text{Re} \leq 2000$ ) коэффициент гидравлического сопротивления пластовой воды в трещине  $C_w$  вычисляется по формуле [11]

$$C_w = \frac{64k_0}{4\text{Re}_w} = \frac{24}{\text{Re}_w}, \quad \text{Re}_w = \frac{\rho_w v D_H}{\mu_w}, \quad D_H = \frac{4w_f h_f}{2(w_f + h_f)} \approx 2w_f, \quad (8)$$

где  $k_0 = 3/2$  — поправочный коэффициент для канала с прямоугольным сечением, длина одной стороны которого значительно больше длины другой стороны.

Гель может закачиваться в трещину либо через нагнетательную скважину, либо через добывающую. В первом случае прекращается работа добывающей скважины, во втором — нагнетательной. Поэтому если изначально жидкость в магистральной трещине покоится, то начальное давление в трещине равно поровому (пластовому) давлению  $p_k$ . Таким образом, задаются следующие начальные условия для уравнений (2)–(4):

$$v(x, 0) = 0, \quad p(x, 0) = p_k, \quad x_f(0) = 0. \quad (9)$$

Граничное условие на входе в магистральную трещину задает скорость течения через объемный расход  $Q$  геля:

$$v(0, t) = Q/(w_f h_f) \quad (10)$$

(начало отсчета находится на внешней стенке нагнетательной скважины).

Граничное условие на выходе из магистральной трещины (на внешней стенке добывающей скважины) задается следующим образом:

$$p(L, t) = p_k. \quad (11)$$

**2. Устойчивость гелевых экранов.** После установки гелевого барьера возобновляется работа нагнетательной скважины при постоянном давлении  $p_{wnp}$ , добывающей — при постоянном давлении  $p_{wp}$ .

В работе [3] экспериментально исследовалась устойчивость (прочность) барьеров из рассматриваемого геля в трещинах с различной постоянной шириной, искусственно созданных в кернах. Результаты экспериментов показывают, что вследствие неустойчивости Саффмана — Тейлора [12] возможно проникание нагнетаемой воды через гелевый барьер. В работе [3] найден критический градиент давления, при котором в результате разрушения геля вода прорывается через весь гелевый экран. Согласно [3] критический градиент давления определяется выражением

$$(\nabla p)_* = 0,29/w_f^2 \quad (12)$$

и измеряется в паскалях на метр. При меньших градиентах давления прорыва воды через гелевый экран не происходит, т. е. экран является устойчивым.

Если гелевый экран теряет устойчивость до момента достижения установившегося режима течения в трещине после запуска скважин, этот случай далее не рассматривается. Если гелевый экран остается устойчивым до момента выхода на стационарный режим течения, можно оценить устойчивость экранов, установленных в результате закачивания геля, и определить необходимый размер барьера при заданном перепаде давления  $(\Delta p)_p = p_{wnp} - p_{wp}$  после водоизоляции. При анализе устойчивости гелевых барьеров поместим начало координат на внешней стенке нагнетательной скважины.

Течение в трещине после ее водоизоляции (предполагается, что не весь объем трещины занят гелем) описывается системой уравнений (3), (6), (8). Покажем, что при стационарном режиме течения в уравнении движения воды (3) можно пренебречь конвективным слагаемым в силу его малости по сравнению с трением. Действительно, в этом случае должно выполняться неравенство  $L_0 \gg w_f/C_w = w_f \text{Re}_0/16 = w_f \text{Re} w_f/(16L_0) = 2\rho_w Q_p w_f/(16\pi L_0 \mu_w)$ , где  $L_0$  — характерный размер области, свободной от гелевого барьера;  $\text{Re}_0 = (w_f/L_0) \text{Re}$  — приведенное число Рейнольдса в канале с проницаемыми границами, или неравенство  $L_0 \gg \sqrt{\rho_w Q_p w_f/(8\pi \mu_w)}$ . Для характерных параметров  $\rho_w = 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu_w = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,  $w_f = 10^{-3} \text{ м}$  и характерного дебита добывающей скважины  $Q_p = 240 \text{ м}^3/\text{сут} = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  получаем  $L_0 \gg 0,34 \text{ м}$ . Эта оценка всегда выполняется.

Итак, система уравнений (3), (6), (8) сводится к системе двух обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка

$$\frac{dv}{dx} = -\frac{2k(p - p_k)}{w_f \mu_w L_p}, \quad \frac{dp}{dx} = -\frac{(1 - m)C_w \rho_w v^2}{w_f}. \quad (13)$$

Рассмотрим случай расположения (закачивания) геля со стороны нагнетательной скважины без продавливания водой. Этому случаю соответствуют граничные условия для системы (13)

$$v(x_{gr}) = 0, \quad p(L) = p_{wp}, \quad (14)$$

где условие равенства нулю скорости при фиксированной координате правого фронта потока геля  $x_{gr}$  означает устойчивость гелевого экрана и непротекание жидкости через эту границу.

Решая краевую задачу (13), (14), получаем величину перепада давления, действующего на гелевый экран после водоизоляции:

$$(\Delta p)_p = p_{wnp} - p(x_{gr}) = p_{wnp} - p_k + A_1 D_1 (C_{1r} \exp(D_1 x_{gr}) - C_{2r} \exp(-D_1 x_{gr})),$$

$$A_1 = \frac{w_f \mu_w L_p}{2k}, \quad D_1 = \frac{2}{w_f} \sqrt{\frac{6k(1 - m)}{w_f L_p}}, \quad D_{2r} = \frac{2k(p_{wp} - p_k)}{w_f \mu_w L_p}, \quad (15)$$

$$C_{1r} = -\frac{D_{2r} \exp(-D_1 x_{gr})}{2D_1 \operatorname{ch}(D_1(L - x_{gr}))}, \quad C_{2r} = \frac{D_{2r} \exp(D_1 x_{gr})}{2D_1 \operatorname{ch}(D_1(L - x_{gr}))}.$$

Устойчивость гелевого экрана определялась согласно уравнениям (12), (15). Гелевый экран устойчив, если выполняется условие

$$(\Delta p)_p < (\Delta p)_* = \int_{x_{gl}}^{x_{gr}} (\nabla p)_* dx, \quad (16)$$

где  $(\Delta p)_*$  — критический перепад давления;  $(\nabla p)_*$  — критический градиент давления, при котором экран становится неустойчивым.

**3. Результаты численных расчетов.** В качестве водоизолирующего материала рассматривается гель на основе 0,5 %-го раствора полиакриламида и 0,0417 %-го раствора ацетата хрома, который является “сшивателем” водного раствора полиакриламида. “Сшитый” гель описывается одномерной моделью неньютоновской жидкости Хершеля — Балкли с предельным напряжением сдвига [3]:  $\tau = 72 + 41,5\dot{\gamma}^{0,25}$  ( $\tau > 72$  Па),  $\tau_0 = 72$  Па,  $K = 41,5$  Па · с<sup>1/4</sup>,  $n = 1/4$ .

Течение геля направлено от нагнетательной скважины к добывающей. Для численного решения системы уравнений (2)–(8) с граничными и начальными условиями (9)–(11) использовался алгоритм SIMPLE [13]. Модифицированная численная схема была применена для решения систем уравнений (2), (5), (7) и (3), (6), (8), описывающих течение в областях, занятых гелем и водой соответственно. На границе раздела гель — пластовая вода выполняется динамическое условие равенства давлений слева и справа от границы раздела.

Проведены модельные расчеты характеристик процесса закачивания геля со стороны нагнетательной скважины при значениях поправки Кориолиса  $\beta_g = \beta_w = 1/3$ , соответствующих стационарному ламинарному режиму течения в трещине. Расчеты проводились при следующих параметрах. Коэффициент пористости породы равен  $m = 0,25$ . Длина магистральной трещины равна  $L = 127$  м, ее глубина  $h_f = 30$  м. Расстояния от боковых поверхностей трещины до границ пласта равны  $L_p = 50$  м. Пластовые давления на границах рассматриваемого участка слева и справа от трещины постоянны и равны  $p_k = 2 \cdot 10^7$  Па. Плотности пластовой воды и геля равны  $\rho_w = \rho_g = 1050$  кг/м<sup>3</sup> соответственно, вязкость воды  $\mu_w = 1,05 \cdot 10^{-3}$  Па · с. Коэффициенты упругой сжимаемости породы и пластовой воды равны  $\beta_c = 1,1 \cdot 10^{-11}$  Па<sup>-1</sup>,  $\beta_l = 3,8 \cdot 10^{-10}$  Па<sup>-1</sup> соответственно. Расход  $Q$ , эффективная ширина трещины  $w_f$  и проницаемость пласта  $k$  варьировались.

Расчеты на сетке размером 1000 узлов с шагом интегрирования по времени, равным  $\Delta t = 0,001$  с, проводились до тех пор, пока забойное давление в скважине не превышало критического значения  $p_* = 4,5 \cdot 10^7$  Па или фронт потока геля не достигал противоположной скважины. Погрешность вычисления безразмерного давления равна  $\varepsilon_p = 0,01$ . Было выполнено 160 расчетов, результаты которых представлены в табл. 1–4.

Расчет устойчивости гелевых экранов после водоизоляции проводился при том же пластовом давлении, что и до изоляции, при давлении на нагнетательной скважине  $p_{wnp} = 4 \cdot 10^7$  Па и давлении на добывающей скважине  $p_{wbp} = 10^7$  Па.

Существующие насосы способны закачивать гели в пласт с расходами  $Q = 120 \div 960$  м<sup>3</sup>/сут. В табл. 1–4 приведены размеры гелевых экранов  $L_g = x_{gr} - x_{gl} = x_{gr}$  ( $x_{gl} = 0$  — координата заднего фронта гелевого экрана) при закачивании со стороны нагнетательной скважины без продавливания водой в зависимости от ширины трещины и расхода закачиваемого геля для пород с различной проницаемостью  $k$ . (Прочерки в табл. 1–4 означают отсутствие экрана.)

Таблица 1

Размеры гелевых экранов  $L_g$  в зависимости от средней ширины трещины  $w_f$  и расхода закачиваемого геля  $Q$  при проницаемости пласта  $k = 10^{-15} \text{ м}^2$

$Q, \text{ м}^3/\text{сут}$	$L_g, \text{ м}$				
	$w_f = 10^{-4} \text{ м}$	$w_f = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$	$w_f = 10^{-3} \text{ м}$	$w_f = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$w_f = 10^{-2} \text{ м}$
120	—	33,34	95,95	127	127
240	—	25,97	79,95	127	127
360	—	—	70,17	127	127
480	—	—	61,53	127	127
600	—	—	—	127	127
720	—	—	—	127	127
840	—	—	—	127	127
960	—	—	—	127	127

Таблица 2

Размеры гелевых экранов  $L_g$  в зависимости от средней ширины трещины  $w_f$  и расхода закачиваемого геля  $Q$  при проницаемости пласта  $k = 10^{-14} \text{ м}^2$

$Q, \text{ м}^3/\text{сут}$	$L_g, \text{ м}$				
	$w_f = 10^{-4} \text{ м}$	$w_f = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$	$w_f = 10^{-3} \text{ м}$	$w_f = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$w_f = 10^{-2} \text{ м}$
120	—	33,34	95,95	127	127
240	—	25,97	79,95	127	127
360	—	19,11	70,17	127	127
480	—	12,51	61,53	127	127
600	—	—	52,51	127	127
720	—	—	43,12	127	127
840	—	—	34,10	127	127
960	—	—	—	127	127

Таблица 3

Размеры гелевых экранов  $L_g$  в зависимости от средней ширины трещины  $w_f$  и расхода закачиваемого геля  $Q$  при проницаемости пласта  $k = 10^{-13} \text{ м}^2$

$Q, \text{ м}^3/\text{сут}$	$L_g, \text{ м}$				
	$w_f = 10^{-4} \text{ м}$	$w_f = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$	$w_f = 10^{-3} \text{ м}$	$w_f = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$w_f = 10^{-2} \text{ м}$
120	1,46	33,34	95,95	127	127
240	—	25,97	79,95	127	127
360	—	19,11	70,17	127	127
480	—	12,51	61,53	127	127
600	—	7,81	52,51	127	127
720	—	4,64	43,12	127	127
840	—	2,86	34,10	127	127
960	—	—	26,35	127	127

Таблица 4

Размеры гелевых экранов  $L_g$  в зависимости от средней ширины трещины  $w_f$  и расхода закачиваемого геля  $Q$  при проницаемости пласта  $k = 10^{-12} \text{ м}^2$

$Q, \text{ м}^3/\text{сут}$	$L_g, \text{ м}$				
	$w_f = 10^{-4} \text{ м}$	$w_f = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$	$w_f = 10^{-3} \text{ м}$	$w_f = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$w_f = 10^{-2} \text{ м}$
120	1,59	33,34	95,95	127	127
240	—	25,97	79,95	127	127
360	—	19,11	70,17	127	127
480	—	12,51	61,53	127	127
600	—	7,81	52,51	127	127
720	—	4,64	43,12	127	127
840	—	2,86	34,10	127	127
960	—	1,84	26,35	127	127

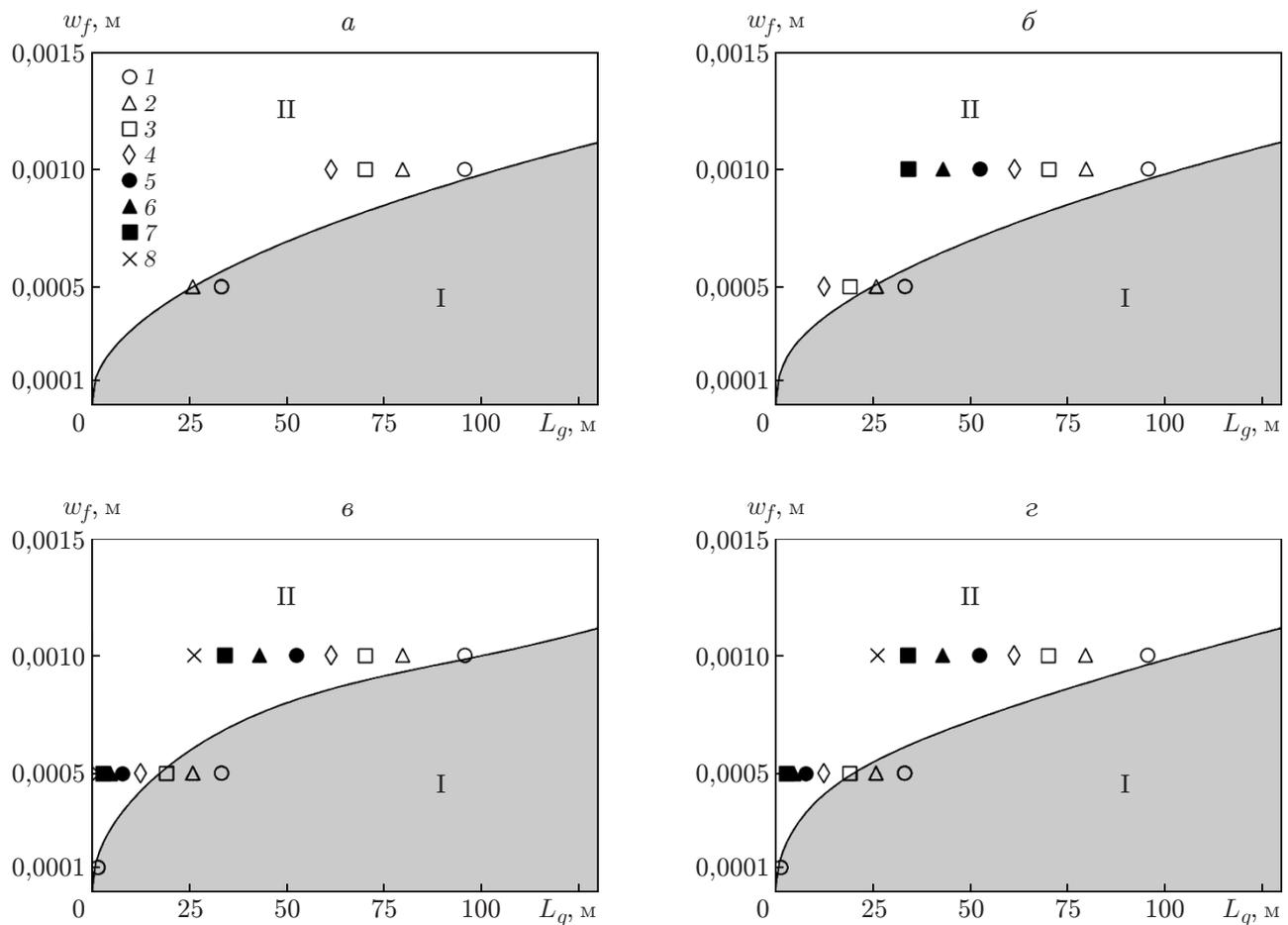


Рис. 2. Области устойчивости (I) и неустойчивости (II) гелевых экранов при различных проницаемостях пласта  $k$  и расходах закачиваемого геля  $Q$ :  
 а —  $k = 10^{-15} \text{ м}^2$ , б —  $k = 10^{-14} \text{ м}^2$ , в —  $k = 10^{-13} \text{ м}^2$ , г —  $k = 10^{-12} \text{ м}^2$ ; 1 —  $Q = 120 \text{ м}^3/\text{сут}$ , 2 —  $Q = 240 \text{ м}^3/\text{сут}$ , 3 —  $Q = 360 \text{ м}^3/\text{сут}$ , 4 —  $Q = 480 \text{ м}^3/\text{сут}$ , 5 —  $Q = 600 \text{ м}^3/\text{сут}$ , 6 —  $Q = 720 \text{ м}^3/\text{сут}$ , 7 —  $Q = 840 \text{ м}^3/\text{сут}$ , 8 —  $Q = 960 \text{ м}^3/\text{сут}$

На рис. 2 показаны области устойчивости и неустойчивости гелевых экранов в плоскости параметров  $(L_g, w_f)$  при различных значениях проницаемости породы  $k$ , а также результаты расчетов глубины проникания геля  $L_g$ , представленные в табл. 1–4. Попадание размера гелевого экрана в зависимости от ширины трещины (при постоянной проницаемости породы) в область устойчивости означает возможность установки устойчивых экранов при данных расходах закачиваемого геля.

Из рис. 2 следует, что увеличение ширины трещины приводит к ухудшению устойчивости экрана и увеличению его размера вследствие уменьшения гидравлического сопротивления при закачивании геля в трещину. На рис. 2 видно, что в рассмотренном диапазоне значений проницаемости пород в трещинах, ширина которых  $w_f > 1,1$  мм, установка устойчивых экранов невозможна. В то же время невозможно установить устойчивые экраны в трещинах, ширина которых  $w_f < 0,1$  мм, вследствие превышения критического давления при закачивании геля.

Анализ рассмотренных значений расхода закачиваемого геля и ширины трещин показал, что в пластах с проницаемостью  $k = 10^{-15}$  м<sup>2</sup> установка устойчивых экранов возможна в трещинах шириной  $w_f = 0,5$  мм при наименьшем расходе  $Q = 120$  м<sup>3</sup>/сут, в пластах с проницаемостью  $k = 10^{-14}$  м<sup>2</sup> — при  $w_f = 0,5$  мм и  $Q = 120, 240$  м<sup>3</sup>/сут, в пластах с проницаемостью  $k = 10^{-13}$  м<sup>2</sup> — при  $w_f = 0,1$  мм,  $Q = 120$  м<sup>3</sup>/сут и при  $w_f = 0,5$  мм,  $Q = 120, 240$  м<sup>3</sup>/сут, в пластах с проницаемостью породы  $k = 10^{-12}$  м<sup>2</sup> — при  $w_f = 0,1$  мм,  $Q = 120$  м<sup>3</sup>/сут, а также при  $w_f = 0,5$  мм,  $Q = 120, 240, 360$  м<sup>3</sup>/сут.

Диаграммы устойчивости, подобные диаграммам, представленным на рис. 2, можно построить для произвольных входных данных. С использованием представленной математической модели для любых трещин и пород, для которых выполняется неравенство (1), можно исследовать устойчивость устанавливаемых в трещине гелевых экранов, а также решать задачу определения критических значений перепада давления в трещине при фиксированном размере установленного гелевого экрана.

**Заключение.** Представлена математическая модель установки гелевого барьера в магистральную трещину, соединяющую нагнетательную и добывающую скважины. В квазиоднородном стационарном приближении решена задача устойчивости гелевого барьера в трещине. Показано, что на основе разработанной модели водоизоляции трещин и устойчивости гелевых барьеров можно подбирать значения расхода закачиваемого геля, размеры устойчивых экранов, а также допустимые перепады давления в магистральных трещинах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Ефимов Н. Н.** Технология ОВП в нефтяных скважинах и пути повышения эффективности РИР // Инж. практика. 2011. № 7. С. 4–17.
2. **Seright R. S.** Gel propagation through fractures // SPE Product. Facilities. 2001. V. 16. P. 225–231.
3. **Wang Y., Seright R. S.** Correlating gel rheology with behavior during extrusion through fractures // SPE/DOE symp. on improved oil recovery, Tulsa (USA), Apr. 22–26, 2006. Paper SPE 99462. [Electron. resource]. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/99462-MS>.
4. **Кутепов А. М.** Химическая гидродинамика: Справ. пособие / А. М. Кутепов, А. Д. Полянин, З. Д. Запрынов, А. Д. Вязьмин, Д. А. Казенин. М.: Квантум, 1996.
5. **Баренблатт Г. И.** Движение жидкости и газов в природных пластах / Г. И. Баренблатт, В. И. Ентов, В. М. Рыжик. М.: Недра, 1984.
6. **Ландау Л. Д.** Теоретическая физика: В 10 т. Т. 6. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Физматлит, 2003.

7. Трофимов А. С., Бердников С. В., Кривова Н. Р. и др. Обобщение индикаторных (трассерных) исследований на месторождениях Западной Сибири // Территория нефтегаз. 2006. № 12. С. 72–77.
8. Ильясов А. М., Булгакова Г. Т. Моделирование течения вязкой жидкости в магистральной вертикальной трещине с проницаемыми стенками // Мат. моделирование. 2016. Т. 28, № 7. С. 60–85.
9. Чарный И. А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М.: Недра, 1975.
10. Климов Д. М. Вязкопластические течения: динамический хаос, устойчивость, перемешивание / Д. М. Климов, А. Г. Петров, Д. В. Георгиевский. М.: Наука, 2005.
11. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992.
12. Saffman P. G., Taylor G. I. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele — Shaw cell containing a more viscous liquid // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1958. V. 245. P. 312–329.
13. Патанкар С. В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984.

*Поступила в редакцию 24/XI 2016 г.,  
в окончательном варианте — 9/III 2017 г.*

---