

Научная статья / Original research article
УДК 533.624
DOI: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-1-61-72>
EDN: VONIOV



Идентификация динамики обводнения добывающей скважины после прорыва техногенной трещины от нагнетательной

А. А. Изотов^{1*}, С. Ф. Мулявин²

¹ ООО «РН-Геология Исследования Разработка», Тюмень, Российская Федерация

² Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация

*aaizotov@rn-gir.rosneft.ru

Аннотация. Техногенные трещины, образующиеся в результате закачки воды, могут соединять нагнетательные и добывающие скважины. Однако доля добываемой воды часто увеличивается лишь после первоначально умеренного отклика, возникающего после прорыва. Мы предполагаем, что это замедленное ускорение обусловлено зависящей от времени утечкой через стенки трещины: взвешенные частицы осаждаются и образуют фильтрационную корку, постепенно уменьшая проницаемость стенок трещины, что обеспечивает рост доли закачиваемой воды, поступающей в добывающую скважину. Современные законы утечки явно связывают ее с ростом фильтрационной корки и динамическими эффектами поперечного потока. Мы формулируем упрощенную одномерную модель для уже существующей трещины, соединяющей две скважины. Поток вдоль трещины описывается законом Пуазейля для щели с учетом распределенной утечки, пропорциональной разнице давлений между трещиной и пластом. Засорение вводится как увеличивающееся со временем сопротивление утечке, что согласуется с концепциями образования фильтрационной корки/скина, широко используемыми в моделировании потерь жидкости. Для доли закачиваемой воды, поступающей в добывающую скважину, упрощенная форма дает явное выражение, которое непосредственно соответствует прогнозу обводненности при постоянном дебите жидкости. Пример, рассчитанный для месторождения в Западной Сибири, воспроизводит распространенное наблюдение: обводненность увеличивается с ~30 % при прорыве до >90 % в течение ~3 месяцев без изменения режимов работы скважин. Мы также обсуждаем, почему добывающие скважины действуют как аттракторы траекторий для медленно развивающихся трещин, вызванных закачкой, посредством пороупругих возмущений напряжений, и почему ствол скважины может остановить трещину после пересечения, что согласуется с взаимодействием трещины и скважины в рамках механики разрушения типа «остановочного отверстия».

Ключевые слова: техногенная трещина, автоГРП, обводнение, прорыв воды, заводнение

Для цитирования: Изотов А. А., Мулявин С. Ф. Идентификация динамики обводнения добывающей скважины после прорыва техногенной трещины от нагнетательной. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2026;30(1):61–72. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-1-61-72> EDN: VONIOV

Identification of water-cut dynamics in a producing well after breakthrough of a water-induced fracture

Aleksey A. Izotov^{1*}, Semyon F. Mulyavin²

¹ ООО «RN-GIR», Tyumen, Russian Federation

² Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

*aaizotov@rn-gir.rosneft.ru

Abstract. Water-induced fractures created during water injection can connect injection and production wells. However, the fraction of produced water often increases significantly only after an initially moderate response following breakthrough. We hypothesize that this delayed acceleration is due to time-dependent leakoff through the fracture walls. Suspended solids are deposited and form a filter cake, gradually reducing wall permeability that increases the fraction of injected water delivered to the producing well. Modern leakoff models explicitly relate leakoff to growth of filter cake and the dynamic effects of transverse flow. We formulate a reduced one-dimensional model for an extant fracture that connecting two wells. Poiseuille law describes flow along the fracture for a slot taken into account distributed leakoff proportional to the pressure difference between the fracture and the formation. We introduce fouling as a time-increasing resistance to leakoff, consistent with filter cake and skin formation concepts widely used in fluid losses modeling. The reduced form yields an explicit expression for the fraction of injected water that enters the producing well. This explicit directly correlates to the predicted water-cut at a constant liquid rate. An example for a West Siberian field reproduces a common observation: the water-cut rises from ~30% at breakthrough to >90% within ~3 months without changes in well operating conditions. We also discuss why producing wells act as attractors for the trajectories of slowly propagating injection-induced fractures due to poroelastic stress perturbations, and why a wellbore can arrest a fracture after intersection. This behavior agrees with fracture – well interaction in the framework of "stop-hole" fracture mechanics.

Keywords: water-induced fracture, fracturing (auto-frac), water-cut, water breakthrough, water-flooding

For citation: Izotov A. A., Mulyavin S. F. Identification of water-cut dynamics in a producing well after breakthrough of a water-induced fracture. *Oil and Gas Studies*.2026;30(1):61–72 (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-1-61-72>

Введение

Высокие темпы обводнения добывающих скважин при заводнении часто связывают с формированием высокопроводящих путей фильтрации: трещин, техногенных каналов низкого фильтрационного сопротивления. Практически важной особенностью образования таких путей является то, что после момента прорыва воды обводненность нередко растет не только резко, скачком при достижении трещиной забоя добывающей скважины, но и ускоренно после, достигая значений 90–100 % за сравнительно короткое время (месяцы). Это указывает на динамическую эволюцию проводимости и утечки [1].

Такая динамика существенно ухудшает нефтеотдачу и требует прогнозных моделей, позволяющих отличить продвижение фронта от притока по высокопроводящей техногенной трещине.

В данной работе рассматривается сценарий, когда между нагнетательной и добывающей скважинами образовалась трещина (или эквивалентный проводящий канал низкого фильтрационного сопротивления), по которой в трещине течет вода при давлении, превышающем пластовое. В отличие от подходов, где рост обводненности объясняется исключительно геометрическим ростом трещины [2], в предлагаемом механизме ключевую роль играет эволюция утечек из трещины в пористую среду. На раннем этапе существенная часть воды фильтруется в пласт вдоль длины тре-

щины, что ограничивает долю воды, достигающую добывающей. По мере загрязнения стенок трещины утечки уменьшаются, вследствие чего доля доставляемой по трещине воды возрастает, а обводненность ускоренно растет.

Цель исследования — предложить простую, интерпретируемую физико-математическую модель пост-прорывной динамики обводненности продукции, связать ее параметры с физическим механизмом загрязнения стенок и показать, как по динамике оценивать характерные времена этого процесса.

Методы

Концептуальная модель

Рассмотрим пару нагнетательная — добывающая скважины, соединенную прямолинейной трещиной длиной L , по которой течет вода [7]. Поскольку давление в трещине $p(x, t)$ превышает пластовое давление p_r , через стенки трещины происходит утечка воды в поровый коллектор $\ell(x, t)$, распределенная по длине трещины. Именно эта распределенная утечка определяет ключевой эффект: даже при наличии прямой гидродинамической связи по трещине не вся вода доходит до добывающей скважины, особенно на ранней стадии.

В работе предполагается, что по мере утечки в пористый пласт стенки трещины подвергаются загрязнению [3, 4] (осаждение механических примесей, формирование фильтрационной корки или зоны пониженной проницаемости у стенки). Это приводит к уменьшению интенсивности утечек в матрицу [5, 6] и, следовательно, к росту доли воды, которая сохраняется в канале и достигает добывающей. Таким образом, рост обводненности после прорыва интерпретируется как результат эволюции утечки [7, 8], а не только как следствие изменения режима работы скважин или мгновенного изменения геометрии канала.

Для описания этого эффекта вводится один управляющий параметр — безразмерная величина $\beta(t)$, характеризующая соотношение между проводимостью трещины вдоль длины и интенсивностью утечек в матрицу. При больших утечках β велика, доля доставленной воды мала; при снижении утечек вследствие загрязнения β уменьшается, доля воды, движущейся к добывающей скважине, возрастает, что приводит к ускоряющемуся росту обводненности. Концептуальная схема механизма и иллюстрация эволюции утечек приведены на рисунке 1.

Схема «нагнетательная скважина — трещина — добывающая скважина». По трещине течет вода при $p > p_r$. Одновременно происходит распределенная утечка в пористый пласт $\ell(x, t)$ через обе стенки трещины, что на раннем этапе снижает долю воды, доходящую до добывающей скважины (см. рис. 1а).

Нормированная величина эффективного сопротивления утечке (иллюстративно) отражает прогрессирующее загрязнение стенок трещины,

что приводит к снижению утечки, где $\lambda(t)$ — коэффициент утечки в используемой математической постановке (см. рис. 1б).

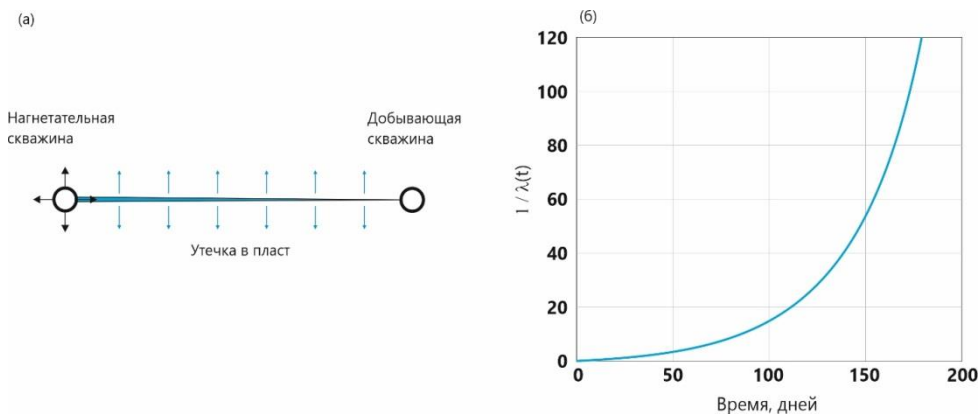


Рис. 1. Концептуальная схема трещины и эволюции утечек при загрязнении стенок
Fig. 1. Conceptual diagram of the fracture and the evolution of leakoff during wall contamination

Математическая модель

Течение жидкости в плоской трещине описывается уравнением Пуазейля [9]

$$q(x, t) = -K_f \frac{\partial p}{\partial x}, \quad K_f = \frac{w^3}{12\mu}, \quad (1)$$

где w — раскрытие трещины, μ — вязкость воды.

Уравнение неразрывности с учетом утечки $g(x, t)$ в пласт

$$\frac{\partial q}{\partial x} = -g(x, t), \quad g(x, t) = 2 \lambda(t) (p(x, t) - p_r), \quad (2)$$

где $g(x, t)$ — квазистационарная утечка в пласт на единицу длины и высоты трещины; $p(x, t)$ — давление в трещине; p_r — пластовое давление в окрестности трещины; $\lambda(t)$ — коэффициент, отражающий эффективность утечки, значение уменьшается при формировании корки, повышении степени кольматации.

Комбинация (1, 2) приводит к линейному уравнению для давления вдоль трещины

$$K_f \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 2 \lambda(t) (p(x, t) - p_r). \quad (3)$$

Введем характерную длину, на которой за счет утечки давление снижается до пластового

$$\ell(t) = \sqrt{\frac{K_f}{2\lambda(t)}}. \quad (4)$$

Безразмерные параметры

$$x' = \frac{x}{L}, \quad p' = \frac{p-p_r}{\Delta p}, \quad \Delta p = p_{inj} - p_r, \quad (5)$$

и ключевой безразмерный параметр «число утечки»

$$\beta(t) = \frac{L}{\ell(t)} = \sqrt{\frac{2\lambda(t)L^2}{K_f}}. \quad (6)$$

Интерпретация $\beta(t)$:

- $\beta \gg 1$: утечка вдоль трещины доминирует, вода утекает в пласт \rightarrow до добывающей доходит мало воды по трещине;
- $\beta \ll 1$: утечка мала, трещина работает как почти герметичный канал \rightarrow до добывающей доходит большая доля воды.

Модель загрязнения феноменологически соответствует снижению утечки вследствие роста фильтрационной корки

$$\lambda(t) = \lambda_0 e^{-\alpha t} \Rightarrow \beta(t) = \beta_0 e^{\frac{\alpha t}{2}}, \quad (7)$$

где $\lambda(t)$ — коэффициент утечки; при росте загрязнения $\lambda(t)$ уменьшается. $\beta(t) = L/\ell(t)$ — ключевой безразмерный параметр утечки.

Ключевой параметр — характерное время $\tau_c = 1/\alpha$, когда $t \sim \tau_c$, режим меняется качественно: утечки снижаются, вода интенсивнее поступает в добывающую скважину (рис. 2).

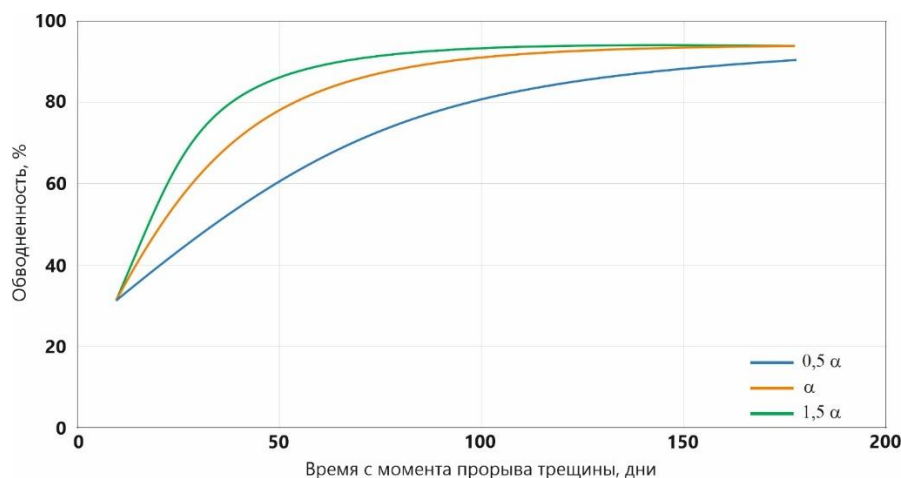


Рис. 2. Прогнозируемое моделью ускорение роста обводненности после прорыва
Fig. 2. Model-predicted acceleration of water-cut growth after breakthrough

Сопротивление утечке растет экспоненциально, как при увеличении загрязнения. Это качественно согласуется с формированием сопротивления утечкам в моделях fluid loss для ГРП [9–11].

Тогда (3) можно записать с учетом (5)

$$\frac{d^2 p'}{dx^2} = \beta(t)^2 p'. \quad (8)$$

Этот механизм объясняет динамику роста обводненности продукции. Постепенное снижение утечки в пласт обеспечивает рост объема воды, транспортируемого в добывающую скважину [10, 11].

Чтобы получить упрощенно оценку снизу объема воды, транспортируемого по трещине, берем $p_r \approx p_{prod}$ (пластовое давление около добывающей). Тогда граничные условия

$$p(0, t) = p_{inj}(t), \quad p(L, t) = p_{prod}(t) \approx p_r. \quad (9)$$

Тогда решение для давления (в безразмерных координатах x')

$$p(x, t) - p_r = (p_{inj} - p_r) \frac{\text{sh}(\beta(t)(1-x'))}{\text{sh}(\beta(t))}. \quad (10)$$

Расход воды в начале трещины равен приемистости $q_{inj}(t)$, тогда на другом конце трещины

$$q_{inj}(t) = \frac{K_f \Delta p}{L} \beta(t) \text{cth}(\beta(t)), \quad q_{w prod}(t) = \frac{K_f \Delta p}{L} \frac{\beta(t)}{\text{sh}(\beta(t))}, \quad (11)$$

где $q_{w prod}(t)$ — объем воды, поступающий в добывающую скважину по трещине.

Доля воды, дошедшая до добывающей по трещине

$$F(t) = \frac{q_{w prod}}{q_{inj}} = \frac{1}{\text{ch}(\beta(t))} = \text{sech}(\beta(t)). \quad (12)$$

Таким образом, при фиксированных давлениях на концах $q_{w prod}(t)$ монотонно растет при уменьшении $\lambda(t)$, то есть при загрязнении стенок и падении утечки:

- в начале коэффициент $\lambda(t)$ большой, величина $\beta(t)$ большая, $F(t)$ мала и обводненность продукции низкая (рис. 3);
- по мере загрязнения $\lambda(t)$ снижается, $\beta(t)$ снижается, $F(t)$ растет и темп роста обводненности повышается [12, 13].

Обводненность скважины $wc(t)$

$$wc(t) = \frac{q_{w prod}(t)}{q_{w prod}(t) + q_o(t)}, \quad (13)$$

где $q_o(t)$ — дебит нефти добывающей скважины.

Зависимость $WC(t)$ от времени и параметра α после момента прорыва по трещине.

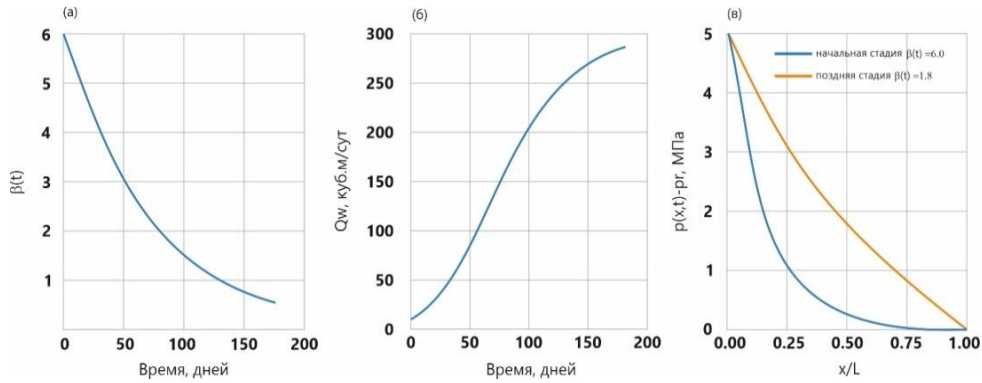


Рис. 3. Декомпозиция механизма: эволюция параметра утечек, дебита воды и профиля давления: а) Эволюция безразмерного параметра утечек $\beta(t)$ после прорыва; б) Дебит воды, поступающий в добывающую по трещине; в) Профили давления в трещине для раннего и позднего времени
Fig. 3. Mechanism decomposition: evolution of the leakoff parameter, water rate, and pressure profile: (a) Evolution of the dimensionless leakoff parameter $\beta(t)$ after breakthrough; (b) Water rate entering the producing well through the fracture; (c) Pressure profiles in the fracture at early and late times

Результаты

Рассмотрим на примере одного из месторождений Западной Сибири обводнение трех скважин по трещине. Динамика обводнения скважины представлена на рисунке 4а.

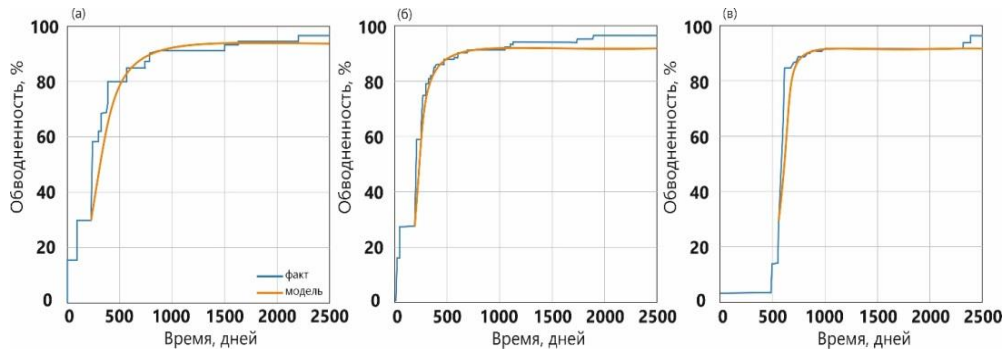


Рис. 4. Примеры динамики обводнения добывающих скважин при прорыве воды по трещине
Fig. 4. Examples of water-cut dynamics in producing wells during fracture-driven water breakthrough

В этом примере приемистость нагнетательной скважины $q_{inj}(t) = 300 \text{ м}^3/\text{сут.}$, дебит нефти добывающей скважины $q_0(t) = 20 \text{ м}^3/\text{сут.}$, начальный объем воды, транспортируемой по трещине в добывающую скважину в момент прорыва, $q_{w\text{prod}}(t) \approx 8,57 \text{ м}^3/\text{сут.}$

Доля доставленной воды при $wc = 30 \%$

$$F_{30} = \frac{q_{w\text{prod}}}{q_{inj}} = \frac{8,57}{300} = 0,0286;$$

при $wc = 90 \%$

$$F_{90} = \frac{180}{300} = 0,6;$$

для $F_{30} = 0,0286$: из (12) $\beta_{30} \approx 4,247$

для $F_{90} = 0,6$: $\beta_{90} \approx 1,099$

По динамике технологических показателей момент скачка обводненности до 30 % $t_{30} \approx 0,52$ года, момент достижения обводненности скачком до 90 % $t_{90} \approx 0,68$ года, время $\Delta t = t_{90} - t_{30} \approx 57$ суток

$$\alpha = \frac{2}{\Delta t} \ln \left(\frac{\beta_{30}}{\beta_{90}} \right) = \frac{2}{57} \ln \left(\frac{4,247}{1,099} \right) \approx 0,047 \text{ сут}^{-1}.$$

Характерное время:

$$\tau = \frac{1}{\alpha} \approx 24 \text{ сут.}$$

Рост сопротивления утечке:

$$\frac{\lambda(t_{90})}{\lambda(t_{30})} = \left(\frac{\beta_{30}}{\beta_{90}} \right)^2 = \left(\frac{4,247}{1,099} \right)^2 \approx 14,9 \text{ раза.}$$

За два месяца эффективное сопротивление утечке увеличилось примерно в ~15 раз (утечки резко упали), что обеспечило рост обводненности с 30 до 90 %.

Для двух других скважин (рис. 4б, 4в) параметры $\alpha \approx 0,007 \text{ сут.}^{-1}$ и $\alpha \approx 0,004 \text{ сут.}^{-1}$ соответственно. Характерное время: $\tau = 136$ суток и $\tau = 247$ суток.

Рост эффективного сопротивления утечке $\approx 10,8$. То есть в обоих случаях утечки снижаются примерно в 11 раз, а различается именно скорость этого процесса (через α , τ).

Обсуждение

Основная гипотеза работы состоит в том, что ускорение роста обводненности после прорыва обусловлено не только фактом формирования

межскважинной связи по трещине, но и снижением утечек из трещины в матрицу. По результатам трассерных исследований такие трещины, в которых вода движется с высокой скоростью, называют каналами низкого фильтрационного сопротивления. В рамках одномерной модели трещины утечки входят как распределенный сток $\ell(x, t)$ и определяют долю доставленной воды $F(t)$. В этом смысле умеренный рост обводненности сразу после прорыва является логичным: значительная часть воды может утекать в пласт по длине трещины. Ускорение роста возникает тогда, когда утечки снижаются во времени с загрязнением стенок, и большая часть нагнетаемой воды доходит до добывающей. Эта постановка опирается на общепринятую физику утечек: классические подходы, подобные закону Картера, задают базовый режим фильтрации через стенку, а расширения учитывают вклад загрязнения и зависящие от времени и давления сопротивления, что приводит к отклонению от простой зависимости от $t^{-1/2}$. Рост сопротивления утечке используется здесь как механизм, обеспечивающий ускорение роста обводненности.

Связь между $WC(t)$ и параметром утечек вводится через долю доставленной воды

$$F(t) = \frac{q_{w\text{ prod}}(t)}{Q_{inj}(t)} = \frac{\beta(t)}{\sinh \beta(t)}, \quad \beta(t) = \beta_0 e^{-\alpha(t_0 - t_b)/2},$$

где $\beta(t)$ представляет интенсивность утечек относительно проводимости трещины, а α задает скорость снижения утечек вследствие загрязнения.

Если ускорение обводнения обусловлено постепенным снижением утечек, то после момента прорыва t_b восстановленная из данных величина $\beta(t)$, полученная из уравнения $F = \beta / \sinh \beta$ и $F = Q_{w\text{ prod}} / Q_{inj}$, должна удовлетворять приближению

$$\ln \beta(t) = \ln \beta_0 - \frac{\alpha}{2}(t_0 - t_b).$$

То есть $\ln \beta$ должно быть близко линейным по времени на интервале ускоренного роста обводненности.

Ключевой момент, который делает гипотезу проверяемой: рост обводненности при фиксированных Q_{inj} и Q_o соответствует почти фиксированному изменению β . Различие между быстрым и медленным темпом обводнения связано прежде всего с разной скоростью снижения утечек, то есть со скоростью процесса (α , $\tau = 1/\alpha$), а не с разными типами трещин. Дополнительно модель дает количественную оценку изменения загрязнения стенок. Если интерпретировать через β , то между обводненностью 30 % и 90 %: $\left(\frac{\beta_{30}}{\beta_{90}}\right)^2 \approx 10,8$. Это означает, что скважина перешла от умеренного обводнения к почти полному обводнению, достаточно увеличения эффективного сопротивления утечке примерно на порядок. Для загрязне-

ния стенок это физически реалистичный масштаб изменения, соответствующий литературным источникам [3–7].

Существенный риск интерпретации состоит в том, что рост доли доставленной воды может быть вызван не только снижением утечек, но и ростом проводимости трещины. Однако эти два механизма дают разные диагностические следствия:

- снижение утечек увеличивает дебит воды в добывающей скважине при относительно слабом изменении режима работы нагнетательной скважины;
- рост проводимости трещины (рост раскрытия) должен сопровождаться изменениями гидродинамических откликов: ростом приемистости при том же давлении или снижением требуемого давления при том же расходе (в зависимости от режима). То есть по технологическому режиму эти механизмы принципиально разделимы.

Следовательно, предложенная модель проверяема: она предсказывает, что для быстрой динамики обводнения основное ускорение будет коррелировать с индикаторами ухудшения фильтрационных свойств породы (состав воды и содержание механических примесей, объем закачки), а не обязательно с признаками раскрытия трещины.

Ограничения модели:

1. **Приток воды доминирует по трещине.** Модель является диагностической, описывает пост-прорывную динамику через один управляющий параметр $\beta(t)$ и не позволяет явно учитывать приток из порового пласта.

2. **Краткосрочный период оценки.** Предположение о постоянном дебите или приемистости допустимо на кратковременном масштабе 2–4 месяцев для оценки. Для точной настройки целесообразно использовать фактические дебиты.

3. **Постоянный технологический режим.** Если есть независимые факторы изменения раскрытия трещины (например, изменение приемистости или давления нагнетания), целесообразно расширять модель, включая зависимость $K(t)$ в $\beta(t)$.

Дальнейшее развитие модели целесообразно в направлении явного учета изменения раскрытия трещины от давления (связь с геомеханикой), более детального учета загрязнения стенок (через фильтрацию и свойства примесей), учета фонового притока и двухфазного течения в пористом пласте для случаев, где наблюдается смешанный режим «фронт обводнения и трещина».

Выводы

- Пост-прорывная динамика обводнения может иметь последующее ускорение, если утечка из трещины в пласт системно уменьшается во времени из-за загрязнения стенок.

- Минимальная одномерная модель трещины с утечкой дает простую редукцию роста объема воды, движущегося по трещине с загрязнением ее стенок.
- Практический расчет показывает, что рост обводненности с ~30 до > 90 % за ~3 месяца может получаться без изменения технологических режимов скважин, только за счет падения утечки (роста доли воды, доходящей до добывающей).

Вклад авторов

Изотов А. А.: формулирование идеи; разработка методологии; написание статьи.
Мулявин С. Ф.: научное редактирование.

Author contributions

Aleksey A. Izotov: formulation of idea; methodology; writing.
Semyon F. Mulyavin: scientific editing.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interest.

Список источников / References

1. Witherspoon P. A., Wang J. S., Iwai K., Gale J. E. Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. *Technical information report*. 1979;23 (No. LBL-9557). Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States). <https://doi.org/10.2172/5704312>
2. Zhao Y., Lu G., Zhang L., Yang K., Li X., Luo J. Physical simulation of waterflooding development in large-scale fractured-vuggy reservoir considering filling characteristics, *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020;(191):107328, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107328>
3. Lavrov A. Modified leak-off equation for hydraulic fracture modelling. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2025;15(6):107. <https://doi.org/10.1007/s13202-025-02007-6>
4. Zenchenko E. V., Turuntaev S. B., Nachev V. A., Chumakov T. K., Zenchenko P. E. Study of the Interaction of a Hydraulic Fracture with a Natural Fracture in a Laboratory Experiment Based on Ultrasonic Transmission Monitoring. *Energies*. 2024;17(2):277. <https://doi.org/10.3390/en17020277>
5. Yi T., Peden J. M. A comprehensive model of dynamic fluid loss in hydraulic fracturing. *SPE Production & Facilities*. 1994;9(04):267–272. <https://doi.org/10.2118/25493-PA>
6. Berchenko I., Detournay E. Deviation of hydraulic fractures through poroelastic stress changes induced by fluid injection and pumping. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1997;34(6):1009–1019. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(97\)00005-3](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(97)00005-3)
7. Yarushina V. M., Bercovic, D., Oristaglio M. L. (2013). Rock deformation models and fluid leak-off in hydraulic fracturing. *Geophysical Journal International*. 2013;194(3):1514–1526, <https://doi.org/10.1093/gji/ggt199>

8. Alshoaibi A. M., Fageehi Y. A. Finite Element Simulation of a Crack Growth in the Presence of a Hole in the Vicinity of the Crack Trajectory. *Materials*. 2022;15(1):363. <https://doi.org/10.3390/ma15010363>
9. Эберт Г. Краткий справочник по физике: справочное издание / перевод со 2-го нем. изд. Н. М. Шикунинной; под ред. К. П. Яковлева. Москва: Физматгиз; 1963. 552 с.
Ebert G. *Kratkij spravochnik po fizike: spravochnoe izdanie*. Moscow: Fizmatgiz; 1963. (In Russ.).
10. Yang M., Li M.-C., Wu Q., Growcock F. B., Chen Y. Experimental study of the impact of filter cakes on the evaluation of LCMs for improved lost circulation preventive treatments. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020;(191):107152. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107152>
11. Liu Y., Guo J., Chen Z. Leakoff characteristics and an equivalent leakoff coefficient in fractured tight gas reservoirs. *Journal of natural gas science and engineering*. 2016;(31):603–611. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.03.054>
12. Settari, A. A new general model of fluid loss in hydraulic fracturing. *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1985;25(04):491–501. <https://doi.org/10.2118/11625-PA>
13. Miskimins J. L., editor. *Hydraulic fracturing: fundamentals and advancements*. Richardson, Texas, USA: Society of Petroleum Engineers. 2019:1–795.

Информация об авторах / Information about the authors

Изотов Алексей Александрович,
директор по науке и инновациям, ООО
«РН-Геология Исследования Разработ-
ка», г. Тюмень, aaizotov@rn-gir.rosneft.ru

Aleksey A. Izotov, LLC «RN-
GIR», Business Development Director,
Tyumen, aaizotov@rn-gir.rosneft.ru

Мулявин Семен Федорович,
доктор технических наук, профессор
кафедры разработки и эксплуатации
нефтяных и газовых месторождений,
Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень, muljavinsf@tyuiu.ru, ORCID:
<https://orcid.org/0000-0003-4768-8511>

Semyon F. Mulyavin, Doctor of
Engineering Sciences, Professor at the
Development and Exploitation of Oil and
Gas Fields, Industrial University of
Tyumen, muljavinsf@tyuiu.ru, ORCID:
<https://orcid.org/0000-0003-4768-8511>

Поступила в редакцию / Received 26.12.2025

Поступила после рецензирования / Revised 04.02.2026

Принята к публикации / Accepted 05.02.2026