

УДК 622.276.1

DOI: 10.31660/0445-01108-2025-109-123

EDN: JYDWBL

Теоретическое обоснование процесса изменения концентрации структур кольматантов в околоскважинной зоне при виброимпульсном воздействии

Н. В. Шаталова

*Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
shataliovanv@tyuiu.ru*

Аннотация. Для восстановления продуктивных свойств нефтяных скважин применяется большое количество волновых и вибрационных способов воздействия на пласт, использующихся для увеличения проницаемости околоскважинной зоны. Необходимым этапом существующих технологий является вынос загрязняющих околоскважинную зону частиц в скважину с последующей транспортировкой их на поверхность. Однако влияние волновых полей может быть распространено на большую глубину и эффективно применяться для очистки большого участка пласта. Цель исследования — теоретическое обоснование процесса изменения концентрации структур кольматантов в околоскважинной зоне и трещине гидравлического разрыва пласта без извлечения разрушенных частиц кольматантов на поверхность: в процессе воздействия волновых полей, генерируемых в скважине, осуществляется продвижение частиц в глубь пласта и рассеивание их по большой площади чистого пространства. Теоретическое обоснование процесса проведено методом математического моделирования. В работе выполнена постановка задачи уменьшения концентрации частиц загрязнений на исследуемом участке, осуществлено ее решение, получены формулы изменения количества осадка и абсолютной проницаемости, сделаны расчеты, построены графики. Результаты могут быть применены для разработки новой виброволновой технологии повышения продуктивности скважин.

Ключевые слова: виброволновое воздействие, суффозия, кольматирующие частицы

Для цитирования: Шаталова, Н. В. Теоретическое обоснование процесса изменения концентрации структур кольматантов в околоскважинной зоне при виброимпульсном воздействии / Н. В. Шаталова. — DOI: 10.31660/0445-01108-2025-2-109-123// Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2025. — № 2. — С. 109–123. EDN: JYDWBL

Theoretical justification of the process of changing the concentration of colmatant structures in the near-wellbore zone under vibro-impulse action

Natalya V. Shatalova

*Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
shataliovanv@tyuiu.ru*

Abstract: A wide range of wave and vibration methods are employed to restore the productivity of oil wells, aimed at increasing the permeability of the near-wellbore zone. A necessary step in these technologies is the removal of contaminating particles from the near-wellbore zone, with its subsequent transportation to the surface. However, action of wave fields can extend to greater depth. In addition, it can be effectively utilized to clean large areas of the reservoir. The aim of the study

is to theoretically justify the process of altering the concentration of colmatant structures in the near-wellbore zone and within hydraulic fracturing (HF) fractures, without necessitating the extraction of broken colmatant particles to the surface. When wave fields generated within the well are applied, particles are moving deeper into the reservoir and dispersed over a wider clean area. The theoretical justification was conducted by the method of mathematical modeling. In the course of work, the task of reducing the concentration of contaminant particles in the studied area is formulated and solved, formulas for the change in the amount of sediment and absolute permeability are derived, calculations are made, and graphs are constructed. The results of this study can be applied to the development of a new vibro-wave technology aimed at improving well productivity.

Keywords: vibration wave action, suffusion, colmatating particles

For citation: Shatalova, N. V. (2025). Theoretical justification of the process of changing the concentration of colmatant structures in the near-wellbore zone under vibro-impulse action. *Oil and Gas Studies*, (1), pp. 109-123. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2025-1-109-123

Введение

Широкое применение волновых полей в нефтяной промышленности обусловлено их максимальной экологичностью, сопровождающейся значительной эффективностью по очистке околоскважинной зоны от кольматантов, снижению вязкости и увеличению подвижности пластовых флюидов и другими положительными эффектами [1].

Упругие колебания рабочей жидкости в скважине создаются генераторами различных конструкций, работающими на различной глубине погружения [2]. Существующие волновые технологии декольматации околоскважинных зон включают в себя два основных этапа: силовое воздействие, разрушающее структуры загрязнений и вынос разрушенных частиц на поверхность созданием депрессии на пласт [3, 4]. Однако существует мнение, что волновым репрессионным воздействием возможно оттеснить загрязнения вглубь пласта [5]. В предложенной работе дано теоретическое обоснование виброволнового воздействия на поровое пространство трещины гидравлического разрыва пласта (ГРП) и рассмотрен случай продвижения частиц загрязнений за пределы проппантовой пачки потоком жидкости, закачиваемой в импульсном режиме.

Объект и методы исследования

Источником колебаний жидкости в скважине в предлагаемом вибрационном методе служит виброволновой гидромонитор (ВГМ), располагаемый в зоне перфорации. Согласно принципу его действия канал нагнетаемой рабочей жидкости периодически перекрывается с помощью клапанным пружинного механизма, в результате чего происходят циклические колебания жидкости во внешней среде, сопровождающиеся последовательностью гидроударов. Режимы работы (пропускания жидкости через рабочую камеру) и релаксации имеют разное время, поэтому можно говорить о создании гидромонитором импульсов давления трапецеидальной формы, описанных в [6]. ВГМ работает в низкочастотном диапазоне: частота следования им-

пульсов изменяется от 1 до 5 Гц. С помощью организованного таким источником волнового поля решаются задачи очистки протяженного пространства продуктивного пласта, включающего трещину ГРП. Поэтому объектами воздействия выступают околоскважинная зона и поровое пространство трещины с измененными в процессе эксплуатации фильтрационными свойствами.

Для получения теоретических зависимостей и прогнозирования процесса в работе рассматривается фильтрация смеси жидкости, содержащей твердые частицы. Аналогичный процесс описывается в работах Ю. М. Шехтмана как процесс кольтатации-суффозии, происходящий при *постоянном* давлении [7]. Для предлагаемой задачи расчет распределения давления $P(x, t)$ в трещине в *импульсном* режиме описан в [8]. Математическое представление импульсов произведено с помощью гармоник ряда Фурье и решения уравнения пьезопроводности:

$$P(x, t) = P_0 + \sum_{n=0}^{\infty} a_n \frac{L-x}{L} \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \left\{ \sum_{j=1}^{\infty} \left[\left(\frac{2}{\pi j} \right) \frac{\sin \frac{\pi j x}{L}}{1 + \left(\frac{\kappa}{n\omega} \right)^2 \left(\frac{\pi j}{L} \right)^4} \left(-\cos(n\omega t) + \frac{\kappa}{n\omega} \left(\frac{\pi j}{L} \right)^2 \sin(n\omega t) \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где P_0 — пластовое давление; a_n — коэффициенты ряда Фурье для трапецеидальной функции; n — номер гармоники; ω — частота гармоники; κ — коэффициент пьезопроводности; L — интервал, на котором определяется распределение давления.

Для решения задачи о механической суффозии принимаем схематичное представление порового пространства Ю. М. Шехтмана (рис. 1).

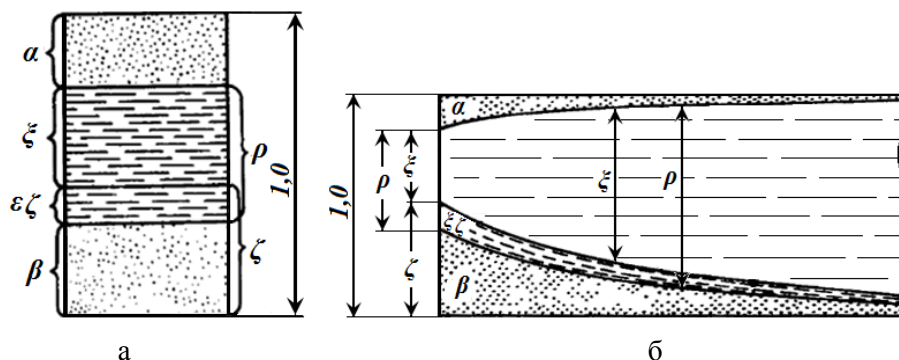


Рис. 1. Схема заполнения порового пространства в процессе фильтрации смеси: фронтальный вид (а) и вид сбоку (б)

На схеме следующие обозначения: ρ — насыщенность порового пространства жидкостью; $(1 - \rho)$ — насыщенность порового пространства твердым веществом; твердые частицы находятся в поровом пространстве

во взвешенном или осажденном состоянии; β — насыщенность порового пространства осевшей массой в твердом теле; α — взвешенными частицами; ζ — насыщенность порового пространства осевшими частицами в рыхлом теле; ξ — насыщенность порового пространства «свободной» жидкостью, не связанной с осевшей массой; ε — пористость осевшей массы (принимается постоянной); $\varepsilon \zeta$ — насыщенность жидкостью, связанной с осевшей массой.

Согласно схеме

$$\rho + \alpha + \beta = 1 \text{ и } \xi + \zeta + \alpha = 1, \quad (2)$$

$$\beta = \zeta - \varepsilon \zeta = \zeta (1 - \varepsilon) \text{ или } \zeta = \beta / (1 - \varepsilon), \quad (3)$$

$$\rho = 1 - \alpha - (1 - \varepsilon) \zeta \text{ и } \rho = \xi + \varepsilon \zeta. \quad (4)$$

введем обозначение объемной концентрации взвешенного твердого вещества в движущейся смеси δ , тогда

$$\delta = \frac{\alpha}{\alpha + \xi} \text{ или } \delta = \frac{\alpha}{1 - \zeta}. \quad (5)$$

Обозначим m — пористость породы в процессе фильтрации смеси, m_0 — первоначальная пористость породы, то количество жидкости в единице объема пористой среды выразится как

$$m = m_0 \rho, \quad (6)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м^3 .

Формулировка задачи

Через пористую среду течет жидкость, содержащая взвешенные частицы. Считаем, что при размерах пор, в 5–10 раз превышающих размер вымываемых частиц [9,10], поровые каналы позволяют сорванной частице двигаться без задержек вместе с фильтрационным потоком.

Срыв частиц происходит равномерно по пути фильтрации, от координаты x не зависит, а изменяется только во времени. Требуется определить изменение объемной концентрации и всех насыщенностей, то есть математически описать процесс суффозии.

Решением задачи будет определение закономерностей $\zeta(x, t)$ — доли осевшего пористого грунта в порах ($\varepsilon = \text{const}$ — пористость осадка) и $\delta(x, t)$ — доли плавающей твердой фракции в подвижной суспензии.

Для нахождения указанных величин решается система из 3-х дифференциальных уравнений:

- 1) уравнение Дарси;
- 2) уравнение интенсивности процесса кольтматации-суффозии (кинетики процесса);
- 3) уравнение неразрывности для твердых частиц, несомых фильтрационным потоком через единицу поверхности поперечного сечения пористой среды.

$$\left\{ \begin{array}{l} w(x, t) = - \frac{k_0(1 - \sqrt{\zeta(x, t)})^3}{\mu} \frac{\partial P(x, t)}{\partial x} \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \zeta(x, t)}{\partial t} = \lambda \left(\delta(x, t) - \frac{a_0 \zeta(x, t)}{\zeta_0 - \zeta(x, t)} \right) \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \delta(x, t)}{\partial t} + \frac{w(x, t)}{m_0(1 - \zeta)} \frac{\partial \delta(x, t)}{\partial x} = f(\delta(x, t), \zeta(x, t)) \end{array} \right. \quad (9)$$

Уравнение (8) описывает процесс кольтматации-суффозии: если $\delta(x, t)$ больше равновесной концентрации твердых частиц в суспензии δ^*

$$\delta(x, t) > \delta^* = \frac{a_0 \zeta(x, t)}{\zeta_0 - \zeta(x, t)}$$

происходит отложение осадка, если $\delta(x, t) < \delta^*$ происходит процесс суффозии, вымывание осадка $\zeta(x, t)$.

Замыкающими соотношениями служат для абсолютной проницаемости — (10), для пористости — (11) и насыщенности порового пространства жидкостью — (12)

$$k(x, t) = k_0(1 - \sqrt{\zeta(x, t)})^3, \quad (10)$$

где $k_0 = const$. $k_0 = 30 \dots 700$ Д согласно экспериментальным исследованиям Ю. М. Шехтмана

$$m(x, t) = m_0 + \zeta(x, t)(m_1(x, 0) - m_0), \quad (11)$$

где m_1 — пористость в начале суффозии ($\zeta(x, t) = 1$); m_0 — пористость в конце суффозии ($\zeta(x, t) = 0$).

В расчете принимаем $m_1 = m_1(x, 0) = m_0 \cdot \rho(x, 0)$.

Насыщенность порового пространства жидкостью согласно рисунку 1 и при учете соотношения (4) и (5)

$$\rho(x, t) = 1 - \delta(x, t) \cdot (1 - \zeta(x, t)) - (1 - \varepsilon) \cdot \zeta(x, t). \quad (12)$$

Для решения задачи принимаются начальные (НУ) и граничные (ГУ) условия

НУ: $\zeta(x, 0) = f_1(x), \delta(x, 0) = f_2(x); P(x, 0) = P_{пл}, q(x, 0) = 0$
 ГУ: $P(0, t) = P_{пл} + P_a \cdot f_3(t); P(L, t) = P_{пл}$.

В НУ функция

$$f_1(t) = C_1 e^{-\frac{x}{C_2}},$$

где $C_1 = 0,75, C_2 = 2; C_1 \leq \zeta_0$. Показательная функция $f_1(t)$ соответствует распределению осевшего осадка в поре по рисунку 1, б.

В ГУ $f_3(t)$ — функция, описывающая последовательность трапецеидальных импульсов, представлена уравнением (1).

Схема решения задачи

С помощью аналитического решения уравнения (7) находим среднюю по сечению скорость фильтрации и скорость частиц в суспензии $w(x, t)$ на новом временном шаге.

Затем решаем уравнение кинетики процесса (8). Оно решается численным интегрированием, причем интеграл равен шагу по времени, а неизвестная $\zeta(x, t)$ на новом временном шаге является верхним пределом интегрирования. Уравнение (9) — уравнение неразрывности — это уравнение переноса частиц. Решив его по явной схеме бегущего счета, найдем $\delta(x, t)$ на новом временном шаге.

Система уравнений 7÷9 решается на координатной пространственно-временной сетке. Пространственная сетка одномерная, регулярная, охватывает область исследуемого интервала от скважины (координата x_0) до расчетного значения в глубине пласта (координата x_N). Локализация точек временной сетки обусловлена видом функции трапецеидального возмущения давления на левой границе интервала (рис. 2). Время изменяется фиксированными шагами и соответствует положению точек 0...5. Система уравнений 7÷9 решается в этих точках.

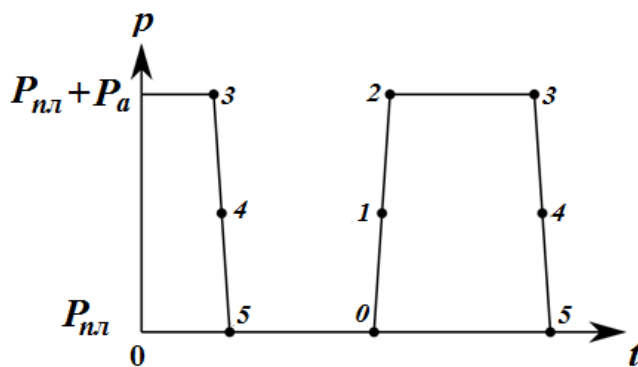


Рис. 2. Временная организация импульсов давления в околоскважинной зоне

Теперь рассмотрим подробнее каждое из уравнений системы.

Уравнение Дарси

Закон Дарси позволяет при известной вязкости и проницаемости найти среднюю по сечению скорость фильтрации w [м/с]

$$w(x, t) = -\frac{k_0(1 - \sqrt{\zeta(x, t)})^3}{\mu} \frac{\partial P(x, t)}{\partial x}.$$

Для расчета осредняем скорость фильтрации на исследуемом участке. Для этого высчитываем среднюю проницаемость

$$\overline{k(t)} = \left(\frac{1}{\sum_{i=0}^N \frac{1}{k(x_i, t)}} \right), \quad (11)$$

и среднюю на участке скорость фильтрации

$$\overline{w(t)} = -\frac{\overline{k(t)}}{\mu} \frac{(P(x_N, t) - P(x_0, t))}{L}. \quad (12)$$

Уравнение кинетики процесса

$$\frac{\partial \zeta(x, t)}{\partial t} = \lambda \left(\delta(x, t) - \frac{a_0 \zeta(x, t)}{\zeta_0 - \zeta(x, t)} \right)$$

описывает увеличение осадка $\zeta(x, t)$ (процесс коагуляции), если

$$\delta(x, t) > \delta^* = \frac{a_0 \zeta(x, t)}{\zeta_0 - \zeta(x, t)}$$

и вымывания осадка (процесс суффозии $\zeta(x, t)$), если $\delta(x, t) < \delta^*$.

В неравенствах δ^* — равновесная концентрация твердых частиц в суспензии, $a_0 = 0,0005 \dots 0,0036$, $\zeta_0 = 0,7 \dots 0,9$ по данным опытов Ю. М. Шехтмана.

Параметр λ — безразмерный опытный параметр, характеризующий свойства пористой среды и заполнителя в их взаимодействии в процессе суффозии. $\lambda = 81$ [1/час] или $0,0225$ [1/сек] $\varepsilon = 0,5$ по данным опытов Ю. М. Шехтмана и Е. М. Сергеева.

Преобразуем уравнение кинетики к виду

$$\partial t = \frac{\partial \zeta(x, t)}{\lambda \left(\delta(x, t) - \frac{a_0 \zeta(x, t)}{\zeta_0 - \zeta(x, t)} \right)}. \quad (13)$$

Интегрируем обе части выражения (13)

$$t^{k+1} - t^k = \int_{\zeta_n^k}^{\zeta_n^{k+1}} \frac{d\tau}{\lambda \left(\delta_n^k - \frac{a_0 \tau}{\zeta_0 - \tau} \right)}. \quad (14)$$

Шаг по времени $t^{k+1} - t^k$ фиксирован и известен: это параметр импульса вибровоздействия.

В правой части δ_n^k и ζ_n^k известны, искомая величина ζ_n^{k+1} является верхним пределом интеграла.

Для решения уравнения воспользуемся квадратурным правилом Гаусса-Кронрода [12]. В соответствии с этим правилом интеграл

$$I = \int_a^b g(t) dt$$

может быть оценен с помощью другого известного интеграла

$$\int_a^b f(z) dz = \sum_{i=1}^m w_i f(z_i) + R_m. \quad (15)$$

Для выражения (15) известны веса w_i и положение узлов z_i на отрезке (α, β) , то есть определено квадратурное правило. Переход от отрезка (α, β) к отрезку (a, b) и от переменной z к переменной t осуществляется заменой переменных

$$\begin{aligned} I &= \left(\frac{b-a}{\beta-\alpha} \right) \int_a^\beta g \left(\frac{(b-a)z + a\beta - b\alpha}{\beta-\alpha} \right) dz = \\ &= \left(\frac{b-a}{\beta-\alpha} \right) \sum_{i=1}^m w_i g \left(\frac{(b-a)z_i + a\beta - b\alpha}{\beta-\alpha} \right) + R_m. \end{aligned} \quad (16)$$

Воспользовавшись 15-точечным правилом Кронрода для интеграла $\int_{-1}^1 f(z) dz$, запишем интеграл (14) в виде неявного уравнения относительно ζ_n^{k+1}

$$t^{k+1} - t^k \approx \left(\frac{\zeta_n^{k+1} - \zeta_n^k}{2} \right) \sum_{i=1}^{15} w_i \frac{1}{\lambda \left(\delta_n^k - \frac{a_0 \left(\frac{(\zeta_n^{k+1} - \zeta_n^k) z_i + \zeta_n^k + \zeta_n^{k+1}}{2} \right)}{\zeta_0 - \left(\frac{(\zeta_n^{k+1} - \zeta_n^k) z_i + \zeta_n^k + \zeta_n^{k+1}}{2} \right)} \right)}. \quad (17)$$

Данное уравнение можно решить, к примеру, методом деления отрезка пополам (бисекции). Решив его, узнаем ζ_n^{k+1} на новом временном шаге. Решение и вычисления производились с помощью специально написанной компьютерной программы.

Уравнение переноса

Уравнение переноса — это третье уравнение системы. Оно выводится из уравнения неразрывности для твердой фазы

$$\frac{\partial w_T}{\partial x} = m_0 \frac{\partial(1-\alpha-\beta)}{\partial t}, \quad (18)$$

где α — доля твердой взвеси в объеме пор m_0 , $\beta = (1 - \varepsilon) \cdot \zeta$ — доля осадка в этом же объеме.

Поскольку $w_T = w(x, t)\delta(x, t)$, где $\delta(x, t) = \alpha/(1 - \zeta)$ — доля плавающей твердой фракции в подвижной суспензии и $w(x, t)$ — суммарная скорость фильтрации жидкой фазы и взвеси суспензии, запишем уравнение баланса в более общем виде

$$\frac{\partial w(x, t)\delta(x, t)}{\partial x} = -m_0(1 - \varepsilon) \frac{\partial \zeta(x, t)}{\partial t} - m_0 \frac{\partial \alpha}{\partial t}. \quad (19)$$

Или, учитывая, что

$$\zeta = 1 - \frac{\alpha}{\delta},$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{1}{\delta} \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\alpha}{\delta^2} \frac{\partial \delta}{\partial t}, \quad \text{и}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{\alpha}{\delta} \frac{\partial \delta}{\partial t} - \delta \frac{\partial \zeta}{\partial t} = (1 - \zeta) \frac{\partial \delta}{\partial t} - \delta \frac{\partial \zeta}{\partial t}.$$

Уравнение баланса можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial w(x, t)\delta(x, t)}{\partial x} &= -m_0(1 - \varepsilon) \frac{\partial \zeta(x, t)}{\partial t} - m_0(1 - \zeta) \frac{\partial \delta(x, t)}{\partial t} + m_0 \delta \frac{\partial \zeta(x, t)}{\partial t} \\ \frac{\partial w(x, t)\delta(x, t)}{\partial x} &= m_0(\varepsilon - 1 + \delta(x, t)) \frac{\partial \zeta(x, t)}{\partial t} - m_0(1 - \zeta(x, t)) \frac{\partial \delta(x, t)}{\partial t}. \end{aligned} \quad (20)$$

С учетом уравнения интенсивности процесса, или уравнения кинетики процесса

$$\frac{\partial \zeta(x, t)}{\partial t} = \lambda \left(\delta(x, t) - \frac{a_0 \zeta(x, t)}{\zeta_0 - \zeta(x, t)} \right) \quad (21)$$

получается уравнение для неразрывности твердой фазы

$$\frac{\partial w(x, t)\delta(x, t)}{\partial x} = m_0(\varepsilon - 1 + \delta) \lambda \left(\delta - \frac{a_0 \zeta}{\zeta_0 - \zeta} \right) - m_0(1 - \zeta) \frac{\partial \delta}{\partial t}. \quad (22)$$

В этом уравнении $m_0, a_0, \zeta_0, \varepsilon$ — известные константы, $w(x, t) = \overline{w(t)}$ — средняя по сечению и по участку пласта скорость течения смеси в м/с из закона Дарси (12).

Уравнение (22) можно записать в виде

$$w \frac{\partial \delta}{\partial x} + \delta \frac{\partial w}{\partial x} = m_0(\varepsilon - 1 + \delta) \lambda \left(\delta - \frac{a_0 \zeta}{\zeta_0 - \zeta} \right) - m_0(1 - \zeta) \frac{\partial \delta}{\partial t},$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{w}{m_0(1 - \zeta)} \frac{\partial \delta}{\partial x} = - \frac{\delta}{m_0(1 - \zeta)} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{m_0(\varepsilon - 1 + \delta) \lambda}{m_0(1 - \zeta)} \left(\delta - \frac{a_0 \zeta}{\zeta_0 - \zeta} \right). \quad (23)$$

Второе слагаемое в правой части (23)

$$\frac{m_0(\varepsilon - 1 + \delta) \lambda}{m_0(1 - \zeta)} \left(\delta - \frac{a_0 \zeta}{\zeta_0 - \zeta} \right) = \frac{(\varepsilon - 1) \lambda}{(1 - \zeta)} \delta - \frac{(\varepsilon - 1) \lambda}{(1 - \zeta)} \frac{a_0 \zeta}{(\zeta_0 - \zeta)} + \frac{\lambda}{(1 - \zeta)} \delta^2 - \frac{\lambda \delta}{(1 - \zeta)} \frac{a_0 \zeta}{(\zeta_0 - \zeta)} =$$

$$= \delta \left(\frac{(\varepsilon - 1) \lambda}{(1 - \zeta)} - \frac{\lambda}{(1 - \zeta)} \frac{a_0 \zeta}{(\zeta_0 - \zeta)} \right) - \frac{(\varepsilon - 1) \lambda}{(1 - \zeta)} \frac{a_0 \zeta}{(\zeta_0 - \zeta)} + o(\delta), \quad (24)$$

где

$$\frac{\lambda}{m_0(1 - \zeta)} \delta^2 = o(\delta)$$

есть величина второго порядка малости относительно δ . Так как $\delta \ll 1$, пренебрегаем этим нелинейным слагаемым. В результате правая часть (23) станет линейной.

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{w}{m_0(1 - \zeta)} \frac{\partial \delta}{\partial x} = \delta \left(- \frac{1}{m_0(1 - \zeta)} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{(\varepsilon - 1) \lambda}{(1 - \zeta)} - \frac{\lambda}{(1 - \zeta)} \frac{a_0 \zeta}{(\zeta_0 - \zeta)} \right) - \frac{(\varepsilon - 1) \lambda}{(1 - \zeta)} \frac{a_0 \zeta}{(\zeta_0 - \zeta)}. \quad (25)$$

Уравнение (25) представляет собой уравнение переноса с источником членом (правая часть), зависящим от решения δ .

Численная схема первого порядка для решения данного уравнения может быть реализована разными способами. Один из них представляет явную схему бегущего счета и имеет вид

$$\frac{\delta_n^{k+1} - \delta_n^k}{\tau} + c \frac{\delta_n^k - \delta_{n-1}^k}{h} = \delta_n^{k+1} \left(- \frac{1}{m_0(1 - \zeta)} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{(\varepsilon - 1) \lambda}{(1 - \zeta)} - \frac{\lambda}{(1 - \zeta)} \frac{a_0 \zeta}{(\zeta_0 - \zeta)} \right)_n^{k+1} -$$

$$- \left(\frac{(\varepsilon - 1) \lambda}{(1 - \zeta)} \frac{a_0 \zeta}{(\zeta_0 - \zeta)} \right)_n^{k+1}, \quad (26)$$

где $c = w/m_0(1 - \zeta)$.

Сгруппировав в левой части уравнения слагаемые с δ_n^{k+1} , домножим обе части уравнения на τ и учтем, что расход не меняется по координате для каждого t , получим

$$\delta_n^{k+1} \left(1 - \frac{(\varepsilon - 1) \lambda \tau}{(1 - \zeta)} + \frac{\lambda \tau}{(1 - \zeta)} \frac{a_0 \zeta}{(\zeta_0 - \zeta)} \right)_n^{k+1} =$$

$$= \delta_n^k - \frac{c \tau}{h} (\delta_n^k - \delta_{n-1}^k) - \left(\frac{(\varepsilon - 1) \lambda \tau}{(1 - \zeta)} \frac{a_0 \zeta}{(\zeta_0 - \zeta)} \right)_n^{k+1}. \quad (27)$$

Отсюда можно выразить δ_n^{k+1} :

$$\delta_n^{k+1} = \frac{\left[\delta_n^k - \frac{c\tau}{h} (\delta_n^k - \delta_{n-1}^k) - \left(\frac{(\varepsilon-1)\lambda\tau}{(1-\zeta)} \frac{a_0\zeta}{(\zeta_0-\zeta)} \right)_n^{k+1} \right]}{\left(1 - \frac{(\varepsilon-1)\lambda\tau}{(1-\zeta)} + \frac{\lambda\tau}{(1-\zeta)(\zeta_0-\zeta)} \right)_n^{k+1}}. \quad (28)$$

Данное выражение справедливо для $c > 0$ (флюид движется от скважины вглубь пласта), и бег происходит слева направо по узлам пространственной координатной сетки $n \in [1 \dots N]$, где $n = 0$ — скважина. При этом направлении бега используется ГУ на левой границе: $\delta_0^{k+1} = 0$. На правой границе решение находится по схеме.

Аналогично можно вывести выражение для δ_n^{k+1} в случае $c < 0$ (флюид движется к скважине из пласта)

$$\delta_n^{k+1} = \frac{\left[\delta_n^k - \frac{|c|\tau}{h} (\delta_n^k - \delta_{n+1}^k) - \left(\frac{(\varepsilon-1)\lambda\tau}{(1-\zeta)} \frac{a_0\zeta}{(\zeta_0-\zeta)} \right)_n^{k+1} \right]}{\left(1 - \frac{(\varepsilon-1)\lambda\tau}{(1-\zeta)} + \frac{\lambda\tau}{(1-\zeta)(\zeta_0-\zeta)} \right)_n^{k+1}}. \quad (29)$$

Здесь $n \in [N - 1 \dots 0]$, где $n = 0$ — скважина.

При этом направлении бег по пространственной сетке идет справа налево, используется ГУ на правой границе: $\delta_N^{k+1} = \delta_{N-1}^{k+1}$ (δ берется из предыдущей ячейки на этом же временном шаге). На левой границе решение находится по схеме.

Результаты и обсуждение

Численная реализация

По результатам моделирования процесса суффозии в режиме волнового репресссионного воздействия с целью очистки околоскважинной зоны и трещины ГРП были выполнены расчеты с петрофизическими данными среды (табл. 1) и данные для формы импульсов (табл. 2).

Таблица 1

Петрофизические данные пористой среды

Название	Величина
Пористость чистой среды (проппантовой пачки) m_0	0,15
Абсолютная проницаемость чистой среды (пачки), k_0	120 Д
Динамическая вязкость пластовой жидкости	0,001 Па·с
Длина исследуемой области, L	15 м
Пластовое давление, P_0	21 МПа
Коэффициент изотермической сжимаемости воды β_l	$4,28 \cdot 10^{-10}$ 1/Па·с
Коэффициент изотермической сжимаемости скелета β_s	$2,04 \cdot 10^{-10}$ 1/Па·с
Коэффициент изотермической сжимаемости осадка, β_g	$2,04 \cdot 10^{-10}$ 1/Па·с

Расчетные данные для формы импульсов

Название	Величина
Частота вибровоздействия	2 Гц
Период импульсов, T_{imp}	0,5 с
Основание трапеции, T_1	0,25 с
Вершина трапеции, T_0	0,24 с
Амплитуда импульса давления	8·МПа

Начальное распределение осадка в порах $\zeta(x, 0) = c_1 \cdot \exp(-c_2 x)$, коэффициенты $c_1 = 0,75$, $c_2 = 2,0$.

Коэффициенты в уравнении кинетики, $\lambda = 0,0225$ 1/сек, $a_0 = 0,0036$, $\zeta_0 = 0,9$.

Выполненные по описанной методике расчеты показывают, что в результате воздействия импульсами давления на околоскважинную зону в течение 4-х часов происходит изменение количества осадка в объеме пор $\zeta(x, t)$, а также абсолютной проницаемости $k(x, t)$ пористой среды. График на рисунке 4 показывает, что в начале вибровоздействия $\zeta(x, 0) = 0,75$, то есть пористая среда околоскважинной зоне закольматирована на 75 %.



Рис. 4. Изменение количества осадка в объеме пор $\zeta(x, t)$ за 4 часа виброимпульсного воздействия

При этом дальняя область трещины ГРП остается чистой. В конце воздействия осадок практически равномерно распределяется по всей длине исследуемого участка, составляя около 10 %; $\zeta(x, t)$ по длине изменяется в пределах 0,1...0,17.

График на рисунке 5 иллюстрирует изменение абсолютной проницаемости $k(x, t)$ пористой среды на исследуемом участке.

Увеличение $k(x, t)$ от 0 до 50 Д наблюдается в зоне перфорации через 4 часа вибровоздействия. В глубине пласта $k(x, t)$ несколько снижается по сравнению со значением абсолютной проницаемости чистой среды проп-

пантовой пачки k_0 , принятой 120 Д. Такое изменение объясняется очисткой пористой структуры, продвижением и рассеиванием разрушенных частиц кольматантов из зоны перфорации в глубь пласта.



Рис. 5. Изменение абсолютной проницаемости $k(x,t)$ за 4 часа виброимпульсного воздействия

Увеличение $k(x,t)$ от 0 до 50 Д наблюдается в зоне перфорации через 4 часа вибровоздействия. В глубине пласта $k(x,t)$ несколько снижается по сравнению со значением абсолютной проницаемости чистой среды пропантовой пачки k_0 , принятой 120 Д. Такое изменение объясняется очисткой пористой структуры, продвижением и рассеиванием разрушенных частиц кольматантов из зоны перфорации в глубь пласта.

Выводы

Рассмотрена задача очистки порового пространства нефтяного пласта от колюматирующих загрязнений виброволновым воздействием. Вниманием охвачено пространство околоскважинной зоны и трещины ГРП. В основу описания процесса деколюматации положен процесс суффозии. Теоретическое описание этим методом подтверждает гипотезу, что волновым репрессивным воздействием возможно не только очистить поровое пространство от загрязнений, но и оттеснить их вглубь пласта за границы трещины ГРП с рассеиванием частиц по большой площади. Технологическое решение, основанное на результатах предложенного моделирования, позволит исключить операцию выноса разрушенных загрязнений на поверхность и проблему их утилизации. Процессы, описанные в обосновании, могут быть усилены химическими методами восстановления продуктивности нефтяных скважин, а также применяться для повышения приемистости нагнетательных скважин.

Список источников

1. Колебания и волны во флюидонасыщенных геологических средах. Явления, процессы, закономерности. Волновая парадигма : монография / О. Л. Кузнецов, В. П. Дыбленко, Д. В. Чилингар [и др.]. – Ижевск, 2021. – 420 с. – Текст : непосредственный.

2. Гидродинамические генераторы колебаний — новый тип устройств для осуществления периодических воздействий / Е. И. Велиев, Р. Ф. Ганиев, А. С. Корнеев, Л. Е. Украинский. — DOI 10.31857/S268674002106016X. — Текст : непосредственный // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. — 2021. — Т. 501, № 1. — С. 63–67.
3. Ганиев, О. Р. Процессы, технология и техника волновой очистки призабойной зоны пласта / О. Р. Ганиев, Н. А. Шамоу, Н. С. Завалишин. — DOI 10.31857/S0235711922040083. — Текст : непосредственный // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2022. — № 4. — С. 70–80.
4. An Effective Accelerated Pulsing Injection Method for Restoring Injectivity in Waterflood Fields with Selective Injection Systems with Side-Pocket Mandrels and Control Flow Valves / J. C. Escobar-Remolina, W. Barrios-Ortiz, J. Mantilla-Villamizar [et al.] // SPE Western Regional Meeting. — SPE, 2014. — P. SPE-169544-MS. — DOI: 10.2118/169544-MS
5. Апасов, Т. К. Комплексный метод интенсификации добычи нефти волновыми полями. / Т. К. Апасов, Н. В. Шаталова, А. В. Шаталов. — Текст : непосредственный // Интегрированное научное сопровождение нефтегазовых активов: опыт, инновации, перспективы: сборник докладов III международной научно-практической конференции. Сыктывкар, 20–22 октября 2021 года. — Сыктывкар : Коми республиканская типография, 2021. — С. 245–250.
6. Апасов, Т. К. Обоснование эффективности виброволновой технологии воздействия на призабойную зону пласта. / Т. К. Апасов, Н. В. Шаталова, А. В. Шаталов. — DOI 10.33285/0132-2222-2020-9(566)-44-49. — Текст : непосредственный // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2020. — № 9 (566). — С. 44–49.
7. Шехтман, Ю. М. Фильтрация малоконцентрированных суспензий / Ю. М. Шехтман. — Москва : Издательство Академии наук СССР. — 1961. — 212 с. — Текст : непосредственный.
8. Реновационный способ восстановления продуктивности скважин с использованием волновых полей / Н. В. Шаталова, Т. К. Апасов, А. В. Шаталов, Б. В. Григорьев. — DOI 10.31897/PMI.2022.108. — Текст : непосредственный // Записки Горного института. — 2020. — Т. 258. — С. 986–997.
9. Зайцев, М. В. Влияние эффектов поражения пласта на немонопотную зависимость дебита скважины от депрессии / М. В. Зайцев, Н. Н. Михайлов — DOI 10.24887/0028-2448-2017-9-90-94. — Текст : непосредственный // Нефтепромысловое дело. — 2016. — № 6. — С. 7–13.
10. Шаталова, Н. В. Инновационное применение вибраций в технологии повышения продуктивности нефтяных скважин / Н. В. Шаталова, Т. К. Апасов. — Текст : непосредственный // Материалы Международной научно-практической конференции им. Д. И. Менделеева, посвященной 15-летию Института промышленных технологий и инжиниринга: сборник статей конференции. В 3-х томах. — Тюмень : ТИУ, 2024. — С. 160–162.
11. Каханер, Д. Численные методы и программное обеспечение / Д. Каханер, К. Моулера, С. Нэш ; пер с англ. под ред. Х. Д. Икрамова, 2-е изд. — Москва : Мир, 2001. — 575 с. — Текст : непосредственный.

References

1. Kuznetsov, O. L., Dyblenko, V. P., Chilingar, D. V., Sadegi, K. M., Marchukov, E. Yu., Sharifullin, R. Ya., Chirkin, I. A., & Simkin, E. M. (2021). Oscillations and waves in fluid-saturated geological environments phenomena, processes, patterns wave paradigm. Izhevsk, 420 p. (In Russian).
2. Veliev, E. I., Ganiev, R. F., Korneev, A. S., & Ukrainsky, L. E. (2021). Hydrodynamic generators of oscillations: a new type of device for periodic impacts. Doklady Physics, 66(12), pp. 353-357. (In Russian). DOI: 10.31857/S268674002106016X

3. Ganiev, O. R., Shamov, N. A., & Zavalishin, N. S. (2022). Protsessy, tekhnologiya i tekhnika volnovoy ochildki prizaboynoy zony plasta. Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin, (4), pp. 70-80. (In Russian). DOI: 10.31857/S0235711922040083
4. Escobar-Remolina, J. C., Barrios-Ortiz, W., Mantilla-Villamizar, J., Vargas-Medina, J. A., Sanabria-Gomez, L., Davidson, B. C., ... & Wegmann-Sanchez, J. M. (2014). An Effective Accelerated Pulsing Injection Method for Restoring Injectivity in Waterflood Fields with Selective Injection Systems with Side-Pocket Mandrels and Control Flow Valves. In SPE Western Regional Meeting, pp. SPE-169544. DOI: 10.2118/169544-MS
5. Apasov, T. K., Shatalova, N. V. & Shatalov, A. V. (2021). Kompleksnyy metod intensivifikatsii dobychi nefti volnovymi polyami. Integrirovannoe nauchnoe so-provozhdienie neftegazovykh aktivov: opyt, innovatsii, perspektivy: sbornik dokladov III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Syktyvkar, 20–22 oktyabrya 2021 goda. – Syktyvkar, Komi respublikanskaya tipografiya Publ., pp. 245-250. (In Russian).
6. Apasov, T. K., Shatalova, N. V., & Shatalov, A. V. (2020). Substantiation of the efficiency of the vibrowave technology of impact on a bottomhole oil formation zone. Automation, telemechanization and communication in oil industry, (9(566)), pp. 44-49 (In Russian). DOI: 10.33285/0132-2222-2020-9(566)-44-49
7. Shekhtman, Yu. M. (1961). Fil'tratsiya malokontsentrirrovannykh suspenziy. Moscow, Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR Publ., 212 p. (In Russian).
8. Shatalova, N. V., Apasov, T. K., Shatalov, A. V., & Grigoriev, B. V. (2022). Renovation method of restoring well productivity using wavefields. Journal of Mining Institute, (258), pp. 986-997. (In Russian). DOI: 10.31897/PMI.2022.108
9. Zaitsev, M. V., & Mikhailov, N. N. (2016). Impact of formation damage effects on non-monotonic dependence of a well flow-rate on depression. Oilfield engineering, (6), pp. 7-13. (In Russian). DOI: 10.24887/0028-2448-2017-9-90-94
10. Shatalova, N. V. & Apasov, T. K. (2024). Innovatsionnoe primenenie vibratsiy v tekhnologii povysheniya produktivnosti neftyanykh skvazhin. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii im. D. I. Mendeleeva, posvyashchennoy 15-letiyu Instituta promyshlennykh tekhnologiy i inzhiniringa: sbornik statey konferentsii. V 3-kh tomakh. – Tyumen, TIU Publ., pp. 160-162. (In Russian).
11. Kahaner, D., Moler, C., & Nash, S. (1989). Numerical methods and software. Prentice-Hall, Inc. United States, p. 495. (In English).

Информация об авторе/ Information about the author

Шаталова Наталья Васильевна, старший преподаватель кафедры электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, shataliovanv@tyuiu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2086-6421>

Natalya V. Shatalova, Senior Lecturer at the Department of Physics and Instrument Engineering, Industrial University of Tyumen, shataliovanv@tyuiu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2086-6421>

Статья поступила в редакцию 03.09.2024; одобрена после рецензирования 06.11.2024; принята к публикации 06.02.2025.

The article was submitted 03.09.2024; approved after reviewing 06.11.2024; accepted for publication 06.02.2025.