

А.Н. Никонорова, О.В. Батманова, Д.Н. Гуляев, Д.Б. Касимова, Б.Л. Гуськов,
В.М. Кричевский

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИН НЕПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ ЗАКАЧКИ ВОДЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Как правило, при разработке нефтяного месторождения ключевую роль играет система поддержания пластового давления, состоящая из ряда нагнетательных скважин, предназначенных для закачки воды. Однако не всегда объем закачиваемого флюида достигает целевого пласта и выполняет свои функции по вытеснению нефти. Довольно часто закачиваемая вода уходит в соседние пласты из-за перетоков, прорывов, образования трещин и др. В этих случаях можно говорить о непроизводительной закачке. Непроизводительная закачка – частое явление на нефтяных месторождениях, которое приводит к существенным потерям как в добыче, так и в экономике предприятия. Поэтому изучение способов диагностики и контроля непроизводительной закачки является актуальной задачей. В настоящей работе приведено термическое моделирование, на базе которого удалось установить закономерности поведения трещин при непроизводительной закачке и предложить подход, направленный на повышение информативности скважинных температурных исследований.

Ключевые слова: непроизводительная закачка, термометрия, система поддержания пластового давления, нагнетательная скважина.

A.N. Nikonorova, O.V. Batmanova, D.N. Gulyaev, D.B. Kasimova, B.L. Gus'kov,
V.M. Krichevskiy

REASONS OF NON-PRODUCTIVE WATER INJECTION IDENTIFICATION AT OIL FIELDS BY TEMPERATURE MODELLING

Typically, a reservoir pressure maintenance system with a number of injectors is a key factor in the oil field development. However, the volume of injected fluid does not always reach the target formation. Often, injected water is discharged into adjacent reservoirs due to crossflows, breakthroughs, fracturing, etc. In these cases, we can talk about nonproductive injection. Nonproductive injection is a frequent issue in oil fields, which leads to significant losses in both oil production and the money. Therefore, the study of methods for diagnosing and controlling nonproductive injection is an urgent task for many scientists. This paper provides an analysis of temperature modeling, on the basis of which it was possible to establish the regularities of fracture behavior during nonproductive injection and propose an approach to increase the information content of downhole temperature logging.

Keywords: non-productive injection, temperature logging, reservoir pressure maintenance system, injection wells.

Введение

В представленной работе приведены результаты совместного численного моделирования полей температуры и давления.

Основной целью расчетов является обоснование методики мониторинга влияния стационарных и нестабильных трещин на динамику непроизводительной закачки по результатам термометрии скважин [1].

Никонорова Анастасия Николаевна

аспирант Российского государственного университета (Национальный исследовательский университет) нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва. Сфера научных интересов: разработка месторождений, моделирование, геофизика, повышение нефтеотдачи, геофизические информационные системы. Автор 12 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: anastasia.nikonorova@list.ru

Батманова Ольга Викторовна

старший преподаватель, заместитель заведующего кафедрой телекоммуникационных систем и информационной безопасности. Российский новый университет, Москва; старший преподаватель факультета финансов и банковского дела. Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Москва. Сфера научных интересов: геофизическое и гидродинамическое исследование скважин, системный анализ, информационные технологии, искусственный интеллект. Автор 7 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: bat-olga@yandex.ru

Гуляев Данила Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры геофизических информационных систем. Российский государственный университет (Национальный исследовательский университет) нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва. Сфера научных интересов: геофизические и гидродинамические исследования скважин. Автор более 60 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: letter_to_me@rambler.ru

Касимова Дилфуза Бобировна

инженер. ОНТИиИГУ «Институт геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений», город Ташкент, Узбекистан. Сфера научных интересов: геофизические исследования скважин. Автор 8 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: dilfuzichka_88@mail.ru

Гуськов Борис Леонидович

старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем и информационной безопасности. Российский новый университет, Москва. Сфера научных интересов: гидродинамические исследования скважин, электронные приборы и устройства, методы измерения и диагностики материалов и приборов на их основе. Автор 19 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: bl.rosnou@yandex.ru

Кричевский Владимир Маркович

ассистент кафедры геофизических информационных систем. Российский государственный университет (Национальный исследовательский университет) нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва. Сфера научных интересов: гидродинамические исследования скважин. Автор 18 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: v.krichevsky@gmail.com

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ информативности термометрии при диагностике трещин;
- выполнить оценку возможностей количественной интерпретации термических исследований при определении длин трещин и фильтрационно-емкостных свойств вскрываемых коллекторов.

Алгоритм решения задач.

1. Моделирование полей давления и температур.
2. Оценка поведения температурного поля как в процессе закачки, так и в процессе релаксации.

3. Анализ влияния геометрии трещин и свойств коллектора на температурное поле.

Для воссоздания скважинных условий, а также задания условий развития трещин была применена следующая модель (см. Рисунок 1).

1. Скважина вертикальная цилиндрическая, полость радиуса r_c в неограниченном по простиранию однородном вмещающем пласте-коллекторе пористости K_{nn} , проницаемости k_n , теплопроводности λ_n , объемной теплоемкости $c\gamma_n$.

2. Границы пласта – плоские горизонтальные непроницаемые и непроводящие теплоу поверхности, находящиеся на расстоянии h друг от друга по вертикали.

3. Трещина – вертикальный канал с прямоугольным осевым сечением длины $2L_{mp}$ и ширины x_{mp} , расположенный симметрично относительно оси скважины и вскрывающий пласт по всей высоте; заполнитель полости трещины – однородная среда пористости $K_{n,mp}$, проницаемости k_{mp} , теплопроводности λ_{mp} , объемной теплоемкости $c\gamma_{mp}$.

4. В начальный момент времени $t = 0$ все точки пласта и полости трещины характеризуются одинаковым начальным давлением $P_{nl} = \text{const}$ и температурой $T_{nl} = \text{const}$ (их изменение по высоте пласта не учитывается).

5. В рассматриваемых условиях температура $T(r,t)$ и давление $P(r,t)$ являются функциями радиальной координаты r и времени t .

6. В течение периода времени $0 < t < t_{pab}$ скважина работает в режиме нагнетания с расходом $Q = \text{const}$.

7. В течение последующего периода времени $t_{pab} < t < t_{pab} + t_{ост}$ скважина простаивает, при этом рассматривается вариант, когда в данный период трещина остается открытой, и вариант, когда трещина закрывается. В последнем случае фильтрационные и тепловые свойства трещины принимаются такими, как у пласта.

8. Первоначально пласт полностью насыщен водой. Тепловые свойства первоначально содержащейся в порах и закачиваемой воды одинаковы: теплопроводность λ_ϕ , объемная теплоемкость $c\gamma_\phi$.

Расчеты выполнялись в Eclipse на неравномерной сетке, сгущенной в областях контрастных изменений давления и температуры в полости трещины, а также в пласте вблизи поверхности трещины и вблизи стенки скважины.

Согласно принятой постановке задачи изучается многослойная среда, состоящая из нескольких однородных областей (ствол скважины, полость трещины, вмещающие породы).

Моделирование поля давления

В рассматриваемых условиях задача сводится к совместному решению уравнения пьезопроводности (для давления) и уравнения теплового баланса (для температуры) [2]. Уравнение пьезопроводности имеет вид

Выявление причин непроизводительной закачки воды при разработке нефтяных ...

$$\frac{\partial^2 P(x, y, z, t)_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P(x, y, z, t)_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P(x, y, z, t)_i}{\partial z^2} = \frac{1}{\chi_i} \frac{\partial P(x, y, z, t)_i}{\partial t}, \quad (1)$$

где $P(x, y, z, t)_i$ – давление как функция координат и времени; χ – пьезопроводность; i – индекс слоя.

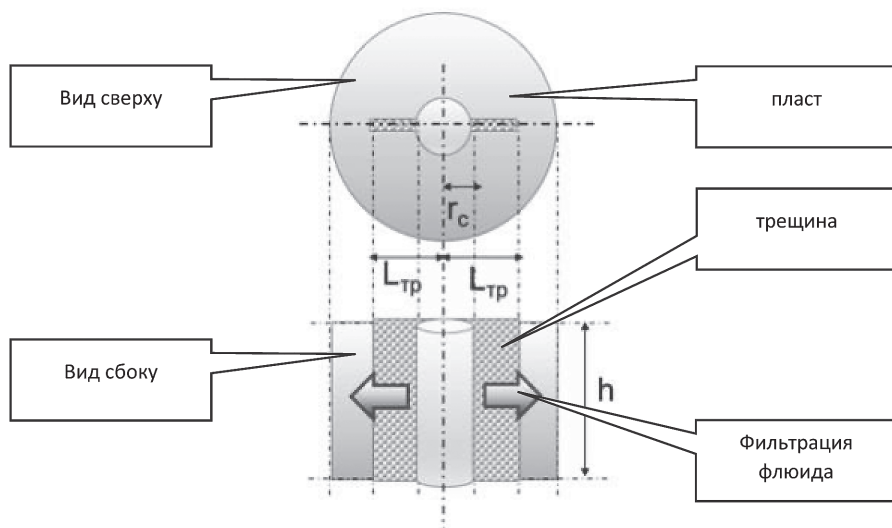


Рисунок 1. Схема системы «скважина – пласт» при термомоделировании

Начальным условием является равенство начального давления P_0 гидростатическому: $P_0 = P(x, y, z, 0)$.

На стенке скважины и на поверхности трещин выполняются граничные условия сопряжения (IV рода):

$$1. P(x_{zp}, y_{zp}, z_{zp}, t)_i = P(x_{zp}, y_{zp}, z_{zp}, t)_j,$$

$$\text{где } P(x_{zp}, y_{zp}, z_{zp}, t)_i \text{ – давление на границе; } K_i \frac{\partial P(x_{zp}, y_{zp}, z_{zp}, t)_i}{\partial n} = K_j \frac{\partial P(x_{zp}, y_{zp}, z_{zp}, t)_j}{\partial n},$$

где n – направление нормали; K_{ij} – проницаемость слоев; i, j – индексы контактирующих слоев.

На Рисунке 2 приводится график динамики поля давления как в процессе закачки флюида в пласт, так и в процессе остановки скважины.

Расчеты выполнены при следующих условиях: дебит жидкости, закачиваемой в пласт, составляет $10 \text{ м}^3/\text{сут.}$ на 1 м пласта, проницаемость пласта – 3 мД.

Моделирование поля температуры

Основными процессами, формирующими поведение теплового поля в стволе скважины, являются теплопроводность, конвективный теплоперенос, дроссельный и адиабатический эффекты. Данные процессы описываются уравнениями баланса тепловых потоков для конкретных условий исследуемых скважин и пластов [3].

Так, при модельных условиях, описанных в предыдущем разделе, тепловые эффекты при закачке холодной жидкости в пласт-коллектор описываются следующим уравнением баланса:

$$\begin{aligned} & \operatorname{div} \lambda_{T_{n.c}} \operatorname{grad} T(x, y, z, t)_i - c\gamma_{\phi} \bar{w} \operatorname{grad} T(x, y, z, t)_i + K_n c\gamma_{\phi} \eta_T \frac{\partial P(x, y, z, t)_i}{\partial t}, \\ & - K_n c\gamma_{\phi} \varepsilon_T \operatorname{grad} P(x, y, z, t)_i = c\gamma_{n.c} \frac{\partial T(x, y, z, t)_i}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

где $c\gamma_{\phi}$, $c\gamma_{n.c}$ – объемные теплоемкости флюида и пористой среды; K_n – коэффициент пористости; $\lambda_{T_{n.c}}$ – теплопроводность пористой среды; η_T , ε_T – дифференциальные адиабатический и дрессельный коэффициенты; i – индекс слоя.

Однако для породнеколлекторов уравнение (2) примет следующий вид:

$$\operatorname{div} \lambda_{T_{n.c}} \cdot \operatorname{grad} T(x, y, z, t)_i = c\gamma_{i.n} \frac{\partial T(x, y, z, t)_i}{\partial t}, \quad (3)$$

где $c\gamma_{n.c}$ – объемная теплоемкость пористой среды; $\lambda_{T_{n.c}}$ – теплопроводность пористой среды.

Условием является равенство начального давления гидростатическому:

$$T_0 = T_s,$$

где T_0 – начальная температура; T_s – геотермическая температура.

На стенке скважины и на поверхности трещин выполняются граничные условия сопряжения (IV рода):

$$1. T_i = T_j,$$

где $T(x_{zp}, y_{zp}, z_{zp}, t)_j$ – температура на границе;

$$2. \lambda_i \frac{\partial T(x_{zp}, y_{zp}, z_{zp}, t)_i}{\partial n} = \lambda_j \frac{\partial T(x_{zp}, y_{zp}, z_{zp}, t)_j}{\partial n},$$

где n – направление нормали; λ_{ij} – теплопроводности слоев; i, j – индексы контактирующих слоев.

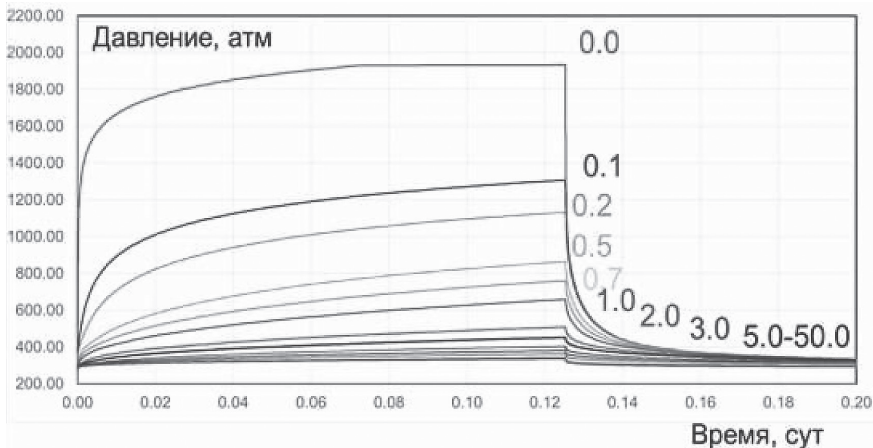


Рисунок 2. Поведение поля давления в скважине в условиях непроизводительной закачки в пласт в течение 3 ч и в процессе релаксации. Шифр кривых – длина трещины, м

Выявление причин непроизводительной закачки воды при разработке нефтяных ...

Анализ поведения поля температуры в условиях образования трещины

Моделирование полей температуры и давления выполнено при условиях короткой (3 ч) и длительной (72 ч) закачки (см. Рисунок 3). Расчет полей давления и температуры произведен согласно уравнениям (1)–(3). Выявлены необычные закономерности поведения теплового поля при различных длинах трещин.

В частности, рассмотрим случай трехчасовой закачки в пласт при условиях проницаемости пласта 10 мД, дебита жидкости 10 м³/сут. на 1 м пласта. Обнаружено, что с увеличением длины трещины темп восстановления теплового поля значительно быстрее.

Такая закономерность, скорее всего, связана с формированием в пласте теплового поля линейной симметрии.

Для случая 72-часовой закачки в пласт (при проницаемости пласта 3 мД, дебите жидкости 10 м³/сут. на 1 м пласта) закономерность увеличения скорости восстановления теплового поля при росте длин трещин сохраняется (Рисунок 4).

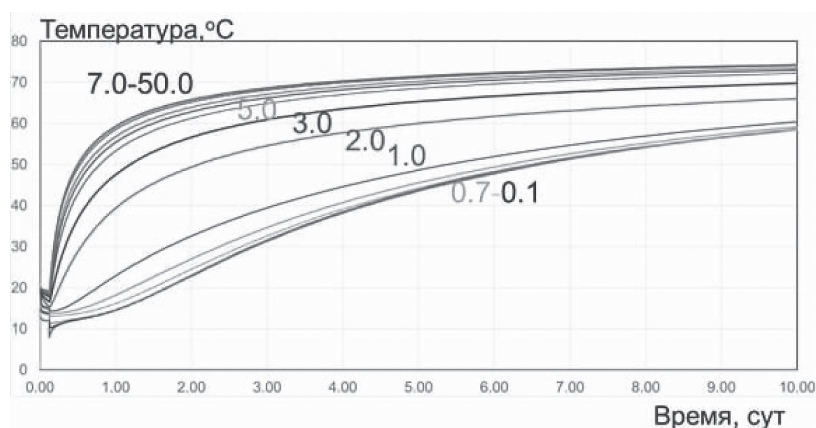


Рисунок 3. Поведение поля температуры в скважине в условиях непроизводительной закачки в пласт в течение 3 ч и в процессе релаксации. Шифр кривых – длина трещины, м

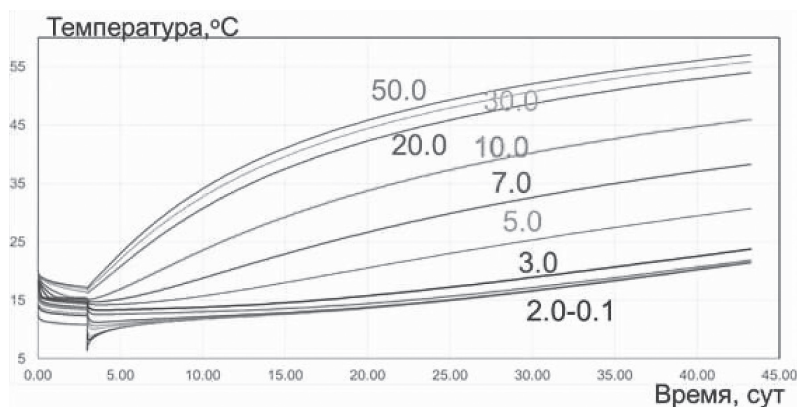


Рисунок 4. Поведение поля температуры в скважине в условиях непроизводительной закачки в пласт в течение 72 ч и в процессе релаксации. Шифр кривых – длина трещины, м

Выводы

В условиях образования трещин наблюдается нестандартное поведение теплового поля в процессе релаксации – рост темпа восстановления первоначальной температуры при увеличении длины трещины. Обнаруженный эффект может быть положен в основу метода диагностики непроизводительной закачки в пласт, вскрытый трещиной, в процессе разработки нефтяных месторождений. Для обоснования методики интерпретации термометрии скважин с целью оценки непроизводительной закачки необходим дополнительный анализ с учетом геометрических размеров трещин, фильтрационных свойств пласта, режима работы скважин.

Литература

1. Батманова О.В., Гуляев Д.Н., Даниленко О.И. Применение мультискважинной деконволюции для анализа свойств нефтяных пластов // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы модели, анализ и управление. 2019, № 3. С 81–92.
2. Ипатов А.И., Кременецкий М.И., Гуляев Д.Н., Мельников С.И., Каешков И.С., Морозовский Н.А. Гидродинамический и геофизический мониторинг разработки сложнопостроенных месторождений углеводородов // Нефтяное хозяйство. 2015. № 9. С. 68–72.
3. Кременецкий М.И., Ипатов А.И., Гуляев Д.Н. Информационное обеспечение и технологии гидродинамического моделирования нефтяных и газовых залежей. М.; Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2011. 896 с.

References

1. Batmanova O.V., Gulyaev D.N., Danilenko O.I. (2019) *Primenenie mul'tiskvazhinnoj dekonvoljucii dlya analiza svojstv neftyanyh plastov* [Application of multi-well deconvolution to analyze the properties of oil reservoirs]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy modeli, analiz i upravlenie*, no. 3, pp. 81–92 (in Russian).
2. Ipatov A.I., Kremeneckij M.I., Gulyaev D.N., Mel'nikov S.I., Kaeshkov I.S., Morozovskij N.A. (2015) *Gidrodinamicheskij i geofizicheskij monitoring razrabotki slozhnopostroennyh mestorozhdenij uglevodorodov* [Hydrodynamic and geophysical monitoring of the development of complex hydrocarbon fields]. *Neftyanoe hozyajstvo*, no. 9, pp. 68–72 (in Russian).
3. Kremeneckij M.I., Ipatov A.I., Gulyaev D.N. (2011) *Informacionnoe obespechenie i tekhnologii gidrodinamicheskogo modelirovaniya neftyanyh i gazovyh zalezhej* [Information support and technologies for hydrodynamic modeling of oil and gas deposits]. Moscow, Izhevsk, Izhevsk Institute for Computer Research, 896 p. (in Russian).