



ISSN: 2658–5782

Номер 4

2024

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Исследование возмущения давления в пласте и в трещине ГРП при собственных колебаниях столба жидкости в скважине

З.З. Мамаева

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

E-mail: zilia16@mail.ru

На сегодняшний день добыча нефти является сложным и высокотехнологичным процессом, который постоянно развивается и совершенствуется. Одной из актуальных проблем в нефтяной отрасли является снижение дебита большинства добывающих скважин и, как следствие, увеличение добычи трудноизвлекаемых запасов и необходимость проведения работ по обработке призабойной зоны с целью улучшения ее коллекторских характеристик, например, создание трещин гидравлического разрыва пласта. Данные процессы требуют исследования состояния пластов и получения информации о геометрии трещины. В настоящей работе представлен один из возможных методов исследования пластов и трещин гидравлического разрыва пласта, основанный на возбуждении собственных колебаний столба жидкости в скважине и анализе волновых характеристик колебаний. На основе теоретической модели собственных колебаний столба жидкости, полученных вследствие гидравлического удара, изучено влияние проводимости трещины гидравлического разрыва пласта на возмущения давления в пласте и в самой трещине. Выполнен анализ зависимости давления от времени и изменения амплитуды колебаний давления в различных точках пласта и трещины гидравлического разрыва пласта.

Ключевые слова: скважина, нефть, гидроудар, собственные колебания жидкости, частота колебаний, коэффициент и декремент затухания

Работа выполнена в рамках государственного задания № 124030400064-2 (FMRS-2024-0001)

Study of pressure disturbance in the reservoir and in the hydraulic fracture during natural oscillations of the liquid column in the well

Z.Z. Mamaeva

Mavlyutov Institute of Mechanics UFRC RAS, Ufa, Russia

E-mail: zilia16@mail.ru

Today, oil production is a complex and high-tech process that is constantly evolving and improving. One of the pressing problems in the oil industry is the decline in the flow rate of most production wells and, as a consequence, an increase in the production of hard-to-recover reserves and the need to process the bottomhole zone in order to improve its reservoir characteristics, for example, creating hydraulic fracturing (HF) cracks. These processes require studying the state of the formations and obtaining information about the fracture geometry. This paper presents one of the possible methods for studying formations and HF cracks based on the excitation of natural oscillations of a liquid column in a well and the analysis of the wave characteristics of the oscillations. Based on a theoretical model of natural oscillations of a liquid column obtained as a result of a hydraulic shock, the effect of the conductivity of a hydraulic fracturing crack on pressure disturbances in the formation and the crack itself was studied. An analysis was made of the dependence of pressure on time and changes in the amplitude of pressure oscillations at various points in the formation and HF crack.

Keywords: well, oil, hydraulic shock, natural oscillations of liquid, oscillation frequency, damping coefficient and decrement

1. Введение

В настоящее время в нефтегазовой промышленности наблюдается снижение разработки месторождений с традиционными запасами нефти и газа, увеличивается доля трудноизвлекаемых источников углеводородов. Для извлечения нетрадиционных углеводородов необ-

ходимым является комплекс мер, важной частью которого считается исследование пластов и получение информации о физических характеристиках коллекторов. Одним из основных методов геофизических исследований скважин и пластов являются акустические методы, которые применяются для выявления и оценки запасов углеводородного сырья, а также контроля и анализа при

разработке, эксплуатации нефтегазовых месторождений и мониторинга технического состояния скважин. Многие исследователи изучают воздействие акустических волн на горные породы, скважину и призабойную зону с целью получения необходимой информации о коллекторских характеристиках пластов и техническом состоянии скважин.

Авторами статьи [1] представлены промышленные исследования воздействия упругими волнами на пласт с целью повышения продуктивности скважины. Упругие волны возбуждались проточными излучателями, которые были установлены на концах насосно-компрессорных труб (НКТ) в нагнетательных скважинах на уровне продуктивного пласта на протяжении шести месяцев. По окончании эксперимента удалось выявить повышение дебита скважин и снижение обводненности добываемой продукции. Полученный эффект возможно сохранить в течение нескольких месяцев.

В статье [2] рассмотрена задача локального акустического зондирования участка скважины с перфорацией. Изучен метод, позволяющий определить влияние качества вскрытия скважины при использовании радиальной перфорации на динамику акустических импульсов жидкости, находящейся между стенками зонда и скважины.

В ряде работ [3–6] представлено исследование динамики распространения импульса в трубопроводе с учетом фильтрации флюида в пористую среду через поврежденные участки, представленные в виде трещин. Дана оценка влияния проводимости перпендикулярной трещины гидравлического разрыва пласта (ГРП) на динамику сигнала акустического «телевизора». Установлено, что при помощи данного метода возможно обнаружить ГРП трещины (проводимости $10^{-13} \div 10^{-10} \text{ м}^3$) по прошедшему или отраженному сигналам.

В работе Andsager R. L., Knapp R. M. [7] представлен метод акустического прогнозирования уровня жидкости в газовых скважинах. Звуковая волна, генерируемая в устье скважины, отражается от поверхности жидкости; расстояние до поверхности жидкости определяется по времени отражения звуковой волны и скорости звуковой волны в системе природного газа. Таким образом, влияние акустических волн в нефтегазовой отрасли имеет достаточно значимую роль как при добыче углеводородов, так и при разработке месторождений и повышении их продуктивности.

В настоящей статье представлено теоретическое исследование одного из возможных акустических методов исследования пластов и трещин ГРП, основанный на возникновении собственных колебаний столба жидкости в скважине. Отметим, что анализ волновых характеристик собственных колебаний несет важную информацию о параметрах пласта, трещины ГРП и техническом состоянии самой скважины. На основе полученной математической модели в работе [8] получены новые численные результаты, описывающее возмущение давления в пласте и трещине ГРП для различных случаев.

2. Возмущение давления в пласте и в трещине ГРП

В настоящей статье представлены численные результаты, полученные с использованием математической модели из [8], в предположении, что вертикальная нефтяная скважина заполнена жидкостью, а именно, водой, на устье движение жидкости ограничено тяжелой крышкой. В начальный момент времени жидкость находится в покое. Подвергаясь некоторым воздействиям, например, резкой остановке насосов, жидкость в скважине начинает колебаться в системе «скважина–трещина ГРП–пласт» (рис. 1).

В работе [8] получены выражения для возмущения давления в пласте и трещине ГРП в виде:

$$P_p = c_1 \cos(kl) \frac{K_0(rq_p)}{K_0(aq_p)} e^{i\omega t},$$

$$P_f = c_1 \cos(kl) e^{-iK_f x} e^{i\omega t},$$

где $q_p = \sqrt{\omega/\chi_p}$; $K_f = \sqrt{\chi_f \sqrt{i\omega}}$; $K_0(x) = \int_0^\infty e^{-xch\xi} d\xi$ — функция Макдональда нулевого порядка; $\omega = \Omega + i\delta$ — комплексная частота собственных колебаний; Ω — круговая частота; δ — коэффициент затухания; $k^2 = (1 + 2/b)\omega^2/C^2$ — комплексное волновое число; — скорость звука в среде; $b = \sqrt{i\omega a_c^2/\nu}$; $\chi_f = \frac{k_f \rho_0 C^2}{m_f \mu}$, k_f — проницаемость трещины ГРП.

Далее, на основе математической модели получено трансцендентное уравнение для нахождения комплексной собственной частоты:

$$\text{tg}(kl) = \left(\frac{a}{a_c}\right)^2 l_p k \left(\frac{2m}{a q_p} \frac{K_0'(aq_p)}{K_0(aq_p)} - \frac{2m_f d_f i K_f}{\pi(aq_f)^2} - 1\right),$$

где $q_p = \sqrt{i\omega/\chi_p}$; $q_f = \sqrt{i\omega/\chi_f}$; a — радиус обсадной колонны скважины; a_c — радиус НКТ; l_p — протяженность открытого участка скважины; m — пористость пласта; m_f — пористость материала в трещине; d_f — ширина трещины.

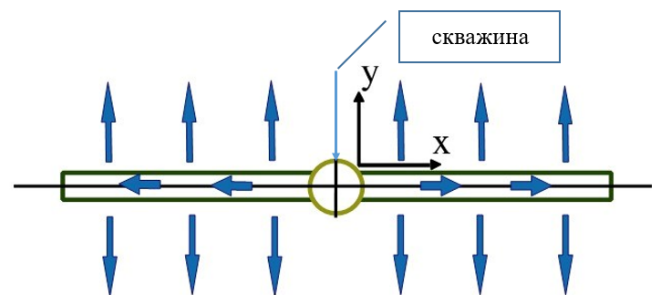


Рис. 1. Схема фильтрации жидкости по трещине и в пласте

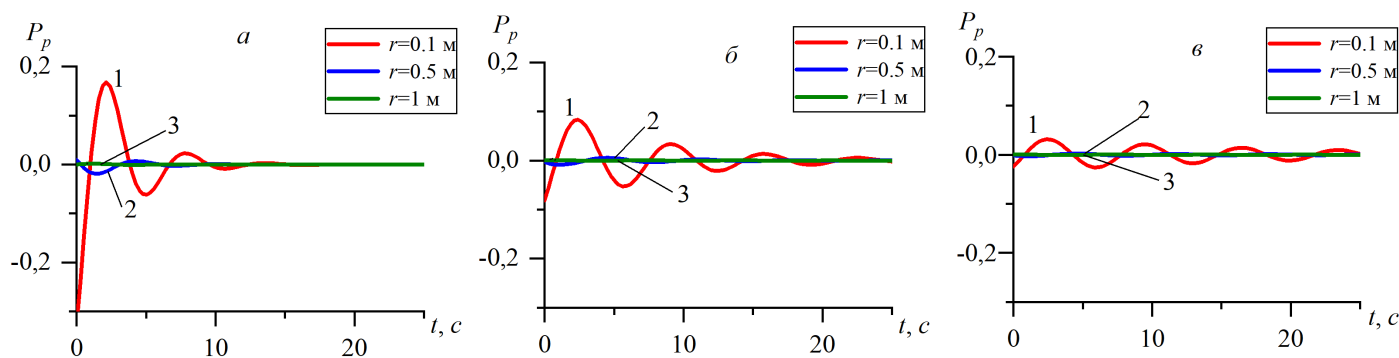


Рис. 2. Зависимости возмущения давления от времени для различных точек пласта: 1 – $r = 0.1$ м, 2 – $r = 0.5$ м, 3 – $r = 1$ м при значениях параметра проводимости трещины: а) $C_f = 5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3$, б) $C_f = 5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3$, в) $C_f = 5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3$

При получении численных расчетов будем полагать, что решение для закона изменения давления в скважине определено с точностью до произвольного постоянного множителя c_1 , т.е. распределение давления нормировано относительно значения при $z = 0$ и вместо P будем использовать нормированное значение при $c_1 = 1$:

$$P_p = \cos(kl) \frac{K_0(rq_p)}{K_0(aq_p)} e^{i\omega t},$$

$$P_f = \cos(kl) e^{-iK_f x} e^{i\omega t}.$$

Численные результаты получены в предположении, что в скважине находится вода со следующими параметрами: $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $C = 1500 \text{ м/с}$, $\mu = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Для скважины и пласта принято: $a_c = 0.035 \text{ м}$, $a = 0.0775 \text{ м}$, $l = 2600 \text{ м}$, $l_p = 20 \text{ м}$, $m_p = 0.1$. Для трещины гидроразрыва: $m_f = 0.02$, $C_f = d_f \cdot k_f$, где C_f – проводимость трещины ГРП.

На основе указанных решений в настоящей статье приведены численные расчеты для возмущений давления в пласте и трещине ГРП.

На рис. 2(а),(б),(в) проиллюстрирована зависимость возмущения давления от времени затухания в

пласте для различных расстояний от забоя скважины: $r = 0.1 \text{ м}$, $r = 0.5 \text{ м}$, $r = 1 \text{ м}$.

Показано, что для низкой проводимости трещины ГРП на графиках наблюдается более высокая амплитуда колебаний, которая с увеличением параметра проводимости трещины заметно снижается. Таким образом, с увеличением проводимости трещины уменьшается амплитуда колебаний и растет время затухания колебаний во всех трех точках пласта.

На рис. 3(а),(б),(в) показана динамика возмущения давления на различных расстояниях в трещине ГРП, а именно: 1 м, 15 м, и 30 м.

Видно, что рост значения проводимости трещины ГРП приводит к увеличению времени затухания колебаний и снижению амплитуды во всех трех рассматриваемых точках трещины. Заметим, что для высокой проводимости трещины, а именно, для $C_f = 5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3$, различия между значениями амплитуды и периодом колебаний для точек трещины $x = 1, 15, 30 \text{ м}$ минимальны. Также отметим, что с увеличением расстояния наблюдается рост амплитуды колебаний в диапазоне проводимости трещины $10^{-15} \div 10^{-11} \text{ м}^3$.

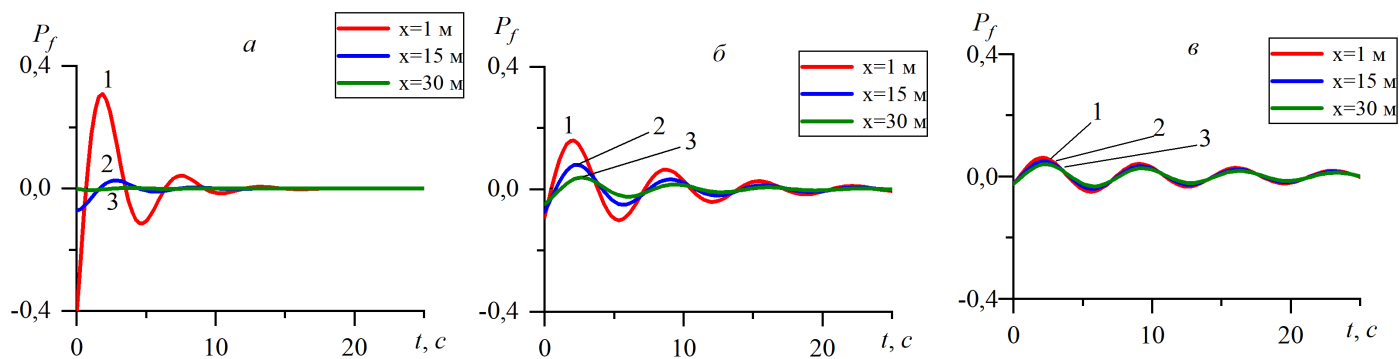


Рис. 3. Зависимость давления от времени в различных точках трещины ГРП: 1 – $x = 1$ м, 2 – $x = 15$ м, 3 – $x = 30$ м при значениях коэффициента проводимости трещины: а) $C_f = 5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3$, б) $C_f = 5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3$, в) $C_f = 5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3$

3. Заключение

На основе математической модели получены новые численные результаты, описывающие динамику возмущения давления в пласте и трещине ГРП. Рассмотрена зависимость давления от времени для различной проводимости трещины ГРП в определенных точках пласта и трещины. Установлено, что с ростом проводимости трещины в диапазоне $10^{-15} \div 10^{-11} \text{ м}^3$ амплитуда возмущения давления в пласте снижается и тем самым уменьшается время затухания колебаний. Для колебаний в трещине в данном диапазоне проводимости в случаях $x = 15 \text{ м}$ и $x = 30 \text{ м}$ заметно растут амплитуда и время затухания возмущений.

Список литературы / References

- [1] Марфин Е.А., Кравцов Я.И., Абдрашитов А.А., Гатауллин Р.Н. Промысловые испытания волнового воздействия на процесс добычи нефти на Первомайском месторождении // Георесурсы. 2014. № 2(57). С. 14–16.
Marfin E.A., Kravtsov Ya.I., Abdrashitov A.A., Gataullin R.N. Field Tests of Wave Action on Oil Production in the Pervomaysky Field. // Georesources [Georesources]. 2014. No. 2(57). Pp. 14–16. (in Russian)
DOI: [10.18599/grs.57.2.3](https://doi.org/10.18599/grs.57.2.3)
- [2] Шагапов В.Ш., Хусаинов И.Г., Ишмухаметова А.А. К теории акустического зондирования перфорированной скважины // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2007. № 6. С. 42–48.
Shagapov V.Sh., Khusainov I.G., Ishmukhametova A.A. On the theory of acoustic sounding of a perforated well // News of higher educational institutions. Oil and gas. 2007. No. 6. Pp. 42–48 (in Russian).
EDN: [umgmnq](https://www.edn.ru/umgmnq)
- [3] Галиакбарова Э.В., Хакимова З.Р. Акустическое сканирование трубчатых каналов с узкими трещинами // Вестник Башкирского университета. 2017. Т. 22, № 3. С. 590–596.
Galiakbarova E.V., Khakimova Z.R. Acoustic scanning of tubular channels with narrow cracks // Bulletin of the Bashkir University. 2017. Vol. 22, No. 3. Pp. 590–596 (in Russian).
EDN: [yvlblz](https://www.edn.ru/yvlblz)
- [4] Шагапов В.Ш., Галиакбарова Э.В., Хусаинов И.Г., Хакимова З.Р. Акустическое сканирование поврежденных трубопроводов, находящихся в грунте // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59, № 4. С. 169–178.
DOI: [10.15372/PMTF20180420](https://doi.org/10.15372/PMTF20180420)
Shagapov V.Sh., Galiakbarova E.V., Khusainov I.G., Khakimova Z.R. Acoustic Scanning of Damaged Pipelines in Soil // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2018. Vol. 59, No. 4. Pp. 724–732.
DOI: [10.1134/S002189441804020X](https://doi.org/10.1134/S002189441804020X)
- [5] Шагапов В.Ш., Галиакбарова Э.В., Хакимова З.Р. Эволюция акустических импульсов в поврежденных подземных трубопроводах // Ученые записки казанского университета. Серия физико-математические науки. 2021. Т. 163, № 1. С. 48–58.
Shagapov V.Sh., Galiakbarova E.V., Khakimova Z.R. Evolution of acoustic pulses in damaged underground pipelines // Scientific Notes of Kazan University. Series: Physical and Mathematical Sciences. 2021. V. 163, No. 1. Pp. 48–58 (in Russian).
DOI: [10.26907/2541-7746.2021.1.48-58](https://doi.org/10.26907/2541-7746.2021.1.48-58)
- [6] Шагапов В.Ш., Галиакбарова Э.В., Хакимова З.Р. К теории акустического сканирования поврежденных подземных трубопроводов // Акустический журнал. 2021. Т. 67, № 6. С. 583–594.
Shagapov V.Sh., Galiakbarova E.V., Khakimova Z.R. On the Theory of Acoustic Scanning of Underground Pipeline Damage // Acoustic Journal. 2021. V. 67, No. 6. Pp. 583–594 (in Russian).
DOI: [10.31857/S0320791921060113](https://doi.org/10.31857/S0320791921060113)
- [7] Andsager R.L., Knapp R.M. Acoustic Determination of Liquid Levels in Gas Wells // J. Pet. Technol. 1967. V. 19(05). Pp. 601–605.
DOI: [10.2118/1640-PA](https://doi.org/10.2118/1640-PA)
- [8] Шагапов В.Ш., Рафикова Г.Р., Мамаева З.З. Динамика полей давления в пласте и в трещине ГРП при собственных колебаниях столба жидкости в скважине // Инженерно-физический журнал. 2023. Т. 96, № 6. С. 1494–1501.
Shagapov V.Sh., Rafikova G.R., Mamaeva Z.Z. Dynamics of pressure fields in the reservoir and in the hydraulic fracture during natural oscillations of the liquid column in the well // Engineering and Physical Journal. 2023. V. 96, No. 6. Pp. 1494–1501 (in Russian).
EDN: [ummvzt](https://www.edn.ru/ummvzt)

Сведения об авторах / Information about the Authors

Зилия Зайтовна Мамаева

канд. физ.-мат. наук

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа,
Россия

Ziliya Zaitovna Mamaeva

PhD (Phys. & Math.)

Mavlyutov Institute of Mechanics UFRC RAS, Ufa, Russia

zilia16@mail.ru

ORCID: [0000-0002-7783-1211](https://orcid.org/0000-0002-7783-1211)