

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук
(УФИЦ РАН)

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова - обособленное структурное
подразделение Федерального государственного бюджетного
научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра
Российской академии наук
(ИМех УФИЦ РАН)

На правах рукописи

Мамаева Зилия Заитовна

**ИССЛЕДОВАНИЯ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ
СТОЛБА ЖИДКОСТИ В СКВАЖИНЕ**

01.06.01 Математика и механика
1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Уфа-2023

Работа выполнена в Институте механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук

**Научный
руководитель:**

Урманчиев Саид Федорович

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Механика многофазных систем» Института механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИМех УФИЦ РАН)

Рецензенты:

Болотнова Раиса Хакимовна

доктор физико-математических наук, с.н.с., главный научный сотрудник лаборатории «Механика многофазных систем» Института механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук

Башмаков Рустэм Абдрауфович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Математического анализа» ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Нефтегазовая промышленность является одной из самых важных и крупнейших сфер мировой экономики. Стоит отметить, что изначально нефть фонтанировала из недр земли и не было необходимости применять сложные конструкций для ее извлечения, но с годами ситуация изменилась и началась великая эпоха скважинной геофизики. Считается, что первая нефтяная скважина в России появилась в 1864 году. В настоящее время добыча нефти – сложный процесс, в котором задействованы в первую очередь научные исследования. Основными проблемами нефтедобычи в данный период времени считаются снижение продуктивности добывающих скважин, повышение доли трудноизвлекаемых запасов углеводородов и техническое состояние скважин. Для решения данных вопросов возникает необходимость в исследовании скважин, призабойной зоны и прилегающей к ней зоны пласта. Существуют различные методы изучения скважин, одним из которых является акустическая спектроскопия скважин, позволяющая получить информацию о коллекторских характеристиках пласта и физических параметрах скважины на основе анализа волновых характеристик собственных колебаний в скважине.

Таким образом, актуальными являются исследования, направленные на теоретическое изучение способа диагностики скважин, основанном на анализе собственных колебаний столба жидкости в скважине, возникших вследствие резкого изменения давления и скорости жидкости в насосно-компрессорной трубе (НКТ), позволяющие получить данные о коллекторских характеристиках пласта и физических параметрах скважины.

Цель работы.

Развитие теории акустических способов диагностики скважин и пластов путем исследования волновых характеристик собственных колебаний столба жидкости.

Задачи исследования:

- развитие и исследование математической модели, описывающая динамику собственных колебаний столба жидкости в скважине в предположении, что скважина заполнена: водой; нефтью;
- анализ влияния различных коллекторских характеристик пласта на основные волновые параметры затухающих колебаний;
- сравнение полученных результатов для воды и нефти.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Математическая модель, описывающая динамику собственных затухающих колебаний столба жидкости в НКТ;
- 2) Получение аналитических решений для возмущения давления и скорости жидкости в скважине;

- 3) Вывод трансцендентного уравнения для определения комплексных собственных частот колебаний жидкости;
- 4) Результаты исследования анализа влияния коллекторских характеристик пласта на динамику собственных колебаний жидкости в скважине.

Научная новизна исследований, проведенных в работе, заключается в следующем:

- 1) Построена математическая модель собственных затухающих колебаний столба жидкости в скважине, предполагая, что в скважине находится вода или нефть;
- 2) Представлены приближенные решения в случае слабых затуханий;
- 3) Исследовано влияние основных параметров скважины, пласта на интенсивность и характер затухания колебаний.

Достоверность результатов исследования подтверждаются использованием фундаментальных уравнений механики сплошных сред, гидродинамики, универсальных законов сохранения, корректной постановкой физико-математических задач. Математические пакеты, реализующие численные методы решения теоретических моделей, основаны на точных алгоритмах.

Практическая значимость.

Результаты исследования метода диагностики скважин при помощи возбуждения собственных колебаний столба жидкости могут служить теоретической основой способов определения коллекторских характеристик пластов и диагностики технического состояния нефтедобывающих скважин.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях, семинарах и научных школах:

Международная конференция «Вычислительная механика и современные прикладные программные системы» (Республика Крым, г. Алушта, 4 – 13 сентября 2021 г.); Международная научная конференция «Современные проблемы математики и физики» (Республика Башкортостан, г. Стерлитамак, 12 – 15 сентября 2021 г.); V Международная научно - практическая конференция «Актуальные проблемы науки и образования в современном вузе» (Республика Башкортостан, г. Стерлитамак, 16–18 сентября 2021 г.); Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная памяти профессора Усманова Салавата Мударисовича «Обратные задачи и математические модели» (Республика Башкортостан, г. Бирск, 16 сентября 2022 г.); Международная научная конференция «Уфимская осенняя математическая школа – 2022» (Республика Башкортостан, г. Уфа, 28 сентября – 1 октября 2022 г.); XVI Всероссийская молодежная научная

конференция «Мавлютовские чтения» (Республика Башкортостан, г. Уфа, 25 – 27 октября, 2022 г., 1 место в секции «Математическое и компьютерное моделирование»); Международная молодежная научно-практическая конференция «Математическое моделирование процессов и систем» (Республика Башкортостан, г. Стерлитамак, 17 - 19 ноября 2022 г.); Семинары лаборатории механики многофазных систем Института механики им. Р. Р. Мавлютова под руководством д-ра физ.-мат. наук, профессора Шагапова В. Ш.; Конкурс молодых ученых ИМех УФИЦ РАН (Республика Башкортостан, г. Уфа, апрель 2022 г., 3 место); Конкурс молодых ученых УФИЦ РАН (Республика Башкортостан, г. Уфа, февраль 2022 г.); Международная научная конференция «Комплексный анализ, математическая физика и нелинейные уравнения» (Южный Урал, оз. Банное, 13 – 17 марта 2023 г.); XXVII Всероссийская научная конференция Студентов - физиков и молодых ученых ВНКФСФ-27 (Екатеринбург, 2 – 6 апреля 2023 г., диплом II степени).

Публикации.

Основные научные результаты по теме проведенных исследований опубликованы в 12 статьях, изданных в журналах и научных сборниках, из них 4 – в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science, Scopus; 1 – в научных журналах из перечня ВАК РФ.

Благодарность.

Автор выражает искреннюю признательность и благодарность д-ру физ.-мат. наук, профессору Владиславу Шайхулагзамовичу Шагапову за постановку задач и ценные советы. Особую благодарность автор выражает д-ру физ.-мат. наук, профессору Урманчееву Саиду Федоровичу, канд. физ.-мат.наук Рустэму Абдрафовичу Башмакову и канд. физ.-мат.наук Гузаль Ринатовне Рафиковой за оказанную помощь и поддержку, полученные при выполнении выпускной работы.

Личный вклад.

Совместно с научным руководителем произведены постановка задач, анализ полученных результатов и подготовка статей к публикации. Численная реализация моделей, проведение расчетов, обработка, анализ и оформление численных результатов, подготовка части публикаций проведены автором самостоятельно.

Структура и объем диссертационной работы.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы.

Во введении определена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, приведены основные положения и результаты работы с подтверждением их достоверности, представлена их научная новизна и практическая значимость.

В первой главе приведен обзор теоретических исследований, посвященных геофизическим методам исследования скважин. Проанализированы основные методы диагностики нефтедобывающих скважин.

Во второй главе представлена теоретическая модель, описывающая процесс распространения собственных колебаний столба жидкости в вертикальной скважине, предполагая, что скважина заполнена водой. Получено трансцендентное уравнение для определения комплексных частот, изучены зависимости частоты колебаний, коэффициента затухания и декремента затухания от проницаемости пласта, рассмотрена распределение амплитуды колебаний и сдвига фазе по глубине скважины.

В третьей главе решена задача о затухающих колебаниях в скважине, с учетом того, что скважина заполнена нефтью. Изучена динамика давления в различных точках скважины и исследованы основные волновые характеристики собственных колебаний.

В заключении изложены результаты, полученные в процессе написания работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы научно-квалификационной работы, сформулированы цели и задачи, изложена научная новизна, приведены основные результаты, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор литературных и экспериментальных работ по геофизическим и гидродинамическим методам исследования скважин. Изучены работы по моделированию гидроудара в скважинах.

Во второй главе представлены результаты исследования динамики собственных колебаний столба жидкости в скважине, полагая, что скважина заполнена водой.

В п.2.1 приведена постановка задачи и основные уравнения. Предполагаем, что в начальный момент времени течение воды в скважине не происходит. Протяженность столба жидкости на закрытом участке скважины длиной l значительно превышает длину открытого участка: $l \gg l_p$. (рис.1) Собственные колебания столба жидкости в вертикальной скважине возникают при резком закрытии скважины (гидроударе).

Для движущейся в скважине жидкости записываем уравнение неразрывности и уравнения сохранения импульса для возмущений плотности ρ , давления P и скорости w запишем в линеаризованном приближении в виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad \rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{2\sigma}{a} \quad (0 < z < l),$$

$$\sigma = \mu \int_{-\infty}^t \frac{\partial w / \partial t}{\sqrt{\pi \nu (t - \tau)}} d\tau, \quad \nu = \frac{\mu}{\rho_0}, \quad \rho = \frac{P}{C^2},$$

где a - радиус скважины; ρ - возмущение плотности; P - возмущение давления; w - возмущение скорости; σ - касательное напряжение в жидкости на поверхности стенки скважины; μ и ν - динамическая и кинематическая вязкости жидкости; C - скорость звука в жидкости.

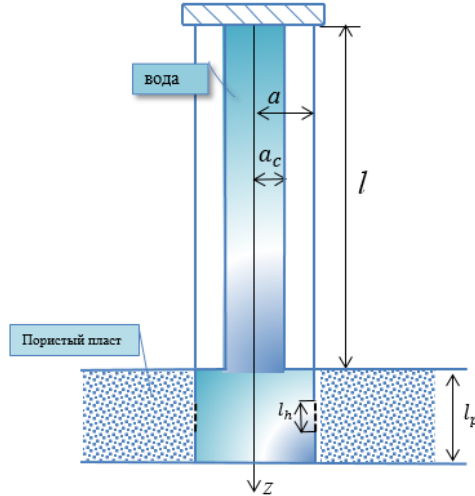


Рис.1. Схема скважины.

Будем полагать, что на верхней границе течение воды ограничено тяжелой и неподвижной крышкой. Потому как протяженность l_p открытого участка скважины $l < z < l + l_p$ значительно меньше протяженности закрытого участка $0 < z < l$, можно предположить, что возмущение давления на открытом участке однородно и равно $P_p(t)$. Таким образом, в качестве граничного условия при $z=l$ принимаем следующие выражения:

$$z = 0 : w(t, 0) = 0,$$

$$z = l : p(l, t) = p_l(t), \quad w(l, t) = w_l(t),$$

Закон сохранения массы для призабойного участка скважины запишем в виде:

$$\pi a^2 l_p \frac{\partial \rho_l}{\partial t} = \pi a_c^2 \rho_0 w_l - 2\pi a l_h \rho_0 u.$$

где u - скорость фильтрации жидкости в окружающую проницаемую горную породу через стенку открытого участка скважины.

Запишем уравнение упругого режима фильтрации в пласте вокруг скважины в виде:

$$\frac{\partial P_p}{\partial t} = \alpha_p \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P_p}{\partial r} \right), \quad \alpha_p = \frac{k_p \rho_0 C^2}{m_p \mu} \quad l < z < l + l_p, \quad a < r < \infty,$$

при этом граничные условия на границе «скважина – пласт» и на большом расстоянии от скважины имеют вид

$$P_p|_{r=a} = P_l, \quad P_p|_{r=\infty} = 0.$$

В п.2.2 представлены аналитические решения для возмущения давления и скорости жидкости.

Аналитическое решение первой системы ищем в виде стоячих волн

$$P = A_{(p)}(z) e^{i\omega t}, \quad w = A_{(w)} e^{i\omega t},$$

где $\omega = \Omega + i\delta$ комплексная частота собственных колебаний, причем действительная часть Ω отвечает за период колебаний $T = 2\pi / \Omega$, а мнимая часть δ за интенсивность затухания.

При $z=l$ для закона изменения параметров P_l и w_l находим

$$P_l = P|_{z=l} = A_{(p)}(l) e^{i\omega t}, \quad w_l = w|_{z=l} = i \frac{C_1}{\rho_0 \omega} \frac{k \sin(kl)}{(1 + 2/y)} e^{i\omega t}.$$

Для нахождения градиента давления на стенке открытого участка скважины находим решение уравнения фильтрации в пласте, соответствующее граничным условиям

$$P_p|_{r=a} = P_l = C_1 \cos(kl) e^{i\omega t}, \\ P_p \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty.$$

Для давления в пласте получим следующее решение

$$P_p = C_1 \cos(kl) \left(K_0(rq_p) / K_0(aq_p) \right) e^{i\omega t}.$$

С учетом, найденных решений, получим трансцендентное уравнение для определения комплексных частот в виде:

$$\operatorname{tg}(kl) = \left(\frac{a}{a_c} \right)^2 l_p k \left(\frac{2 l_h m}{a l_p} \frac{K_0'(aq)}{K_0(aq)} - 1 \right).$$

В п.2.3 показаны, полученные численные результаты.

В численных расчетах в качестве жидкости принята вода со следующими физическими параметрами: $\rho_0=10^3$ кг/м³, $C=1500$ м/с, $\mu=10^{-3}$ Па·с. Параметры скважины и пласта: $l=1500$ м, $l_p=20$ м, $m_p=10^{-1}$.

На рис. 2 (а), (б) и (в) приведена иллюстрация зависимостей собственной частоты Ω , коэффициента затухания δ , а также декремента затухания Δ от

проницаемости пласта k_p при различных значениях протяженности призабойной зоны скважины l_p . Заметим, что при увеличении коэффициента проницаемости в диапазоне $k_p=10^{-15}\div 10^{-12}$ м² частота собственных колебаний уменьшается приблизительно в два раза, соответственно увеличивается период колебаний. В отмеченном диапазоне значений коэффициента проницаемости с ростом протяженности призабойной зоны пласта уменьшается частота колебаний, увеличиваются коэффициент и декремент затухания. Видно, что для всех представленных параметров в диапазоне высоких проницаемостей 10^{-12} м² $> k_p > 10^{-9}$ м² влияние длины открытого участка на значения частот, коэффициента и декремента затухания незначительно.

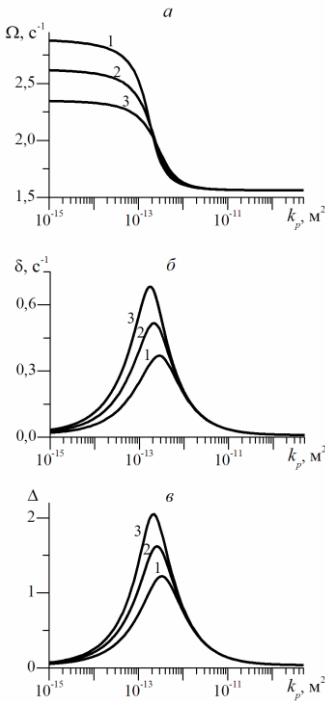


Рис. 2. Зависимость собственной частоты (а), коэффициента затухания (б), декремента затухания (в) от коэффициента проницаемости пласта при различных значениях l_p м: 1 - 20, 2 - 50, 3 - 100.

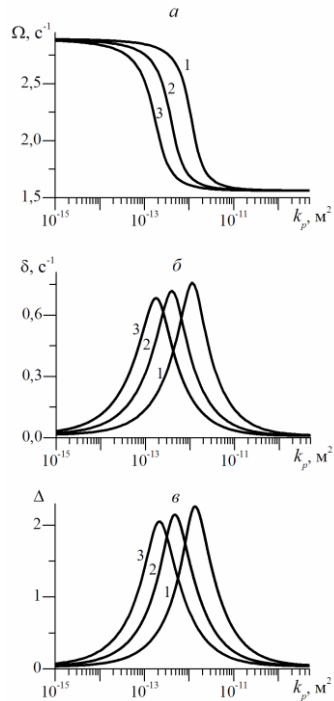


Рис. 3. Зависимость собственной частоты (а), коэффициента затухания (б), декремента затухания (в) от коэффициента проницаемости пласта при различных значениях l_h , м: 1 - 2, 2 - 5, 3 - 10.

На рис. 3 (а), (б) и (в) представлены зависимости собственной частоты Ω , коэффициента затухания δ , а также декремента затухания Δ от проницаемости пласта при различных значениях протяженности зоны перфорации скважины l_h . Видно, что с увеличением протяженности зоны перфорации уменьшается частота колебаний в диапазоне $k_p=10^{-14}\div 10^{-11}$ м². Можно заметить, что зависимость коэффициента и декремента затухания от проницаемости имеет немонотонный характер.

На рис. 4 представлено влияние длины скважины на зависимости собственной частоты, коэффициента затухания, а также декремента затухания.

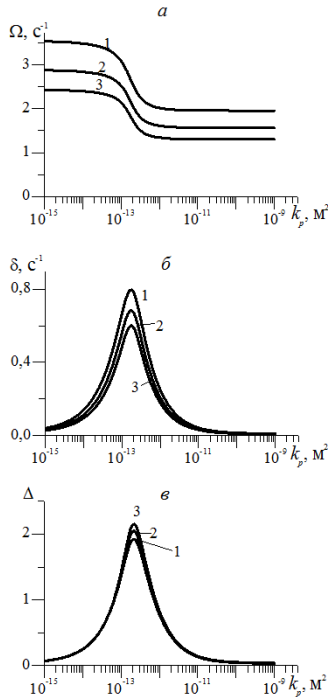


Рис.4. Зависимость собственной частоты (а), коэффициента затухания (б), декремента затухания (в) от коэффициента проницаемости пласта при различных значениях протяженности скважины: 1 – $l = 1200$ м, 2 – 1500 м, 3 – 1800 м.

Видно, что с увеличением протяженности скважины снижаются значения частоты колебаний, что естественно, но снижается при этом значения

коэффициента затухания на всём рассматриваемом участке коэффициентов проницаемости.

На рис. 5 (а), (б) и (в) показана динамика давления датчиков, которые находятся в точках скважины 0 м (а), 750 м (б) и 1500 м (в) для различных коэффициентов проницаемости.

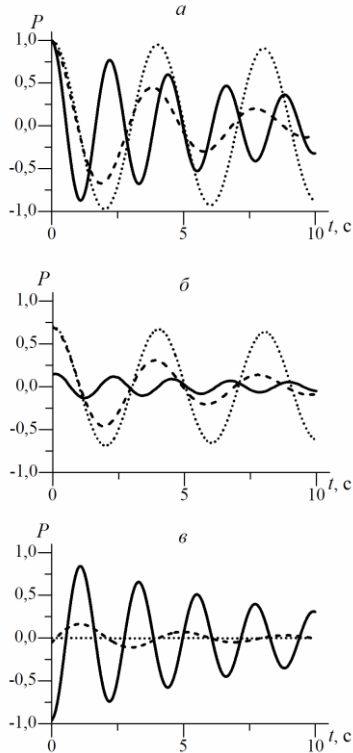


Рис.5. Динамика давления в датчиках, расположенных в точках скважины 0 м (а), 750 м (б) и 1500 м (в). Сплошная, штриховая и точечная линии соответствуют значениям проницаемости $k_p = 10^{-14} \text{ м}^2$, 10^{-12} м^2 , 10^{-10} м^2 .

Видно, что в случае значений проницаемости 10^{-12} , 10^{-10} м^2 затухание колебаний происходит быстрее и амплитуда колебаний уменьшается с увеличением глубины скважины. При значении проницаемости 10^{-14} м^2 самая низкая амплитуда колебаний наблюдается в точке 750 м, в начале и в конце скважины наблюдается приблизительно равная амплитуда колебаний.

В третьей главе решена задача о собственных колебаниях столба жидкости, в предположении, что скважина заполнена нефтью.

Проанализировано основных волновых параметров затухающих колебаний нефти в скважине.

В п.3.1 решена задача о собственных колебаниях столба жидкости (нефти) в скважине (рис.6). Основные уравнения: сохранения массы жидкости в скважине, уравнение импульсов, уравнения для упругого режима фильтрации в пласте вокруг скважины, аналогичны уравнениям в задаче, представленной во второй главе.

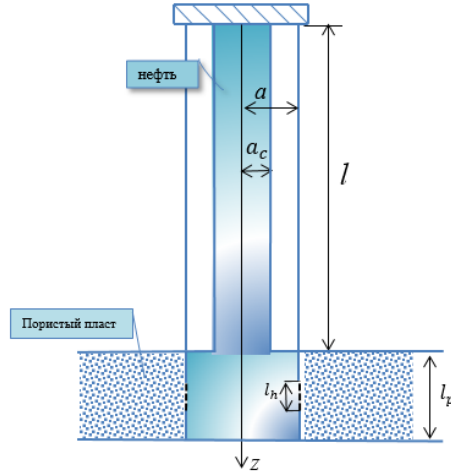


Рис.6. Схема скважины.

В п.3.2. Найдены аналитические решения для возмущения давления и скорости жидкости (нефти) в виде:

$$P_l = P|_{z=l} = A_{(p)}(l) e^{i\omega t}, \quad w_l = w|_{z=l} = i \frac{C_1}{\rho_0} \frac{k \sin(kl)}{\omega (1 + 2/y)} e^{i\omega t}.$$

В п.3.3. Проведен анализ численных результатов.

Решение для закона изменения давления в скважине согласно (6), (10) определено с точностью до произвольного постоянного множителя C_2 , т.е. распределение давления нормировано относительно значения при $z=0$ и вместо P будем использовать нормированное значение $P/A_p(0)$ при $C_2=1$:

$$P = \cos(kz) e^{i\omega t}.$$

Численные результаты получены в предположении, что в скважине находится нефть и при использовании следующих физических параметров:

$\rho = 890 \text{ кг/м}^3$, $C = 1225 \text{ м/с}$, $\mu = 20 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Для скважины и пласта принято: $a_c = 0.04 \text{ м}$, $a = 0.1 \text{ м}$, $l = 1500 \text{ м}$, $l_h = 10 \text{ м}$, $l_p = 20 \text{ м}$, $m = 0.1$.

На рис. 7 (а), (б) и (в) приведена иллюстрация зависимостей собственной частоты, коэффициента затухания, а также декремента затухания от проницаемости пласта k_p при различных значениях протяженности призабойной зоны скважины.

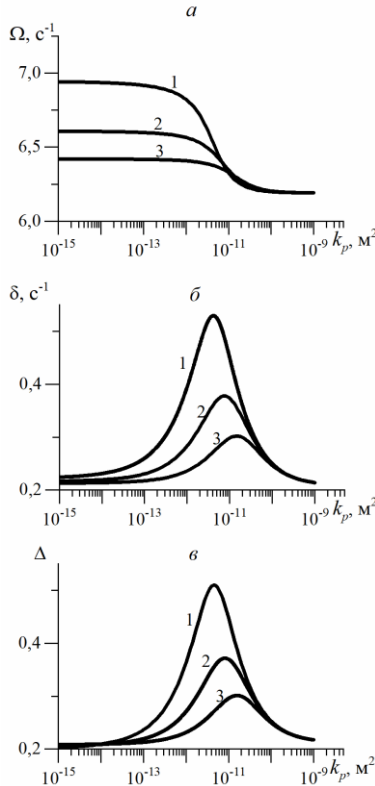


Рис.7. Зависимость собственной частоты (а), коэффициента затухания (б), декремента затухания (в) от коэффициента проницаемости пласта при различных значениях протяженности призабойной зоны скважины: 1 - $l_p = 20 \text{ м}$, 2 - $l_p = 50 \text{ м}$, 3 - $l_p = 100 \text{ м}$.

Заметим, что при увеличении коэффициента проницаемости в диапазоне $10^{-15} \div 10^{-11} \text{ м}^2$ частота собственных колебаний заметно уменьшается,

соответственно увеличивается период колебаний. С ростом протяженности призабойной зоны пласта в данном диапазоне значений коэффициента проницаемости наблюдается уменьшение всех трех параметров (частоты, декремента и коэффициента затухания), что соответствует меньшему количеству колебаний и более медленному их затуханию. Видно, что для всех представленных параметров в диапазоне высоких проницаемостей $10^{-11} \div 10^{-9} \text{ м}^2$ влияние длины открытого участка на значения частот, коэффициента и декремента затухания незначительно.

На рис.8 (а), (б) и (в) показана динамика давления датчиков, которые находятся в точках скважины 0 м (а), 750 м (б) и 1500 м (в) для различных коэффициентов проницаемости.

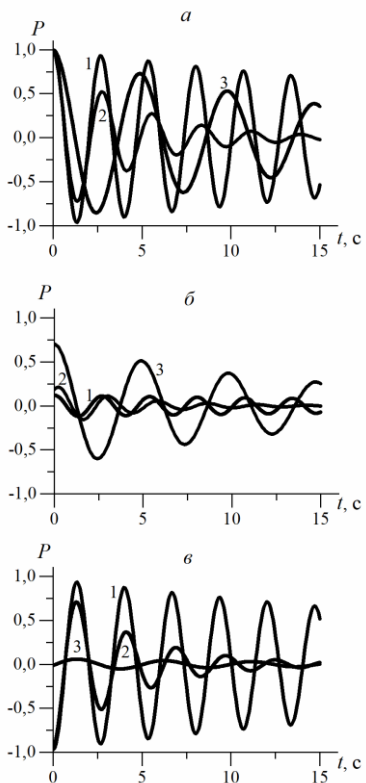


Рис.8. Динамика давления в датчиках, расположенных в точках скважины 0 м (а), 750 м (б) и 1500 м (в) при различной проницаемости пласта: 1 - $k_p = 10^{-14} \text{ м}^2$, 2 - $k_p = 10^{-12} \text{ м}^2$, 3 - $k_p = 10^{-10} \text{ м}^2$.

Видно, что в случае значений проницаемости 10^{-12} , 10^{-10} м² затухание колебаний происходит быстрее и амплитуда колебаний уменьшается с увеличением глубины скважины. При значении проницаемости 10^{-14} м² самая низкая амплитуда колебаний наблюдается в точке 750 м, в начале и в конце скважины наблюдается приблизительно равная амплитуда колебаний.

На рис. 9 показаны распределения амплитуды колебаний давления столба жидкости (а), сдвига по фазе (б) по глубине скважины при различных значениях коэффициента проницаемости пласта.

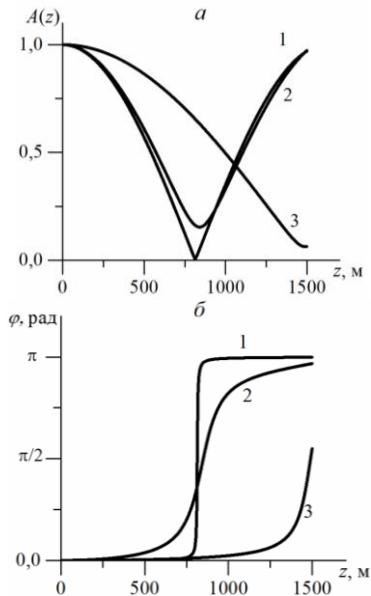


Рис.9. Распределения амплитуды колебаний столба жидкости (а) и сдвига по фазе (б) по глубине скважины при различных значениях коэффициента проницаемости: 1 - $k_p=10^{-14}$ м², 2 - $k_p=10^{-12}$ м², 3 - $k_p=10^{-10}$ м².

Видно, что самая высокая амплитуда достигается в начале и в конце скважины, примерно на глубине $z=750$ м наблюдается самая маленькая амплитуда колебаний. В низкопроницаемых пластах сдвиг фаз колебаний наблюдается в диапазоне $0 \div \pi$. Для высоких проницаемостей сдвиг фаз происходит в диапазоне $0 \div \pi/2$.

На рис.10 представлено сравнение зависимостей собственной частоты, коэффициента затухания и декремента затухания от проницаемости пласта для воды и нефти.

Видно, что частота затуханий нефти примерно в 2 раза больше частоты воды при любых значениях проницаемости пласта. Для коэффициента и декремента затухания получены немонотонные зависимости, здесь для высокопроницаемых пластов значения практически одинаковы, в случае низких проницаемостей видим, что оба параметра для воды намного больше т.е. затухания колебания происходят быстрее.

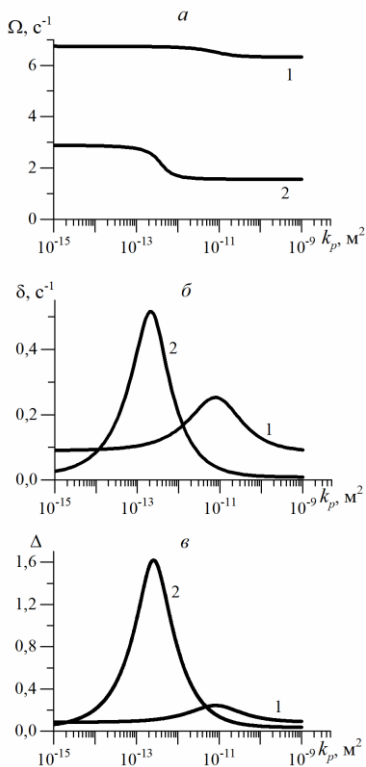


Рис.10. Зависимость собственной частоты (а), коэффициента затухания (б), декремента затухания (в) от коэффициента проницаемости пласта для 1 – нефти, 2 – воды.

В заключении изложены результаты, полученные в процессе написания работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Построена теоретическая модель собственных колебаний столба жидкости в вертикальной скважине, предполагая, что скважина заполнена водой.

2. Проанализировано влияние длины открытого, закрытого участков скважины и протяженности зоны перфорации на динамику собственных колебаний.

3. Установлено, что в диапазоне проницаемости $k_p=10^{-15}\div 10^{-13}\text{м}^2$ пласта протяженность закрытого участка оказывает влияние на волновые характеристики собственных колебаний. Увеличение длины зоны перфорации происходит снижение частоты колебаний в диапазоне $k_p=10^{-13}\div 10^{-11}\text{м}^2$. Выявлено, что с ростом закрытого участка скважины частота колебаний уменьшается вне зависимости от коэффициента проницаемости пласта.

4. Решена задача о собственных колебаниях нефти в скважине.

5. Показано, что наибольшая амплитуда колебаний наблюдается на устье и забое скважины.

6. Приведено сравнение частоты, коэффициента и декремента затухания собственных колебаний при изучении воды и нефти. Установлено, что в диапазоне проницаемостей пласта $k_p=10^{-15}\div 10^{-9}\text{м}^2$ колебания нефти затухают приблизительно в два раза быстрее.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ:

1. Рафикова, Г.Р. Влияние параметров призабойной зоны скважины на собственные колебания столба жидкости в насосно–компрессорной трубе / Г.Р. Рафикова, З.З. Мамаева // Вестник Самарского университета. Естественнаучная серия. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 70–79.

2. Шагапов, В.Ш. Анализ коллекторских характеристик призабойной зоны пласта, подверженного гидравлическому разрыву по собственным колебаниям столба жидкости в скважине / В.Ш. Шагапов, Г.Р. Рафикова, Р.А. Башмаков, З.З. Мамаева // Инженерно–физический журнал. – 2023. – Т. 96, № 2. – С. 281–288.

3. Шагапов, В.Ш. Затухающие собственные колебания жидкости в скважине, сообщаемой с пластом / В.Ш. Шагапов, Р.А. Башмаков, Г.Р. Рафикова, З.З. Мамаева // Прикладная механика и техническая физика. – 2020. – Т. 61, № 4 (362). – С. 5–14.

4. Рафикова, Г.Р. Исследование собственных колебаний нефти в вертикальной скважине / Г.Р. Рафикова, З.З. Мамаева // Многофазные системы. – 2021. – Т. 16, № 3–4. – С. 105–111.

5. Мамаева, З.З. Динамика собственных колебаний жидкости в скважине, сообщающейся с пластом при наличии трещины ГРП / З.З. Мамаева // Многофазные системы. – 2022. – Т. 17, № 3–4. – С. 195–196.

6. Шагапов, В.Ш. Математическая модель колебаний жидкости в скважине, сообщающейся с пластом / В.Ш. Шагапов, Г.Р. Рафикова, З.З. Мамаева // В сборнике: Материалы XXII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021). Материалы конференции. – Москва, 2021. – С. 487.

7. Шагапов, В.Ш. Исследование затухающих собственных колебаний жидкости в скважине, возникших при гидроударе / В.Ш. Шагапов, Г.Р. Рафикова, З.З. Мамаева // В сборнике: Актуальные проблемы науки и образования в современном ВУЗе. Сборник трудов V Международной научно–практической конференции. – Стерлитамак, 2021. – С. 404–407.

8. Шагапов, В.Ш. Исследование характеристик пласта по собственным колебаниям столба жидкости в стволе скважины / В.Ш. Шагапов, З.З. Мамаева // В сборнике: Математическое моделирование процессов и систем. Материалы XII Международной молодежной научно–практической конференции. – Стерлитамак, 2022. – С. 263–265.

9. Шагапов, В.Ш. Исследование собственных колебаний жидкости в вертикальной скважине при наличии ГРП трещины / В.Ш. Шагапов, Г.Р. Рафикова, З.З. Мамаева // В сборнике: Обратные задачи и математические модели. Сборник научных трудов. – Бирский филиал Башкирского государственного университета, - 2022. – С. 72–75.

10. Шагапов, В.Ш. Динамика распространения собственных колебаний столба жидкости в вертикальной скважине / В.Ш. Шагапов, Г.Р. Рафикова, З.З. Мамаева // В сборнике: Уфимская осенняя математическая школа. Материалы международной научной конференции – Уфа, 2022. - Т.2. - С. 432–433.

11. Мамаева, З.З. Исследование характеристик пласта по собственным колебаниям столба жидкости в стволе скважины при наличии ГРП / З.З. Мамаева // В сборнике: Мавлютовские чтения. Материалы XVI всероссийской молодёжной научной конференции. - Уфа, 2022. - Т. 5. - С. 1124–1131.