

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКРЕСТНОСТИ СКВАЖИНЫ МЕТОДОМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ

Гаврилов А.Г., Марданшин А.Н., Овчинников М.Н., Штанин А.В.

Казанский государственный университет, НГДУ «Азнакаевскнефть»

Представлены результаты исследований призабойной зоны вертикальных скважин методом фильтрационных гармонических волн давления с малыми по продолжительности периодами воздействия длительностью в минуты и десятки минут. Сделан вывод об актуальности приведения показаний глубинных и устьевых приборов к пластовым условиям. Рассмотрены особенности интерпретации результатов подобных экспериментов, учитывающие сложное движение жидкости в скважине.

Результаты исследований призабойной зоны актуальны как с точки зрения принятия решений о проведении обработки призабойной зоны и оценки эффективности проведенной ОПЗ, так и для корректного построения постоянно действующих моделей месторождений в случае, когда важно совпадение расчетных и реальных забойных давлений. При этом значения фильтрационных параметров пласта вблизи скважины могут существенным образом отличаться по своим значениям от среднепластовых. В данной статье будут рассмотрены возможности использования метода гидродинамического зондирования окрестности скважины на примере вертикальных скважин в пористых однопластовых системах.

Метод периодического гидродинамического зондирования межскважинных интервалов, известный как метод фильтрационных (гармонических) волн давления (ФВД), разработан достаточно давно [1,2]. Относительно малая его распространенность на практике связана с техническими особенностями проведения экспериментов, недоработанностью вопросов интерпретации результатов исследований для реальных пластовых условий [3], значительным временем необходимым для проведения исследований. Частным случаем этого метода в случае высокочастотного (в фильтрационном смысле) варианта исследований призабойной зоны отдельных скважин с периодами, как правило, 10^2 - 10^4 секунд (или частот $\omega \sim 10^{-1}$ - 10^{-3} рад/сек) является метод так называемого самопрослушивания скважин. Его реализация не требует длительной

остановки работы скважины и позволяет построить картину изменений гидропроводности пласта по мере удаления от скважины на единицы и десятки метров. При этом нет необходимости учитывать явление послепитока, присущее методу кривых восстановления давления (уровня), и вносящее существенное искажение в результаты интерпретации. Глубина зондирования R в методе самопрослушивания задается самим экспериментатором путем задания соответствующего периода T гармонических колебаний и пропорциональна $\sim \sqrt{\chi T}$, где χ – пьезопроводность. Конечно, понятие радиуса зондирования носит условный характер и имеет определенный произвол в выборе его значения. В данном случае речь идет о таких значениях R , при которых амплитуда давления по мере удаления от скважины падает более чем на 3 порядка. Таким образом, при $\chi \sim 10^{-1} \text{ м}^2/\text{с}$ на периодах до 10^3 секунд глубина зондирования составит до 15 метров. При этом время проведения полного цикла исследования околоскважинного пространства на 10-15 различных периодах составит несколько часов.

Аналитические выражения для интерпретации результатов экспериментальных исследований с использованием рассматриваемого метода были получены и исследованы С.Н. Бузиновым и И.Д. Умрихиным [1] и Ю.М. Молоковичем [2]. При проведении исследований методом самопрослушивания с фиксированным периодом T гармонических колебаний дебита (соответственно, фиксированной частоты ω) по данным измерений строятся графики временных зависимостей изменений дебитов и давлений на забое скважины $q(t) = q_0 \sin(\omega t)$ и $P_c(t) = P_0 \sin(\omega t - \Delta)$. Между установившимися гармоническими изменениями дебита и давления будет существовать некоторый фазовый сдвиг Δ . Зная этот сдвиг и амплитуды изменений дебита и давления для каждой конкретной частоты (периода) можно определить фильтрационные параметры пласта гидропроводность ε и комплекс χ / r_c^2 .

При выполнении условия

$$z_c = r_c \sqrt{\frac{\omega}{\chi}} \ll 1 \quad (1)$$

эти параметры могут быть вычислены по достаточно простым приближенным формулам:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{8P_0 \sin \Delta} \quad (2)$$

$$\frac{\chi}{r_c^2} = \frac{\gamma^2}{4} \omega \cdot \exp \frac{\pi}{2 \operatorname{tg} \Delta}. \quad (3)$$

Здесь q_0 – амплитуда колебаний дебита, P_0 – амплитуда колебаний давления, $\gamma = 1.781$ – постоянная Эйлера, r_c – приведенный радиус. Фазовый сдвиг Δ связан с безразмерным параметром z_c зависимостью вида

$$\Delta = \operatorname{arctg} \frac{\pi}{4 \ln \frac{2}{\gamma z_c}}. \quad (4)$$

Для более высоких значений параметра z_c (например, при $r_c \sim 10^{-1}$ м, $\chi \sim 10^{-2}$ м²/с, $\omega = 2\pi/T \sim 10^{-1}$ рад/с, $z_c \sim 0.3$) получены точные, но редко используемые формулы:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{2\pi P_0 z_c} \sqrt{\frac{\operatorname{ker}_0^2 z_c + \operatorname{kei}_0^2 z_c}{\operatorname{ker}_1^2 z_c + \operatorname{kei}_1^2 z_c}}, \quad (5)$$

$$\Delta = \frac{\pi}{4} - \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{ker}_1 z_c \cdot \operatorname{ker}_0 z_c + \operatorname{kei}_1 z_c \cdot \operatorname{kei}_0 z_c}{\operatorname{ker}_0 z_c \cdot \operatorname{kei}_1 z_c - \operatorname{kei}_0 z_c \cdot \operatorname{ker}_1 z_c} \right). \quad (6)$$

Здесь ker и kei – функции Кельвина. Для более сложной (но периодической) формы изменения дебита для линейных систем можно использовать соответствующее разложение сигнала в ряд Фурье и рассматривать отдельные гармоники этого ряда. Случаи сред со сложной реологией рассмотрены в [2].

Казалось бы, проблем с интерпретацией нет, поскольку несложно найти корни уравнения (6), используя, например, современные математические пакеты типа *Maple* или *Mathematica*.

Однако ряд данных натуральных экспериментов, проведенных на скважинах опытного участка Центрально-Азнакаевской площади Ромашкинского месторождения (пласт Д₁ – терригенный пористый коллектор; система – однопластовая; обводненность эксплуатационных скважин 90-99 %; забой - 1800

метров), привел к результатам, которые не укладывались в вышеприведенную схему, поскольку приводили к аномально большим значениям сдвига фаз Δ , даже большим единицы при периодах зондирования менее 1000 секунд. Заметим, что формула (6) ограничивает предельное значение Δ величиной $\pi/4 \sim 0.78$. При этом для эксплуатационных скважин сдвиг фаз был существенно меньше, чем для нагнетательных, эксплуатируемых в процессе экспериментов в режиме «нагнетание-простой» и исследования той же нагнетательной скважины в режиме излив-простой приводили к более реалистичным значениям Δ .

Выяснилось, что при интерпретации результатов исследований методом самопрослушивания при следует учесть ряд особенностей, связанных с условиями проведения экспериментов, чему и посвящена данная работа.

Прежде всего, выясним условие применимости приближения $z_c \ll 1$. На рис.1 показаны зависимости $\Delta_n(z_c)$ и $\Delta_T(z_c)$ для приближенного (4) и точного(6) решений, соответственно, а также расчетное, по данным численного интегрирования, значение фазового сдвига $\Delta_n(z_c)$ – совпадающее с точным решение $\Delta_T(z_c)$.

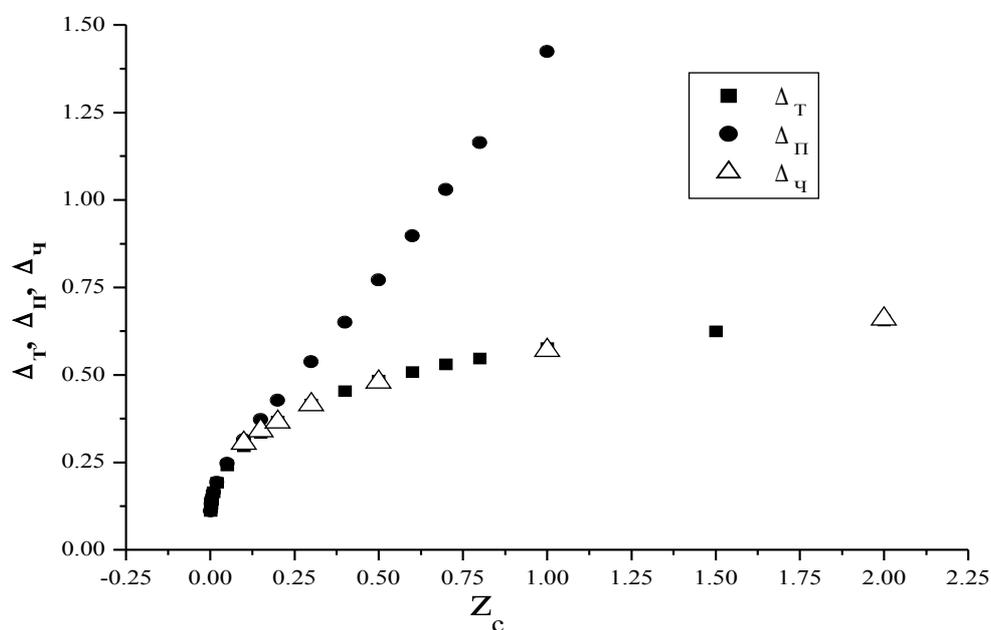


Рисунок 1. Зависимости фазового сдвига от значений параметра z_c для приближенного и точного аналитических решений и численного расчета

Можно сделать вывод, что использование формул (2) - (3) удовлетворительно при значениях $z_c < 0.1 - 0.15$. При больших значениях z_c следует, очевидно, использовать формулы (5) и (6), что соответствует сдвигам фаз $\Delta > 0.20$. Отметим, что с весьма хорошим приближением ($R^2=0.9993$) зависимость $z_c(\Delta)$ в интервале $0.2 < \Delta < 0.6$ можно описать полиномиальной формулой: $z_c = 75.423\Delta^4 - 89.166\Delta^3 + 40.783\Delta^2 - 7.3052\Delta + 0.437$, что охватывает большинство ситуаций с экспериментами по высокочастотному самопрослушиванию. Однако для объяснения результатов ряда натуральных экспериментов, простого пересчета с использованием формул (5-6) оказалось недостаточно.

Переходя к анализу условий проведения экспериментов по самопрослушиванию, отметим, что при пуске скважины с большим перепадом давления в момент времени $t=0$, в стволе скважины наблюдаются гидродинамические волны, распространяющиеся по скважине с акустическими скоростями и перепадами давления до единиц атмосфер. При этом затухание колебаний происходит через время $t \sim 100$ секунд, что сравнимо с периодами задаваемых колебаний. Для исключения этого упруго-динамического эффекта, одним из отрицательных последствий которого являются паразитные скачки значений измеряемых параметров при использовании дискретных времен замеров, использовалась специальная крановая задвижка [4], позволяющая задавать квазигармонические колебания дебита. Это позволило преодолеть фактор нестабильности сигналов, связанный с распространением «ударных» гидродинамических волн.

Следующий вопрос: в какой степени показания устьевых приборов соответствуют используемым в расчетах значениям амплитуд и давлений и как они скоррелированы по времени? Обычно измерительная аппаратура (манометр и дебитомер типа «турбоквант») устанавливаются на устье скважины, причем дебитомер - на устье при входе в НКТ, а манометр - в затрубье. Вариант результатов подобного исследования показан на рис.2 для нагнетательной скважины 4379а, на примере которой и будут приведены последующие расчеты.

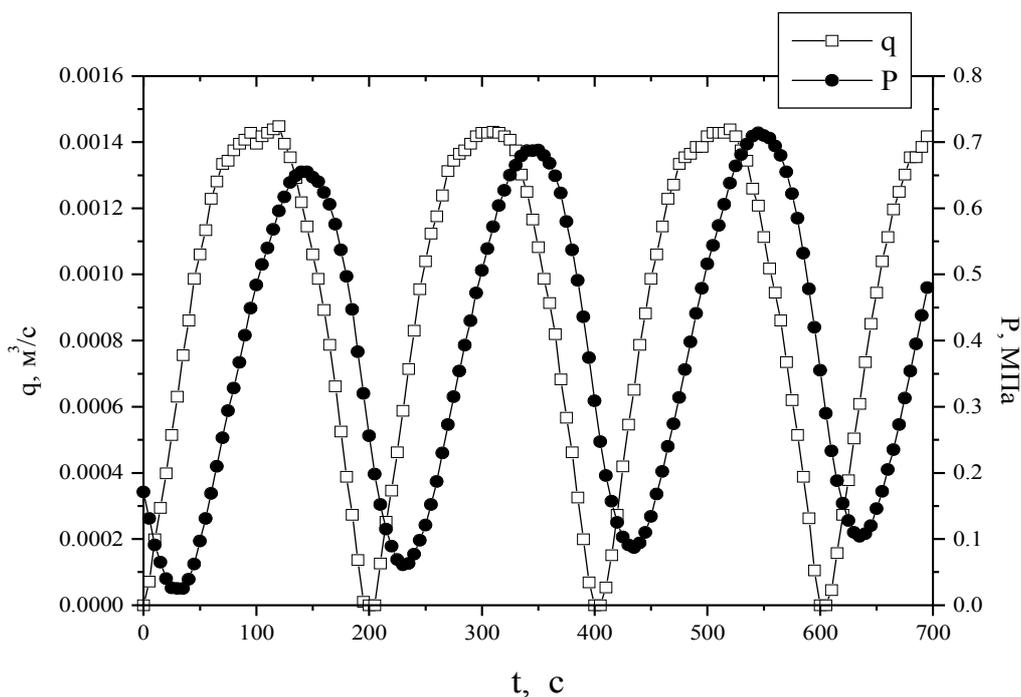


Рисунок 2. Динамика дебита q , регистрируемого устьевым дебитометром, и давления P , регистрируемого манометром на затрубье

Для контрольных измерений использовались также манометры для измерения давления на устье в НКТ и глубинный манометр на забое, в дополнение к манометру на затрубье. Проведенные исследования показали, что значения давлений измеренных глубинным манометром и устьевыми манометрами в затрубье и в НКТ различаются, что показано на рис. 3. Отметим некоторую неэквивалентность измеренных сигналов для четных и нечетных полупериодов колебаний как по форме, так и по продолжительности. Таким образом, эксперименты показали как наличие задержек во времени в показаниях приборов, так и искажение формы сигналов по давлению. Также отличаются и дебиты, измеренные на устье и на забое скважины. Возникает вопрос: какие значения дебита и давления следует брать для последующей интерпретации и расчетов фильтрационных параметров пластов и с какими фазами?

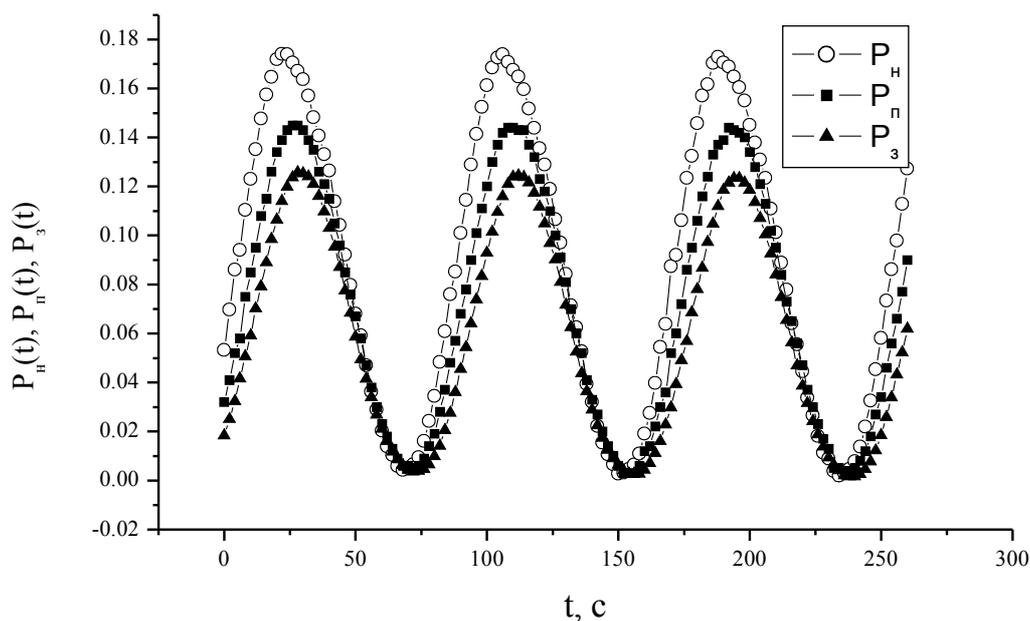


Рисунок 3. Показания трех манометров, установленных на устье в НКТ(P_n), на забое вблизи пласта (P_p) и на затрубье (P_z)

Для корректного расчета фазовых соотношений необходимо рассмотреть следующие механизмы:

- Существование временной задержки, связанной с распространением сигнала по стволу скважины. Конечно, при периодах колебаний дебита в единицы часов, это несущественно, однако для периода $T = 50$ секунд, 1 секунда – это уже 0.12 радиан поправки в разность фаз.

- Потери давления вследствие трения жидкости о стенки скважины, что приводит как к искажению формы сигнала, с соответствующим дополнительным фазовым сдвигом, так и измененную его амплитуды по давлению, что сказывается и при расчете гидропроводности (реальный пластовый дебит будет меньше по амплитуде, чем устьевой, а амплитуда давления будет больше, чем измеряемая на затрубье).

- Наличие «присоединенной» массы (объема) жидкости, которая не проходит реально в пласт, но регистрируется устьевым дебитомером и присутствует в скважине, будучи связанной с процессами сжатия – разжатия

жидкости в стволе скважины в режиме нагнетание – простой. И этот присоединенный объем может быть значительным с точки зрения фазовых соотношений: в наших экспериментах $V_0 \beta_* \Delta P = \Delta V \sim 1 - 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с}$ (здесь β_* - сжимаемость жидкости в объеме V_0 скважины при перепаде давления ΔP), что при дебите $q_0 \sim 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с}$ означает длительность процесса сжатия, эквивалентную единицам секунд.

Таким образом, фазовые задержки в 10-20 секунд, связанные со способом регистрации реальных сигналов на периодах исследования 100-200 секунд, эквивалентны дополнительным сдвигам фаз $\sim 0.5-1.0$, что, по нашему мнению, и должно быть учтено для того, чтобы ответить на вопрос: что показывают «манометр» и «дебитомер»? Другими словами, следует привести показания устьевых приборов к пластовым условиям.

С учетом пересчета фазовых сдвигов для каждого отдельного периода по данным показаний трех манометров мы построили график зависимости Δ от периодов T в дополнение к графику, построенному непосредственно по данным приборов (дебитомера на устье и манометра на затрубье). На рисунке 4 показаны экспериментально полученные сдвиги фаз. Черными квадратиками показана зависимость $\Delta(T)$, рассчитанная по данным устьевых приборов без коррекционных поправок (формальный расчет), а полые кружки – пересчитанные значения Δ с учетом задержки сигналов при распространении по стволу скважин и поправок на трение и сжимаемость (принята равной $5.5 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$) приведенного объема жидкости в стволе скважины. Мы видим, что сдвиги фаз стали более реалистичны (менее $\pi/4$). Отметим, что на рисунке 4 приведены данные исследований скважины 4379а в разные дни и с разными периодами. Тем не менее, кривая $\Delta(T)$ имеет весьма гладкий характер, что говорит об устойчивости получаемых экспериментальных данных.

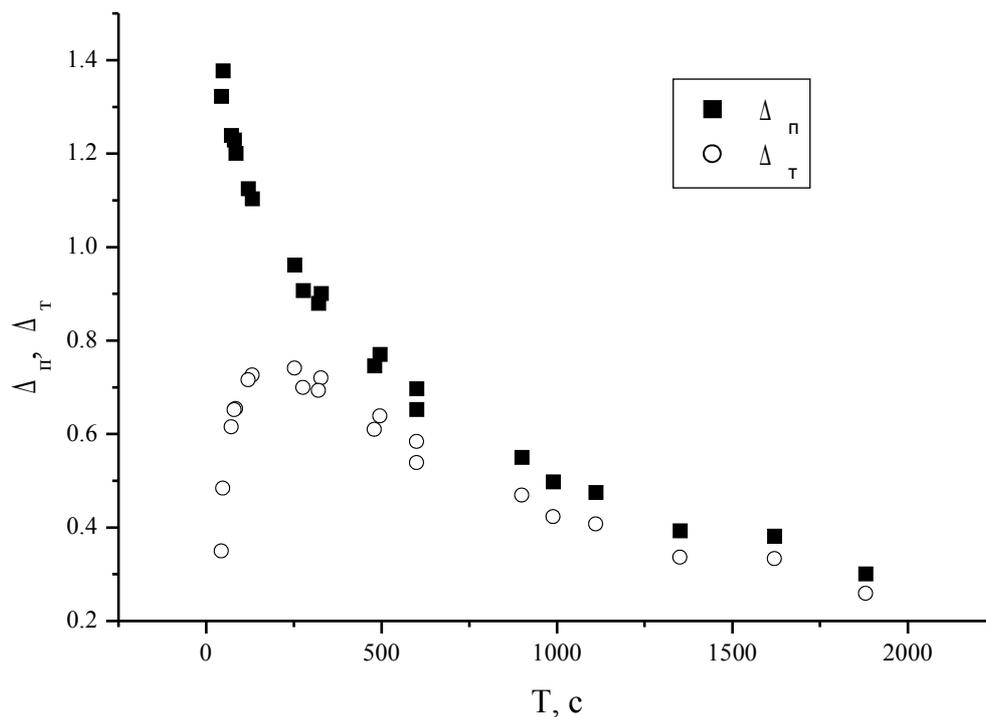


Рисунок 4. Частотная зависимость фазовых сдвигов для случая формального расчета и с учетом коррекции, связанной с приведением давлений и дебитов к пластовым условиям

Теперь можно рассмотреть и динамику гидропроводности $\varepsilon(r)$. Точнее тенденцию этой динамики в виде зависимости $\varepsilon(T)$ и динамику параметра χ / r_c^2 (рис. 5). Данные, полученные по начальным точкам первичных участков (с периодами зондирования до 100 секунд), конечно, менее надежны. Возможно, высокое значение гидропроводности вблизи самой скважины связано с трещиноватостью коллектора вблизи скважины. Затем наблюдается зона пониженной гидропроводности на периодах $10^2 < T < 10^3$ сек и монотонный рост значений гидропроводности по мере роста периода зондирования. Отметим, что в скважину 4379а ранее производилась закачка полимерных систем, которые, возможно ухудшили проницаемость на расстояниях 5-20 метров вблизи скважины. Мы наблюдаем соответствующую картину и по параметру χ / r_c^2 , который, правда является менее надежным при подобного рода исследованиях, чем гидропроводность.

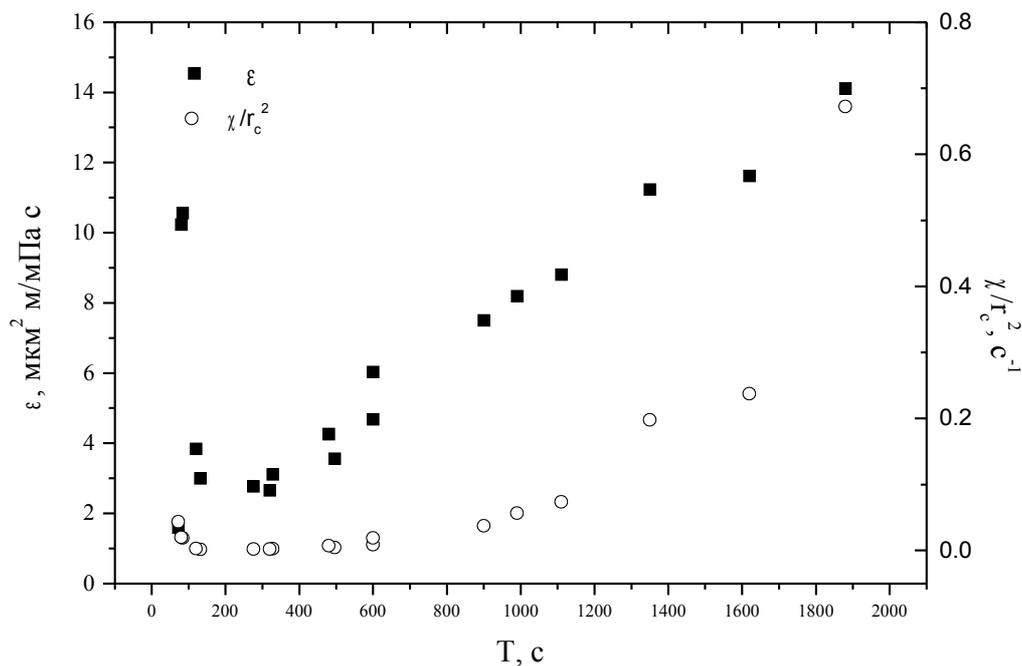


Рисунок 5. Расчетное значение гидропроводности и параметра χ / r_c^2 с учетом сделанных поправок в зависимости от периода колебаний дебита

Вывод: метод самопрослушивания может быть эффективно использован для диагностики состояния околоскважинного пространства пласта при условии корректного расчета амплитуд и фаз дебитов и давлений, отнесенных к системе «пласт-скважина».

Литература

1. Бузинов С.Н., Умрихин И.Д. Исследование нефтяных и газовых скважин и пластов. -М.: Недра. - 1984.-269 с.
2. Молокович Ю.М., Непримеров Н.Н., Пикуза В.И., Штанин А.В. Релаксационная фильтрация .- Казань: Изд. Казанского университета.- 1980.-136с.
3. Овчинников М.Н. Интерпретация результатов исследований пластов методом фильтрационных волн давления. – Казань: Новое знание. – 2003. – 84с.
4. Гаврилов А.Г., Штанин А.В. и др. Устройство для регулирования потока жидкости. Авторское свидетельство РФ № 1626035.