

## **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  $\chi$  – 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  $\omega$ ) 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  $\Delta$ . Зная этот сдвиг и амплитуды изменений дебита и давления для каждой конкретной частоты (периода) можно определить фильтрационные параметры пласта гидропроводность  $\varepsilon$  и комплекс  $\chi / r_c^2$ .

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  $\Delta$  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,  $\chi \sim 10^{-2}$  м<sup>2</sup>/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  $\operatorname{ker}$  и  $\operatorname{kei}$  – 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 Д<sub>1</sub> – 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  $\Delta$ , даже большим единицы при периодах зондирования менее 1000 секунд. Заметим, что формула (6) ограничивает предельное значение  $\Delta$  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  $\Delta$ .

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  $\Delta_T(z_c)$ .

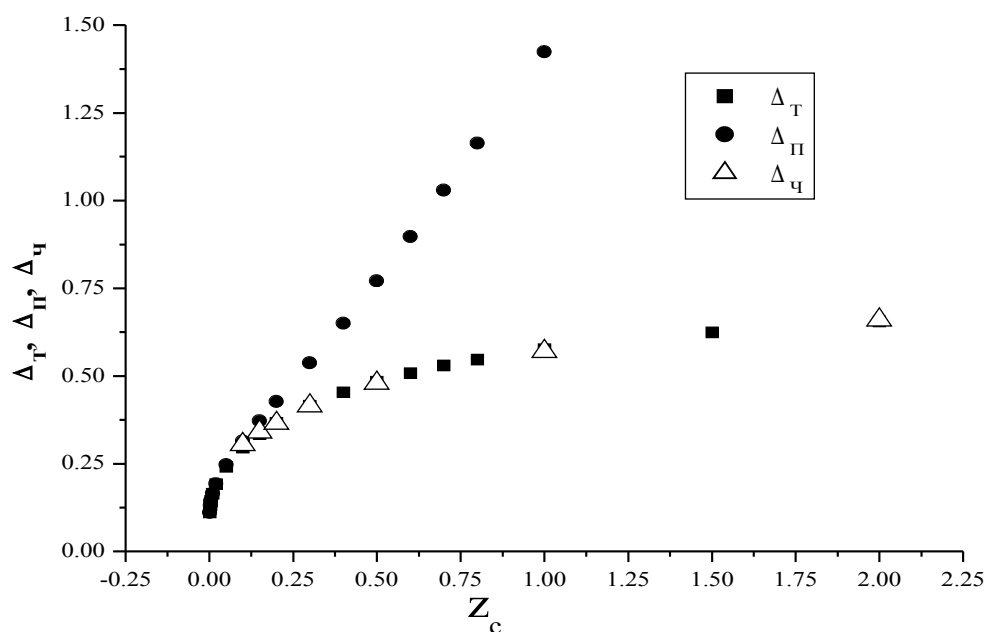


Рисунок 1. Зависимости фазового сдвига от значений параметра  $z_c$  для приближенного и точного аналитических решений и численного расчета

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.

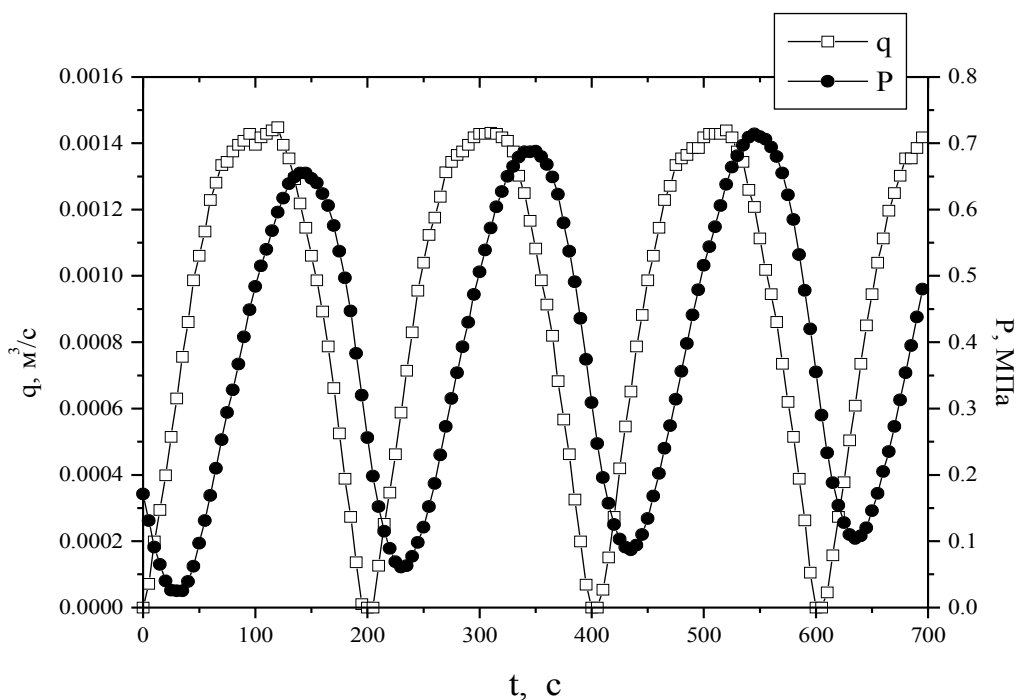


Рисунок 2. Динамика дебита  $q$ , регистрируемого устьевым дебитометром, и давления  $P$ , регистрируемого манометром на затрубье

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?

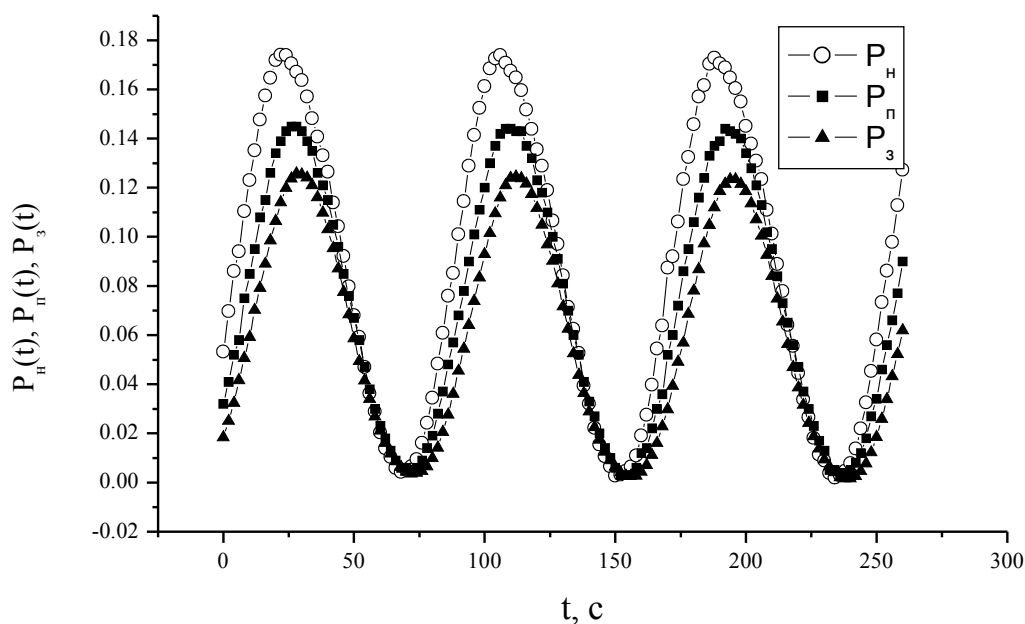


Рисунок 3. Показания трех манометров, установленных на устье в НКТ( $P_n$ ), на забое вблизи пласта ( $P_p$ ) и на затрубье ( $P_z$ )

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  $\beta_*$  - сжимаемость жидкости в объеме  $V_0$  скважины при перепаде давления  $\Delta P$ ), 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  $\Delta$  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  $\Delta$  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.



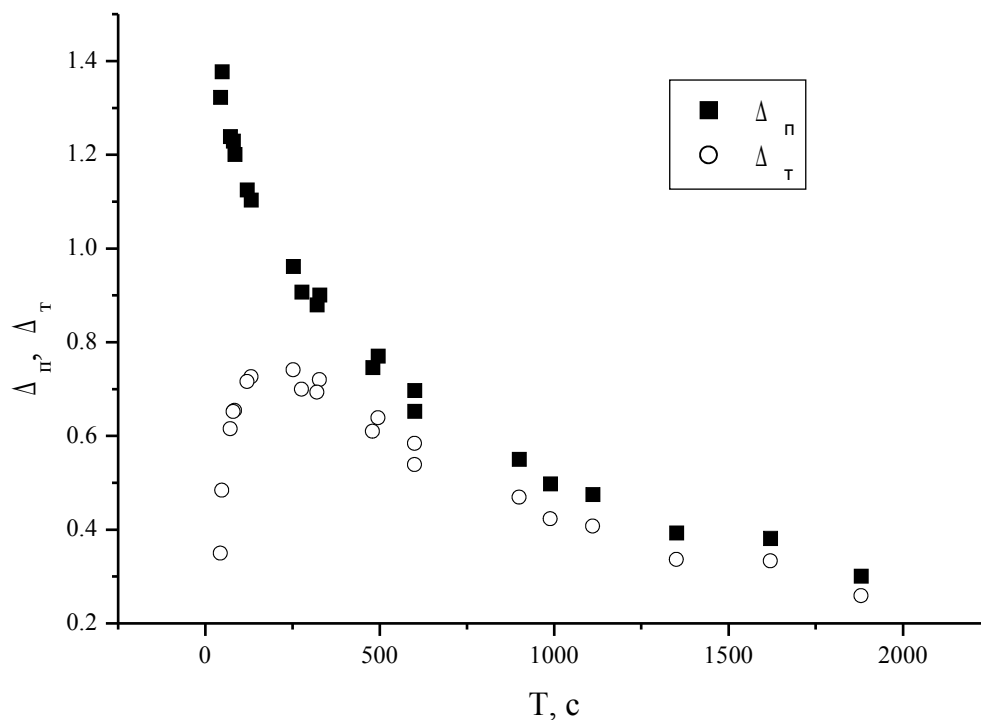


Рисунок 4. Частотная зависимость фазовых сдвигов для случая формального расчета и с учетом коррекции, связанной с приведением давлений и дебитов к пластовым условиям

Теперь можно рассмотреть и динамику гидропроводности  $\varepsilon(r)$ . Точнее тенденцию этой динамики в виде зависимости  $\varepsilon(T)$  и динамику параметра  $\chi / r_c^2$  (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  $\chi / r_c^2$ , который, правда является менее надежным при подобного рода исследованиях, чем гидропроводность.

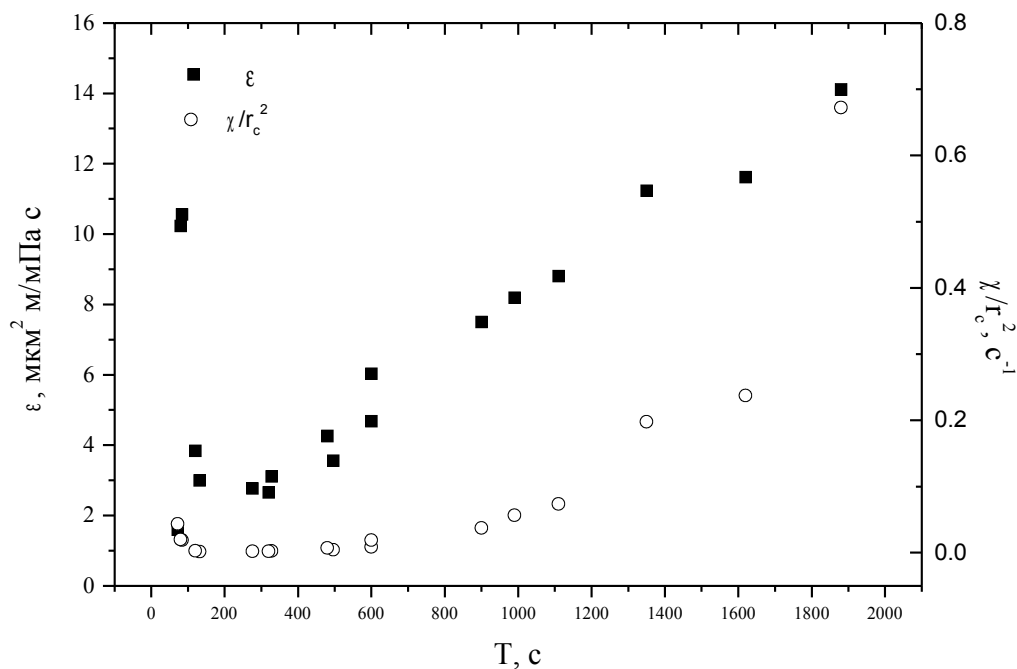


Рисунок 5. Расчетное значение гидропроводности и параметра  $\chi / r_c^2$  с учетом сделанных поправок в зависимости от периода колебаний дебита

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.