

КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Институт физики

Кафедра радиоэлектроники

УДК 338.242

Инв.№

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по вопросам экономического  
и стратегического развития

\_\_\_\_\_ М.Р. Сафиуллин

“ \_\_\_\_\_ ” 2014 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Исследование спектральных характеристик фильтрационных  
шумов в пористых средах

Этап 2. Экспериментальные исследования спектральных характеристик  
фильтрационных шумов различных образцов пористых сред

по договору подряда №33-13/4 от 30.11.2013 г.

(заключительный)

Научный руководитель,

ст. преподаватель, к.т.н.

\_\_\_\_\_ Е.А. Марфин

Казань 2014

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,

к-т техн. наук

\_\_\_\_\_ Е.А. Марфин (введение,  
разделы 1-5, заключение)

Исполнители темы:

студент

\_\_\_\_\_ Б.А. Гарифьянов (разделы 2.2, 3)

студент

\_\_\_\_\_ И.С. Метелёв (разделы 1, 2.1, 3, 4)

студент

\_\_\_\_\_ Д.Р. Сафиуллин (разделы 2-3)

# РЕФЕРАТ

Отчет 38 с., 1 ч., 32 рис., 3 табл., 9 источника, 0 прил.

НАСЫЩЕННЫЕ ПОРИСТЫЕ СРЕДЫ, ФИЛЬТРАЦИЯ,  
ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ШУМЫ, ДАВЛЕНИЕ, ПРОНИЦАЕМОСТЬ,  
ПОРИСТОСТЬ, ВЯЗКОСТЬ, ЧАСТОТА, АМПЛИТУДА, СПЕКТР

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 2 этапу темы «Исследование спектральных характеристик фильтрационных шумов в пористых средах» в рамках темы 063100027 БиПи Эксплорэйшн (договор №C33-13 от 29.03.2013 г.).

Объектом исследования являются насыщенные пористые среды.

Цель работы – создания базы данных спектральных характеристик фильтрационных шумов различной природы.

В процессе работы выполнена модернизация лабораторной установки по исследованию фильтрационных характеристик пористых сред для изучения спектров фильтрационных шумов. Созданы образцы пористых сред с различными значениями пористости и проницаемости. Определены их фильтрационные характеристики. Проведены экспериментальные исследования по замеру и анализу характеристик фильтрационных шумов. Получены спектры шумов при фильтрации через пористые образцы воздуха и воды.

Степень внедрения – полученные спектральные характеристики фильтрационных шумов могут стать основой для решения идентификационных задач метода скважинной спектральной шумометрии.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Экспериментальная установка	7
1.1. Описание экспериментальной установки	7
1.2. Методика определения фильтрационных свойств пористых сред	11
1.3. Методика проведения экспериментальных исследований	13
2. Образцы пористых сред	15
2.1. Изготовление образцов пористых сред	15
2.2. Фильтрационные свойства пористых сред	20
3. Спектральные характеристики фильтрационных шумов	22
4. Анализ и обобщение результатов исследования	33
5. Результаты научно-организационной деятельности	35
Заключение	37
Список использованной литературы	38

## ВВЕДЕНИЕ

Добыча нефти на месторождениях с поздней стадией разработки сопряжена со значительными трудностями. Об этом свидетельствует низкий показатель коэффициента нефтеотдачи, который в России составляет около 30%. Известно, что увеличение коэффициента нефтеотдачи всего лишь на 1% на всех действующих месторождениях мира продлевает на два дополнительных года обеспеченность мирового спроса на энергоресурсы. Таким образом, актуальными являются исследования, направленные на совершенствование методов увеличения нефтеотдачи.

Данные промысловых исследований, получаемых в результате геофизических исследований, в том числе с применением метода спектральной шумометрии, позволяют решать различные практические задачи освоения нефтяных и газовых месторождений. В частности, на основе анализа спектров фильтрационных шумов в скважине можно выявить работающие интервалы продуктивных пластов и их характеристики. Это, в свою очередь, позволит более эффективно применять различные физико-химические методы увеличения нефтеотдачи пластов, оценивать эффективность использования технологических мероприятий по обработке призабойных зон скважин.

Другой важной в практическом плане стороной метода спектральной шумометрии является следующее. Известно, что одним из перспективных направлений совершенствования применяемых методов увеличения нефтеотдачи является совмещение их с воздействием на пласт упругими волнами [1-4]. При определенных условиях возможно достижения сверхсуммарного эффекта [5]. Однако, вопрос выбора оптимального амплитудно-частотного диапазона такого воздействия остается открытым. Имеются основания полагать, что воздействие на процесс фильтрации упругими волнами со спектром, соответствующим спектру фильтрационных шумов, является наиболее эффективным. Для подтверждения этого

необходимо проведение соответствующих экспериментальных исследований.

В результате проведенных ранее на первом этапе исследований получено аналитическое описание спектров фильтрационных шумов, разработаны схема экспериментальной установки для их изучения и программа проведения экспериментальных исследований.

Для достижения поставленной цели проекта - создания базы данных спектральных характеристик фильтрационных шумов различной природы, предусмотрено выполнение следующих основных задач заключительного этапа исследований являются:

- модернизация лабораторной установки по исследованию фильтрационных характеристик пористых сред для изучения спектра фильтрационных шумов;
- создание образцов пористых сред с различными значениями пористости и проницаемости. Измерение их фильтрационных характеристик;
- проведение экспериментальных исследований по замеру и анализу спектральных характеристик фильтрационных шумов;
- анализ и обобщение результатов исследования.

# 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для достижения поставленной цели проекта, на основе ранее предложенной принципиальной схемы (рис. 1.1), разработана экспериментальная установка для изучения спектров фильтрационных шумов.

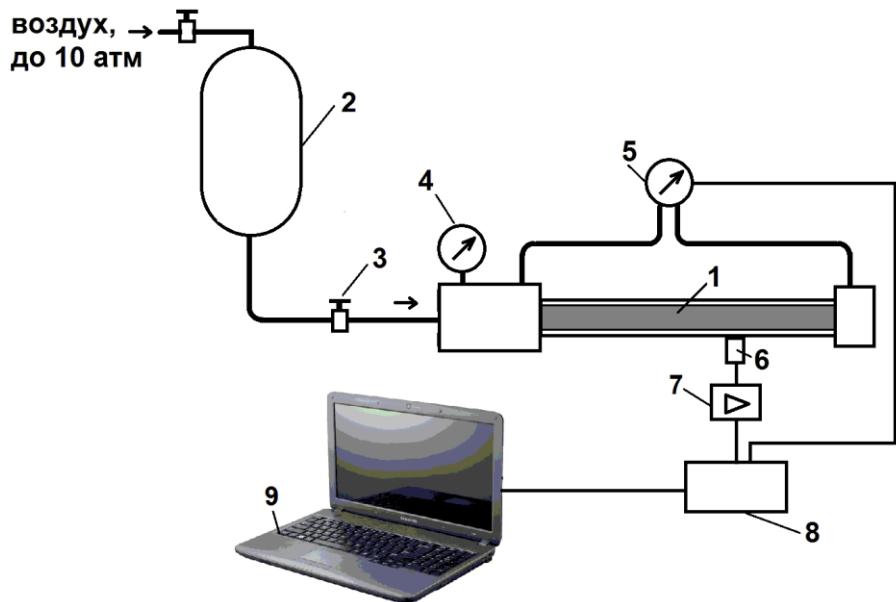


Рис. 1.1. Схема экспериментальной установки.

## 1.1. Описание экспериментальной установки

Внешний вид разработанной экспериментальной установки представлен на рис. 1.2. (обозначения с рис. 1.1 совпадают). Образец пористой среды 1 в виде цилиндра помещается внутрь измерительной ячейки с жестким стальным корпусом. Для образцов используется керновый материал из трещиновато-пористых коллекторов нефтяных месторождений и искусственно созданные пористые среды. Пространство между пористым образцом и стенкой измерительной ячейки для исключения перетечек герметизируется. Один конец трубы с пористым образцом подключается к газовому баллону высокого давления 2 через вентиль 3. Газовый баллон заполнялся воздухом с помощью компрессора. При открытии вентиля 3 поток сжатого воздуха через пористый образец выходит из открытого конца

в свободную атмосферу. С помощью образцового манометра 4 осуществляется визуальный контроль давления перед пористым образцом. Одновременно перепад давления на образце фиксировался с помощью датчика разности давления 5 типа Сапфир-22-ДД.

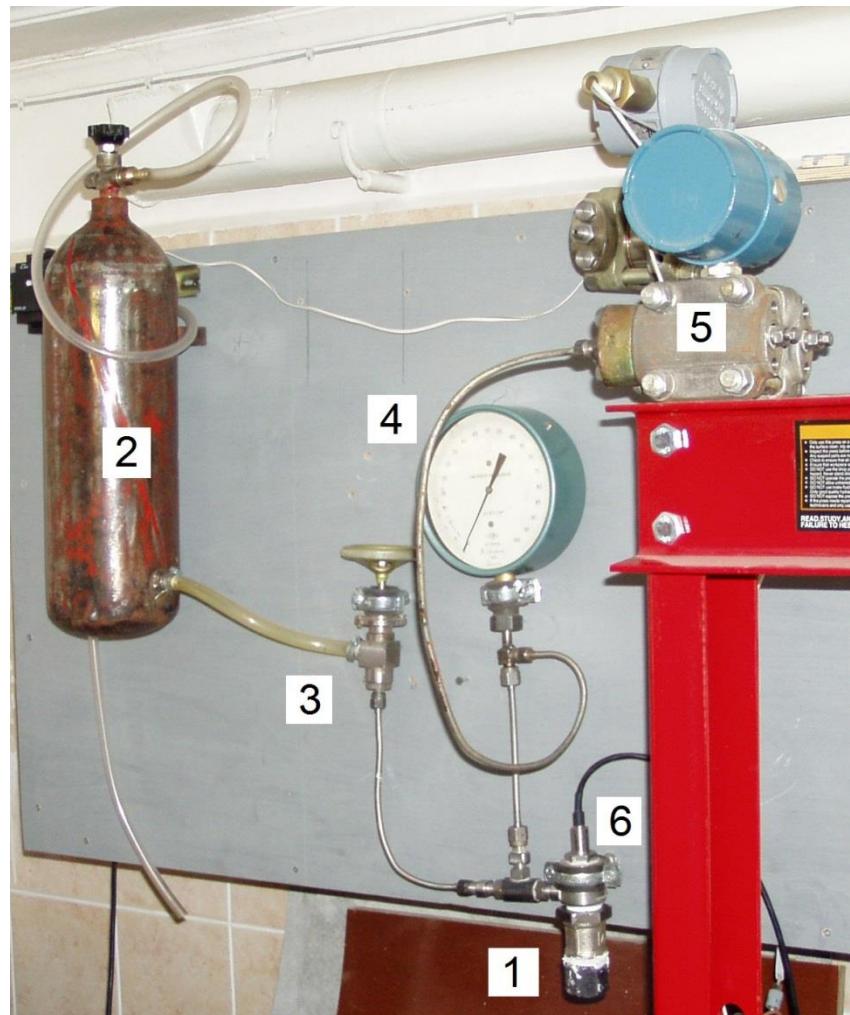


Рис. 1.2. Внешний вид экспериментальной установки.

Фильтрационные шумы могут регистрироваться с помощью гидрофона 6 или контактного микрофона, представляющего собой пьезокерамический датчик и расположенного на измерительной ячейке, присоединенного непосредственно к пористому образцу. Сигнал с микрофона (датчика) подается на предварительный усилитель 7 и далее через анализатор спектра 8 или звуковую карту на компьютер 9 (на рис. 1.2 они не представлены). На анализатор спектра 8 также подается сигнал с датчика разности давления 5

для измерения величины давления перед образцом на нестационарном режиме. В процессе эксперимента одновременная регистрация двух сигналов позволяет сопоставить спектры фильтрационных шумов с перепадом давления на образце (скоростью фильтрации).

При открытии вентиля 3 перед пористым образом 1 (рис. 1.3) создается давление, равное давлению в баке 2 и начинается процесс фильтрации. С выходом воздуха из баллона давление перед образцом снижается. По динамике снижения давления можно судить о фильтрационных свойствах пористой среды и зависимости коэффициента проницаемости от давления.



Рис.1.3. Внешний вид пористого образца в установке.

При использовании жидкости в качестве фильтрующего флюида газовый баллон 2 (рис. 1.2) частично заполняется жидкостью. Остальное пространство баллона заполняется газом под давлением, что обеспечивает перепад давления на образце. Измерением массы жидкости, вытекающей из образца за фиксированное время определяется массовый (объемный) расход жидкости, равный отношению массы жидкости к времени.

С целью повышения производительности проведения исследований на воздухе и достижения повторяемости получаемых данных разработана упрощенная конструкция, исключающая замер перепада давления (рис. 1.4).

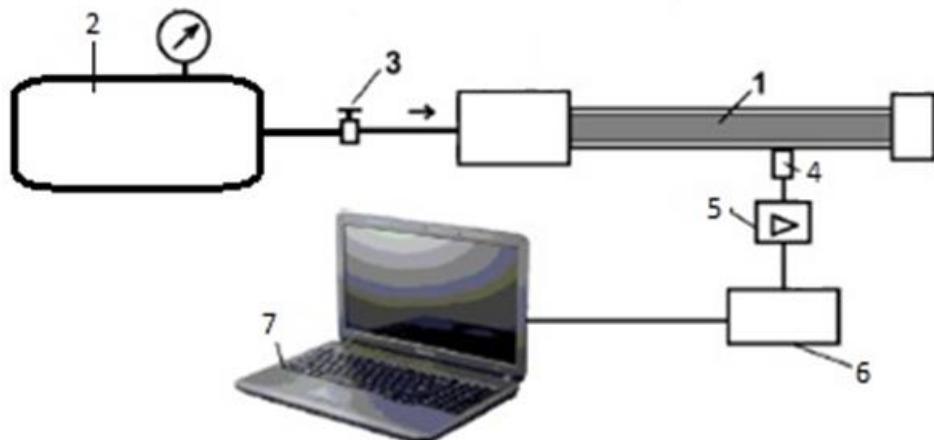


Рис. 1.4. Схема упрощенной конструкции экспериментальной установки.

Отличие между установками также состоит в подаче газа в образец. Здесь воздух под давлением идет в пористый образец 1 напрямую из емкости компрессора 2. Внешний вид пористого образца с вентилем подачи воздуха 3 представлен на рис. 1.5. Запись сигнала фильтрационных шумов осуществляется так же, как и в первой установке с помощью контактного микрофона 4, расположенного на измерительной ячейке. Сигнал с микрофона подается на предварительный усилитель 5. Далее через анализатор спектра ZetLab 6 или звуковую карту на компьютер 7. Компрессор оборудован манометром давления, что позволяет судить о значении давления перед образцом.



Рис. 1.5. Узелстыковки пористого образца с компрессором.

## 1.2. Методика определения фильтрационных свойств пористых сред

Фильтрационными свойствами пористых сред являются пористость (открытая и полная) и проницаемость (абсолютная, фазовая).

Пористостью называется отношение объема пор (пустот)  $V_{\text{пор}}$  к объему образца  $V_{\text{обр}}$  пористой среды:

$$m = V_{\text{пор}}/V_{\text{обр}} \quad (1.1)$$

Определяется в безразмерных единицах или в процентах. Открытые поры участвуют в процессе фильтрации, закрытые не имеют связи с открытymi порами.

Для измерения полной пористости используется следующая расчетная формула:

$$m_{\text{полн}} = M_{\text{ск}}/(\rho_{\text{ск}} V_{\text{обр}}) \quad (1.2)$$

где  $M_{\text{ск}}$  – масса сухой породы (скелета), из которой сделан образец,  $\rho_{\text{ск}}$  – плотность вещества породы. В нашем случае использовался кварцевый песчаник с плотностью  $\rho_{\text{ск}} = 2,6 \text{ г/см}^3$ .

Для измерения открытой пористости образец помещался в жидкость, которая заполняла все открытые поры. В результате этого его масса образцов увеличивалась. Зная массу впитавшейся жидкости, пористость определяется по формуле:

$$m_{\text{отк}} = M_{\text{воды}}/(\rho_{\text{воды}} V_{\text{обр}}) \quad (1.3)$$

Таким образом, для измерения пористости необходимо тщательно измерить геометрические размеры, чтобы вычислить объем образца, произвести взвешивание образца, насыщенного водой и сухого, для вычисления массы насыщенной воды.

Проницаемостью называют способность горных пород фильтровать сквозь себя флюиды при наличии перепада давления. Проницаемость породы определяется лабораторно при фильтрации флюидов через керн. Для ее оценки используется линейный закон фильтрации Дарси, по которому скорость фильтрации флюида в пористой среде пропорциональна градиенту давления и обратно пропорциональна вязкости:

$$V = Q / F = k \times \Delta P / (\mu \times L) \quad (1.4)$$

$$k = Q \times \mu \times L / (\Delta P \times F), \quad (1.5)$$

где:  $V$  – скорость линейной фильтрации (см/с),  $Q$  – объёмный расход флюида (см<sup>3</sup>/с),  $\mu$  – вязкость флюида (сП),  $\Delta P$  – перепад давления (атм),  $F$  – площадь фильтрации (см<sup>2</sup>),  $L$  - длина образца (см),  $k$  – проницаемость (Д).

Соответственно, для расчета проницаемости необходимо произвести измерения всех величин, входящих в уравнение (1.5). Эксперименты проводятся на воде и на воздухе. Если в случае воды расход флюида определяется достаточно просто, то для измерения расхода воздуха, в отсутствии счетчика расхода газа, необходимо прибегнуть к вычислениям. Суть их заключается в том, что расходуемый воздух находится в закрытой емкости (баллоне) и покидает только через образец. Зная зависимость падения давления перед образцом от времени достаточно точно вычисляется коэффициент проницаемости. Типичная зависимость падения давления из баллона объемом 4,8 л для пористого образца из реального керна представлена на рис. 1.6.

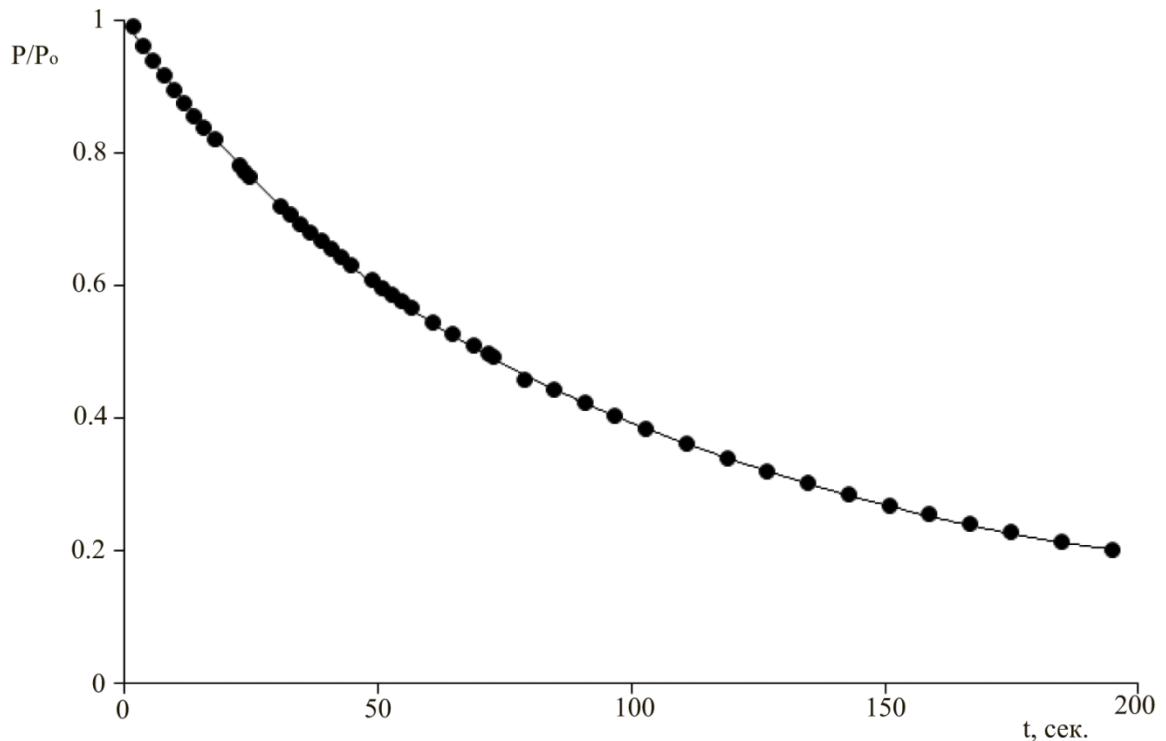


Рис. 1.6. Зависимость падения давления перед образцом.

### ***1.3. Методика проведения экспериментальных исследований***

Исходя из особенностей экспериментальной установки, разработана следующая программа проведения эксперимента:

- 1) проводится подготовка пористых образцов. Измеряются их геометрические параметры и пористость;
- 2) выполняется сбора и подключение всех узлов и систем установки;
- 3) осуществляется проверка на герметичность системы путем обмыливания всех стыковочных узлов. В случае утечки не герметичность устраняется путем затяжки или с помощью герметика;
- 4) заполняется газовый баллон воздухом до заданного давления;
- 5) производится запись сигналов (примерно 10-20 сек.) с датчиков в отсутствии фильтрации. Эти данные содержат фоновый шум и в дальнейшем будут использованы при вычислении полезного сигнала;
- 6) при продолжающейся записи сигналов открывается кран подачи давления на пористый образец. Это приводит к созданию на образце градиента давления и началу фильтрации;
- 7) по падению давления перед образцом с помощью визуального наблюдения за показаниями манометра судят о режиме фильтрации;
- 8) после прекращения фильтрации записанный сигнал обрабатывают на компьютере. Получают зависимость перепада давления на образце от времени, и звуковой файл, который содержит информацию об изменении спектральных характеристик фильтрационных шумов по времени;
- 9) обработка полученных данных позволяет построить графики зависимости амплитудно-частотных характеристик фильтрационных шумов от скорости фильтрации.
- 10) по изменению перепада давления на образце определяют его фильтрационные свойства (проницаемость, зависимость проницаемости от давления).

11) далее эксперимент повторяется с другим образцом пористой среды.

Эксперимент с жидкостью несколько отличается от эксперимента с газом. Для его проведения газовый баллон частично заполняется жидкостью, заполняются жидкостью также все трубопроводы, по которым будет осуществляться течение. Образец пористой среды также насыщается жидкостью. Эксперимент проводится по точечно, т.е. давление в газовом баллоне поднимают до некоторого значения, открывают кран и записывают сигналы фильтрационных шумов. Одновременно осуществляют сбор жидкости для замера расхода. Спустя некоторое время давление в газовом баллоне поднимают до другого значения и эксперимент повторяется.

## 2. ОБРАЗЦЫ ПОРИСТЫХ СРЕД

Изначально планировалось проводить исследования на двух типах кернов – естественных и искусственных. Однако получить набор реальных кернов с различными характеристиками не представлялось возможным. На кафедре радиоэлектроники КФУ был использован только один образец, полученный из керна реального Ромашкинского месторождения. Все остальные образцы пористых сред были получены искусственно из сыпучего материала. Естественно предположить, что скелет естественного керна отличается от скелета искусственного. Однако можно допустить, что расхождение спектров, полученных на искусственных образцах, будет небольшим по сравнению с набором спектров, полученных на естественных образцах.

### *2.1. Изготовление образцов пористых сред*

Способ изготовления образца пористой среды из естественного керна заключался в обработке реального керна на токарном станке до получения цилиндрической формы. Также на токарном станке изготавливалась металлическая форма в виде отрезка трубы, на краях которой была нарезана резьба для подсоединения к установке. Внутренний диаметр формы был чуть больше наружного диаметра цилиндрического образца керна. Этот керн помещался внутрь металлической формы, а пространство между ними герметизировалось с помощью эпоксидного клея. Способ изготовления образцов искусственных пористых сред заключался в приготовлении влажной песчано-цементной смеси, помещении ее в металлический корпус и прессовании смеси для придания цилиндрической формы. Основой для изготовления металлического корпуса были шестигранник и труба. Схема размещения контактного микрофона на металлическом корпусе представлена на рис. 2.1.

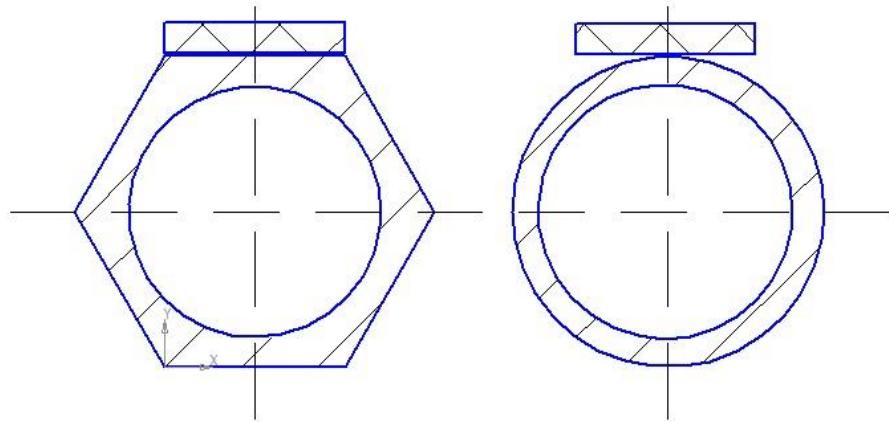


Рис. 2.1. Размещение контактного микрофона на поверхности металлического корпуса образца пористой среды.

Для изготовления металлического корпуса, был использован шестигранный пруток со стороной грани 36 мм. Далее на токарном станке высверливали отверстие диаметром 25-30 мм и нарезали снаружи резьбу (рис. 2.2). Корпуса изготавливали также из металлической трубы внутренним диаметром 25,4 мм, и наружным 34 мм.

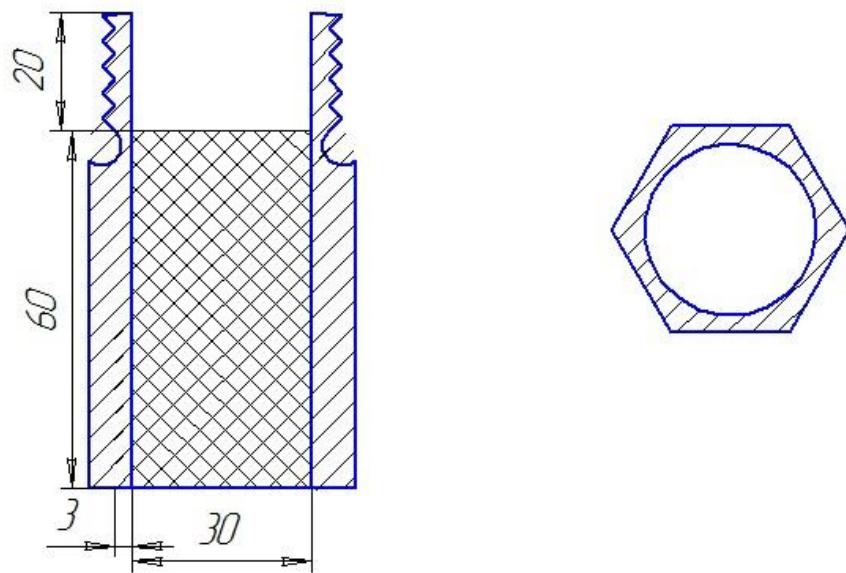


Рис. 2.2. Схема металлического корпуса.

Исходным материалом для изготовления кернов служит смесь влажного песка и цемента. Для того, чтобы образцы имели различные физические характеристики, необходимо изменять у них факторы изготовления. Под факторами подразумевается размер фракций песка, соотношение песок-цемент и давление сжатия образца на прессе.

В качестве исходного материала использовался кварцевый речной песчаник, имеющий широкое распределение по размеру частиц (рис. 2.3).

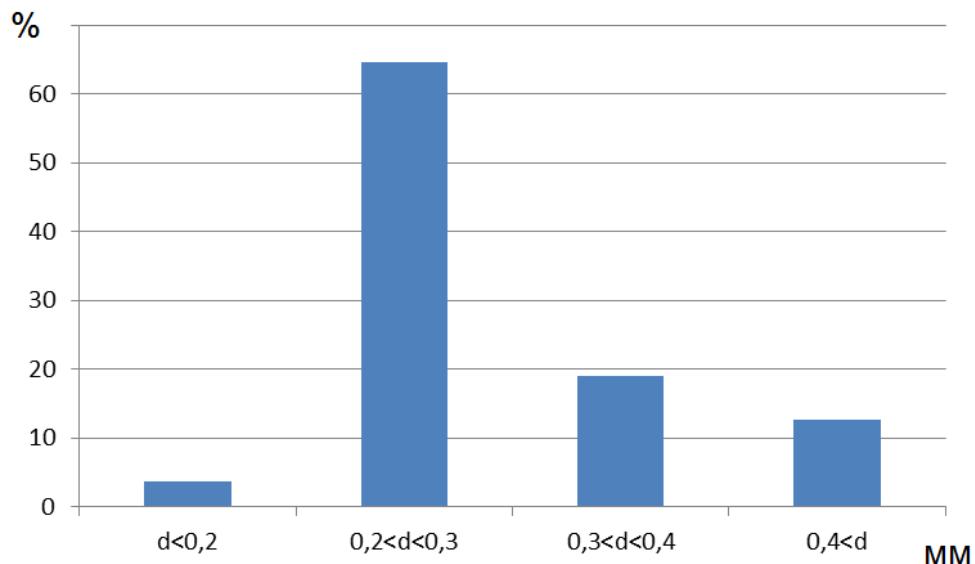


Рис. 2.3. Распределение частиц песчаника по размеру.

Песок просеивается на четыре фракции 0.2-0.3 мм, 0.3-0.4 мм, 0.5-1 мм и более 1 мм. Размер зерен песка сильно влияет на структуру скелета искусственного керна, следовательно, и на спектр фильтрационных шумов.

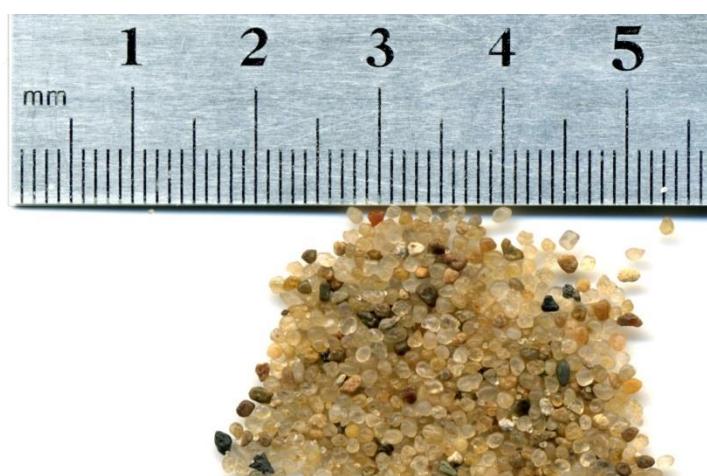


Рис. 2.4. Макросъемка зерен песчаника (фракции диаметром более 1 мм).

Приготовление материала начинается с выбора песка одной из фракции и смачивания его. Далее влажный песок смешивается с цементом в определенных пропорциях. Для соблюдения пропорций использовали высокоточные весы (погрешность 0.001 гр). На весах взвешивали цемент и влажный песок, а затем тщательно их перемешивали. Далее эта смесь помещалась в металлический корпус, внутренняя поверхность которого покрывалась тонким слоем герметика для исключения перетока между образцом и поверхностью корпуса. После этого помещаем образец под пресс. Значение величины давления на прессе задавалось различное, чтобы получить различные структуры скелета искусственного керна (рис. 2.5).

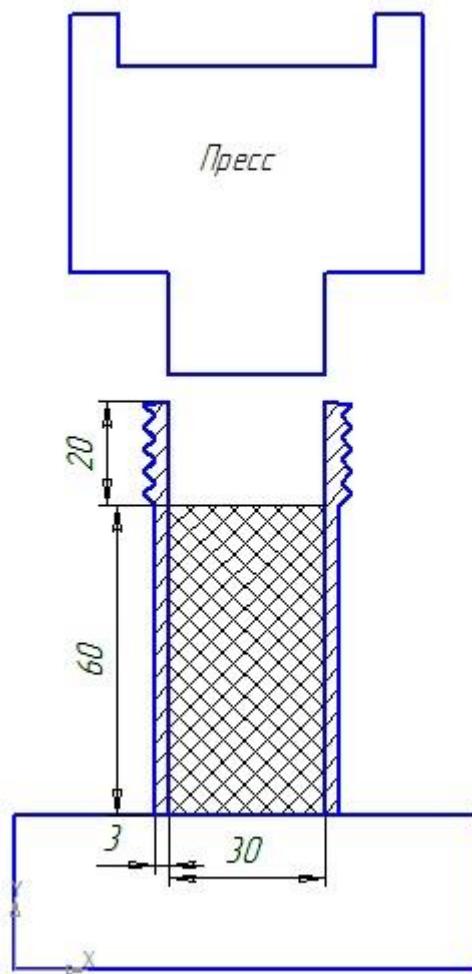


Рис. 2.5. Изготовление искусственного керна на прессе

После того, как прессования смеси, необходимо, чтобы зерна песчаника зацементировались. Для этого образец помещался в сухое теплое помещение на несколько дней. О готовности образца судили визуально по внешним признакам.

Фотографии некоторых образцов созданных пористых сред представлены на рис. 2.6. Вид образца пористой среды из реального керна представлен на рис.2.7.



Рис. 2.6. Внешний вид образцов искусственных пористых сред.



Рис. 2.7. Фотография образца пористой среды из реального керна.

## 2.2. Фильтрационные свойства пористых сред

В процессе подготовки было создано 12 образцов пористых сред. Результаты замера их характеристик и рассчитанных по вышеуказанной методике значения пористостей представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Характеристики образцов пористых сред.

№ образца	Соотн. цемент-песок	Размер фракции	Давление на прессе, тонн	Длина и диаметр образца, мм	$m_{полн.}$ , %	$m_{окт.}$ , %
1	1 : 20	0.3-0.4	5	52.3 25.4	26.4	12.8
2	1 : 6	0.5-1.2	2	45.7 25.5	32.4	14.9
3	1 : 10	0.3-0.4	4	43.6 25.5	24.7	13.4
4	1 : 6	0.5-1.2	4	47 25.1	18.4	4.3
5	1 : 6	0.5-1.2	6	48.7 25.7	15.5	4.2
6	1 : 50 (алебастр)	0.3-0.4	4	58.9 24.1	32.8	26.0
7	1 : 20	0.2-0.3	2	30.1 28.5	16.55	4.3
8	1 : 20	0.2-0.3	6	32.9 28.0	22.43	3.8
9	1 : 20	0.2-0.3	4	48.3 28.0	29.8	3.1
10	1 : 20	0.3-0.4	4	32.9 27.7	28.1	20.3
11	1 : 20	0.3-0.4	6	30.1 27.2	23.5	14.5
12	1 : 20	0.3-0.4	2	48.3 27.6	30	6.6

Погрешность определения пористости не превышает 2%. Расчеты показывают, что при одинаковом составе смеси при изготовлении образцов их пористость зависит от усилия прессования: чем больше давление – тем меньше значение пористости.

Для расчета проницаемости пористых образцов использовались результаты замера расхода жидкости при известных значениях перепада

давления по формуле (1.5). В случае фильтрации газа значение плотности воздуха бралось при среднем давлении в образце.

В таблице 2.2 представлены рассчитанные значения проницаемости пористых образцов в Дарси ( $1 \text{ Дарси} = 0.9869 \cdot 10^{-12} \text{ мм}^2$ ). Взаимосвязь пористости с проницаемостью изготовленных образцов имеет сильный разброс (рис. 2.8), но нем не менее закономерность увеличения проницаемости с увеличением пористости прослеживается.

Таблица 2.2.

Фильтрационные свойства пористых образцов.

№ образца	$m_{\text{полн}}, \%$	$m_{\text{окт}}, \%$	$k_{\text{возд.}}, \text{мД}$	$k_{\text{вода}}, \text{мД}$
1	26.4	12.8	270.3	147.2
2	32.4	14.9	315.3	
3	24.7	13.4	460.5	42.1
4	18.4	4.3	48.7	15.9
5	15.5	4.2	28.7	
6	32.8	26.0	669.6	
8	22.4	3.8	231.1	
9	29.8	3.1	1074.6	
10	28.1	20.3	232.3	
11	23.5	14.5	29.8	
12	30	6.6	1.13	

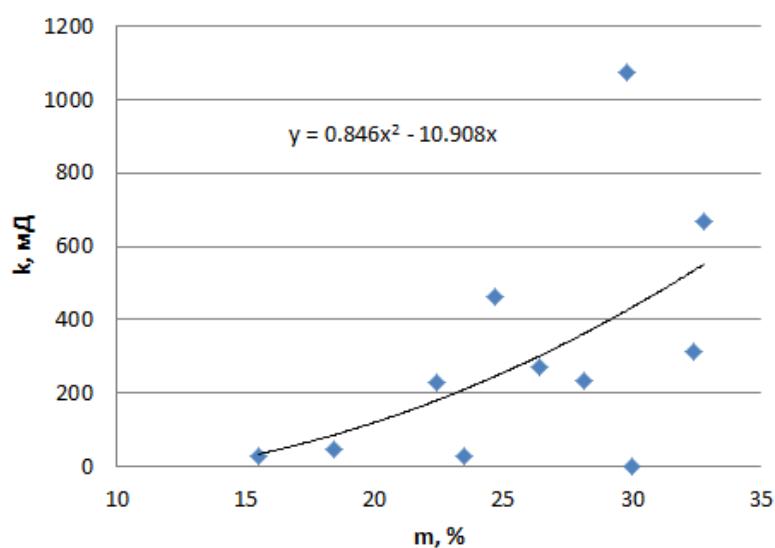


Рис. 2.8. Зависимость проницаемости от пористости искусственных образцов.

### 3. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ШУМОВ

В соответствии с разработанными выше методиками проведен комплекс экспериментальных исследований фильтрационных шумов в доступном диапазоне перепадов давления на воздухе и на воде для каждого образца пористой среды. Ниже представлены полученные спектры фильтрационных шумов.

*Образец №1.* Соотношение цемент-песок 1:20, размер фракции 0.3-0.4 мм, давление на прессе 4 тонны. Проницаемость по воде – 147.2 мД, по воздуху – 270,3 мД, значение пористости – 26,4%. Спектры фильтрационных шумов по воздуху и воде представлены на рис. 3.1 и 3.2 соответственно. На рис. 3.2 кривые соответствуют трем значениям давления перед образцом.

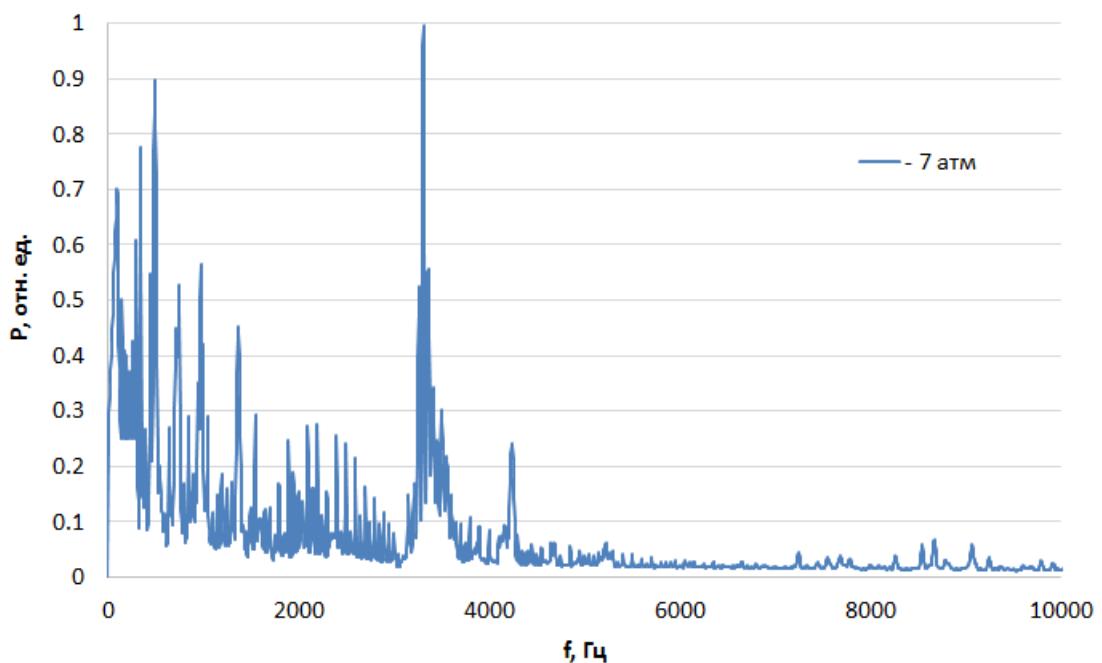


Рис. 3.1. Спектр фильтрационных шумов по воздуху (образец №1).

Основной пик в спектре фильтрационных шумов по воздуху сигнала находится на частоте ~3500 Гц, этот же пик виден в спектре по воде, но не так сильно выражен. На воде при давлении 5 атм появляется пик на частоте ~10500 Гц.

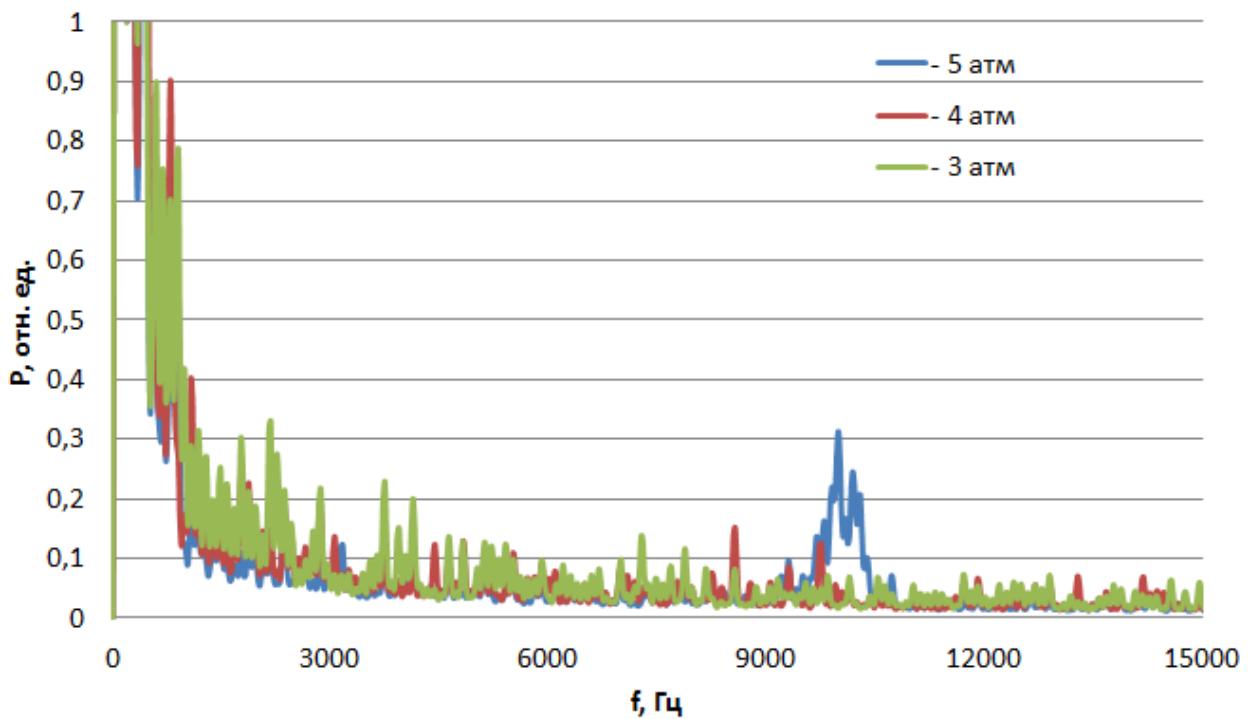


Рис. 3.2. Спектр фильтрационных шумов по воде (образец №1).

*Образец №2.* Соотношение цемент-песок 1:6, размер фракции 0.5-1.2 мм, давление на прессе 2 тонны. Проницаемость по воздуху – 315.3 мД, значение пористости – 32.4%. Спектры фильтрационных шумов по воздуху представлены на рис. 3.3. Основной пик приходится на частоту ~4500 Гц.

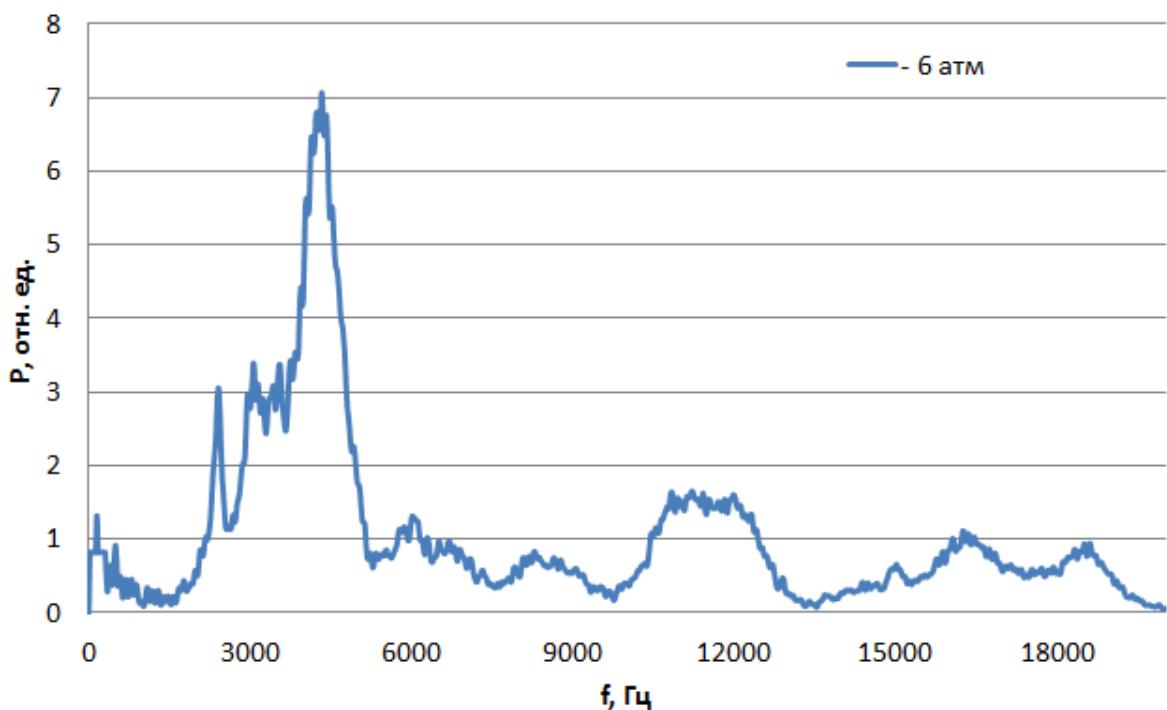


Рис. 3.3. Спектр фильтрационных шумов по воздуху (образец №2).

**Образец №3.** Соотношение цемент-песок 1:10, размер фракции 0.3-0.4 мм, давление на прессе 4 тонны. Проницаемость по воде – 42.1 мД, по воздуху – 460.5 мД, значение пористости – 24.7%. Спектры фильтрационных шумов по воздуху и воде представлены на рис. 3.4 и 3.5 соответственно. Кривые соответствуют различным значениям давления перед образцом.

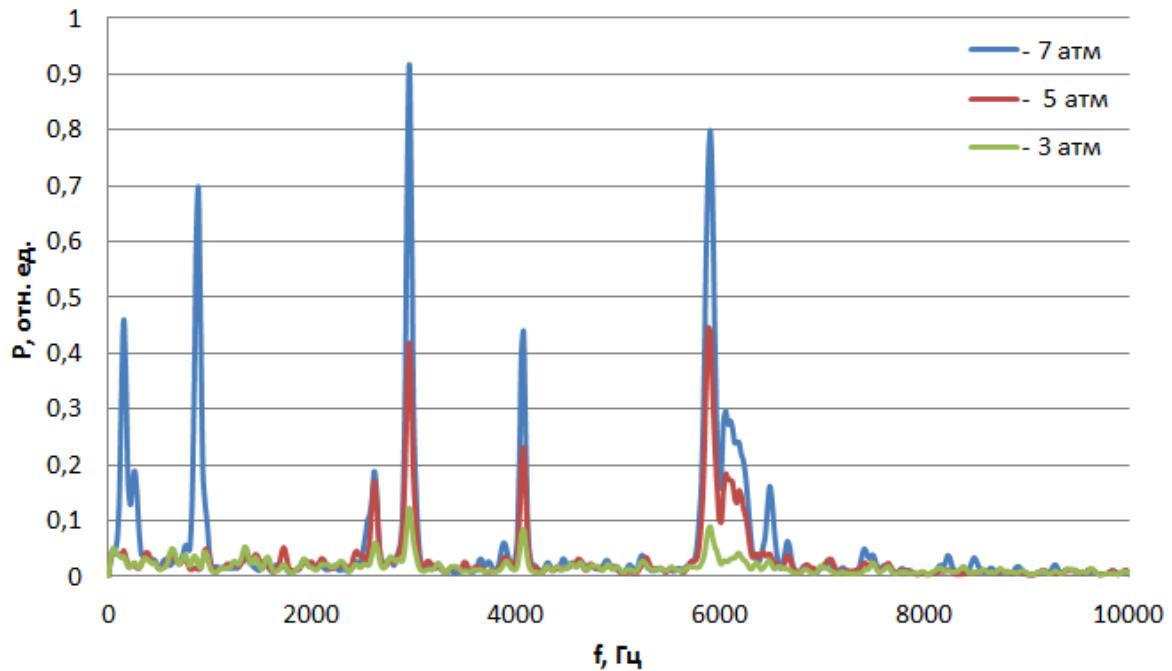


Рис. 3.4. Спектр фильтрационных шумов по воздуху (образец №3).

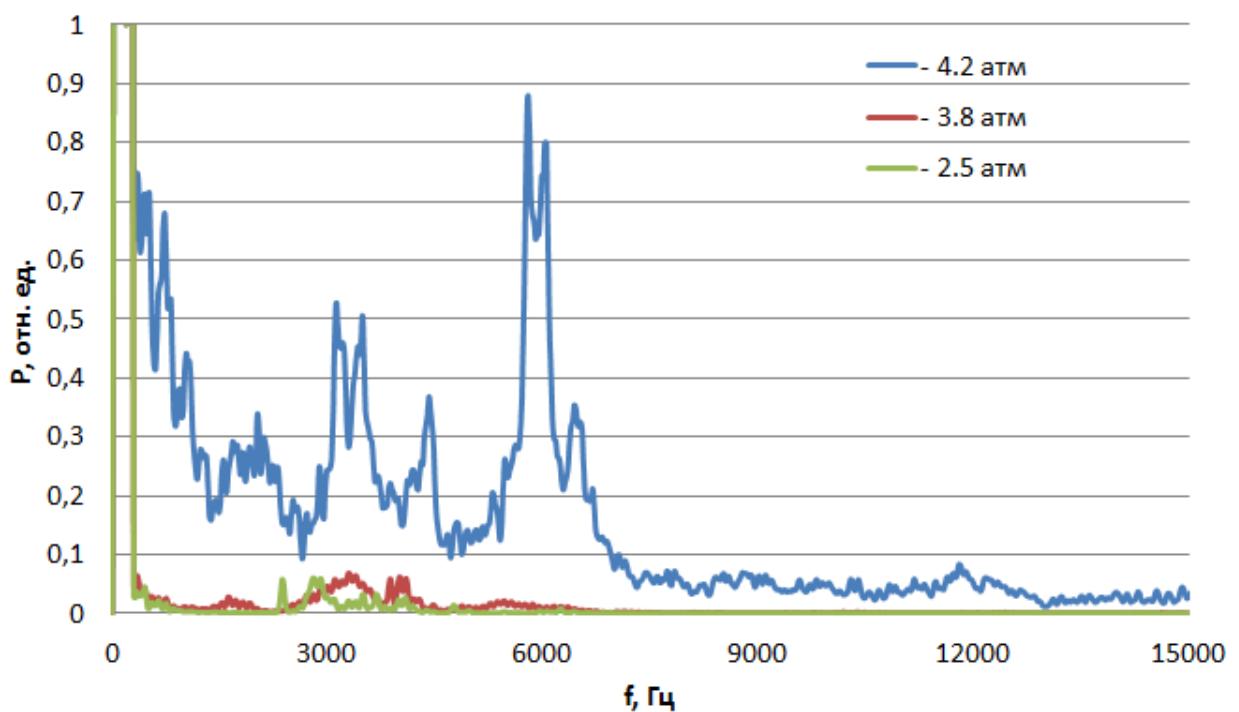


Рис. 3.5. Спектр фильтрационных шумов по воде (образец №3).

В спектр фильтрационных шумов присутствуют несколько пиков на частотах  $\sim 3000$  Гц,  $4000$  Гц и  $6000$  Гц. Примечательно, что эти пики наблюдаются при фильтрации и воды и воздуха. Амплитуда пиков зависит от скорости фильтрации (давления перед образцом).

**Образец №4.** Соотношение цемент-песок 1:6, размер фракции 0.5-1.2 мм, давление на прессе 4 тонны. Проницаемость по воде – 15.9 мД, по воздуху – 48.7 мД, значение пористости – 18.4%. Спектры фильтрационных шумов по воздуху и воде представлены на рис. 3.6 и 3.7 соответственно.

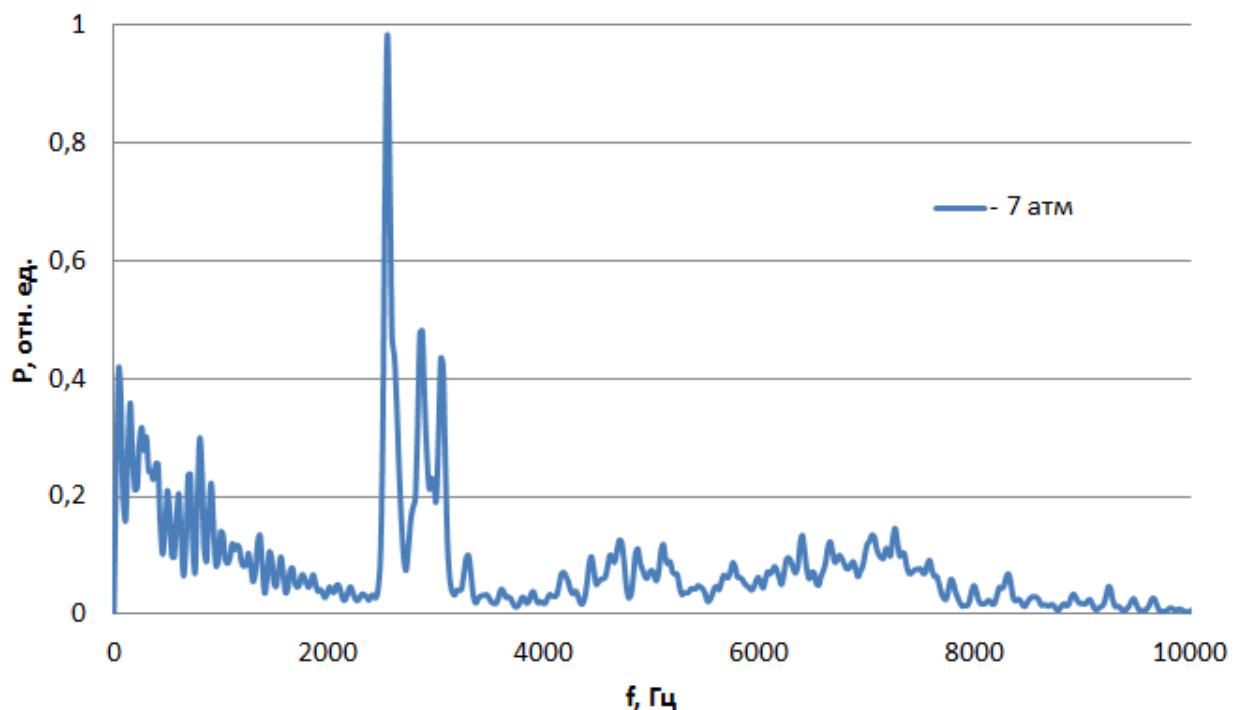


Рис. 3.6. Спектр фильтрационных шумов по воздуху (образец №4).

Полученный образец пористой среды получился низкопроницаемым, поэтому при расположенных перепадах давления скорость фильтрации была очень низкая, что сказалось на выделении сигнала фильтрационных шумов. Тем не менее, при фильтрации воздуха наблюдается пик на частоте  $\sim 2500$  Гц. При фильтрации воды этот пик отсутствует, однако на более низких частотах присутствуют два пика на частотах  $\sim 500$  Гц и 750 Гц, которые также наблюдаются при фильтрации воздуха, хоть и не столь явно.

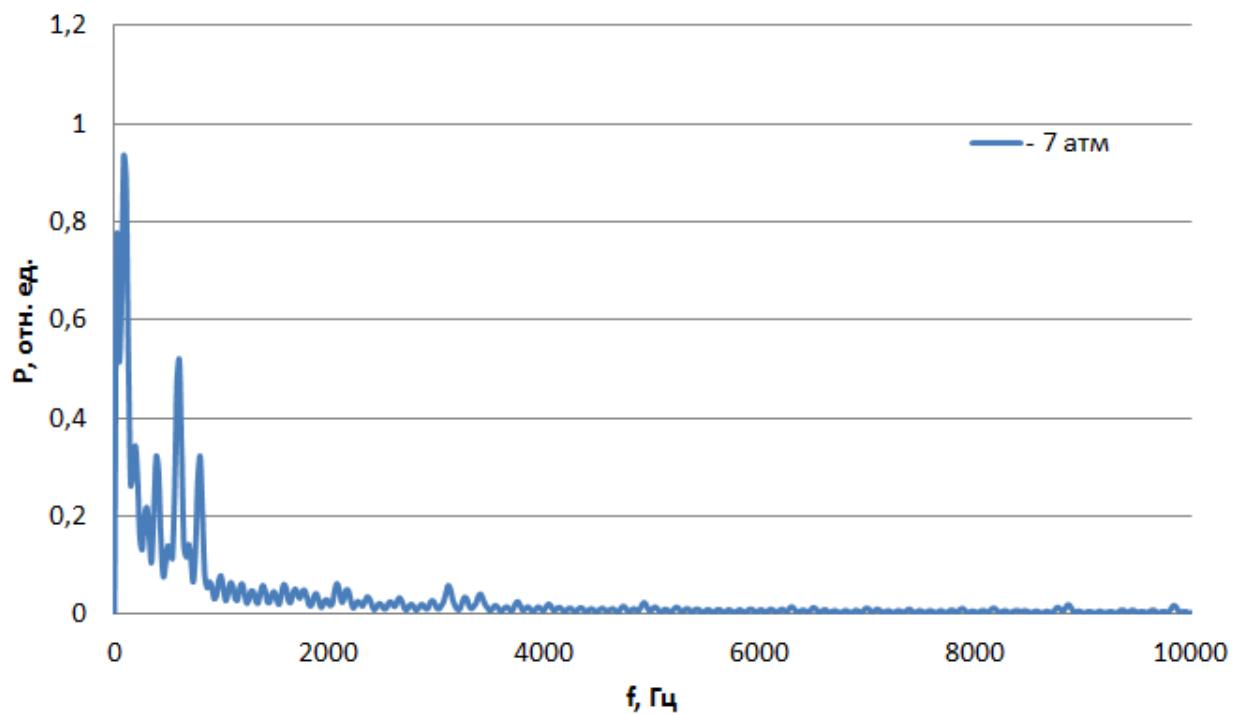


Рис. 3.7. Спектр фильтрационных шумов по воде (образец №4).

*Образец №5.* Соотношение цемент-песок 1:6, размер фракции 0.5-1.2 мм, давление на прессе 6 тонн. Проницаемость по воздуху – 28,7 мД, значение пористости – 15.5%. Спектр фильтрационных шумов по воздуху представлен на рис. 3.8. В силу крайне низкой проницаемости зафиксировать фильтрационные шумы по воде не удалось.

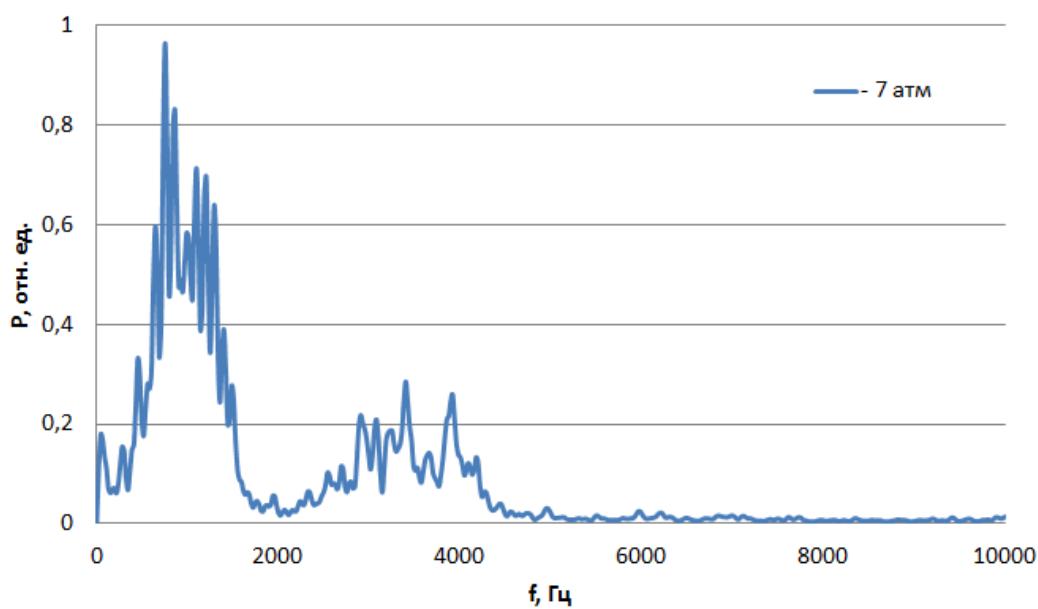


Рис. 3.8. Спектр фильтрационных шумов по воздуху (образец №5).

В спектре наблюдаются пики на низких частотах  $\sim 700$ - $1200$  Гц, что имеет некоторое сходство с образцом №4. Это возможно объясняется тем обстоятельством, что незначительное количество пор по которым идет фильтрация имеют крупные размеры.

**Образец №6.** Соотношение цемент-песок 1:50, в качестве цементирующего вещества использован алебастр, размер фракции 0.3-0.4 мм, давление на прессе 4 тонны. Проницаемость по воздуху – 669.6 мД, значение пористости – 32.8%. Спектр фильтрационных шумов по воздуху представлен на рис. 3.9.

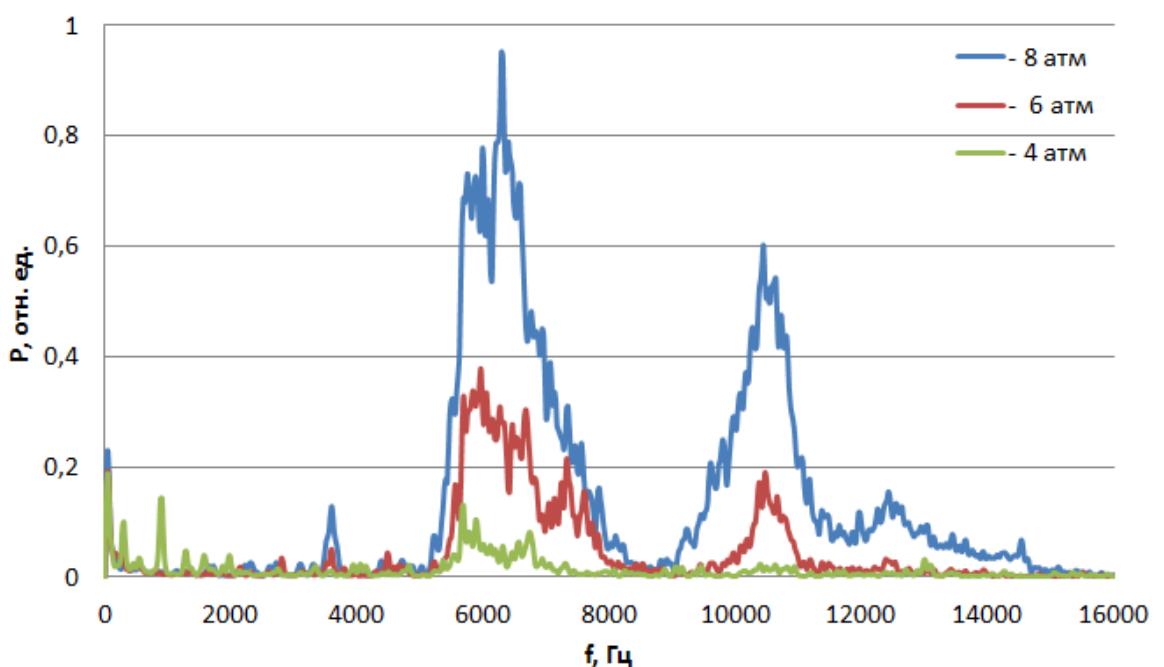


Рис. 3.9. Спектр фильтрационных шумов по воздуху (образец №6).

Пористый образец получился высокопористым и высокопроницаемым. Это позволило достичь высоких скоростей фильтрации. Спектр фильтрационных шумов имеет два пика на частотах  $\sim 6500$  Гц и  $11000$  Гц шириной порядка 1000 Гц. Наблюдается явно выраженная зависимость амплитуды колебаний от скорости фильтрации, смещение пиков не происходит.

**Образец №8.** Соотношение цемент-песок 1:20, размер фракции 0.2-0.3 мм, давление на прессе 6 тонн. Проницаемость по воздуху – 231.1 мД, значение пористости – 22.4%. Спектры фильтрационных шумов по воздуху представлены на рис. 3.10. Спектр имеет выраженный узкий пик на частоте ~3500 Гц, амплитуда которого зависит от скорости фильтрации.

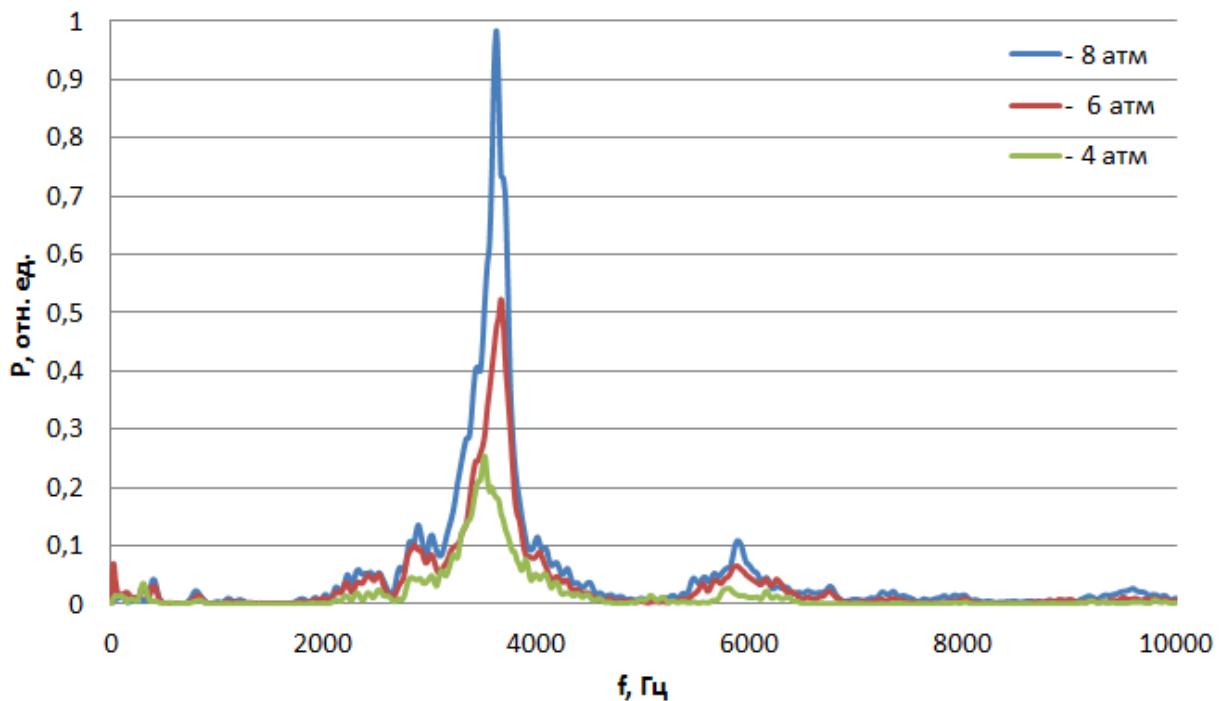


Рис. 3.10. Спектр фильтрационных шумов по воздуху (образец №8).

**Образец №9.** Соотношение цемент-песок 1:20, размер фракции 0.2-0.3 мм, давление на прессе 4 тонны. Проницаемость по воздуху – 1074.6 мД, значение пористости – 29.8%. Спектры фильтрационных шумов по воздуху представлены на рис. 3.11. Спектр имеет несколько пиков на частотах ~3000 Гц, 3800 Гц и 5500 Гц. Их амплитуда также зависит от скорости фильтрации. Сравнивая эти данные с образцом №8, изготовленные из одинаковых материалов, но с разным усилием прессования, можно сделать вывод о том, что получаемые образцы имеют не только разную проницаемость, но и разные спектры фильтрационных шумов. Очевидно, что при слабом сдавливании остаются пустоты поры большего размера. Следовательно, процесс генерации фильтрационных шумов обусловлен размерами этих пустот.

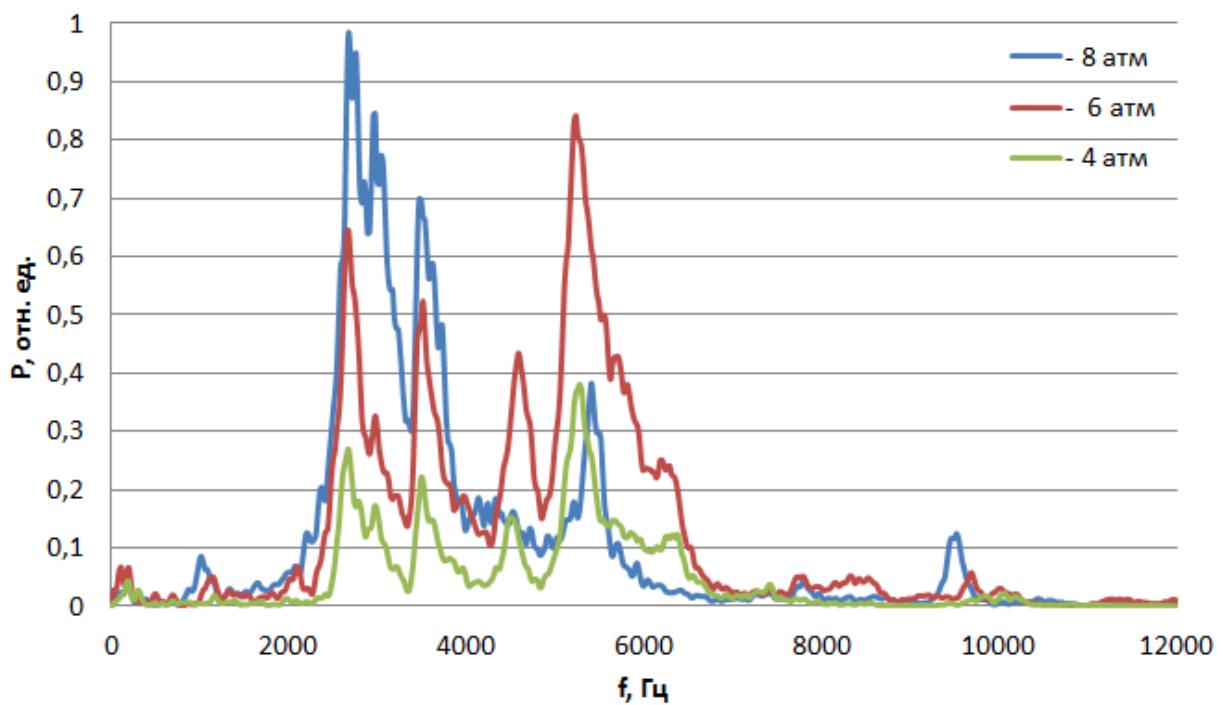


Рис. 3.11. Спектр фильтрационных шумов по воздуху (образец №9).

*Образец №10.* Соотношение цемент-песок 1:20, размер фракции 0.3-0.4 мм, давление на прессе 4 тонны. Проницаемость по воздуху – 232.3 мД, значение пористости – 28.1%. Спектры фильтрационных шумов по воздуху представлены на рис. 3.12.

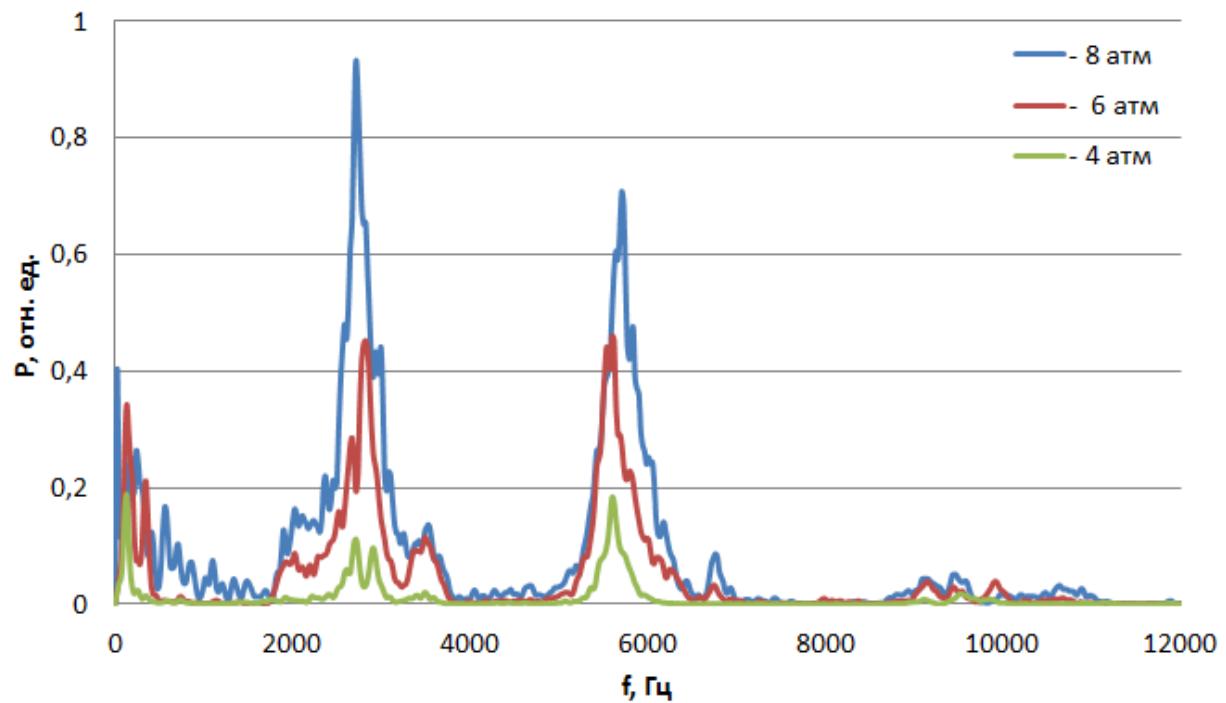


Рис.3.12. Спектр фильтрационных шумов по воздуху (образец №10).

Спектр имеет два выраженных пика на частотах  $\sim 3000$  Гц и  $5800$  Гц. Их амплитуда также как и для предыдущих образцов зависит от скорости фильтрации.

*Образец №11.* Соотношение цемент-песок 1:20, размер фракции 0.3-0.4 мм, давление на прессе 6 тонн. Проницаемость по воздуху –  $29.8$  мД, значение пористости –  $23.5\%$ . Полученные спектры фильтрационных шумов по воздуху представлены на рис. 3.13. В спектре шумов слабо выделяется пик на частоте  $\sim 450$  Гц, на более высоких частотах амплитуда пиков существенно ниже. Это объясняется низкими скоростями фильтрации, которые не позволяют возбудить сильные шумы.

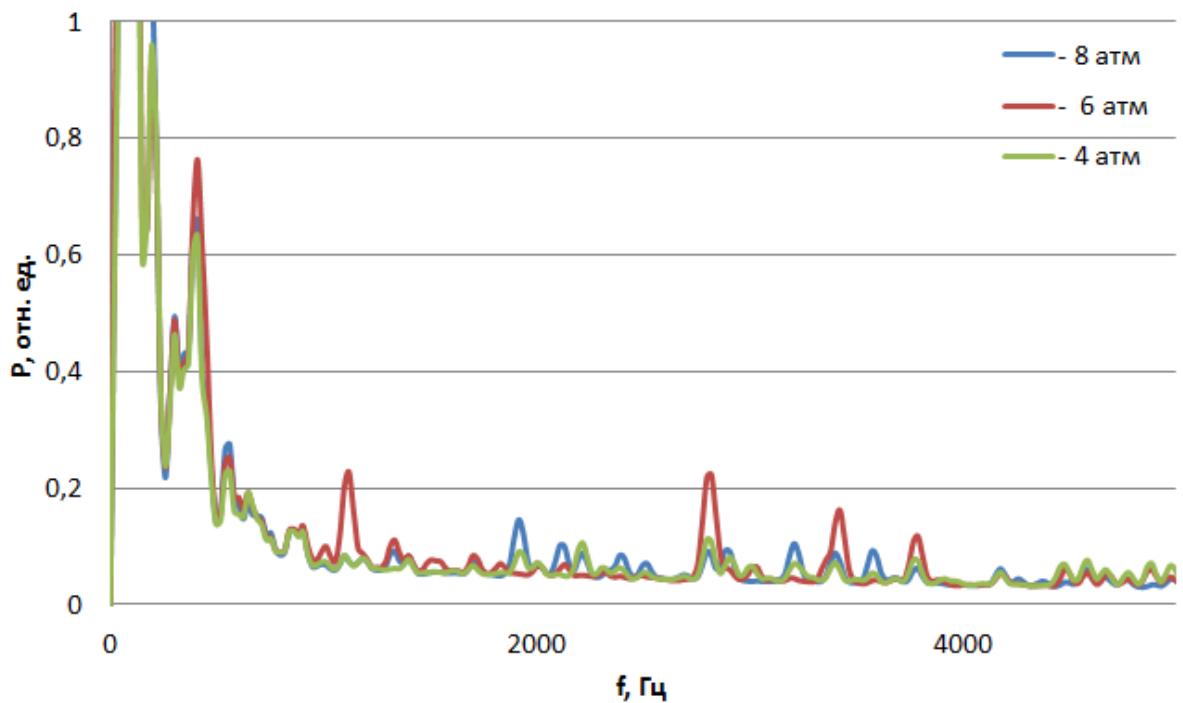


Рис. 3.13. Спектр фильтрационных шумов по воздуху (образец №11).

*Образец №12.* Соотношение цемент-песок 1:20, размер фракции 0.3-0.4 мм, давление на прессе 2 тонн. Проницаемость по воздуху –  $1.13$  мД, значение пористости –  $30\%$ . При изготовлении образца было добавлено несколько большее количество воды по сравнению с образцом №10 и №11.

Это привело к тому, содержащийся в смеси цемент лучше «схватился» и создал слабопроницаемую среду. Полученные спектры фильтрационных шумов по воздуху и по воде представлены на рис. 3.14 и рис. 3.15. У данного образца наблюдается несколько пиков, основной приходится на частоте  $\sim 5500$  Гц, который на больших скоростях фильтрации несколько смещается в сторону увеличения.

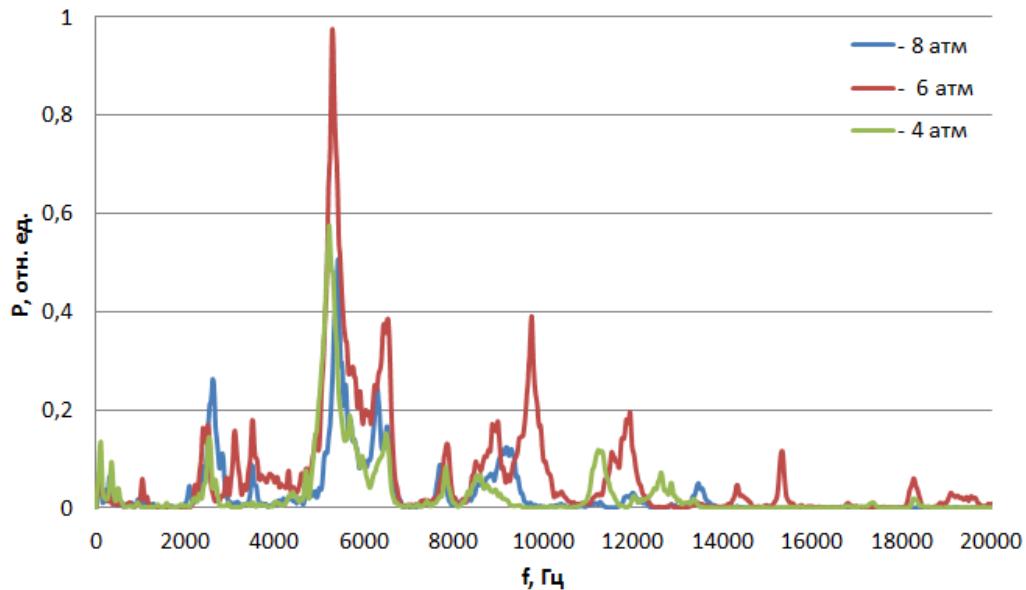


Рис. 3.14. Спектр фильтрационных шумов по воздуху (образец №12).

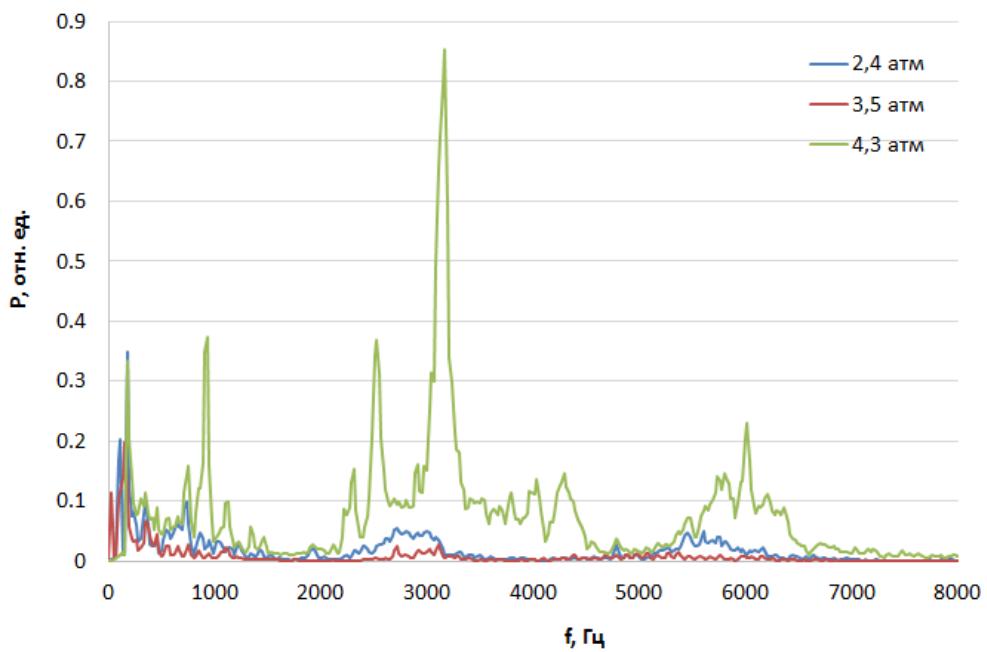


Рис. 3.15. Спектр фильтрационных шумов по воде (образец №12).

**Образец №13.** Образец выполнен из реального керна. Проницаемость по воздуху составила 321 мД. Значение пористости не определялось. В результате эксперимента и обработки данных был построен трехмерный график зависимости спектра фильтрационных шумов реального керна от перепада давления на образце (рис. 3.16). В спектре наблюдаются два выраженные пика на частотах  $\sim 3000$  Гц и 8000 Гц. При уменьшении градиента давления ниже 5.0 МПа/м амплитуда этих составляющих не выделяется среди других частот.

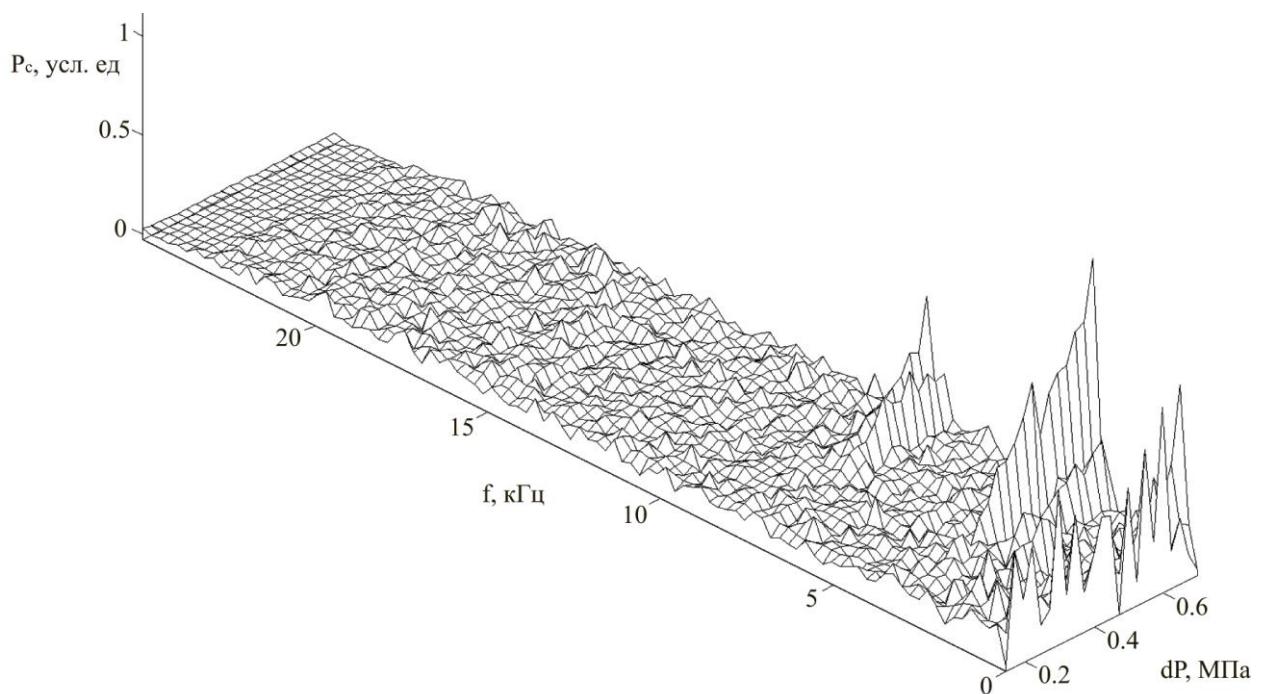


Рис. 3.16. Спектр фильтрационных шумов по воздуху (образец №13).

## 4. АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты проведенных экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что спектр фильтрационных шумов имеет один или несколько пиков. Это обусловлено фильтрационными свойствами пористых сред и структурой скелета породы, определяемой условиями ее создания. Режим течения оказывает влияние только на амплитуду пиков спектра фильтрационных шумов, частота этих пиков при изменении скорости фильтрации практически не меняется. Этот вывод согласуется результатами ранее опубликованных данных, например в работах [6-9].

В качестве примера проанализирована зависимость амплитуды одного из пиков фильтрационных шумов реального керна от перепада давления на образце. Эта зависимость имеет практически квадратичный вид (рис.4.1), что подтверждает положения разработанной ранее аналитической модели.

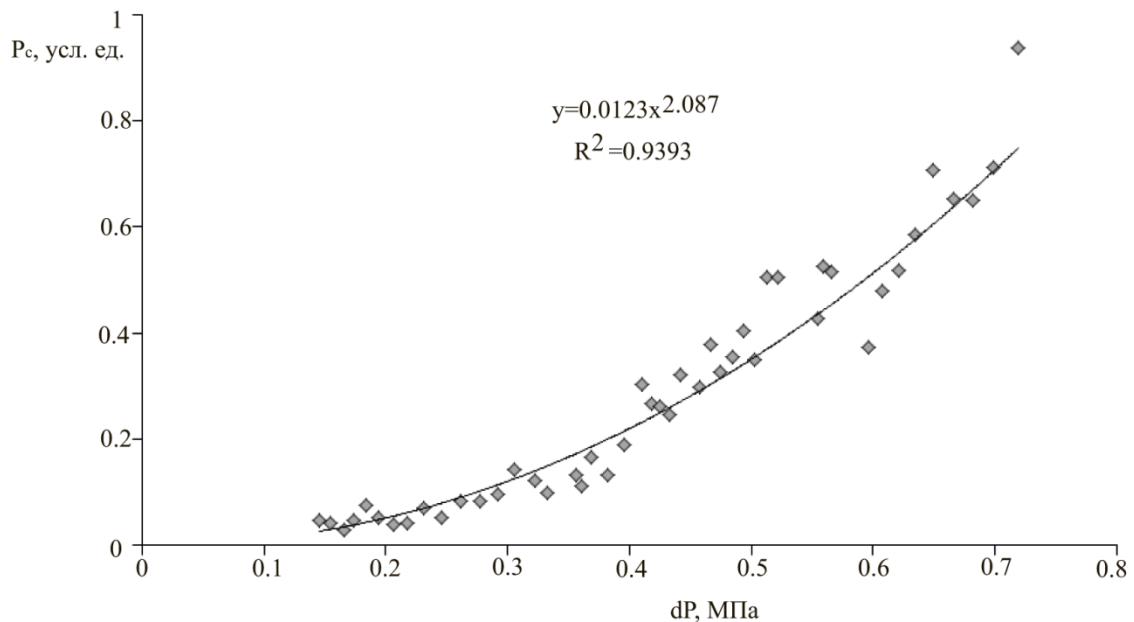


Рис. 4.1. Зависимость амплитуды пика 3000 Гц фильтрационных шумов от перепада давления на образце.

В таблице 4.1 представлены обобщенные данные по фильтрационным свойствам пористых сред и частотам основных пиков фильтрационных шумов. Значительной корреляции между значениями проницаемости и

основными частотами не выявлено. Однако, некоторая взаимосвязь между пористостью и частотами пиков все же прослеживается (рис. 4.2).

Таблица 4.1

Сводные данные по характеристикам образцов пористых сред

№ образца	$m_{\text{полн.}}, \%$	$m_{\text{окт.}}, \%$	$k_{\text{возд.}}, \text{мД}$	Основной пик, Гц	Дополнительные пики, Гц
1	26.4	12.8	270.3	3500	10500
2	32.4	14.9	315.3	4500	-
3	24.7	13.4	460.5	3000	4000, 6000
4	18.4	4.3	48.7	2500	500, 700
5	15.5	4.2	28.7	700	1200
6	32.8	26.0	669.6	6500	11000
8	22.4	3.8	231.1	3500	6000
9	29.8	3.1	1074.6	3000	3800, 5500
10	28.1	20.3	232.3	3000	5800
11	23.5	14.5	29.8	450	-
12	30	6.6	1.13	5500	-
13	27.1	11.8	321	3000	8000

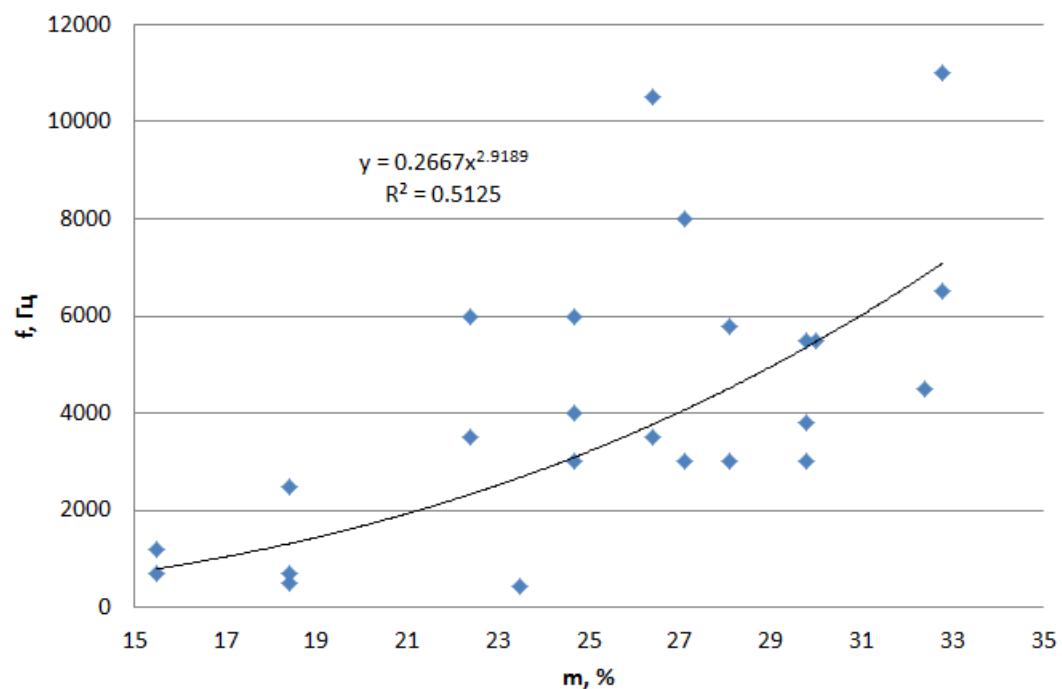


Рис. 4.2. Зависимость частот фильтрационных шумов от пористости образцов.

## **5. РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

В 2014 году исполнители гранта доложили результаты исследований по проекту на следующих научных мероприятиях:

- IX Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». Казань, 10-12 сентября 2014;
- 1-ой Всероссийской акустической конференции. Москва, 6-9 октября 2014.

Опубликована одна статья в журнале из списка ВАК:

1. Марфин Е.А., Абдрашитов А.А., Беляев Е.В. Экспериментальная установка для исследования механизма воздействия упругих волн на процесс фильтрации // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2014, №2, с.17-25.

Принята статья к печати в электронный журнал, индексируемый в системе РИНЦ:

2. Марфин Е.А., Метелёв И.С., Гарифьянов Б.А., Абдрашитов А.А. Исследование спектров фильтрационных шумов // Ученые записки физического факультета МГУ.

Опубликованы труды докладов на конференциях:

3. Сафиуллин Д.А., Кравцов Я.И., Марфин Е.А. Волновое поле в перфорированной трубе // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: Материалы докладов IX школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. Казань, 10-12 сентября 2014 г. – Казань: Академэнерго, 2014. – С.266-269.

4. Гарифьянов Б.А., Метелёв И.С., Сафиуллин Д.Р., Марфин Е.А. Исследование акустической эмиссии при фильтрации флюидов в пористых средах// Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: Материалы докладов IX школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. Казань, 10-12 сентября 2014 г. – Казань: Академэнерго, 2014. – С.219-222.

5. Марфин Е.А., Метелёв И.С., Гарифьянов Б.А., Абдрашитов А.А. Исследование спектров фильтрационных шумов // 1-я Всероссийская акустическая конференция: Материалы докладов. Москва, 6-9 октября 2014. Секция – Воздействие на флюиды.
6. Сафиуллин Д.А., Марфин Е.А., Загидуллина А.Р. Распространение звука в перфорированной скважине // 1-я Всероссийская акустическая конференция: Материалы докладов. Москва, 6-9 октября 2014. Секция – Воздействие на флюиды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных экспериментальных исследований на 2 этапе можно сформулировать следующие выводы:

- явление шумообразования в процессе фильтрации газов и жидкостей через пористые среды представляет интересную в фундаментальном и практическом смысле задачу;
- модернизирована лабораторная установка по исследованию фильтрационных характеристик пористых сред для изучения спектров фильтрационных шумов;
- созданы образцы пористых сред с различными значениями пористости и проницаемости. Определены их фильтрационные характеристики;
- проведенными экспериментальными исследованиями по замеру и анализу характеристик фильтрационных шумов получены спектры шумов при фильтрации через пористые образцы воздуха и воды;
- установлено, что спектры фильтрационных шумов имеют выраженные пики, которые определяются свойствами пористых сред. Частоты их практически не меняются от смены типа флюида и режима течения, что свидетельствует о резонансном характере наблюдаемых явлений;
- полученные спектральные характеристики фильтрационных шумов могут стать основой для решения идентификационных задач метода скважинной спектральной шумометрии.

Полученные результаты и накопленный опыт проведенных исследований может быть использован в учебном процессе Казанского (Приволжского) федерального университета.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кузнецов О.Л. Ефимова С.А. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. М.: Недра. 1983. 286 с.
2. Дыбленко В.П.. Камалов Р.Н.. Шарифуллин Р.Я.. Туфанов И.А. Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр». 2000. 381 с.
3. Кузнецов О.Л.. Симкин Э.М.. Чилингар Дж. Физические основы вибрационного и акустического воздействия на нефтегазовые пласти. М.: Мир. 2001. 260 с.
4. Дыбленко В.П. Волновые методы воздействия на нефтяные пласти с трудноизвлекаемыми запасами. Обзор и классификация. М.: ОАО «ВНИИОЭНГ». 2008. 80 с.
5. Муслимов Р.Х.. Волков Ю.В. и др. Анализ эффективности термоволнового воздействия на Мордово-Кармальском месторождении // Бурение и нефть. № 1. 2003. 18-22.
6. Ипатов А.И.. Городнов А.В.. Ипатов С.И.. Марьенко Н.Н.. Петров Л.П.. Скопинцев С.П. Исследование амплитудно-частотных спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при фильтрации флюидов в породах // Геофизика. 2004. №2. С.25-30.
7. Афанасьев Е.Ф.. Грзелова К.Л.. Плющев Д.В. Об источниках генерации звука в насыщенных флюидом пористых средах // Докл. АН СССР. 1987. №3. С.554-557.
8. Николаев С.А., Овчинников М.Н. Генерация звука фильтрационным потоком в пористых средах // Акустический журнал. 1992. Т.38. №1. С.114-118.
9. Заславский Ю.М.. Заславский В.Ю. Исследование акустического излучения при фильтрации воздушного потока сквозь пористую среду // Акустический журнал. 2012. Т.58. №6. с.756-761.