АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 38 1992 Вып. 1

УДК 543.1
© 1992 г.

С.А. Николаев, М.Н. Овчинников

ГЕНЕРАЦИЯ ЗВУКА ФИЛЬТРАЦИОННЫМ ПОТОКОМ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Результаты проведенных экспериментальных исследований показывают, что спектры шумов фильтрационного потока отражают механические свойства горной породы, а местоположение частотного максимума акустического излучения практически не зависит от скорости фильтрации и свойств флюида.

Изучение явления аэрогидродинамического звукообразования, вызываемого фильтрационным потоком, проводилось нами исходя из задач контроля за работой коллекторов нефтяных и газовых месторождений. Основным рассматриваемым вопросом являлось выявление взаимосвязи типа коллектора, скорости фильтрации жидкости или газа с интенсивностью и спектром возникающего акустического излучения.

К настоящему времени большое число публикаций посвящено проблеме гидродинамического звукообразования [1–3]. Вопросы же звукообразования, возникающего в процессе фильтрации [4], изучены слабо. В работе [5] проведено теоретическое рассмотрение этого вопроса на основе подхода Лайтхилла [3], однако воспользоваться результатами этой работы для решения практических задач затруднительно ввиду сложности решения полученных уравнений. В этой ситуации большой интерес представляют результаты экспериментальных исследований шумов фильтрации, чему и посвящена данная работа.

Исследования явления гидродинамического звукообразования, возникающего при фильтрации, проводились как в лабораторных условиях, так и в условиях работающих скважин.

Полевые исследования (в работающих скважинах) выполнены аппаратурой скважинной спектральной шумометрии. Данная аппаратура включает скважинный акустический приемник цилиндрической формы диаметром 0,025 м и длиной 0,45 м, соединенный геофизическим кабелем со вторичным прибором спектрального анализа и регистрации. Акустическим датчиком скважинного прибора служит пьезокерамика ЦТС-19 сферической формы. Датчик помещается в жесткий непроницаемый контейнер, заполненный маслом. Этот датчик соединен через предварительный усилитель звуковой частоты и схему согласования с геофизическим кабелем, по которому информационный сигнал передается во вторичный прибор. Спектральный анализ сигнала осуществляется третьоктавным анализатором шума в полосе измерения от 20 Гц до 30 кГц. Чувствительность скважинного акустического приемника не хуже 0,1 Па.

Скважинные измерения проводились в нескольких участках скважины, последовательно перемещая измерительный прибор в ее стволе. Во время измерения прибор покоился. При этом прибор помещался как в зоне фильтрующего коллектора, так и в удалении от него, где влияние шумов фильтрационного потока отсутствует, а гидродинамическая ситуация в стволе скважины и в зоне работающего коллектора идентична. В результате анализа и сравнения различных гидродинамических ситуаций установлено, что в зоне работающего коллектора за счет фильтрационного потока в спектре шумов возникают дополнительные источники в диапазоне от 1 до 25 кГц в зависи-

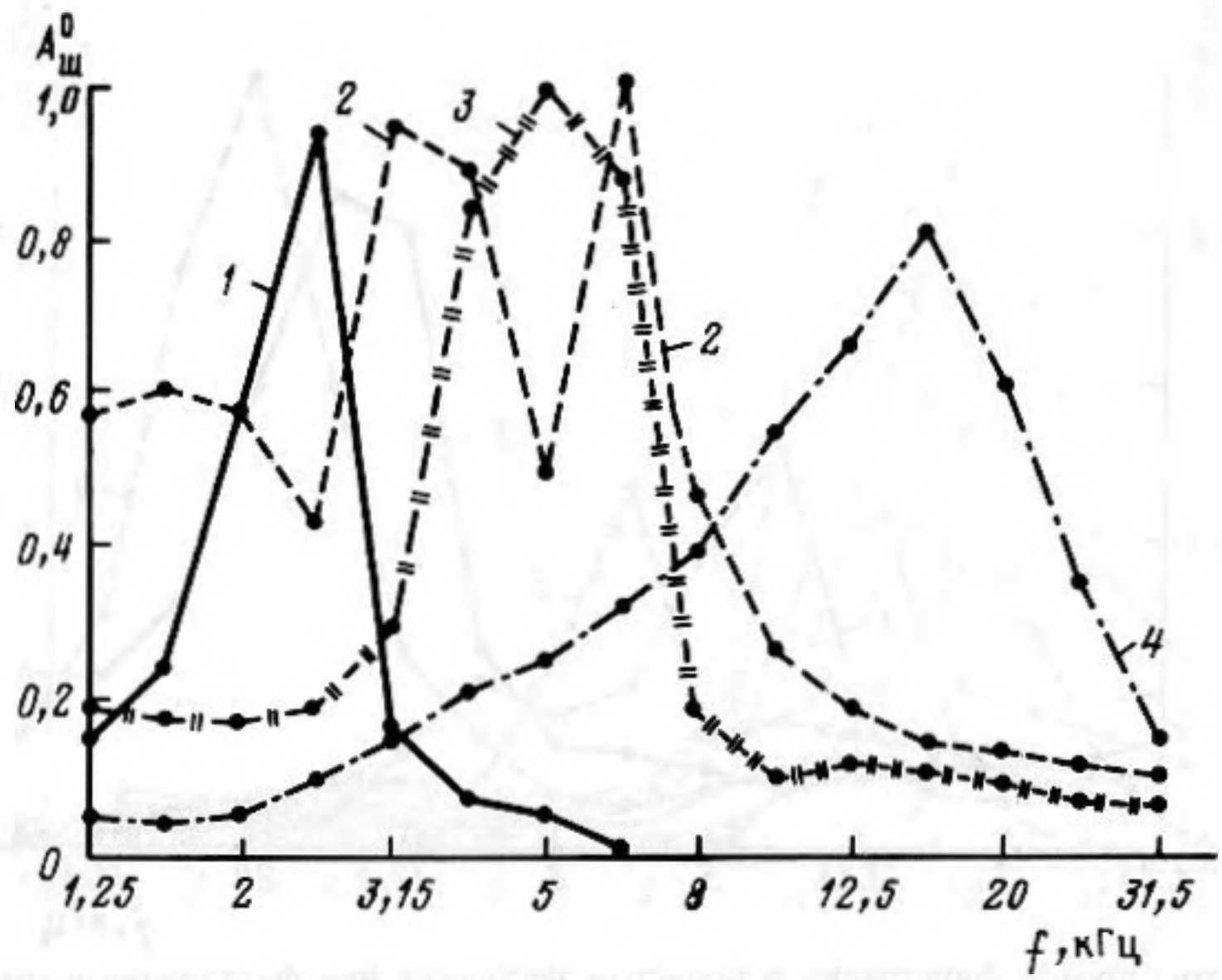

Рис. 1. Спектры шумов фильтрации в трещиноватом (*1*), трещиновато-пористом карбонатном коллекторе (*2*), пористом песчаном коллекторе (*3, 4*): $A^0_ш$ – относительная амплитуда шумов. $A^0_ш = A_l/A_{max}$, где A_l – текущее значение амплитуды шумов в полосе, A_{max} – максимальное значение амплитуды шумов в эксперименте

мости от структуры работающего коллектора. На основе этих закономерностей звукообразования разработан способ контроля гидродинамического потока в скважине [6].

На рис. 1 приведены спектры гидродинамических шумов, возникающие при фильтрации в различных типах коллекторов. Для шумов фильтрации в трещиноватых и трещиновато-пористых карбонатных коллекторах характерно звукообразование в диапазоне частот порядка 1–8 кГц. Причем, если фильтрация происходит по трещиноватым и пористым каналам одновременно, в спектре шумов имеются два максимума (кривая *2*, рис. 1), которые соответствуют обоим каналам течения. В пористых песчаных коллекторах шумы фильтрации расположены в области более высоких частот от 3 до 30 кГц и определяются зернистостью коллектора. Для крупнозернистых коллекторов шумы фильтрации имеют более низкий частотный спектр (кривая *3*, рис. 1), а мелкозернистые коллекторы имеют более высокочастотные шумы фильтрации (кривая *4*, рис. 1). При этом относительные значения фоновых шумов в спектре не превышают 0,2 в области нижних частот и 0,05 в области верхних частот относительно спектра излучения фильтрационного потока. При удалении скважинного прибора от зоны фильтрационного потока относительные значения фоновых шумов в спектре фильтрационных шумов не превышают 0,05.

Для изучения гидродинамического звукообразования фильтрационного потока в трещиновато-пористых средах создана лабораторная установка, в которой образец коллектора в виде цилиндра (диаметром $1 \div 2 \cdot 10^{-2}$ м и длиной $2 \div 4 \cdot 10^{-2}$ м) помещен в измерительную ячейку с жестким стальным корпусом. На поверхности корпуса ячейки расположены измерительный датчик цилиндрической формы из пьезокерамики ЦТС-19 и предварительный усилитель низкой частоты. Сигнал с предварительного усилителя подается на третьоктавный анализатор спектра шумов. Подвод и отвод жидкости от измерительной ячейки осуществляется по металлическим трубам длиной до одного метра с тем же диаметром, что и ячейка. Жидкость для создания фильтрационного потока подается от емкости по подсоединенному к измерительной ячейке дюритовому шлангу под действием заданного градиента давления. При выходе жидкости из измерительной ячейки создается небольшое противодавление. Измерительная ячей-

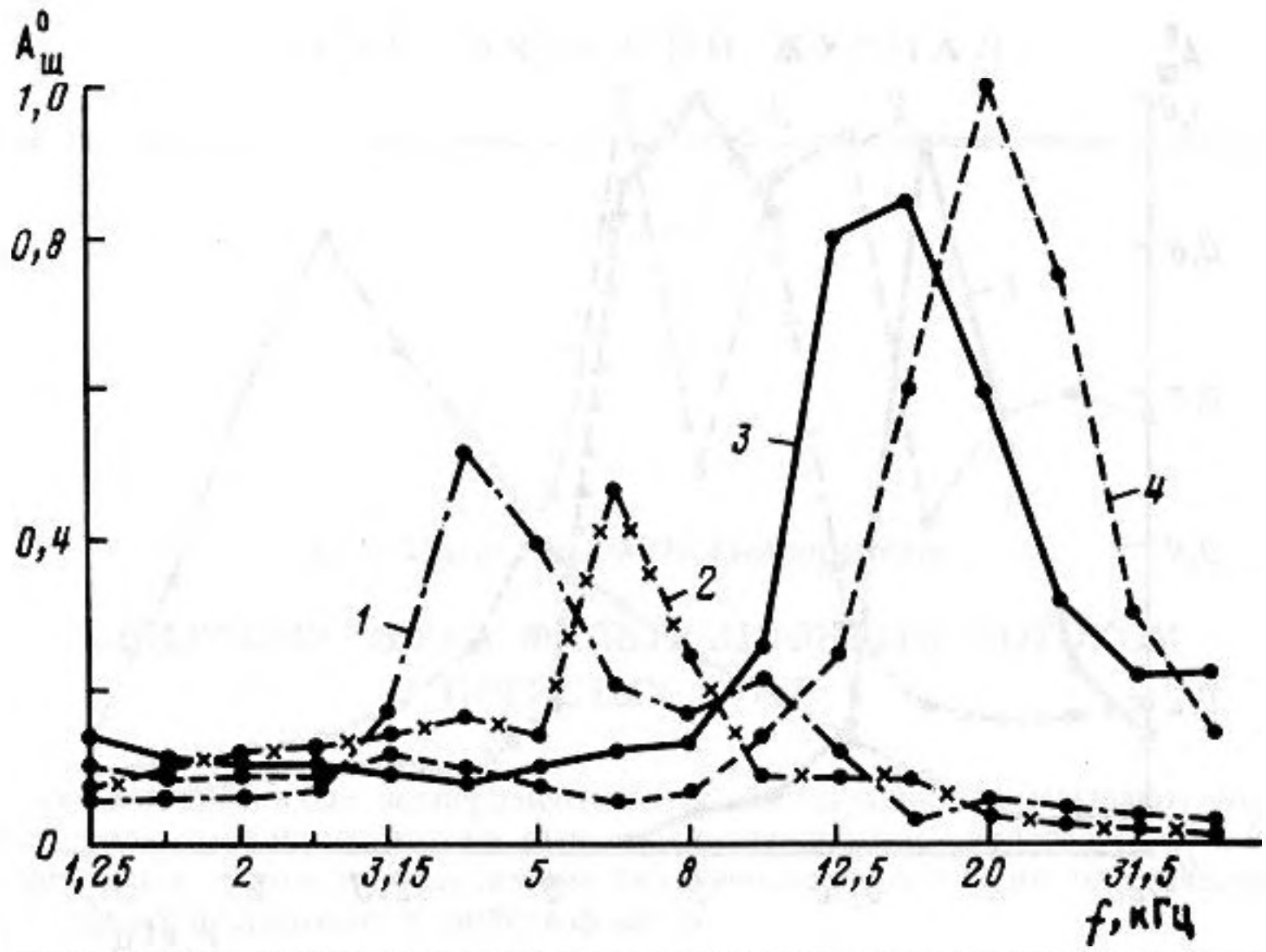

Рис. 2. Спектры шумов фильтрации в пористом песчанике при фильтрации в трещиноватых (*1*), трещиновато-пористых (*2*), пористых карбонатных породах (*3*), пористом песчанике (*4*)

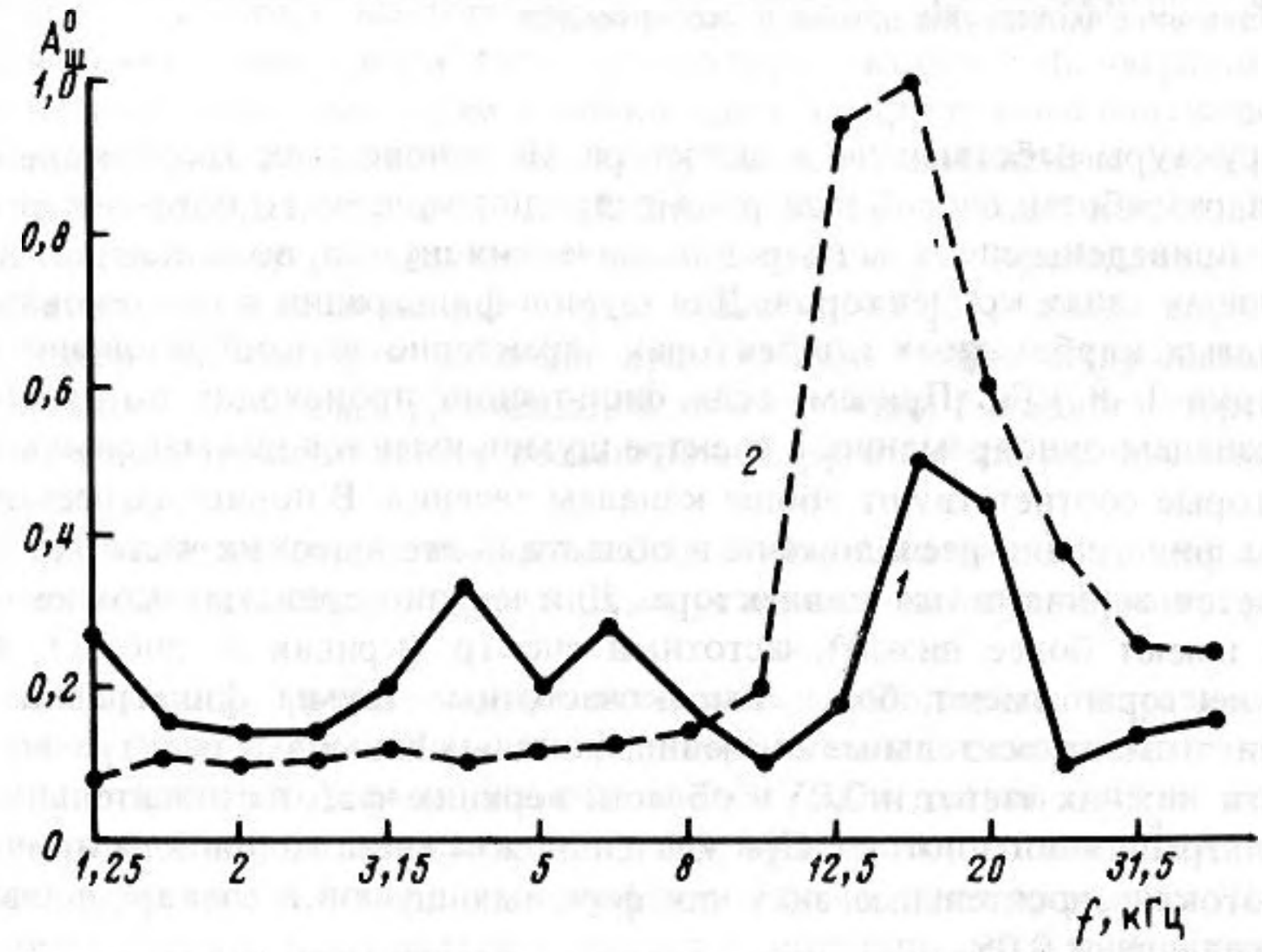

Рис. 3. Спектры шумов фильтрации в пористом песчанике при фильтрации воды (*1*) и углекислого газа (*2*)

ка помещается в противошумовой контейнер. Измерения проводились в ночное время суток для уменьшения влияния посторонних факторов. Относительные значения фоновых шумов в лабораторном эксперименте не превышают 0,02.

В качестве фильтрующего флюида использовались вода и углекислый газ (CO_2). Для образцов был взят керновый материал из трещиновато-пористых и пористых коллекторов нефтяных месторождений Татарии. Именно в этих коллекторах проводились нами скважинные исследования. На рис. 2 приведены спектры шумов, полученные при фильтрации жидкости. Трещиновато-пористым карбонатным породам соответствуют шумы с максимумами в спектре на частотах 4,0 и 6,3 кГц, пористым песчаникам – 16,0 и 20,0 кГц.

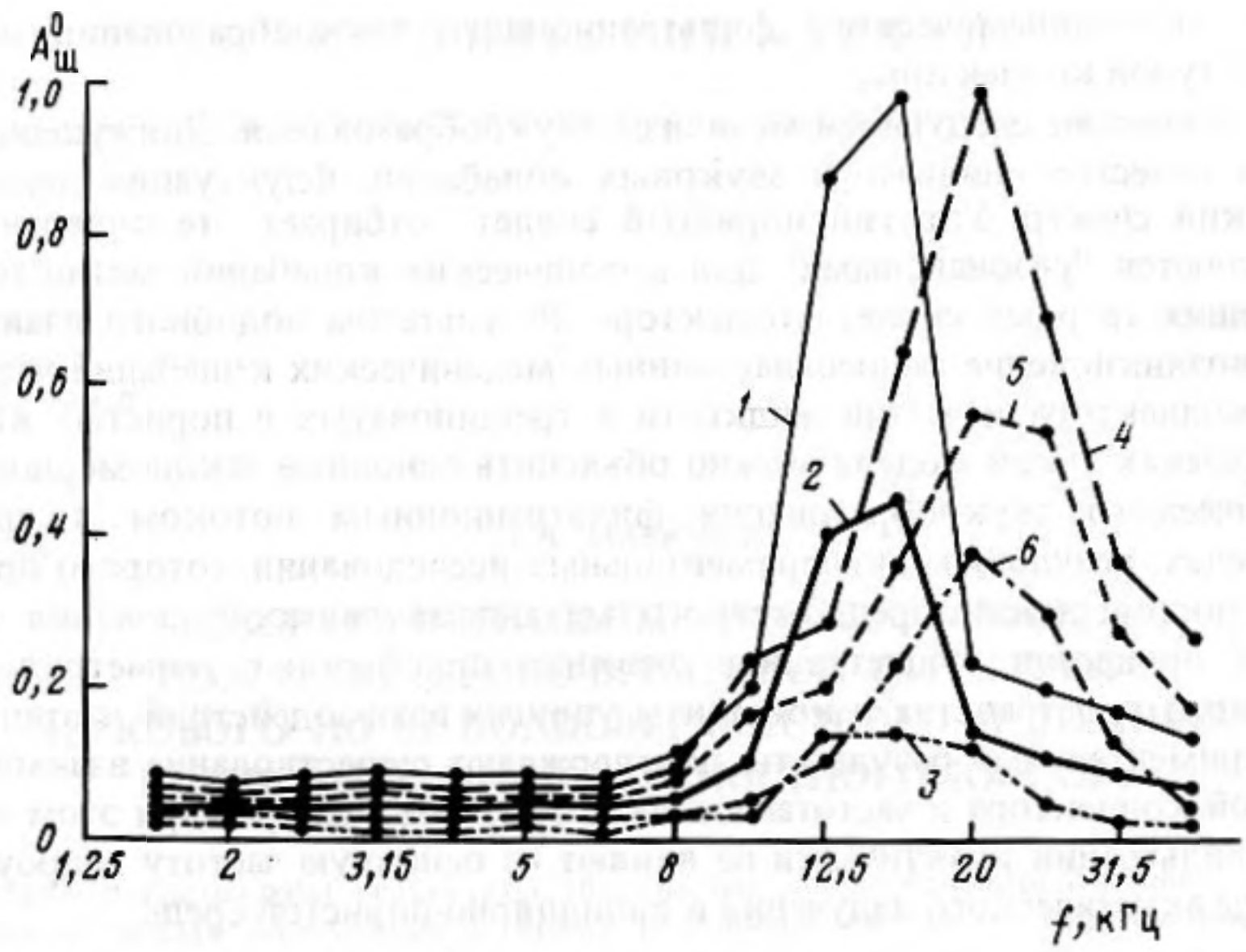

Рис. 4. *1, 2, 3* – спектры шумов фильтрации в пористом песчанике при соотношении скоростей 4 : 2 : 1; *4, 5, 6* – в мелкозернистом пористом песчанике при соотношении скоростей 5 : 3 : 1 соответственно

Таким образом, полученные результаты показывают, что амплитудно-частотные характеристики шумов фильтрационного потока в пластовых и лабораторных условиях идентичны и определяются структурой и типом коллектора. Как правило, в трещиновато-пористых коллекторах поток фильтруется через трещиноватое пространство и максимум спектра гидродинамического шума расположен в пределах единиц килогерц. Если же фильтрация потока осуществляется через трещины и поры одновременно, то дополнительно появляются шумы в области более высоких частот, характерные для шумов потока через пористое пространство (рис. 1, кривая *2*, рис. 2, кривая *2*).

Были проведены эксперименты по фильтрации жидкости и газа через одни и те же образцы. Максимумы спектра шумов фильтрации в этом случае практически совпадают (рис. 3). Этот факт позволяет сделать вывод о том, что вид спектра шума фильтрационного потока не зависит или слабо зависит от вязкости и плотности флюида, а связан главным образом со структурой и типом коллектора.

Для выяснения влияния скорости фильтрации на вид спектра проведены эксперименты, в которых шумы измерялись при различных скоростях потоков жидкости. В этих условиях большим скоростям фильтрации соответствуют большие амплитуды шумов. При этом не происходит заметного изменения спектра шумов для каждого исследования образца (рис. 4). В этих экспериментах скорость истечения жидкости регулировалась изменением высоты задающей и мерной емкостей.

Таким образом, экспериментально выявлено, что местоположение максимума спектра шумов практически не зависит от скорости фильтрации и вида флюида.

При проведении экспериментов возникает вопрос о возможных влияниях резонансов рабочего участка на вид спектра. Оценки показывают, что собственные частоты колебаний измерительной ячейки в лабораторных экспериментах в несколько раз больше частот шумов фильтрационного потока. В условиях же скважинных экспериментов собственные частоты колебаний труб одинаковых размеров и конструкций совпадают как в зоне фильтрации, так и вне ее. К тому же вне зоны фильтрации относительный уровень шумов в спектре фильтрации может быть только ниже фоновых, которые равны 0,05. При разных условиях измерения частоты звукообразования фильтрационного потока в скважине и в лаборатории совпадают. Это дает основание считать,

что явление гидродинамического фильтрационного звукообразования определяется именно структурой коллектора.

Авторы предлагают следующий механизм звукообразования. Движущаяся жидкость выступает в качестве инициатора звуковых колебаний. Флуктуация давления в ней имеет широкий спектр. Упругий пористый скелет "отбирает" те колебания, частоты которых являются "резонансными" для механических колебаний частиц горной породы, образующих твердый скелет коллектора. Результатом подобного взаимодействия и является возникновение самосогласованных механических колебаний частиц твердого скелета коллектора и частиц жидкости в трещиноватых и пористых каналах коллектора. В рамках такой модели можно объяснить основные закономерности явления гидродинамического звукообразования фильтрационным потоком в трещиновато-пористых средах, результаты экспериментальных исследований которого представлены выше. При достоверности предложенного механизма звукообразования в описании исследуемых процессов существенное значение приобретают геометрия неоднородностей порового пространства и константы упругих взаимодействий частиц горной породы. Экспериментальные результаты подтверждают существование взаимосвязи между структурой коллектора и частотами в акустическом спектре. При этом вид флюида и скорость фильтрации практически не влияют на основную частоту гидроупругого по своей природе акустического излучения в капиллярно-пористой среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Миниович И.Я., Перник А.Д., Петровский В.С.* Гидродинамические источники звука. Л.: Судостроение, 1972. 478 с.
2. *Мунин А.Г., Кузнецов В.М., Леонтьев Е.А.* Аэродинамические источники шума. М.: Машиностроение, 1981. 248 с.
3. *Лайтхилл Дж.* Волны в жидкостях. М.: Мир, 1981.
4. *Коротаев Ю.П., Грдзелова К.Л.* Исследование газовых скважин с помощью шумометрии. М.: ВНИИЭГАЗПРОМ, – ротапринт, 1983. 45 с.
5. *Афанасьев Е.Ф., Грдзелова К.Л., Плющев Д.В.* Об источниках генерации звука в насыщенных флюидом пористых средах // Докл. АН СССР. 1987. № 3. С. 554–557.
6. *Николаев С.А., Овчинников М.Н., Николаев А.С.* Способ контроля гидродинамического потока в скважине: А.с. № 1477900 СССР // Б.И. 1989. № 17. С. 121.

Казанский государственный университет
им. В.И. Ульянова-Ленина

Поступила в редакцию
19.01.90
После исправления
19.04.91

S.A. Nikolaev, M.N. Ovchinnikov

SOUND GENERATION BY A FILTRATIONAL FLOW IN POROUS MEDIA

Results of laboratory and oilfield experiments carried out for the investigation of hydrodynamic sound generation arising in the process of filtration are cited. It is shown that the reservoir structure determines the spectrum of acoustic radiation. Alterations of the filtration velocity and the kind of fluid lead to changing of the radiation intensity without considerably variation of the spectrum form. The results of the laboratory experiments and of those conducted in the oilfields are show to be identical.