

Министерство высшего и среднего специального образования  
Р С Ф С Р

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени  
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

П р е п р и н т № 251

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ,  
ВОЗБУЖДАЕМЫХ ДЕТОНАЦИОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

Ф.У.Аспуллаев  
Г.Г.Ба л и н  
Р.Д.Джамалов  
С.Н.Куличков  
Н.Н.Молодцов  
В.В.Семенов  
Л.Ю.Соболев  
В.Н.Товчигречко  
В.Е.Фридман  
Л.П.Цветков  
И.П.Чунчuzов  
К.Н.Шамшев

Горький 1988

Б в л и н Г.Г. и др.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ДЕТОНАЦИОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ.//Препринт № 251. - Горький: НИРФИ. - 1988. - 21 с.

УДК 534.2

Приведены результаты экспериментов по распространению коротких акустических импульсов в приземном слое атмосферы. Обсуждаются форма волнового поля и спектры акустических и сейсмических сигналов на расстояниях до 150 м. Приводятся экспериментальные записи акустических полей на расстояниях до 4 км.

## Введение

При распространении мощных коротких акустических импульсов в приземном слое атмосферы проявляются различные эффекты, связанные с нелинейностью, неоднородностью и диссипацией. Для выяснения характера их проявления были проведены экспериментальные исследования на полигоне, расположенном в Ферганской долине. Целью работы являлось изучение процессов генерации мощного звука с помощью источника, работающего в режиме непрерывной генерации импульсов с перестраиваемой частотой их следования. Изучались процессы распространения с учетом точного изменения стратификации параметров приземного слоя атмосферы. Кроме того, исследовались сейсмические поля в приповерхностном слое грунта. Подробные результаты изложены в работе "Экспериментальные исследования распространения мощных акустических импульсов в приземном слое атмосферы" (Отчет по ДНТСМ № 61/86 от 23.07.86, Горький-Москва, 1987 г., 71с.). Здесь кратко приводятся основные данные, полученные в эксперименте.

## I. Детонационный генератор

В экспериментальных работах использовался источник мощных импульсов, в которых генерация акустического поля возникает в результате детонации топливно-воздушной смеси в длинной трубе. Детонационный акустический источник включал в себя систему подготовки смеси, систему инициирования и детонационную камеру (рис. I).

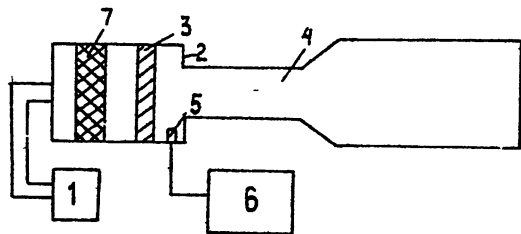


Рис. I. Схема акустического источника: 1 - Система подготовки смеси, 2 - Детонационная камера, 3 - Теплопоглощающий элемент, 4 - Разгонная труба, 5 - Запальная свеча, 6 - Система инициирования, 7 - Обратный клапан.

В эксперименте применялась детонационная камера, закрытая обратным клапаном с торца диаметром 25 мм и открытая с торца диаметром 100 мм. Суммарный объем камеры составлял  $W \approx 2 \cdot 10^4 \text{ см}^3$ . Камера заполнялась смесью бензина с воздухом в соотношении, близком к стехиометри-

ческому. При воспламенении смеси у закрытого торца электроискровым разрядом запальной свечи нормальное горение на расстоянии порядка 40–60 диаметров трубы переходит в детонационное и продолжает распространяться со скоростью 1800 м/с к открытому торцу акустического генератора. Параметры течения при этом имеют следующие значения: давление порядка  $36 \text{ кг/см}^2$ , давление в плоскости Чепмена-Жуге (за ударной волной) составляет примерно  $18 \text{ кг/см}^2$ , скорость продуктов горения за ударной волной в направлении к открытому торцу порядка 900 м/с. Давление в зоне покоя около  $6 \text{ кг/см}^2$ . При истечении продуктов детонации из открытого торца трубы давление в камере падает ниже атмосферного и достигает  $0,45 \text{ кг/см}^2$ . После истечения продуктов детонации камера заново заполняется и процесс повторяется в пульсирующем режиме.

Для предотвращения воспламенения вновь подаваемой смеси остатками продуктов сгорания предыдущего цикла использовался теплопоглощающий элемент, расположенный за клапаном. Выбор параметров теплопоглощающего элемента и его местонахождение в камере зажигания определяются из условия образования слоя охлаждения продуктов сгорания определенной толщины. Этот слой продуктов сгорания, охлажденных до температуры ниже температуры самовоспламенения, отделяет свежую смесь, поступающую в камеру, от остатков горячих продуктов сгорания, что обеспечивает работу генератора в пульсирующем режиме при достаточно высокой частоте повторений. Предельная частота пульсаций определяется скоростью заполнения камеры смесью, которая, в свою очередь, зависит от производительности системы подготовки смеси, величины проходного сечения камеры и её гидродинамического сопротивления. Несколько более подробное описание элементов и принципа работы детонационного генератора изложено в отчете.

В качестве системы подготовки смеси использовался один из двух блоков карбюраторного V – образного двигателя ЗИЛ–130, который отключался от системы зажигания, а соответствующая выхлопная труба перекрывалась предварительно встроенной в неё заслонкой. Перед заслонкой на сваренный в выхлопную трубу ступер надевался маслобензостойкий шланг, который подсоединялся к входу камеры. Длина шланга составляла 16 м, диаметр – 32 мм. Горючим служил бензин марки А–76.

При запуске двигателя один блок цилиндров работал в нормальном режиме, а из второго блока смесь через шланг нагнеталась в камеру. Давление подачи смеси  $P_n$  лежит в диапазоне от 1 атм до 1,8 атм.

Смесь, полученная таким образом, является однородной, гомогенной и по составу близкой к стехиометрическому. Детонационная способность полученной смеси повышена в результате холоднотламенных реакций, имеющих место при предварительном сжатии. Тонкая регулировка обогащения или обеднения смеси осуществлялась ручкой привода воздушной заслонки карбюратора. Регулирование расхода смеси осуществлялась ручкой привода акселератора и контролировалось с помощью тахометра по номограмме  $G(N, P_H)$ , где  $N$  - число оборотов двигателя,  $P_H$  - давление нагнетания смеси,  $G$  - производительность (рис.2).

Рис.2. Номограмма расхода смеси.

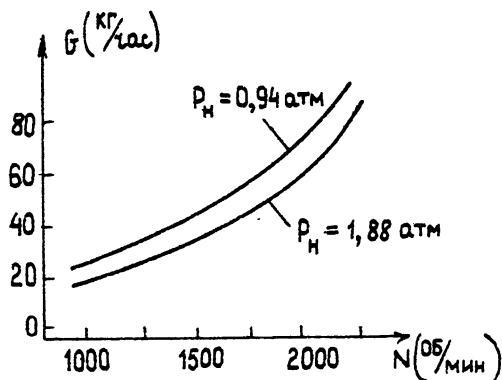


Таблица I.I.

№ п/п	Длина детонационной камеры (см)	Выходной диаметр (см)	Общий объем $W$ (см <sup>3</sup> )	Вес горючего $Q$ (г)
1	515	10	$2 \cdot 10^4$	20
2	415	10	$1,215 \cdot 10^4$	12
3	315	10	$0,43 \cdot 10^4$	4,5
4	275	2,5	$0,13 \cdot 10^4$	1,5

В ходе проведения эксперимента варьировались частота генерации акустических импульсов в диапазоне от  $\Omega \approx 0,1$  Гц до, примерно,  $\Omega = 25$  Гц и объемы детонационной камеры. В табл. I.I. приведены па-

параметры генератора и указан вес горючего, соответствующий каждому объему.

## 2. Схема проведения эксперимента

Акустическая трасса была выбрана над ровным хлопковым полем, длиной около 800 м в период созревания хлопка. Высота хлопковых кустов порядка 70 см; высажены они на грядках высотой 20–30 см. Расстояние между грядками составляет 50 см. Поэтому все хлопковое поле представляет собой почти гармоническую амплитудную решетку с сильнопоглощающим (лиственным) покрытием.

Источник был установлен на высоте 2 м над уровнем поля и закреплен на бетонной ограде. Микрофоны и сейсмодатчики располагались на поверхности поля вдоль трассы, близкой к оси генератора на фиксированных расстояниях от его среза (табл. 2.1)

Таблица 2.1.

№ точки	расстояние (м)	условия	регистрация
I	18	Дневная запись на 4 канала одновременно с точками № 3, 4, 6.	микрофон
2	27	Дневная запись на 3 канала одновременно с точками № 5, 7.	микрофон и сейсмодатчик
3	30	См. № I	См. № I
4	50	См. № I	См. № I
5	76	См. № 2	См. № 2
6	84	См. № I	См. № I
7	155	См. № 2	См. № 2
8	600	запись дневная	микрофон
9	700	ночная	—"
10	$4 \cdot 10^3$	—"	—"
II	около 8 км	—"	аудиорегистрация

В таблицу внесены удаленные точки регистрации; на расстоянии 4 км была осуществлена запись акустических импульсов в ночное время суток. На расстоянии 8 км группа экспериментаторов, выехавшая на запись в ночное время, хорошо слышала работу генератора.

Измерения акустических сигналов проводились при помощи микрофонов БК 4147 диаметром 0,5 дюйма, а также шумомера типа 00 023 RFT, имеющих полосу частот порядка 30 кГц и предел измерений звукового давления около 150 дБ. Измерения сейсмических сигналов проводились при помощи приемников вертикальной составляющей скорости смещения грунта типа СВ-10, имеющих рабочий диапазон 5 - 800 Гц и чувствительность 15 мв/мм/с. Акустические и сейсмические сигналы регистрировались на измерительном магнитофоне БК 7005, имеющим диапазон частот: 40 Гц - 60 кГц в режиме прямой записи и от 0 до 12 кГц в режиме ЧМ записи и динамический диапазон около 45 дБ. Акустические сигналы в точках № 1-4 (см. табл. 2.1) регистрировались в режиме прямой записи; в остальных точках и при записи сейсмических сигналов использовалась ЧМ-запись. Обработка записей сейсмических и акустических полей включала в себя регистрацию осциллограмм сигналов, получение их амплитудных спектров, а также корреляционный и кепстральный анализ. При обработке использовались следующие приборы:

1. Цифровой регистратор БК 7502, имеющий следующие характеристики: объем памяти - 4 Кбайта, частота выборок при записи может изменяться дискретно в 2,5, 10, 20 и т.д. раз и находится в пределах от 100 Гц до 100 кГц; частота выборок при воспроизведении 0,5 кГц - 500 кГц, динамический диапазон - 47 дБ.

2. Спектральный анализатор С4-73, который позволяет получить амплитудный и энергетический спектры, а также их логарифмы в диапазоне частот от 2 Гц до 20 кГц с дискретным переключением в 2,5, 10, 20 и т.д. раз. Количество независимых точек в спектрах - 200, динамический диапазон - 48 дБ.

3. Двухкоординатный самописец **endim** 620.02.

Для регистрации осциллограмм и спектров сигнал с измерительного магнитофона подавался на цифровой регистратор, в котором устанавливался необходимый режим частоты выборок на входе и выходе. Затем выходной сигнал регистратора записывался на двухкоординатном самописце и задавался на вход спектрального анализатора. Амплитудный спектр либо его логарифм выводились на самописец.

Для получения кепстров логарифм спектра, полученный в анализаторе

ре, вводился в память цифрового регистратора, а затем подвергался вторичной спектральной обработке в том же анализаторе. При корреляционной обработке сигналов строился модуль корреляционной функции с помощью Фурье-преобразования от энергетического спектра.

### 3. АКУСТИЧЕСКИЕ ПОЛЯ (ТРАССА 18 - 155 м)

#### 3.1. Анализ поля на малых расстояниях

При измерении полей выявилось существенное отличие импульсов, генерируемых детонационной волной в трубе генератора, от импульсов, возникающих при выходе из трубы волны горения (рис.3)<sup>+</sup>. Детонационные "сильные" импульсы имели форму, близкую к классической: ударная волна, спад давления, зона разгрузки и новая зона давления, вызванная дожигом смеси на выходе генератора. Перекосы на "хвосте" могут быть вызваны отражениями от стенок и других объектов. Слабый импульс, возбуждаемый волной горения, более изрезан. Тонкая структура импульсов содержит высокочастотные осцилляции. Отметим флуктуации пиковых значений давления при генерации различных импульсов. В сильных импульсах амплитуда менялась на 1,5 - 2% (например на расстоянии 27 м принимались сильные импульсы с разбросом амплитуды от 108 до 126 Па). Для слабых сигналов флуктуации амплитуды намного сильнее.

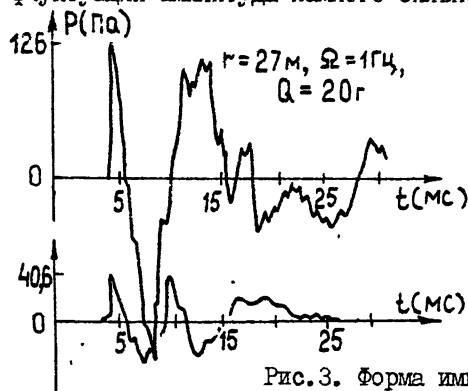


Рис.3. Форма импульсов при детонации и горении.

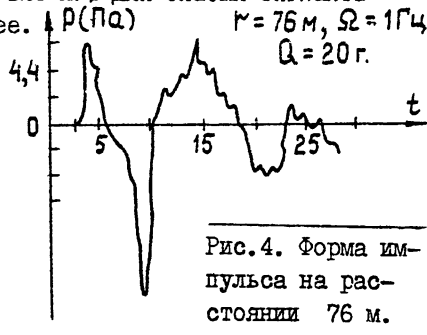


Рис.4. Форма импульса на расстоянии 76 м.

<sup>+</sup> На рисунках отмечается вес смеси (в граммах), в соответствии с таблицей I.I., расстояние от генератора и частота генерации импульсов.



При распространении импульс испытывает искажение формы: амплитуда его падает, длительность нарастает, очертания формы сглаживаются (ср. рис.4 и верхний импульс на рис.3). Фронты остаются узкими, что говорит о малости высокочастотной диссипации. По-видимому, трансформация импульса происходит под действием двух факторов: нелинейности и "неклассической" диссипации (обусловленной конечностью импеданса подстилающей поверхности). Это подтверждается также динамикой спектра (рис.5); с увеличением расстояния спектр обужается и сдвигается в сторону низких частот. Отметим также, что уменьшение амплитуды с расстоянием происходит существенно быстрее, чем это определяет сферическая расходимость.

Отметим теперь сильную изрезанность спектров. На расстоянии 27 м имеются максимумы на частотах 225, 325, 400 и 450 Гц; на расстоянии 76 м частоты максимумов сдвигаются и составляют 250, 275, 340-370, 475 Гц (рис.5). Изрезанность спектров вызвана, скорее всего, наличием отражений от подпорной бетонной стенки, корпуса автомобиля, питающего генератор, и от других объектов.

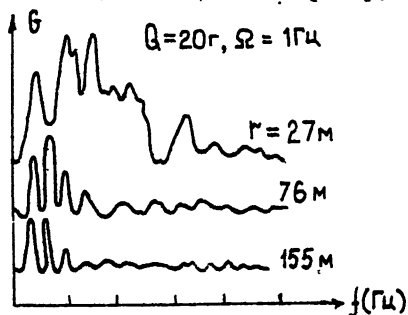


Рис.5. Трансформация спектра.

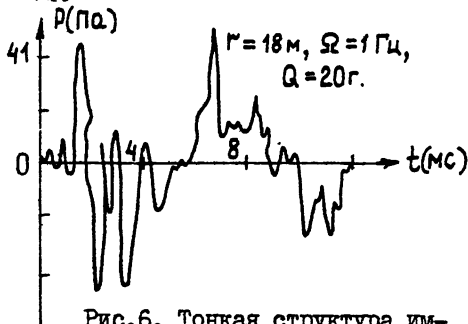


Рис.6. Тонкая структура импульса на расстоянии 18 м.

Структура поля на больших расстояниях определяется формой импульса вблизи источника. В спектре слабого импульса на расстоянии 18 м (рис.6) энергия сосредоточена в диапазоне до 1 кГц (рис.7). Периодическая модуляция спектра говорит о наличии сильного отражения в исходном сигнале. Такое отражение можно проанализировать с помощью корреляционной или кепстральной обработки (рис. 8, 9). На корреляционной функции, выполненной в трех временных масштабах, наличие отражений просматривается слабо. Кепстр позволяет более четко отметить отражения (рис.9). Так имеем выде-

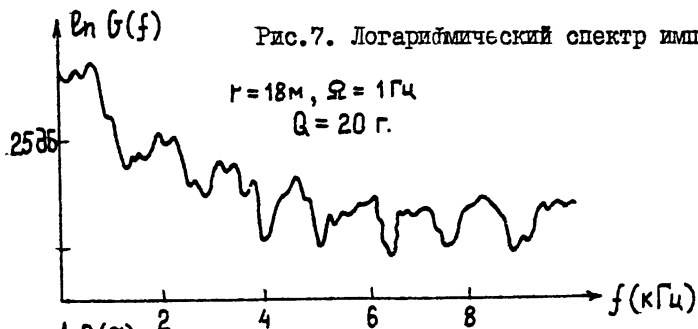


Рис.7. Логарифмический спектр импульса.

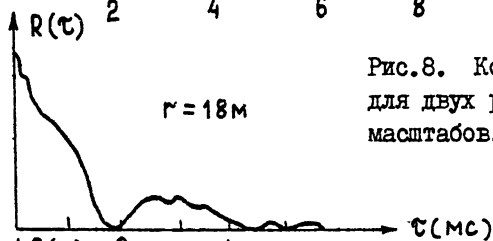


Рис.8. Корреляционная функция для двух различных временных масштабов.

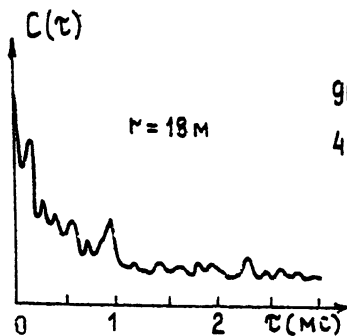
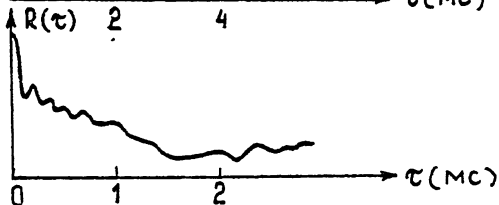


Рис.9. Кестр импульса.

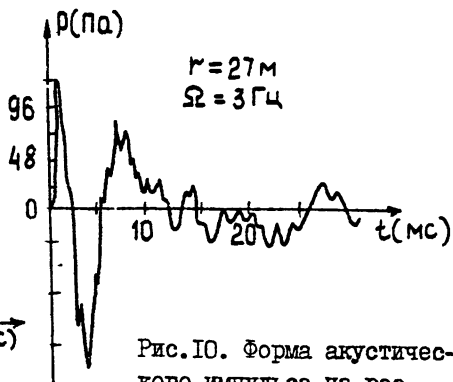


Рис.10. Форма акустического импульса на расстоянии 27 м.

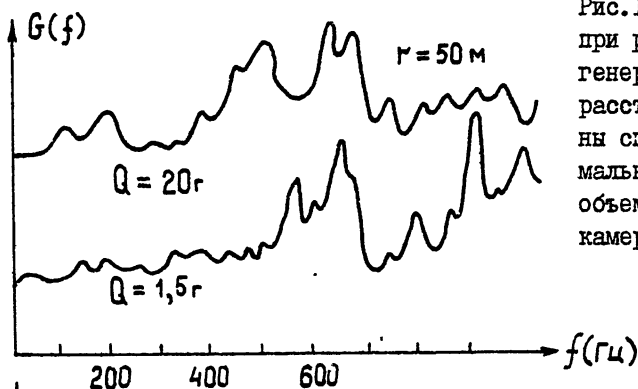
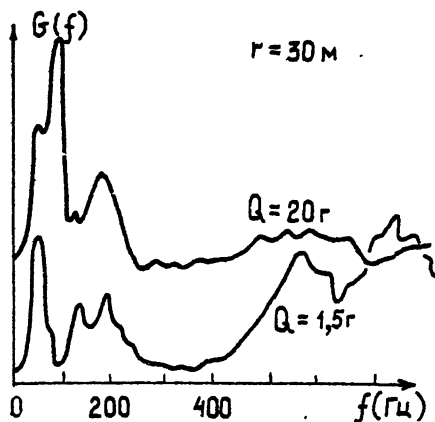
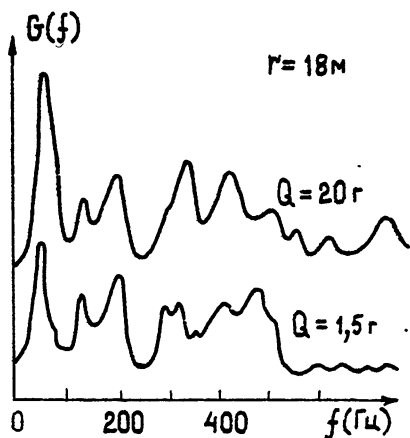
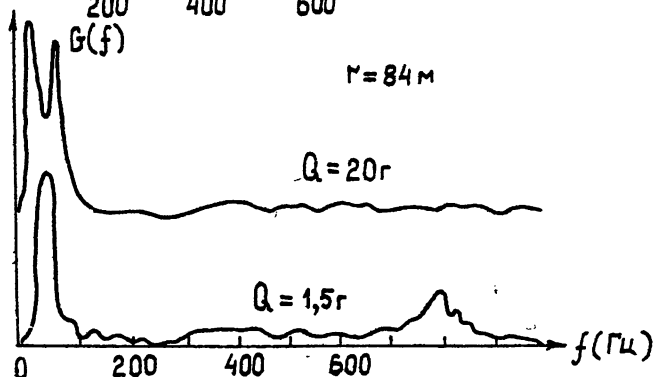


Рис. II. Форма спектра при различных объемах генератора на разных расстояниях. Приведены спектры при максимальном и минимальном объемах детонационной камеры.



ленные задержки: 0,1 мс; 0,9 мс (сильное отражение; видимо им определяется модуляция спектра); 2,3 мс и 5,4 мс. Эти задержки соответствуют расстояниям порядка 0,03 м; 0,3 м; 0,75 м и 1,8 м. Первые три задержки, вероятнее всего, связаны с конструктивными особенностями генератора (отражение в трубе от различных ее частей) Можно также предположить наличие отражений от неровностей почвы непосредственно вблизи микрофона. Задержка в 1,8 м вероятно связана с отражением от бетонной стенки, на которой крепились труба генератора.

### 3.2. Изменение параметров поля при смене частоты

Смена частоты генерации акустических импульсов означает изменение объема смеси, участвующей в реакции. Амплитуды сигналов уменьшаются при увеличении частоты (ср. рис. 4 и 10). Эта тенденция просматривается отчетливо в сильных импульсах. Амплитуды ударных волн на расстоянии 27 м для частот 1 и 3 Гц составляют 126 и 120 Па. Слабые импульсы ведут себя несколько иначе для частот 1,3 и 5 Гц их амплитуды составляют 41, 65 и 45 Па. Это, вероятно, связано с существенно более медленным распространением волны горения, при котором вся впрыснутая смесь успевает вступить в реакцию при работе на частоте 3 Гц; Только с еще большим увеличением частоты происходит уменьшение порции смеси и уменьшение амплитуды акустического импульса. Отметим, что здесь также могут иметь место и флуктуации амплитуды сигнала. С увеличением расстояния процесс уменьшения амплитуды такой же, как и при частоте 1 Гц.

### 3.3. Изменение объема топливо-воздушной смеси

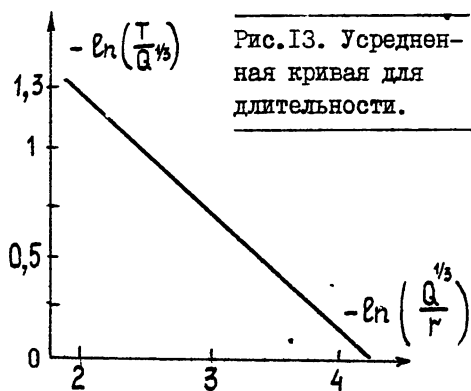
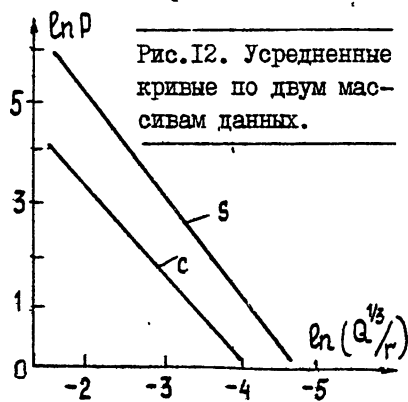
Влияние изменения объема на акустическое поле экспериментально изучалось при использовании труб 4 разных объемов. Снимались последовательно секции разгонной трубы генератора (см. табл. I.I); тем самым уменьшался вес горючего, используемого для генерации одного импульса. При этом происходил быстрый спад амплитуды на всех расстояниях, а низкочастотная область спектра (до 1 кГц) испытывала резкую трансформацию (рис. II). С уменьшением объема на всех расстояниях происходило выделение какой-то части спектра, причем с увеличением расстояния подчеркивалась все более высокочастотная

область: на 18 м выделялся диапазон 400–500 Гц, на 30 м – 500–600 Гц, на 50 м – 600–700 Гц и на 84 м – 700–800 Гц. Такая зависимость спектральных компонент от расстояния пока необъяснима, хотя увеличение интенсивности сравнительно высоких частот с уменьшением объема генератора понятно и объясняется уменьшением времени пробега детонационной волны. Действительно, из общих соображений ясно, что уменьшение объема смеси должно приводить к уменьшению характерных длительностей импульсных сигналов, т.е. к увеличению спектральной интенсивности на высоких частотах.

### 3.4. Автомоделные законы для параметров ударных волн

Обработка полученных результатов проводилась следующим образом. На плоскость  $\ln P$ ,  $\ln r$  наносились усредненные значения амплитуд слабых и сильных импульсов. Из полученного массива данных стало ясно, что амплитуда спадает существенно быстрее, чем это обусловлено сферической расходимостью. Причем степень уменьшения амплитуды зависит от ее начальных значений. Очевидно, что повышенная диссипация определяется потерями (вызванными конечным импедансом подстилающего слоя) и нелинейностью (определяемой высокой амплитудой и малой длительностью акустического импульса вблизи источника).

Сведение всех экспериментальных данных воедино (рис. 12, 13) позволил получить общие универсальные соотношения амплитуды и длительности от расстояния  $r$  и веса  $Q$ . Оказалось, что сильные и



слабые импульсы образуют два массива данных (рис.12). Кривые проведенные по этим массивам по условию равных среднеквадратичных отклонений, имеют следующие функциональные зависимости

$$P_c \approx 4 \cdot 10^2 \left( \frac{Q^{1/3}}{r} \right)^{1,5}, \quad (3.1)$$

$$P_s \approx 10^4 \left( \frac{Q^{1/3}}{r} \right)^2. \quad (3.2)$$

Здесь  $P$  в Па,  $r$  в м,  $Q$  в г. Экспериментальные результаты по увеличению длительности также могут быть выражены через вес и расстояние. Здесь, правда, разброс точек очень велик, поскольку при определении длительности большую роль играют шумы; поэтому здесь приводится график (рис.13) и построенная по нему формула для длительности, измеренной по полуширине импульса

$$T_m \approx 10^{-4} Q^{1/3} \left( \frac{Q^{1/3}}{r} \right)^{0,56} (c). \quad (3.3)$$

Рост длительности существенно выше, чем это может обеспечить обычная молекулярная вязкость и классическая квадратичная нелинейность

#### 4. СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПОЛЯ (ТРАССА I8 - I55 м)

Форма поля измерялась на поверхности сейсмическим датчиком на трех расстояниях (рис.14). Измерялась скорость смещения в мм/с. На всех трех осциллограммах четко прослеживается приход акустического импульса, а затем осцилляторная структура. С увеличением расстояния период осцилляторной структуры несколько увеличивается. одной из причин формирования такой формы сигнала может являться наличие резко выраженного подстилающего слоя. Действительно, в местности, в которой проводились эксперименты, по косвенным данным имеется слой почвенных вод на глубине порядка 3-4 метров. Отметим еще одно обстоятельство: на расстоянии 76 м перед приходом акустического импульса наблюдается предвестник, который может являться боковой волной, распространяющейся по скоростному слою, лежащему под низкоскоростным поверхностным слоем. Из графиков также видно, что сейсмический сигнал имеет вид последовательности цугов. Если предположить, что максимум цуга распространяется с минимальной групповой скоростью (фаза Эйри), то ее несложно определить по момен-

ту прихода; величина минимума групповой скорости составляет 200 м/с. Теперь, проводя грубую оценку и принимая среднюю скорость продоль-

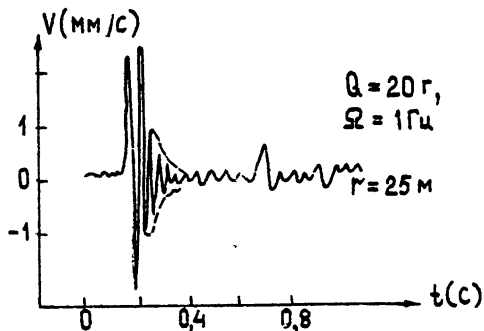
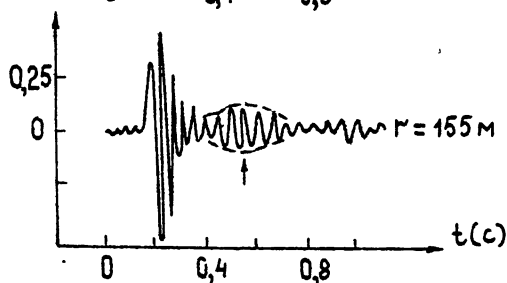
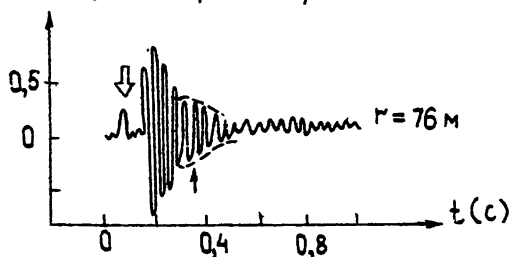


Рис. 14. Сейсмический сигнал на разных расстояниях. Стрелками отмечены приходы фазы Эйри и боковая волна.



ной волны в подстилающем слое порядка 250–300 м/с, можно оценить время распространения боковой волны. Выберем слой толщиной порядка 4 м, лежащий на водоносной подложке, имеющей скорость 1,5 км/с. Представим вход боковой волны практически вертикальным. Тогда время прихода боковой волны определяется распространением по трассе, являющейся суммой двух толщин слоя и расстояния до точки наблюдения. Простые оценки показывают, что такое представление дает время прихода боковой волны раньше на, примерно, 100 мс, чем приход прямого акустического импульса, что находится в хорошем согласии с экс-

периментальными результатами.

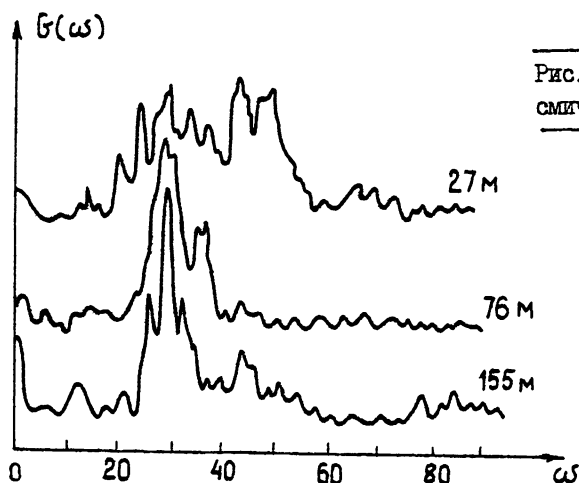


Рис.15. Спектр сейсмической волны.

Рассмотрим теперь трансформацию спектров сейсмического сигнала. Энергонесущие компоненты спектра сосредоточены в области 20 – 50 Гц. Некоторые отличия имеют спектры сильных и слабых сигналов. Но для тех и других проявляется тенденция подчеркивания каких-то частотных компонент (рис.15). Широкий на малых расстояниях спектр постепенно обужается, что также является свидетельством выделения резонансной спектральной компоненты подстилающим слоем определенной толщины.

#### 5. АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ НА РАССТОЯНИЯХ 600 И 700 М

Измерения на расстоянии 600 м и 700 м проводились на прямой видимости в дневное (600 м) и ночное (700 м) время. Форма сигнала в дневное время на разных частотах работы генератора представляет собой биполярный сигнал, импульс которого близок к нулю (рис.16). Амплитуда импульса вполне соответствует сферической расходимости с расстояния порядка 150 м.

Резко меняется картина в вечернее время (рис.17). Прослеживается несколько приходов в точку наблюдения, причем первый импульс обогащен высокой частотой. Это явление видимо определяется рефракцией,



при которой первый приход идет вдоль рефрагированного луча, сигнал

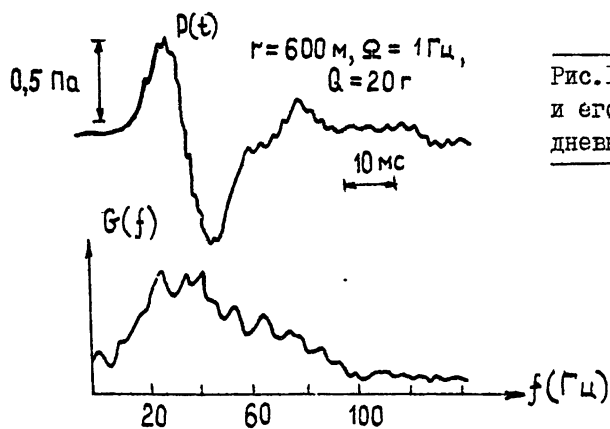


Рис.16. Форма импульса и его спектр. Запись дневная.

вдоль которого испытан существенно меньшее затухание. Отметим, что за основными приходами имеется слабая осцилляционная структура, которая усиливается при генерации импульсов с большей частотой

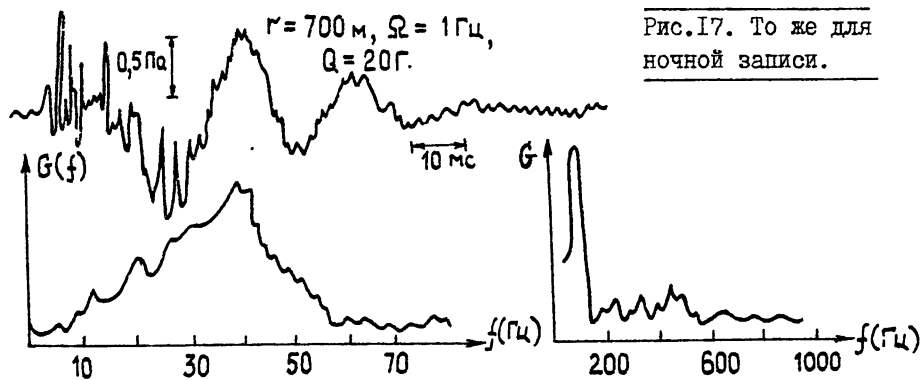


Рис.17. То же для ночной записи.

Сравним теперь спектры сигналов в дневное время суток (рис.16, 17). Низкочастотные участки спектра в обоих случаях имеют максимум примерно на 40 Гц. Пока неясно, подчеркивается этот максимум условиями распространения импульсного сигнала (затухание, обусловленное конечностью импеданса земной поверхности) или неоднородностью параметров атмосферы. Отметим только, что в вечернее время максимум на частоте порядка 40 Гц более выражен. Сильное отличие наблюдается

для области высоких частот; днем практически отсутствуют компоненты выше 150 Гц. В ночное время резко усиливается интенсивность частотного диапазона 300–500 Гц. Это может являться следствием стратификации, при которой первые приходы определяются лучами, выходящими из источника вверх, в сторону увеличения высоты, и испытывающие рефракцию на некоторой высоте. При этом, естественно уменьшается диссипация, обусловленная приповерхностными слоями грунта и самой ее поверхностью (развитая растительность, как было видно из анализа поля на близких расстояниях, обладает свойством повышенной диссипации высокочастотной области спектра).

При изменении частоты работы генератора происходит модуляция спектра, подчеркиваются дискретные компоненты, кратные частоте работы генератора. Кроме того, на одной из частот, а именно частоте 5 Гц, возникло явление усиления узкой монохроматы вблизи частоты

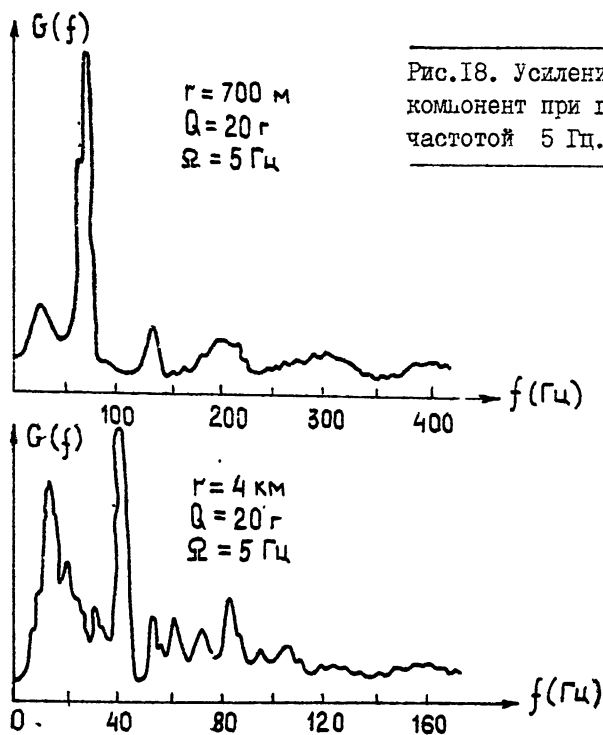


Рис.18. Усиление спектральных компонент при генерации с частотой 5 Гц.

75 Гц. Забегая вперед можно отметить аналогичное явление и на расстоянии 4 км; для этого случая характерно усиление сигнала на частоте около 40 Гц (рис. 18). Объяснить эти усиления можно интерференцией мод, приходящих в точку измерения.

## 6. АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ НА РАССТОЯНИИ 4 КМ

На расстоянии 4 км измерения проводились только в вечернее время. В дневное время имелся интенсивный посторонний производственный шум. В форме сигнала (рис. 19) ясно прослеживаются приходы по различным лучам. Сигнал обладал достаточной интенсивностью как в случае слабых, так и сильных импульсов. При увеличении частоты генерации также, как и на расстоянии 700 м, происходило усиление спектральной компоненты. На этом расстоянии усиливается гармоника на частоте около 40 Гц (рис. 18).

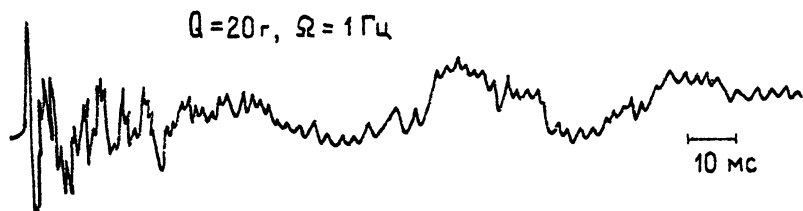


Рис. 19. Форма сигнала на расстоянии 4 км.

Для изучения тонкой структуры поля использовался кепстральный анализ. Обработка реализации длительностью 0,8 с показала в кепстре наличие прихода на  $\tau \approx 0,3$  с. Вторая задержка составляла  $\tau = 0,15$  с. Следовательно кепстр подчеркнул два самых "длинных" луча.

Рассмотрим подробнее малые задержки. Для реализации сигнала длительностью  $T = 0,1$  с можно получить кепстр в диапазоне до 0,1 с (рис. 20). В нем легко различаются малые задержки, соответствующие близким лучам. Кроме того, можно выделить изрезанность сигнала, связанную со сложной структурой поля вблизи источника, сравнивая полученный кепстр с кепстром сигнала, зарегистрированного на малом расстоянии (рис. 9). В кепстре видны задержки на 1, 4, 10, 11, 15 мс; часть задержек (например, 1 мс, 4 мс) совпадают с задержками в кепстре акустического импульса на малом расстоянии. Остальные задержки фиксируют приходы по очень близким по длине трассы лучам, что впрочем, достаточно четко видно и в осциллограмме самого акусти-

ческого поля (рис. 19).

Сделаем одно замечание относительно амплитудных характеристик сигнала на расстоянии 4 км. Сравнивая этот сигнал и сигнал на расстоянии 700 м, имеющий амплитуду порядка 0,5 - 1 Па (рис.17)

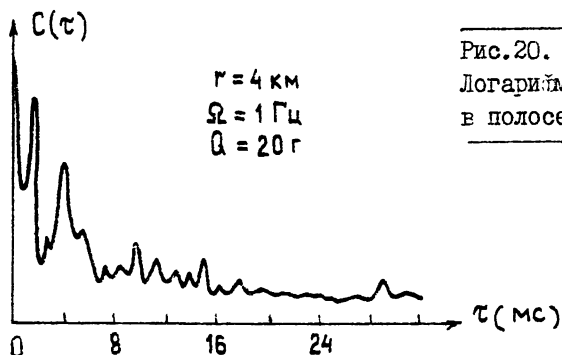


Рис.20. Кепстр сигнала.  
Логарифмический спектр  
в полосе в полосе 5 кГц.

видим, что имеет место спадание амплитуды, близкое к сферической расходимости. Для более точных измерений необходима синхронизация, которая позволила бы проследить за каждым импульсным сигналом генератора вдоль всей трассы.

Второе замечание касается аудиорегистрации сигнала на расстоянии около 8 км. Хорошая слышимость на данном расстоянии в ночное время суток позволяет предположить, что предельная зона слышимости при работе акустического излучателя данной конструкции может быть существенно выше. Для определения четких границ зон слышимости и зависимости ее размеров от параметров генератора требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Акустический детонационный генератор, использованный в эксперименте, является эффективным сейсм-акустическим источником, способным объединять достоинство взрывных зарядов (высокая мощность в импульсе, малая длительность) с преимуществами обычных акустических излучателей (перестройка частоты, модуляции). По су-

шеству, детонационный генератор представляет собой "управляемый взрыв"; он прост и экономичен в эксплуатации.

2. Акустический детонационный генератор позволяет решать широкий круг задач физики атмосферы и нелинейной акустики. С его помощью возможно проведение крупно-масштабных экспериментов по распространению акустических сигналов на дальние расстояния. Так при проведении экспериментов зона слышимости превышала 8 километров.

3. В ходе проведения экспериментальных исследований обнаружены следующие явления при распространении акустических волн на малых расстояниях в приземном слое атмосферы:

Аномально высокое затухание импульсного сигнала; пиковое значение амплитуды уменьшается существенно быстрее, чем это обусловлено сферической расходимостью и классической молекулярной вязкостью. Причем выявляется зависимость от начальной амплитуды импульса — для более мощных импульсов затухание происходит быстрее.

Аномально быстрое расширение импульсного сигнала. Длительность импульса нарастает существенно быстрее, чем в обычной поглощающей среде.

4. При измерении акустических волн на больших расстояниях (700 м, 4 км) обнаружены эффекты, связанные с изменением характера стратификации температуры и ветра в приземном слое атмосферы в течении суток. В дневное время, при отсутствии температурной инверсии, трансформация импульса определяется только диссипативными механизмами. При наличии температурной инверсии начинают проявляться дисперсионные эффекты, определяемые волноводным распространением звука. В эксперименте получены формы сигналов как в дневное, так и в ночное время суток при различной частоте работы детонационного генератора. Показано формирование многолучевости в ночное время и обнаружены эффекты усиления сигнала на выделенной частоте при частоте повторения импульсов 5 герц.

5. Использование детонационного генератора позволило исследовать сейсмические поля, наведенные мощным акустическим сигналом, распространяющимся над поверхностью земли. На трассах до 150 м получено, что сейсмическая волна представляет собой длинный цуг на фиксированной частоте, что говорит о наличии вдоль трассы подстилающего слоя, лежащего на слое с высокой скоростью звука, что сходится с качественными представлениями о характере структуры грунта в районе проведения эксперимента.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение . . . . .	3
1. Детонационный генератор . . . . .	3
2. Схема проведения эксперимента . . . . .	6
3. Акустические поля (трасса I8-I55 м) . . . . .	8
4. Сейсмические поля (трасса I8-I55 м) . . . . .	14
5. Акустическое поле на расстояниях 600 и 700 м . . . . .	16
6. Акустическое поле на расстоянии 4 км . . . . .	19
Заключение . . . . .	20

Дата поступления статьи  
30 ноября 1987 г.