

Л. Д. ГИК, Н. М. ДЕРЖИ, В. П. ЗАЙЦЕВ,  
В. Г. ЧЕРНЯКОВ

(Новосибирск)

## ЗАЩИТА ФИЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ОТ МИКРОВИБРАЦИИ ПОГРУЖЕНИЕМ В ГРУНТ

При решении ряда физических задач необходимо, чтобы уровень микросейсмических колебаний фундамента не превышал некоторого малого предела. Так, например, при измерении абсолютного значения ускорения сил тяжести механические колебания фундамента амплитудой в сотые доли микрона уже могут быть существенной помехой. В городских условиях из-за наличия индустриальных и транспортных возбудителей вибраций уровень колебаний фундамента зданий оказывается значительно выше, достигая десятых долей или даже единиц микрон, а в случае наличия близкорасположенных мощных возбудителей (ударные молоты, мощные компрессоры и т. д.) — еще больших величин.

Защита от микросейсмических шумов техническими средствами, в особенности в диапазоне низких частот порядка нескольких герц, связана с большими трудностями. Поэтому все большее внимание уделяется вопросу выбора местоположения фундамента для аппаратуры, при котором уровень вибраций мал. Из практики скважинных сейсмических измерений известно, что при погружении сейсмоприемника уровень микросейсмических шумов обычно уменьшается. К сожалению, количественная зависимость уровня микросейсмического шума от глубины погружения исследована недостаточно. В настоящей работе авторы пытаются внести некоторую ясность в данный вопрос.

При рассмотрении сигнала, воздействующего на погруженный сейсмоприемник П, полагаем, что источник И, возбуждающий колебания, находится на поверхности. Погруженными источниками пренебрегаем, так как сейсмические волны от землетрясений приходят сравнительно редко, а шахтные источники характерны для редких территорий. Среду распространения сейсмических волн считаем в первом приближении горизонтально однородной, с монотонным нарастанием скорости сейсмических волн по глубине (рис. 1, а) при постоянной плотности. Ввиду сложности среды траектория движения сейсмического сигнала неоднозначна (рис. 1, б). Так, для некоторого источника И<sub>2</sub>, помимо основной траектории (кривая 2 для прямой волны), существуют множество траекторий отраженных волн типа 2', а также траектория поверхностной волны (кривая 2''). Поэтому даже простейшая модель показывает сложность задачи оценки влияния глубины погружения на уровень сигнала: приходится учитывать сигналы разных волн, для которых условия происхождения существенно зависят от частного спектра возбуждения.

Так, в приповерхностном слое вблизи источника наибольший уровень соответствует поверхностной волне, на долю которой обычно приходится 90—95% энергии источника. При погружении сейсмоприемника уровень поверхностной волны экспоненциально падает и на глубине порядка  $h = \lambda/2$  и более может считаться пренебрежимо малым. Как показывает практика, уровень поверхностной волны понижается и при удалении от источника.

Дать качественную оценку уровня объемной волны затруднительно, так как он является довольно сложной функцией глубины погружения, поверхностного удаления, частотного спектра, рассеивания и затухания волн в среде. В случае однородной среды без затухания зависимость амплитуды смещения в волне от возбуждающей силы  $F$  представляется формулой Стокса

$$U = F \cos \alpha / (4\pi \rho V^2 R)$$

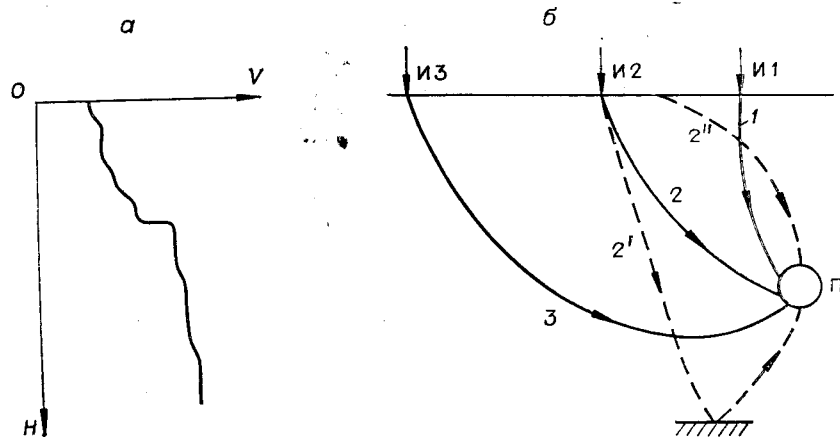


Рис. 1. Возможные траектории колебаний при возбуждении от источника на поверхности для среды с вертикальным градиентом:  
 а — характер градиента скорости; б — направления лучей.

( $\rho$  — плотность грунта,  $V$  — скорость сейсмических волн,  $R$  — удаление,  $\alpha$  — угол между направлением действия силы и вектором  $R$ ). Эта зависимость определяет распространение волны в среде с постоянным волновым сопротивлением  $\rho V$  в условиях, когда поток мощности остается постоянным в пределах телесного угла, имеющего центром точку приложения силы.

Согласно закону сохранения энергии, наметим качественные закономерности и для структур, приближающихся к реальным. В ряде случаев среду распространения волн можно принять градиентной с постоянным градиентом малой величины. В этом случае по-прежнему можно считать, что поток энергии остается неизменным в пределах некоторой «лучевой трубки», образующие которой вместо прямых линий приобретают форму окружностей [1] (рис. 2) с центрами на линии  $z = -1/\beta$  и радиусами  $R = (\beta \sin \alpha_0)^{-1}$ , где  $\beta = (1/V_0)(dV/dz)$ ,  $\alpha_0$  — угол между лучом и вертикалью в точке источника. Из рисунка видно, что при малых (дуга менее радиуса) удалениях от источника (в нисходящей части трубки) ширина трубки изменяется практически пропорционально дуге. В восходящей части ширина меняется сравнительно медленно — приблизительно от  $dR$  до  $2dR$  (приращение радиуса окружности от внутренней до внешней стенок трубки). Постоянство потока мощности внутри лучевой трубки означает, что

$$\Delta_i \rho_i V_i \left( \frac{dU_i}{dt} \right)^2 = \text{const.}$$

Здесь  $\Delta_i$ ,  $\rho_i$ ,  $V_i$  и  $U_i$  — соответственно ширина  $i$ -го сечения, плотность, скорость сейсмических волн и колебательное смещение в этом сечении. Итак, в начальной части трубки  $\Delta_i$  пропорционально  $R$  и, следовательно,  $U_i|_{\partial h/\partial L > 0} = C_1/L\sqrt{V_h}$ , а в конечной части —  $U_i|_{\partial h/\partial L < 0} = C_2/\sqrt{V_h}$  ( $C_{1,2}$  — коэффициент пропорциональности,  $L$  — удаление от источника по криволинейному лучу).

Из вышеизложенного следует, что уровень колебаний сильно зависит от глубины погружения при малых удалениях источника в нисходящей части лучевой трубки и слабо — в восходящей части. В обоих случаях уровень колебаний обратно пропорционален корню квадратному из скорости сейсмических волн.

С целью получения качественных оценок сделанные выводы экстраполируем на модель среды, имеющую резкие отражающие горизонтальные границы. Наличие границы раздела означает частичное отражение волны на этой границе и, следовательно, уменьшение энергии проходящей волны. Изучая лучевые трубки для таких моделей, приходим к вы-

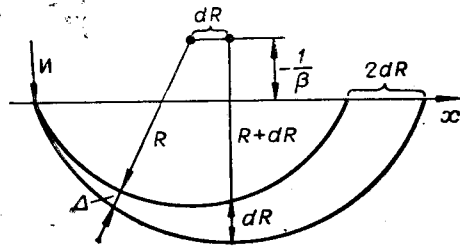


Рис. 2. Продольное сечение лучевой трубки для среды с вертикальным градиентом скорости.

воду, что энергия в трубке уменьшается по сравнению с градиентной моделью, не имеющей скачков скорости сейсмических волн. Поэтому приведенные выше качественные выводы для градиентных моделей можно рассматривать как верхнюю оценку зависимости уровня сигнала от глубины для нисходящей волны и как нижнюю — для восходящей. Если еще учесть, что в условиях реального грунта при увеличении глубины существуют пласты с пониженной скоростью (волноводные участки, погружение в которые, согласно указанным соображениям, должно приводить не к уменьшению, а к увеличению уровня микросейсм), то приходится сделать вывод, что по отношению к сейсмическим сигналам далеких мощных источников погружение на глубину малоэффективно.

Таким образом, качественное рассмотрение изменения уровня колебательного смещения сейсмической волны в среде с малым постоянным градиентом дает зависимость для нисходящей волны, пропорциональную первой степени удаления и корню квадратному из волнового сопротивления, которое при постоянстве плотности определяется скоростью сейсмических волн. Проводя оценку виброзащитных свойств реальных сред и аппроксимацию разреза моделью с постоянным градиентом, необходимо для приповерхностных точек наблюдений сделать поправку на поверхностную волну, уровень которой при небольшом удалении может в 3—4 раза превышать уровень вибросмещения в объемной волне. Кроме того, при наличии резких границ требуется учитывать локализацию энергии из-за отражения в низкоскоростных слоях, что особенно существенно при косом падении. Для реальных условий эта поправка может быть оценена ориентировочным коэффициентом 1,5—3.

Окончательную оценку виброзащитного действия погружения в грунт смог дать эксперимент, который был проведен в окрестности новосибирского Академгородка. В качестве скважинного сейсмографа был выбран разведочный сейсмоприемник СВ-5, частотный диапазон которого расширялся электрической коррекцией [2] до 1,5 Гц. При этом порог чувствительности по смещению равен 0,01 мкм. Для усиления применялась двухкаскадная схема масштабного усилителя на базе интегральной микросхемы К551УД1А с порогом чувствительности  $\leq 0,5$  мкВ. Компенсация действия начального прогиба пружины в горизонтальном положении достигалась электромагнитной силой, создаваемой регулируемым постоянным током, пропускаемым через рабочую катушку сейсмоприемника. Для индикации расположения катушки в центре зазора использовался эффект увеличения электрического импеданса электромеханического преобразователя, наблюдаемый при растормаживании сейсмической системы, когда последняя отходит от упоров. С целью увеличения достоверности измерений сейсмоприемники дублировались для каждого из трех взаимно ортогональных направлений измерения.

Сейсмоприемники помещались в герметически закрытые контейнеры, которые опускались на глубины 2,30 и 60 м. После опускания контейнера кабель ослаблялся, скважина засыпалась грунтом и утрамбовыв-

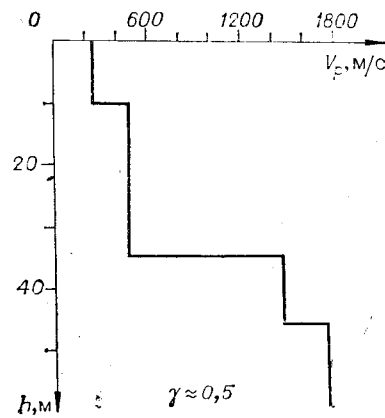


Рис. 3. Скоростной разрез в районе проведения наблюдений (по данным сейсмокаротажа).

валась. До начала измерений не менее месяца выдерживалась естественная усадка грунта. Этим достигалось обеспечение жесткой связи контейнер — грунт, по крайней мере в диапазоне частот до 50 Гц.

Эксперименты проводились в пункте, скоростной разрез которого по данным сейсмокаротажа показан на рис. 3. Разрез не содержит низкоскоростных (волноводных) слоев: градиент скорости положителен по всей глубине. Однако на глубинах 10 и 35 м имеются резкие границы с перепадом скорости в 2 и 2,7 раза соответственно. Менее резкая граница наблюдается на глубине 45 м: перепад скорости в 1,2 раза. Поэтому распространять приведенные выше качественные оценки на такую модель можно чисто условно ввиду отсутствия других оценочных методов.

Информацию о виброзащитных свойствах погружения в глубину грунта можно получить, используя естественный фон микросейсмических сигналов или искусственные зондирующие воздействия — движения транспортных средств, взрывы, удары и т. д. Основной вид зондирующего сигнала — удар стального молота по вкопанной деревянной наковальне. Ударное устройство генерировало импульс силой ~2000—4000 Н с максимумом спектра в полосе 10—20 Гц.

Результаты исследований можно резюмировать следующим образом. При удалении импульсного источника по горизонтали на 30 м от куста скважин для вертикальной компоненты максимум смещения на глубине 30 м по сравнению с той же компонентой на глубине 2 м оказывается меньше в 25—40 раз, а на глубине 60 м — в 70—100 раз. В данной серии экспериментов воспроизводимость результатов была хорошей (взаимная относительная разница не более 10%). Разброс объясняется тем, что при проведении экспериментов изменялись направления ударных воздействий, а результаты сравнения уровней принятых сигналов в зависимости от глубины усреднялись. Такая методика выбрана ввиду сложного строения среды в верхней части разреза, что приводило к сильным изменениям поляризации зондирующей волны.

Сравним экспериментальные цифры с нижними оценками, применимыми к градиентной среде. Длина пути зондирующей волны по криволинейному лучу для контейнера, погруженного на 30 м, в сравнении с приповерхностным контейнером  $R_2/R_1 \sim 1,3$ . Отношение сейсмических скоростей на глубине 30 м и в приповерхностной части грунта  $V_2/V_1 = 500 \text{ м/с}/250 \text{ м/с} = 2$ . Поэтому ожидаемое отношение сигналов  $U_1/U_2 = (R_2/R_1)\sqrt{V_2/V_1} \sim 1,8$ , в то время как эксперимент дает  $U_1/U_2 = 25 \div 40$ . Разница объясняется, видимо, сильным влиянием поверхностной волны и значительным отражением энергии границей, проходящей на глубине 10 м. Для глубин 30 и 60 м разница в пути волны по криволинейному лучу составляет  $R_3/R_2 = 1,6$ , а разница уровней сигнала из-за возрастания волнового сопротивления  $\sqrt{V_3/V_2} = \sqrt{1,8/0,55} = 1,8$ . Это дает нижнюю оценку ослабления сигнала  $U_2/U_3 = 1,6 \cdot 1,8 = 2,9$ . Экспериментальные результаты дают примерно такой же порядок величины ослабления.

При расположении источника вблизи устья скважины вертикальная компонента на глубине 30 м имела уровень в  $U_1/U_2 = 100—200$  раз меньше, чем на глубине 2 м. Для градиентной среды без учета поверхностной волны можно было ожидать  $U_1/U_2 = (R_2/R_1)\sqrt{V_2/V_1} = 15 \cdot 1,4 = 21$ . Объяснить разницу можно эффектом ближней зоны и поверхностной волны. На глубине 60 м вертикальная компонента ослаблена в  $U_1/U_3 = 1500—2000$  раз относительно той же компоненты на глубине 2 м и соответственно в  $U_2/U_3 = 6—10$  раз в сравнении с сигналом на глубине 30 м. Нижние оценки для случая градиентной среды  $U_2/U_3 = (R_3/R_2)\sqrt{V_3/V_2} = 2 \cdot 1,8 = 3,6$ . Разница между оценкой и экспериментальным результатом в  $1,7 \div 2,8$  раза связана, по-видимому, с перераспределением энергии при отражении от резкой границы на глубине 35 м.

Экспериментальные исследования влияния горизонтальной компоненты колебательного смещения при действии импульсного источника

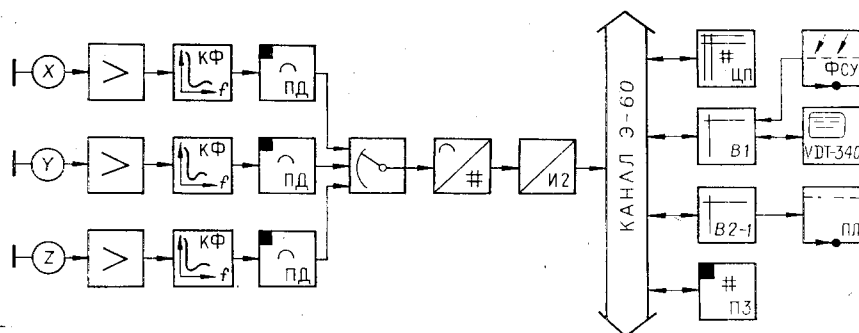


Рис. 4. Измерительная система для статистической обработки микросейсм.

на удалении 30 м от устья скважины дали следующее: по сравнению с уровнем смещения в приповерхностном слое при удалении источника на 30 м в направлении север — юг на глубине 30 м сигнал ослабляется в 10—20 раз и на глубине 60 м — в 40—50. При таком же удалении в направлении запад — восток сигнал на глубине 30 м уменьшается в 20 раз, а на глубине 60 м — в 140—160. Различия, видимо, связаны с сильной анизотропией среды для поперечных волн. Сравнить эти результаты с ожидаемыми оценочными очень трудно, так как параметры разреза для поперечных волн известны с большой погрешностью.

При оценке эффективности действия погружения по отношению к случайным микросейсмическим шумам использованный выше метод записи и анализа коротких реализаций сигнала оказывается неприемлемым ввиду необходимости накопления статистических данных. Единственно реальный путь анализа длительных реализаций, учитывающий необходимость изучения как минимум трех взаимно ортогональных компонент произвольно ориентированного в пространстве вектора смещения — это применение ЭВМ.

Изучение статистических свойств микросейсм связано с обработкой значительных массивов данных. Так, для изучения свойств одной компоненты в полосе частот от 0 до 10 Гц в течение суток потребуется свыше  $10^3$  отсчетов, которые надо зарегистрировать на промежуточном носителе и далее обработать на универсальной ЭВМ. Более целесообразной является предварительная экспресс-обработка результатов измерения в реальном времени с тем, чтобы предельно уменьшить объем информации, передаваемой на дальнейшую обработку. С этой целью создана измерительная система на базе микро-ЭВМ «Электроника-60» (рис. 4). Работа системы состоит в следующем. Сигналы в каждом из трех независимых каналов (X, Y, Z — ориентация) поступают от сейсмоприемников типа СВ-5 на вход усилителя и далее, через пассивный корректирующий RLC-фильтр (КФ), расширяющий полосу исследований до 1,5 Гц в низкочастотную область, на схему пикового детектора (ПД), выделяющего огибающую микросейсмического шума. Выход ПД через коммутатор каналов соединен со входом АЦП типа Ф-7033, выход которого через интерфейсную плату И2 (в комплекте Э-60) связан с микро-ЭВМ Э-60. Для выполнения необходимой экспресс-обработки достаточным является минимальный комплект Э-60, в который входят центральный процессор (ЦП), контроллер B1 для связи ЭВМ с фотосчитывающим устройством типа FS-1501 и пультом оператора типа VDT-340 или «Consul-260», контроллер B2-1 для связи с перфоратором ПЛ-150 и платой ОЗУ типа ПЗ, которые позволяют расширить объем оперативной памяти до 20 К 16-разрядных слов.

Программа обработки предусматривала подсчет распределения микросейсм по уровню огибающей для каждого канала. Распределение подсчитывалось в течение заданного промежутка времени (10—20 мин), при этом анализ изменения уровня микросейсм для вертикальной компоненты колебаний в двух частотных диапазонах (1—5 и 5—10 Гц)

проводился параллельно. Результаты выводились на перфоленту, причем объем регистрируемой информации за сутки для одного канала не превышал 2 Кбайт. Одновременно с результатом обработки на перфоленте автоматически отмечался промежуток времени, к которому относится данное распределение. Дальнейшая программа позволяет усреднить экспериментальные данные за любой период времени. В результате после обработки имеется информация об изменении распределения микросейсм в течение одних суток и среднесуточном распределении. На рис. 5 представлены распределения амплитуд микросейсм для двух частотных диапазонов. Как можно видеть, с вероятностью  $p \sim 0,9$  амплитуды колебаний для полосы частот  $1 \div 5$  Гц лежат ниже  $0,4$  мкм с максимумом на  $0,2$  мкм, а с вероятностью  $p \sim 0,65$  для полосы частот  $5-10$  Гц — ниже  $0,14$  мкм с максимумом амплитуды  $0,07$  мкм. В ходе эксперимента установлено, что статистические характеристики процесса не претерпевают существенных изменений в течение 20-минутного интервала наблюдений. Кроме указанных характеристик, для уточненной оценки распределения микросейсмического шума по частоте проводился анализ энергетического спектра колебаний (при этом из каналов исключались пиковые детекторы).

Для обработки процесса в реальном времени и при невысокой скорости ЭВМ требуется, чтобы метод оценки энергетического спектра допускал простую программную реализацию. Поэтому для оценки спектра мощности использовалось осреднение по ансамблю [3], или, в другой терминологии, осреднение по способу Бартлетта [4]. Этот метод заключается, как известно, в том, что наблюдаемый процесс разбивается на несколько отдельных интервалов, для каждого интервала определяется несглаженная оценка спектра  $S_i^M(f)$  и полученные оценки осредняются.

Известно [4] отношение дисперсий сглаженной оценки спектра мощности по способу Бартлетта  $\bar{S}(f)$  и несглаженной оценки  $\hat{S}(f)$ :

$$\text{Var}[S(f)]/\text{Var}[\hat{S}(f)] = \text{Var}[\bar{S}(f)]/S^2(f) \approx 0,667/k,$$

где  $S(f)$  — оцениваемый спектр,  $k$  — число интервалов, на которые разбивается наблюдаемый процесс.

Относительная ошибка  $\mu = \sqrt{\text{Var}[\bar{S}(f)]}/S(f) = \sqrt{0,667/k}$ . Смещение сглаженной оценки приближенно описывается выражением

$$B(f) = -\frac{1}{M} \int_{-\infty}^{\infty} |u| x(u) e^{-j2\pi u f} du,$$

т. е. смещение обратно пропорционально длине  $M$  интервала разбиения наблюдаемого процесса.

Таким образом, чтобы уменьшить дисперсию оценки, необходимо увеличить число разбиений процесса на интервалы, причем каждый интервал не должен быть слишком коротким, так как при этом возрастает смещение оценки.

Существует три варианта вычислений. В первом варианте можно выполнять все вычисления, связанные с преобразованием Фурье сразу же по мере поступления отсчета. При этом паузы между интервалами  $\Delta T$ , необходимые все же для дополнительных вычислений, производимых со спектром, будут малы. В этом варианте за время, равное шагу дискретизации  $dt$  процесса, нужно проделать вычисления, количество которых пропорционально числу  $M$  оцениваемых точек спектра  $S(f_k)$ ,  $k = 1, \dots, M$ , ( $M_f \leq M$ ). Таким образом, скорость ЭВМ ограничивает минимальное значение  $dt$  и, следовательно, максимальную частоту оценки спектра ( $f \leq 1/dt$ ). Для программы, написанной на языке «Quasik» на ЭВМ «Электроника-60», можно, например, оценить 16 отсчетов спектра в полосе  $0-12,5$  Гц и 128 отсчетов в полосе  $0-2$  Гц.

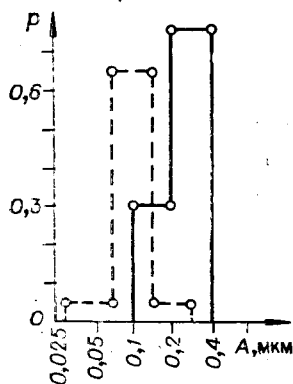


Рис. 5. Распределение амплитуд микросейсм по экспериментальным данным:  
сплошная кривая 1—5 Гц,  
штриховая — 5—10 Гц.

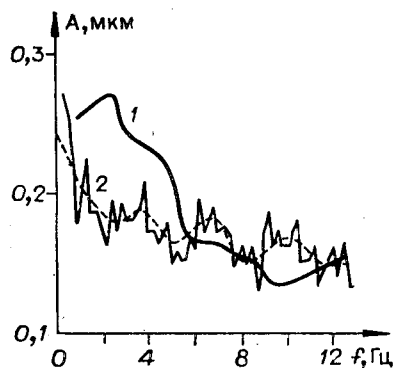


Рис. 6. Энергетический спектр микросейсм для условий эксперимента:  
1 — с погрешностью 50%; 2 — с погрешностью 15%.

Второй и третий варианты основаны на том, что поступающие на вход отсчеты только запоминаются, а все вычисления, связанные с преобразованием Фурье и подсчетом интенсивности процесса, проводятся в паузах  $\Delta T$ . При этом значительно увеличивается отношение  $\Delta T/M$  и неэффективно используется время между отсчетами. Второй и третий варианты отличаются друг от друга тем, что в одном случае преобразование Фурье реализуется с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ), а в другом — обычным методом. Возможны две ситуации, когда невыгодно применять БПФ: во-первых, при  $M \sim 200$  дополнительные вычисления, направленные на переорганизацию процесса, на медленнодействующих ЭВМ уничтожают весь эффект, во-вторых, алгоритмы БПФ по  $M$  точкам временной последовательности определяют обычно  $M$  точек спектра. Если для интерпретации не нужны все  $M$  точек в спектре, то обычный способ расчета может оказаться более эффективным. Для программы с обычным алгоритмом преобразования Фурье, длительность пауз  $\approx 9$  с для 64 отсчетов и 35 с для 128 отсчетов (пропорциональна  $M^2$ ). Для программ с алгоритмом БПФ длина пауз  $\approx 1,7$  с для 64 отсчетов и  $\approx 4,2$  с для 128 отсчетов (язык «Quasik» на «Электронике-60») (пропорциональна  $M \log_2 M$ ).

Таким образом, суммируя все изложенное, можно сделать вывод, что параметры обработки должны удовлетворять двум требованиям:  $M$  и  $k$  нужно выбирать по возможности большими, а общее время обработки  $(Mdt + \Delta T)k$  должно укладываться в промежутке, на котором процесс считается стационарным. Ясно, что нельзя выбрать параметры обработки, предварительно не изучив свойства спектра.

Во втором и третьем вариантах программ возможно в периодах между отсчетами проводить фильтрацию процесса, направленную на устранение эффектов «утечки» [3] с помощью рекурсивных фильтров или заранее рассчитанных сглаживающих временных окон.

Для ЭВМ «Электроника-60» на языке «Quasik» составлена программа, в которой выбор параметров обработки осуществляется следующим образом. По заданной полосе частот, в которой необходимо оценить спектр, определяется шаг дискретизации процесса  $dt$ , который согласуется с минимальным периодом таймера (так, чтобы результирующая полоса частот перекрывала заданную). Затем находится максимально допустимый шаг дискретизации спектра  $df_1$ . Для этого необходимо  $M_1$  отсчетов во временной последовательности. По заданной относительной погрешности  $\mu = \sqrt{0,667/k}$  находится число интервалов  $k$  по заданному общему времени работы — новое значение  $M_2$  и  $df_2$ . Преобразование Фурье осуществляется только в точках, соответствующих  $df_1$  и  $M_1$ , обычным методом в паузах между интервалами.

На рис. 6 представлены зависимости амплитуды микроколебаний грунта от частоты для условий эксперимента. С возрастанием частоты амплитуда колебаний уменьшается, что согласуется с зависимостями на рис. 5.

### ВЫВОДЫ

1. Проведенные в окрестности новосибирского Академгородка экспериментальные исследования позволяют получить информацию об изменении уровня сейсмических сигналов в среде с монотонным возрастанием (от 300 до 2000 м/с) скорости по глубине вплоть до 60 м. Аппроксимация реальной среды подобного типа горизонтально-однородной моделью с постоянным вертикальным градиентом сейсмической скорости дает верхнюю оценку зависимости сейсмического шума от глубины для близкорасположенных источников и нижнюю оценку — для удаленных. С учетом эмпирических зависимостей для уровней поверхностной волны и волны, отраженной на разных уровнях, экспериментальные данные по порядку величины совпадают с приближенными оценками.

2. Экспресс-обработка информации в реальном времени при помощи разработанной измерительной системы на базе микро-ЭВМ «Электроника-60» дает возможность резко сократить объем обработки на конечных этапах получения результатов. Эксперимент показывает, что амплитуда микроколебаний в частотной полосе исследований уменьшается с возрастанием частоты, причем максимальный вес в спектре имеют составляющие с амплитудой 0,2 мкм в полосе  $1 \div 2$  Гц.

3. Избранная методика эксперимента и оценки данных позволяет получить распределение уровня микросейсм по спектру и глубине, что необходимо для выбора наиболее эффективного способа виброзащиты физического оборудования и установок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сейсморазведка: Справочник геофизика.— М.: Недра, 1981, с. 115—123.
2. Гик Л. Д., Карандеев К. Б. Электрическая коррекция виброизмерительной аппаратуры.— Новосибирск: РИО СО АН СССР, 1962.
3. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов.— М.: Мир, 1982.
4. Дженкинс Г., Ватте Д. Спектральный анализ и его приложения.— М.: Мир, 1972, т. 1, т. 2.

*Поступила в редакцию 21 апреля 1983 г.;  
окончательный вариант — 23 августа 1983 г.*

---