

Б. К. КАРАПЕТЯН, С. Г. ШАГИНЯН

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СУГЛИНИСТО-СУПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ

В работе приведены результаты исследования распространения сейсмовзрывных волн в суглинисто-супесчаных грунтах при производстве взрывов на близких расстояниях, а также изучения взаимодействия между грунтом и фундаментом сооружений.

§ 1. ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

Изучением сейсмического эффекта в грунтах при взрыве в СССР стали заниматься в сейсмологическом институте АН СССР более 25 лет тому назад. М. А. Садовским и Ф. А. Кирилловым были указаны основные задачи практического исследования распространения энергии взрыва в грунтах, которые сводятся к изучению зависимости интенсивности колебаний от расстояния до взрыва, веса, глубины, конфигурации и расположения зарядов, а также от рода взрывчатого вещества и плотности его заряжения [1]. Д. Д. Барканом рассматривались зоны воздействия при взрыве в грунте, изучалось влияние заряда на сейсмический эффект и производилась оценка действия сейсмовзрывных волн на сооружения путем расчета сейсмовзрывного воздействия и определения безопасного для сооружения радиуса взрыва [2]. М. А. Садовским проводилось изучение сейсмического воздействия взрывов на грунты и сооружения, в результате чего был предложен способ определения размеров сейсмически опасных зон [3, 4]. Ф. А. Кирилловым было проведено изучение зависимости эффекта взрыва от различных параметров колебаний [5, 6, 7]. Изучение колебаний грунта при различной силе взрыва на близких расстояниях проводилось Д. А. Харином и его сотрудниками, в результате которого получены некоторые закономерности распространения сейсмовзрывных волн в суглинках, подстилаемых мощным слоем глин [8]. С. С. Григоряном была предложена математическая модель деформированного состояния грунтов при динамической нагрузке [9, 10], и на этой основе проведены экспериментальные исследования с целью изучения волн напряжений в мягких грунтах при взрывах [11, 12]. Исследования сейсмического воздействия взрывов проводятся и с целью определения безопасных в сейсмическом отношении зон, а также изучения поведения сооружений, расположенных поблизости от мест взрыва [13, 14, 15]. В последнее время исследования по изучению сейсмовзрывного воздействия на грунты и сооружения получили наибольший размах также вследствие производимых подземных ядерных взрывов [16, 17]. Работы по изучению сейсмического воздействия взрывов также проводятся в США [18, 19] и в других странах.

Задачей проведенного нами экспериментального исследования распространения сейсмических волн в грунтах при взрывах являлось определение параметров колебаний участка, на котором возводились модель

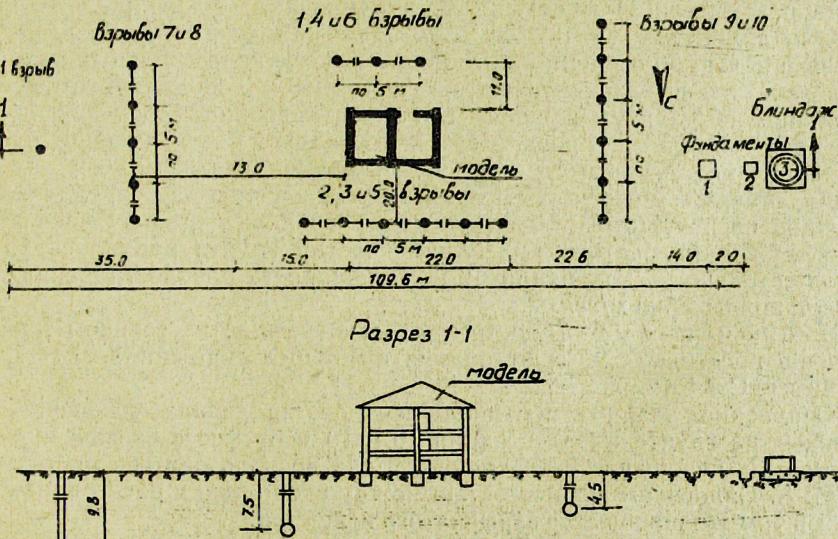
отсека крупноблочного дома в масштабе 1:3 и железобетонное сооружение (блиндаж) диаметром 160 см, высотой 180 см для изучения их поведения при сейсмовзрывном воздействии. Исследование было проведено на участке, расположенном в северо-восточной части г. Ленинакана, на территории строительства больничного городка.

Для освещения вопроса инженерно-геологического строения участка пробурена скважина глубиной 18 м. На основании данных этой скважины, а также пробуренных ранее, можно утверждать, что грунты, слагающие территорию участка, представленные суглинками, супесью, песчаниками, гравием и галькой, маломощны и часто перемежаются между собой. Уровень грунтовых вод находится ниже 14—15 м от поверхности земли. Допускаемая нагрузка на суглинки—2 кг/см.²

Для экспериментов был выбран описанный выше участок, сложенный из суглинисто-супесчаных грунтов, по той причине, что, во-первых, строительство в г. Ленинакане ведется в основном на этих грунтах, которые одновременно являются и наиболее характерными грунтами города; во-вторых, параметры колебаний суглинисто-супесчаных грунтов обеспечивают возможность исследования моделей на сейсмовзрывное воздействие путем соответствующего подбора коэффициентов моделирования; в-третьих, балльность для г. Ленинакана, рекомендуемая Строительными нормами и правилами [20] равной восьми, отнесена к этим грунтам; в-четвертых, участок, где производились замеры, был благоприятным для производства взрывов, поскольку находился на окраине города и на достаточно далеком расстоянии от жилых массивов.

Помимо опорной скважины глубиной 18 м, пройденной с целью выяснения инженерно-геологических условий местности, для производства взрывов на участке были пробурены четыре линии скважин, глубиной 7,5 м, диаметром 132 мм, расположенных на различных расстояниях от сооружений. Генплан участка с указанием сооружений и расположением скважин приведен на фиг. 1.

Поскольку целью проведенного исследования, кроме изучения сейсмических условий участка и вопросов взаимодействия, являлось осу-



Фиг. 1. Генплан участка.

ществление взрывов большой силы, способных вызывать существенные повреждения опытного сооружения (модели) вплоть до его разрушения, необходимо было выбрать рациональную методику производства взрывов. Их следовало производить либо на далеком расстоянии, но сравнительно мощными взрывами, либо на близком расстоянии, но относительно небольшой силы с тем, чтобы не вызвать разрушения породы у основания сооружений. Нами были выбраны взрывы на близком расстоянии от сооружений (11—37 м) единовременно взрываемого заряда 100—300 кг. Для создания возможности взрыва такого количества заряда необходимо было пробурить или глубокие скважины, или создать в сравнительно неглубоких скважинах котлы, вмещающие достаточное количество взрывчатки. Ввиду небольшого расстояния до сооружений, во избежание превалирования вертикальной составляющей сейсмо-взрывного воздействия, взрывание в глубоких скважинах исключалось, и был выбран способ производства взрывов в котлах. Однако был осуществлен и взрыв в скважине, заполненной взрывчаткой на относительно далеком расстоянии (109 м). Взрывы производились в следующей последовательности. Вначале на дне пробуренных скважин размещался патрон взрывчатого вещества весом 1—3 кг и производился взрыв-прострелка с целью образования котла. Далее осуществлялся основной взрыв при размещении ВВ в котлах. Замеры велись как при прострелках, так и при взрывах в котлах, а также в заполненной взрывчатым веществом скважине сейсмоприемниками СПМ-16 и вибрографами ВБП-3 с записью на осциллографах ПОБ-12М и с помощью многомаятниковых сейсмометров АИС-2П. Перед началом опытов была произведена тарировка приборов, построены частотные характеристики и найдены коэффициенты увеличения для ускорений, скоростей и смещений. Ввиду различной силы взрывов, в каждом случае подбирался соответствующий коэффициент загрузления.

§ 2. ДАННЫЕ ПО ОТДЕЛЬНЫМ ВЗРЫВАМ

Первый взрыв (прострелка) произведен в южном направлении на расстоянии 11 м от модели в одиночной скважине глубиной $h=7,5$ м, диаметром $d=132$ мм при количестве взрывчатого вещества $C=3$ кг с целью образования котлов для последующих сильных взрывов.

Вследствие взаимодействия между грунтом и фундаментом сооружения наблюдается уменьшение величины смещения для горизонтальной составляющей в 2,2 раза, а для вертикальной составляющей, наоборот, увеличение смещения в сооружении в 1,46 раза. При этом измерительные приборы на фундаменте были установлены за сооружением, и возможно на результатах эксперимента сказалось экранирующее влияние сооружения. Частота колебаний частиц грунта равнялась 10 Гц, продолжительность колебаний—0,1 сек. Скорость распространения продольной волны—500 м/сек.

Второй взрыв (прострелка) осуществлен в северном направлении на расстоянии 20 м от здания в четырех скважинах ($h=7,5$ м, $d=132$ мм, $C=4 \times 2=8$ кг).

Сравнение величин вертикальных составляющих ускорений, полученных на грунте на расстоянии 10 и 19 м от места взрыва, показывает, что их отношение составляет 3. Если воспользоваться предложенной М. А. Садовским зависимостью между скоростью и расстоянием при одном и том же количестве взрывчатого вещества:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{r_2^{3/2}}{r_1^{3/2}}$$

и принять, что ускорения меняются в такой же зависимости, то для нашего случая получим соотношение 2,62, которое мало отличается от данных эксперимента. Таким образом, можно считать, что для ускорения зависимость от расстояния получается такая же, как и для скорости. Анализ полученных величин смещения грунта показывает, что их вертикальные составляющие на расстоянии 10 и 19 м от взрыва сильно различаются по сравнению с горизонтальными составляющими. Если для вертикальных составляющих это соотношение равно 2,5, то для горизонтальных—1,4.

С целью выяснения фактора взаимодействия при передаче сейсмовзрывной волны от грунта к фундаменту модели, произведено сравнение значений ускорений и смещений. Для вертикальной составляющей получилось уменьшение величины ускорения в 1,73 раза, а для горизонтальной составляющей, наоборот, в сооружении наблюдалось незначительное увеличение ускорения (в 1,09 раза). Изменение величины смещения произошло в сторону его увеличения в сооружении: для горизонтальной составляющей—1,48, а для вертикальной — 1,73. Частота колебаний грунта по смещениям получилась равной 10 гц, продолжительность колебаний—0,3 сек. Частота колебаний по записям ускорений равнялась 20 гц. Таким образом, вследствие различной избирательной способности приборов, записывающих ускорение и смещение, были зафиксированы два значения преобладающих периодов колебаний грунта. Скорость распространения продольной волны—550 м/сек.

Третий взрыв (как и второй) осуществлен в северном направлении на расстоянии 20 м от модели, в двух крайних скважинах ($h=7,5$ м, $d=132$ мм, $C=2\times 2=4$ кг).

Из-за взаимодействия произошло уменьшение горизонтальной составляющей ускорения в 1,08 раза, а вертикальной — в 2,1 раза. Анализ полученных при этом взрыве величин скоростей показывает, что при передаче сейсмовзрывных волн от грунта к фундаменту происходит уменьшение горизонтальной составляющей скорости в 1,77 раза. Величина смещения в сооружении уменьшается для горизонтальной составляющей в 1,15 раза, а для вертикальной—в 1,23 раза. Частота колебаний грунта получилась равной 10—20 герцам; продолжительность колебаний 0,1—0,3 сек. Скорость распространения продольной волны—580 м/сек.

Четвертый взрыв (прострелка) осуществлен в южном направлении на расстоянии 11 м от здания в двух крайних скважинах ($d=7,5$ м, $d=132$ мм, $C=2\times 1,5=3$ кг).

Анализ величин ускорений показывает, что при передаче сейсмовзрывной волны от грунта к фундаменту, вследствие взаимодействия получается уменьшение как горизонтальной, так и вертикальной составляющих в 1,62 раза. При увеличении расстояния в 1,7 раза вертикальная составляющая ускорений грунта уменьшается в 1,8, горизонтальная составляющая скоростей—в 4,4, как горизонтальная, так и вертикальная составляющие смещения—в 1,3 раза. Частота колебаний грунта получилась равной 20 гц, продолжительность—0,3 сек. Скорость распространения продольной волны—445 м/сек.

Пятый взрыв (основной) произведен в северном направлении на расстоянии 20 м от здания в шести скважинах ($h=7,5$ м, $d=132$ мм, $C=6\times 4=240$ кг).

С целью выяснения фактора взаимодействия при передаче сейсмовзрывной волны от грунта к фундаменту произведению сравнение величин ускорений, уменьшение которых для горизонтальной составляющей получилось в 1,03, а для вертикальной — в 1,82 раза. Вертикальная со-

ставляющая скорости уменьшилась в 1,22 раза. Частота колебаний грунта при взрыве получилась равной 10 гц , продолжительность колебаний—0,2 сек, скорость распространения продольной волны—455 м/сек.

Шестой взрыв (основной) осуществлен в южном направлении на расстоянии 11 м от модели в трех скважинах ($h=7,5$ м, $d=132$ мм, $C=3 \times 30 = 90$ кг).

С увеличением расстояния от взрыва в 1,7 раза произошло уменьшение как горизонтальной, так и вертикальной составляющих ускорений в два раза, вертикальной составляющей скорости—в 1,2, горизонтальной составляющей смещения—в 2,3, вертикальной — в 1,3 раза. Сравнение величин ускорений с целью выяснения фактора взаимодействия при передаче сейсмовзрывной волны от грунта к фундаменту здания показало, что для горизонтальной составляющей получилось увеличение ускорения в 1,26 раза, а для вертикальной составляющей—незначительное уменьшение (в 1,05 раза). Сравнение величин вертикальных составляющих скоростей при передаче сейсмовзрывной волны от грунта к фундаменту показывает, что сейсмический эффект уменьшается в 1,5 раза. Изменение величины горизонтальной составляющей смещения произошло в сторону его уменьшения в сооружении в 1,4 раза, а для вертикальной — величина смещения осталась неизменной. Частота колебаний грунта при взрыве колеблется от 2 до 5 и 10 гц , продолжительность колебаний—0,25—0,4 сек. Скорость распространения продольной волны — 515 м/сек.

Максимальные величины приведенного сейсмического ускорения как на фундаменте здания, так и на грунте у здания, получились для маятника с периодом колебаний $T=0,1$ сек, т. е. преобладающим периодом колебаний грунта является 0,1 сек. Это подтверждается и сравнением с периодом колебаний грунта, полученными в результате анализа записей ускорений, скоростей и смещений, при которых найдено, что преобладающая частота грунта равна 0,1 сек. Значения приведенных сейсмических ускорений для всех маятников на грунте получились большей величины, чем на фундаменте здания, т. е. в результате передачи сейсмического воздействия от грунта к сооружению, из-за взаимодействия получается уменьшение величины приведенного сейсмического ускорения. Так, для периодов $T=0,1$, 0,2 и 0,4 сек происходит уменьшение величины горизонтальной составляющей приведенного сейсмического ускорения в среднем на 15, а для периода $T=0,05$ сек—58%.

Седьмой взрыв (прострелка) осуществлен в восточном направлении на расстоянии 13 м от здания в пяти скважинах ($h=7,5$ м, $d=132$ мм, $C=5 \times 1,5 = 7,5$ кг).

При этом взрыве записи во времени не производилось. Имеются лишь данные регистрации приведенных сейсмических ускорений, рассмотрение которых показывает, что если при основных взрывах, максимальные значения приведенного сейсмического ускорения получились для периода $T=0,1$ сек, то в данном случае максимальное значение зарегистрировано маятником, имеющим период $T=0,05$ сек. Кроме того, в отличие от основных взрывов, при прострелке не имелось пиков, характеризующих собой преобладающие периоды колебаний. Из-за взаимодействия между грунтом и фундаментом здания произошло уменьшение на фундаменте горизонтальной составляющей приведенного сейсмического ускорения для $T=0,05$ сек на 70%, для $T=0,2$ сек—8, для $T=0,4$ сек—28%. Для периода $T=0,1$ сек, наоборот, на фундаменте получилось увеличение приведенного ускорения на 13%. Вертикальная составляющая приведенного сейсмического ускорения на фундаменте здания уменьшилась на 80%.

Восьмой взрыв (основной) произведен в восточном направлении на расстоянии 13 м от здания в пяти скважинах ($h=7,5$ м, $d=132$ мм, $C=5 \times 60 = 300$ кг).

Отношение значений горизонтальных составляющих ускорений, полученных на грунте на расстоянии 12 и 22 м от места взрыва, равно 5,05, вертикальных составляющих—1,26. Для скоростей колебаний частиц грунта получилась линейная зависимость от расстояния. При передаче сейсмовзрывных волн от грунта к фундаменту модели произошло уменьшение величины ускорения для горизонтальной составляющей в 1,32, а для вертикальной — в 1,9 раза. Горизонтальная составляющая скорости на фундаменте уменьшилась в 2 раза, горизонтальная составляющая смещения — в 1,15, вертикальная — в 1,2 раза. Частота колебаний грунта получилась равной 2,5 и 10 гц; продолжительность — 0,2—0,5 сек. Скорость распространения продольной волны — 567 м/сек.

Рассмотрение величин приведенных сейсмических ускорений, полученных при этом взрыве, показывает, что пиковое значение получается для периода колебаний $T=0,1$ сек. Отметим, что максимальное значение приведенного сейсмического ускорения при шестом взрыве получилось также при $T=0,1$ сек. Таким образом, при основных взрывах пиковые значения приведенного сейсмического ускорения получились при периоде $T=0,1$ сек, который и является преобладающим периодом колебаний грунта. При прострелочных взрывах для приведенного сейсмического ускорения пикового значения не получилось: кривая имела плавный убывающий характер, т. е. при прострелке не удавалось привести грунтовую массу в такое колебательное состояние, чтобы выявился присущий грунту преобладающий период. Сравнение величин приведенных сейсмических ускорений показывает, что получается уменьшение их значений на фундаменте для $T=0,4$ сек на 10, а для $T=0,5$ сек — 55%.

Девятый взрыв (прострелка) произведен в западном направлении участка, на расстоянии 36,6 м от блиндажа, в шести скважинах ($h=3,9$ — $4,5$ м, $d=132$ мм, $C=6 \times 1 = 6$ кг).

При увеличении расстояния в 1,6 раза произошло уменьшение скорости почти в 4 раза, а именно получилась кубическая зависимость скорости от расстояния. Сравнение величин вертикальных составляющих смещений показывает, что из-за взаимодействия на фундаменте происходит уменьшение в 2 раза. Скорость распространения продольной волны — 519 м/сек.

По полученным величинам приведенных сейсмических ускорений можно определить скорости колебаний частиц грунта по формуле $\tau_i = \frac{2\pi}{T_i} v$ и сравнить с непосредственно замеренной ее величиной, которая равнялась 102 мм/сек. Так, для вертикальной составляющей при $T=0,05$ и $0,1$ сек, соответственно, получаем 130 и 68 мм/сек, т. е. их средняя величина примерно соответствует данным записи во времени.

Десятый взрыв (основной) произведен в западном направлении участка, на расстоянии 36,6 м от блиндажа, в шести скважинах ($h=4,35$ — $4,70$ м, $d=132$ мм, $C=6 \times 44 = 264$ кг).

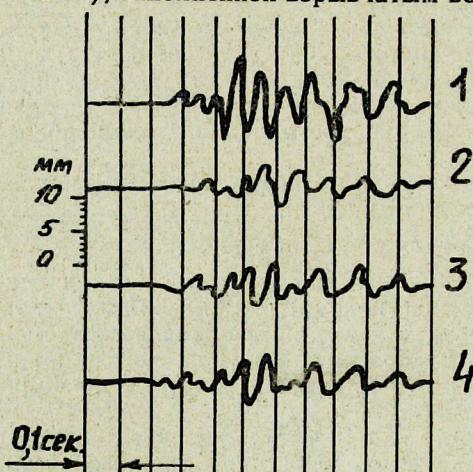
Рассмотрение величин горизонтальной составляющей ускорения грунта и фундамента сооружения показывает, что из-за взаимодействия на грунте происходит уменьшение сейсмовзрывного эффекта на 16%. Величина вертикальной составляющей ускорения при передаче сейсмовзрывного воздействия от грунта к фундаменту осталась неизменной.

С увеличением расстояния от места взрыва в 1,6 раза произошло уменьшение горизонтальной составляющей ускорения в 1,3, а вертикальной — в 1,6 раза. Существенным при этом взрыве является то, что

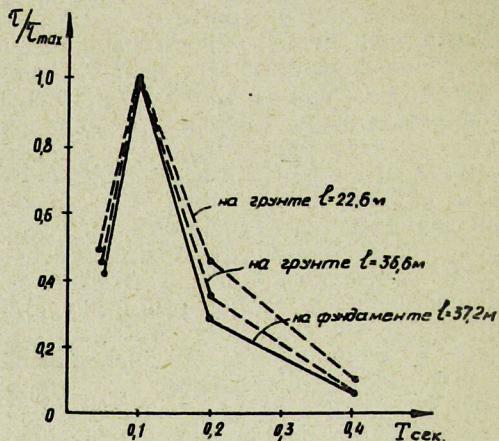
по разнице вступлений представилось возможным определить скорости распространения продольных и поперечных волн. Скорость распространения продольных сейсмовзрывных волн получилась равной $v_{\text{пр}} = 500 \text{ м/сек}$. По разнице во вступлениях продольных и поперечных волн, которая равнялась 0,07 сек определена скорость распространения поперечных волн $v_{\text{поп}} = 256 \text{ м/сек}$. Частота колебаний равна 7—10 гц; продолжительность колебаний 0,3—0,5 сек.

По величинам приведенных сейсмических ускорений, полученных при этом взрыве, построены кривые τ (T), приведенные на фиг. 2. Характерным для этого взрыва, как и для аналогичных двух предыдущих основных взрывов, является пиковое максимальное значение приведенного сейсмического ускорения при $T=0,1$ сек. В результате взаимодействия между грунтом и фундаментом сооружения в основном происходило уменьшение величины приведенного сейсмического ускорения на фундаменте. Кривые τ (T) как для грунта, так и для фундамента имеют примерно одинаковый характер.

Одиннадцатый взрыв произведен в восточном направлении на расстоянии 109,6 м от блиндажа в одиночной скважине ($h=9,8 \text{ м}$, $d=132 \text{ мм}$, $C=82 \text{ кг}$), заполненной взрывчатым веществом.



Фиг. 3. Осциллограмма скорости колебаний грунта при 11-м взрыве. Условные обозначения: 1 — грунт, вертикальная составляющая 95 м; 2 — фундамент, горизонтальная составляющая; 3 — грунт, вертикальная составляющая, 109 м; 4 — фундамент, вертикальная составляющая.



Фиг. 2. Кривая приведенных сейсмических ускорений при 10-м взрыве.

Скорость колебаний частиц грунта на фундаменте сооружения получилась равной 1,9 мм/сек (запись приведена на фиг. 3). При определении скорости по формуле М. А. Садовского получаем 1,7 мм/сек, т. е. разница всего на 10%. Сравнение величин вертикальных составляющих скоростей колебаний частиц грунта на расстояниях, отличающихся в 1,6 раза показывает на их изменение примерно в столько же раз, т. е. имеется линейная зависимость скорости от расстояния. В результате взаимодействия произошло незначительное уменьшение скорости на фундаменте по сравнению с грунтом, что можно объяснить относительной удаленностью взрыва. Анализ данных, полученных при записи смеще-

ний колебаний частиц грунта, показывает, что в результате передачи сейсмовзрывного воздействия от грунта к фундаменту сооружения, происходит увеличение величины смещения примерно на 25%. При этом взрыве наблюдается некоторое увеличение сейсмического эффекта с удалением от точки взрыва, что видимо является результатом наличия поперечно расположенной траншеи на пути распространения сейсмовзрывных волн, образованной от предыдущего взрыва. Частота колебаний получилась равной 5,5—15 Гц, продолжительность колебаний 0,8 сек, скорость распространения продольной волны—451 м/сек.

При этом взрыве представилось возможным определить также логарифмический декремент затухания колебаний частиц грунта, который получился равным $\delta=0,52$.

Сравнение величин приведенных сейсмических ускорений на грунте и на фундаменте сооружения показывает на их уменьшение на фундаменте как для горизонтальной, так и для вертикальной составляющих. Так для горизонтальной составляющей это уменьшение составляет при $T=0,05$ сек—2%, $T=0,1$ сек—18, $T=0,2$ сек—42, $T=0,4$ сек—25%; для вертикальной — при $T=0,05$ сек—87, $T=0,1$ сек—20%. Запись приведенного сейсмического ускорения для $T=0,1$ сек приведена на фиг. 4.

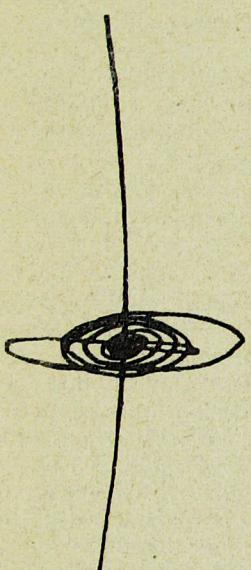
На исследуемом участке перед производством взрывов было осуществлено определение скоростей распространения продольной волны при колебаниях, вызванных ударом от падающего груза. По записи, произведенной в различных точках по линии распространения взрыва определена величина скорости распространения продольной волны, равная 465 м/сек.

§ 3. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования получены данные для четырех различных случаев взрыва, а именно: для взрывов в одиночной скважине; в однорядных (групповых) скважинах различного количества с целью образования котлов (прострелка); в котлах однорядных скважин; в одиночной скважине, заполненной взрывчатым веществом. Сравнение полученных величин ускорений, скоростей, смещений, приведенных ускорений, скоростей распространения сейсмических волн, частоты и продолжительности колебаний производилось для различного количества взрывчатого вещества, расстояния от места взрыва, глубины скважин и др.

Первый и четвертый взрывы произведены при одинаковом количестве заряда (3 кг) и на одинаковых расстояниях от сооружения (14 м), но с той разницей, что первый взрыв был осуществлен в одиночной скважине, четвертый — в двух расположенных скважинах.

Результаты замеров смещений показывают примерно одинаковую величину (0,60 и 0,67 мм). Сравнивая данные, полученные во время третьего и четвертого взрывов, которые были произведены каждый в двух скважинах одинаковой глубины, соответственно при весе заряда 4 и 3 кг и



Фиг. 4. Запись, полученная с помощью АИС-2П при 11-м взрыве (для $T=0,1$ сек).

расстояниях от места взрыва 19 и 14 м, находим, что величины ускорений и смещений мало отличаются. Имеется разница только в значениях скоростей. Определяя скорости по формуле М. А. Садовского

$$v = K \sqrt{\frac{c}{r^3}}$$

и принимая коэффициент К вместо 200 равным 600, получаем разницу от результатов эксперимента на 10—20%. При сравнении данных шестого и десятого взрывов, произведенных соответственно в котлах трех и шести скважин, при количестве заряда 90 и 264 кг на расстояниях 14 и 37 м, получаем разницу в значениях ускорений в 2,9 раза. Вычисленные по формуле М. А. Садовского значения скоростей (при К=200) различаются в 2,6 раза, т. е. полученные экспериментальным путем ускорения имеют примерно такое же соотношение, что и скорости, определенные по формуле. По данным, полученным во время одиннадцатого взрыва, произведенного в скважине глубиной 9,8 м, при количестве заряда 82 кг, на расстоянии 109 м от места взрыва, находим, что скорость колебаний грунта получилась равной 1,9 мм/сек, что отличается от величины скорости, найденной по указанной выше формуле, на 10%.

Таким образом, описанные выше результаты, полученные для различных случаев взрывания, приводят к выводу, что сейсмический эффект при производстве взрывов может быть определен по формуле М. А. Садовского, причем в случае взрывания на рыхление в скважинах и котлах коэффициент К=200 в формуле сохраняется, а при взрывах-прострелках можно принять К=600.

Перейдем к рассмотрению величин приведенных сейсмических ускорений для каждого случая взрывания. При этом произведем сравнение максимальных величин приведенных ускорений τ_{max} , а также средних величин приведенных скоростей:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i T_i}{n}.$$

При взрывах-прострелках в скважинах максимальные значения приведенных сейсмических ускорений получились при $T=0,05$ сек. Значения как горизонтальных, так и вертикальных составляющих максимальных приведенных ускорений и средних приведенных скоростей при одинаковом количестве заряда отличаются примерно вдвое при разнице в расстояниях от места взрыва в 3 раза. При взрывах в котлах скважин максимальные значения приведенных сейсмических ускорений получились при $T=0,1$ сек. Их отношение при шестом и десятом взрывах равно пяти при разнице в количествах ВВ и расстояниях примерно в 3 раза. При взрыве в заполненной скважине максимальное значение приведенного сейсмического ускорения также, как и при прострелках, получилось при $T=0,05$ сек.

Кривые зависимости приведенного сейсмического ускорения от периода для взрывов в скважинах (прострелка и взрыв в заполненной скважине) имеют плавный убывающий характер, близкий к гиперболе; в случае взрыва в котлах плавность кривой нарушается и имеется пиковое значение при $T=0,1$ сек. Для одинаковых случаев взрывов вид кривых τ (T) остается идентичным.

Величины средних приведенных скоростей A , полученных при взрыве в скважине на расстояниях, отличающихся в 1,15 раза, меняются в 1,10 раза, т. е. имеется линейная зависимость A от расстояния. При

сравнении величин приведенных сейсмических ускорений, замеренных при непосредственных записях с помощью сейсмометров, с данными, найденными [20] по формуле:

$$\zeta_i = \frac{2\pi}{T_i} v,$$

получаем близкие значения для периода $T=0,4$ сек, что можно объяснить более длинным периодом колебаний суглинисто-супесчаных грунтов по сравнению со скальными породами, для которых это соотношение справедливо при коротких периодах.

При прострелке в скважинах в основном наблюдается уменьшение горизонтальной составляющей сейсмовзрывного воздействия для всех параметров колебаний; при их передаче от грунта к фундаменту сооружения — до 80%, в единичных случаях имеется обратное соотношение, т. е. незначительное увеличение сейсмического эффекта на фундаменте сооружения. При основных взрывах в котлах и в заполненной скважине из-за взаимодействия сейсмический эффект на фундаменте сооружения уменьшается до 55%. По показаниям АИС-2П, имеющих маятники с различными периодами колебаний (приближенно моделирующих сооружения), представилось возможным определить влияние фактора взаимодействия для сооружений различной жесткости. Так для периода $T=0,05$ сек уменьшение сейсмического воздействия на фундаменте составляет 55—70, для $T=0,1—0,4$ сек — 10—40%.

Экспериментально также были замерены скорости распространения продольных, а также поперечных волн в грунте, вызванных взрывом и ударом от падающего груза. Величина скорости распространения продольной волны в грунте, полученная при взрывах, колеблется в пределах $v_{\text{пр}} = 450—580$ м/сек; скорость распространения поперечной волны $v_{\text{поп}} = 256$ м/сек. При ударе скорость распространения продольных волн получилась равной $v_{\text{пр}} = 470$ м/сек. Таким образом, скорости распространения продольных волн при взрывах получились большей величины по сравнению с ударами даже без учета глубины заложения заряда в скважине. Однако, при учете истинного расстояния от очага взрыва до места установки прибора скорость распространения сейсмовзрывных волн возрастает незначительно (в пределах 10%). Увеличение скорости распространения при взрывах по сравнению с ударом от падающего груза следует объяснить тем обстоятельством, что при взрывах в колебания вовлекаются более глубокие, а следовательно, и более твердые слои грунта. Экспериментальным путем была определена длина волн, которая равняется 51 м.

По записям при одном из взрывов имелась возможность определить логарифмический декремент затухания колебаний частиц грунта, который получился равным $\delta = 0,52$.

Преобладающий период колебаний грунта при взрывах-прострелках получился равным $T=0,05—0,10$ сек, продолжительность колебаний — 0,3 сек; при взрыве в скважине, заполненной взрывчаткой $T=0,07—0,18$ сек, продолжительность колебаний — 0,8 сек; при взрывах в котлах $T=0,10$ и $0,2—0,5$ сек, при продолжительности колебаний до 0,5 сек. Полученные периоды колебаний являются характерными для грунтов участка, где были проведены исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Садовский, Ф. А. Кириллов. Сейсмический эффект взрывов и современное состояние его изучения. «Взрывное дело», № 37, М.—Л., 1939.

2. Д. Д. Баркан. Сейсмовзрывные волны и действие их на сооружения. Стройиздат, М., 1945.

3. М. А. Садовский. Оценка сейсмически опасных зон при взрывах. Тр. сейсмолог. ин-та АН СССР, № 106, М.—Л., 1941.
4. М. А. Садовский. Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов, Изд-во АН СССР, М.—Л., 1946.
5. Ф. А. Кириллов. Влияние глубины взрыва на сейсмический эффект. Тр. сейсмолог. ин-та АН СССР, № 106, М.—Л., 1941.
6. Ф. А. Кириллов. Зависимость периода колебаний от расстояний. Тр. сейсмолог. ин-та АН СССР, № 117, М.—Л., 1945.
7. Ф. А. Кириллов. Сейсмический эффект взрыва. Тр. Сейсмолог. ин-та АН СССР, № 121, М.—Л., 1947.
8. Н. В. Кузьмина, А. Н. Ромашов, Б. Г. Рулев, Д. А. Харин и Е. И. Шемякин. Сейсмический эффект взрывов на выброс в нескольких связанных грунтах. Тр. Ин-та физики Земли АН СССР, № 21 (188), М., 1962.
9. С. С. Григорян. Об общих уравнениях динамики грунтов. АН СССР, т. 124, № 2, 1959.
10. С. С. Григорян. Об основных представлениях динамики грунтов. Прикладная математика и механика, т. 24, 1960.
11. В. Д. Алексеенко, С. С. Григорян, А. Ф. Новгородов, Г. В. Рыков. Некоторые экспериментальные исследования по динамике мягких грунтов. АН СССР, т. 133, № 6, 1960.
12. В. Д. Алексеенко, С. С. Григорян, Л. И. Кошелев, А. Ф. Новгородов, Г. В. Рыков. Измерение волн напряжений в мягких грунтах. Ж. прикладной механики и технической физики, № 2, 1963.
13. С. В. Медведев. Поведение сейсмостойких гражданских зданий при действии взрыва. Тр. Сейсмолог. ин-та АН СССР, № 126, М., 1947.
14. С. В. Медведев и Г. А. Лямин. Сейсмический эффект взрывов на руднике. Тр. Ин-та физики Земли АН СССР, № 21 (188), М., 1962.
15. Б. К. Карапетян. Обеспечение сохранности сооружений при производстве взрывов. Сб. технической информации Министра Арм. ССР, № 3, Ереван, 1958.
16. П. П. Пасечник, С. Д. Коган, Д. Д. Султанов и В. И. Цибульский. Результаты сейсмических наблюдений при подземных ядерных и тротиловых взрывах. Тр. Ин-та физики Земли АН СССР, № 15 (182), М., 1960.
17. Н. Кейлис-Борок. Различие спектра поверхностных волн при землетрясениях и подземных взрывах. Тр. Ин-та физики Земли АН СССР, № 15 (182), М., 1960.
18. D. E. Hudson, I. L. Alford and W. D. Iwan. Ground accelerations caused by large quarry blast. Bull. of the Seismological Society of America, vol 51, № 2, 1961.
19. Л. Дон Лит. Сейсмическое действие взрыва, Госгортехиздат, М., 1963.
20. Строительные нормы и правила. СНиП П-А. 12—62, М., 1963.
21. А. Г. Назаров. Метод инженерного анализа сейсмических сил, Изд-во Арм. ССР, Ереван, 1959.

Институт геофизики и инженерной сейсмологии
АН Армянской ССР.