

С.В. Мишин

(Северо-Восточный комплексный НИИ им. Н.А. Шило ДВО РАН;
e-mail: mishin@neisri.ru)

О СЕЙСМИЧЕСКОМ ДЕЙСТВИИ ВЗРЫВОВ

Анализируются результаты экспериментов по регистрации сейсмического действия взрывов. Предпринята попытка провести сравнительную оценку сейсмических сигналов, порождаемых ударами и взрывами. Материал может быть полезен при решении проблем техносферной безопасности.

Ключевые слова: взрыв, кинетическая энергия, сейсмическое излучение.

S.V. Mishin

ABOUT SEISMIC ACTION EXPLOSIONS

The results of the experiments on recording seismic actions explosions are analyzed. A comparative assessment of seismic signals generated by shocks and explosions. The material can be helpful in solving the problems of technosphere safety.

Key words: explosion, kinetic energy, seismic radiation.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 31 марта 2014 г.

Эквивалентные сейсмограммы удара и взрыва

Навеска дымного охотничьего пороха массой 1 г помещается в капроновую трубку вместе с двумя проводками, соединёнными тонкой константановой проволокой. Эти проводки представляют собой запал, при подаче на который напряжения 200 В с конденсатора тонкая проволока сгорит и воспламенит окружающий её порох. Капроновая трубка с зарядом и запалом помещается в углубление стальной болванки и производится взрыв заряда пороха массой 1 г. Сотрясение от взрыва регистрируется сейсмоприёмником. На рис. 1б представлена сейсмограмма такого взрыва. Затем делается попытка получить сейсмограмму удара тяжёлого тела по этой же болванке, которую можно было бы считать эквивалентной сейсмограмме взрыва (то есть амплитуды сигнала и его частотный состав должны быть сопоставимы).

Процесс взрывного химического превращения сопровождается возбуждением сейсмического излучения. Энергия химического превращения 1 г дымного пороха – 2500 Дж (взрывное превращение метательных **взрывчатых веществ (ВВ)** – порохов – протекает в виде горения). Скорость горения заряда – 3 км/с, то есть если длина заряда составляла 3 см, то время его сгорания – 10^{-5} с. Предположим, что вся химическая энергия взрывной реакции перешла в кинетическую энергию её продуктов.

Связь кинетической энергии E с импульсом P выражается соотношением $E = P^2/2M$. Отсюда $P_{вз} = \sqrt{2ME}$, где $P_{вз}$ – импульс, переданный среде при взрыве, M – масса заряда, равная массе продуктов взрывного превращения, E – химическая энергия взрыва. Для 1 г пороха значение переданного импульса составит 2,2 кгм/с.

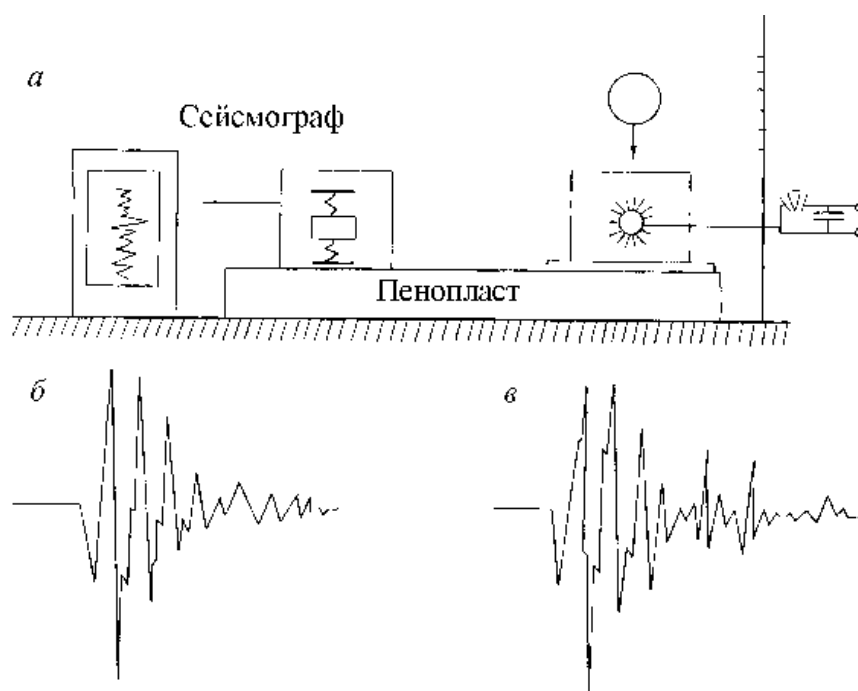


Рис. 1. Получение эквивалентных сейсмограмм взрыва и удара:
а – схема установки для регистрации сейсмических сигналов ударов и взрывов;
б – сейсмограмма взрыва заряда дымного пороха массой 1 г ($E = 2500$ Дж);
в – сейсмограмма удара при падении гири массой 0,5 кг с высоты 1 м ($E = 5$ Дж)

При ударе потенциальная энергия массы mgh в результате свободного падения переходит в кинетическую, то есть $mgh = P_{уд}^2/2m$. Отсюда $P_{уд} = m \cdot \sqrt{2gh}$, то есть импульс, переданный при ударе, равен ударяющей массе, умноженной на квадратный корень из удвоенного произведения ускорения свободного падения на значение высоты падения. В качестве ударяющего тела выбрана полукилограммовая гиря. С какой высоты она должна упасть, чтобы среда получила 2,2 кгм/с механического импульса. Из предыдущего равенства получено, что $h = P^2/m^2/2g = 1$ м, то есть для того, чтобы при ударе среда получила 2,2 кгм/с импульса, полукилограммовую гирю следует уронить с высоты 1 м. Проведя такой удар по болванке, в которой взрывался порох, получают сотрясение, зарегистрированное на сейсмограмме (рис. 1в).

Сопоставляя полученные сейсмограммы, следует отметить их подобие и примерное равенство амплитуд, несмотря на удивительное обстоятельство – энергии процессов взрыва и удара различаются в 500 раз (во столько же раз различаются массы). Это один из экспериментов, которые позволяют заключить, что сейсмическое излучение представляет собой распространение механического импульса в сплошной среде [2].

При проведении таких опытов оказалось, что сотрясения при ударах возбуждаются практически одинаково, а сотрясения при взрывах варьируют по интенсивности в пределах до 25 %. Такого рода опыты достаточно просты и чрезвычайно убедительны.

Распространение пакета излучения

Сейсмическое событие, связанное со взрывом, можно оценивать следующими параметрами: энергия взрыва $E = MK$ (произведение массы заряда M на энергетический эквивалент единицы массы взрывчатки K); переданный в среду импульс $P = \sqrt{2ME} = M \sqrt{2K}$; во время взрыва на стенки зарядной камеры действует ньютоновская сила $F = dP/dt \approx P/\Delta t_{\text{вз}}$ (среднее значение силы можно оценить отношением переданного импульса P к длительности взрыва $\Delta t_{\text{вз}}$, а эта длительность определяется отношением длины заряда L к скорости детонации ВВ v_d : $\Delta t_{\text{вз}} = L/v_d$). Распространяющееся из пункта взрыва сейсмическое излучение (количество движения) создаёт на фронте сейсмическое давление, которое грубо можно оценить отношением значения силы F к поверхности фронта излучения на расстоянии R от **пункта взрыва (ПВ)**:

$$f = F/4\pi R^2.$$

Именно это давление производит необходимое действие взрыва в ПВ и создаёт ненужные в большинстве случаев сотрясения на расстоянии от ПВ.

Сформированный в процессе взрыва пакет сейсмического излучения (механического импульса) распространяется в окружающей среде в виде сферического слоя со скоростью сейсмических волн (из-за неоднородности среды поверхность фронта излучения, разумеется, отличается от правильной сферы, но здесь речь идёт об упрощённой модели). Значение импульса остается постоянным, а поверхность сферического слоя непрерывно увеличивается, отчего плотность импульса на поверхности фронта излучения непрерывно падает. **Плотность импульса** на единицу площади фронта на расстоянии R от пункта взрыва можно оценить значением:

$$G = P/4\pi R^2 \text{ (кгм/с/м}^2\text{)}.$$

При передаче импульса от одних частиц среды другим действуют ньютоновские силы $F = dP/dt$, поэтому фронт излучения создаёт **давление** на окружающую среду

$$N = dG/dt \text{ (Н/м}^2\text{)}.$$

Именно давление волнового фронта создает известные сейсмические эффекты – движение массивных тел, разрушение строений и пр. Величина давления зависит от плотности импульса на поверхности фронта излучения и от длины волны излучения (времени нарастания импульса в процессе взрыва). В очаге продолжительность взрыва можно оценить временем детонации заряда:

$$\Delta t = L/v_p,$$

где L – длина блока;

v_p – скорость детонации ВВ.

В процессе распространения импульса в неоднородной среде, возможно, волновой пакет изменяется, становится более пологим, поэтому при оценках величины сейсмического давления N можно использовать время нарастания амплитуды первого вступления на сейсмограмме (четверть первого периода колебаний) в качестве средней **продолжительности действия** фронта τ . Тогда средняя величина давления фронта на окружающую среду на расстоянии R от очага составит:

$$f = G/\tau.$$

На рис. 2 представлена номограмма, позволяющая графически оценивать значения параметров процесса сейсмического действия взрыва.

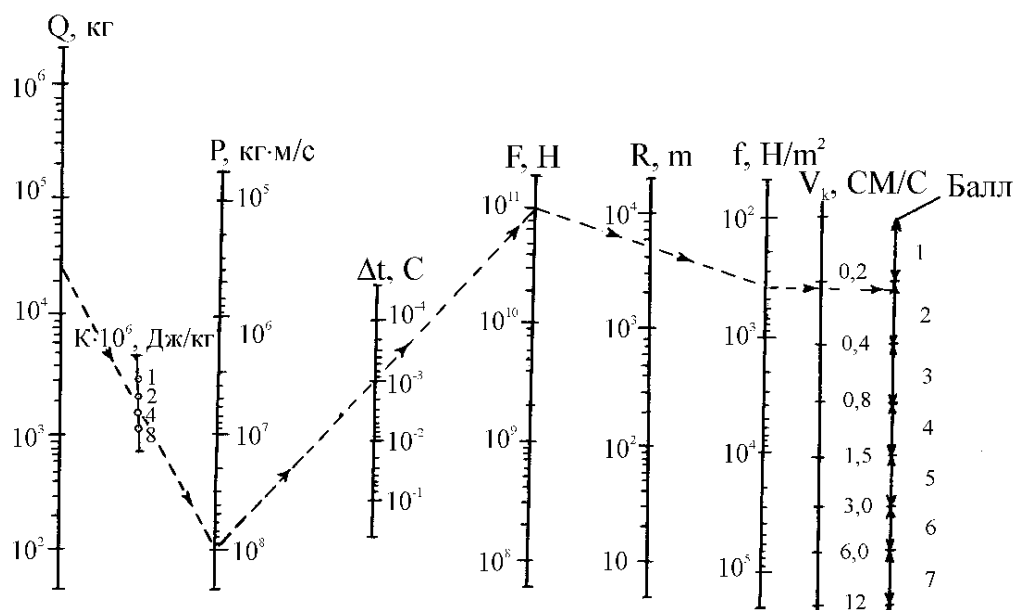


Рис. 2. Номограмма для оценки параметров процесса сотрясения при взрыве

На левой вертикали определяется величина заряда ВВ. Следующая вертикаль – энергетический эквивалент взрывчатки. Проводя прямую через значения массы заряда и энергетический эквивалент, определяется значение импульса (количества движения), соответствующего взрыву. Подсчитав значение времени взрыва $\Delta t = L/v_d$ (L – длина заряда, v_d – скорость детонации ВВ), через точку на вертикали Δt и точку на шкале импульса проводится прямая, определяется среднее значение **ньютоновской силы** F , действующей в гипоцентре взрыва. Ньютоновская сила, как и импульс, уменьшается с квадратом расстояния от пункта взрыва. Проводя прямую через выбранные значения на шкалах силы F и расстояния R , определяют давление f на выбранном расстоянии от пункта взрыва. Именно это давление определяет скорость смещения частиц грунта V и величину балла сотрясения по шкале *MSK-64*.

Пример анализа промышленного взрыва

Рассматриваются результаты регистрации сотрясений от промышленного взрыва, проведенного в карьере рудника "Дукат" в Магаданской области. Был проведен взрыв заряда граммонита массой 92950 кг.

Заряд распределен по 6 ступеням, максимальный заряд в ступени 27400 кг. Регистрация проводилась на лестничной клетке жилого дома, удаленного от пункта взрыва на 4700 м, сейсмоприемники располагались на грунте перед зданием, на площадке 1 этажа и на площадке 5 этажа. На рис. 3 приведены сейсмограммы сотрясений грунта и 5 этажа дома.

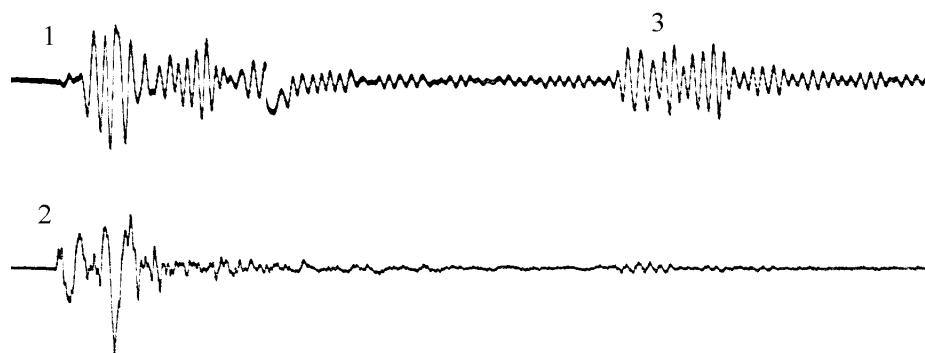


Рис. 3. Сейсмограммы сотрясений жилого дома при взрыве в карьере рудника "Дукат":
1, 2 – сейсмические сигналы, 3 – воздушная волна

На рис. 2 пунктирная линия соответствует параметрам процесса сотрясения при этом взрыве. Взрыв группового короткозамедленного заряда общей массой 93 тонн ВВ считается эквивалентным взрыву единовременного заряда массой 27 тонн. При значении энергетического эквивалента граммонита $K = 4,2 \cdot 10^6$ Дж/кг при взрыве формируется пакет сейсмического излучения, переносимый импульс (количество движения) $P \approx 10^8$ кг м/с. Полагая время взрыва $\Delta t \approx 10^{-3}$ с, определяется сила, действующая на стенки взрывной камеры. Эта величина составляет $F \approx 10^{11}$ Н. На расстоянии 4700 м от пункта взрыва сейсмическое излучение создаёт давление $f \approx 500$ Н/м². Такое давление соответствует сотрясению в 2 балла по шкале MSK-64. Результат регистрации подтвердил, что взрыв не приводит к опасным сотрясениям [3].

Моделирование результатов сейсмического действия взрыва

Можно моделировать ожидаемое сейсмическое воздействие промышленного взрыва на какое-то сооружение, располагающееся на известном расстоянии от готовящегося взрыва. Модель воздействия представляет собой удар при свободном падении выбранного груза массы $m_{y\partial}$ с выбранной высоты h на расстоянии r от сооружения. Масса груза и высота падения выбираются так, чтобы сейсмическое давление, возникающее вследствие удара в выбранной точке, было эквивалентно давлению ожидаемого взрыва, проводящемуся на расстоянии R . Взрыв заряда массой M длиной L формирует сейсмическое давление N на расстоянии R в соответствии с выражением:

$$N \approx Mx \sqrt{(2K)/\Delta t_{\partial 3}/4\pi R^2} \quad (\text{где } \Delta t_{\partial 3} = L/v_d).$$

Удар груза массой m , падающего с высоты h , на расстоянии r от выбранной точки, создаёт давление N_1 в соответствии с выражением:

$$N_1 \approx mx \sqrt{(2gh)/\Delta t_{y\partial}/4\pi r^2}.$$

Для того, чтобы моделировать силу ожидаемого взрыва, надо выполнить удар так, чтобы давления в выбранной точке оказались одинаковыми. Поэтому удар следует проводить на расстоянии от точки, соответствующем выражению:

$$r = R \times \sqrt{m/M \times \Delta t_{\text{уд}} / \Delta t_{\text{вз}}} \times \sqrt{gh/K}.$$

Схему такого моделирования иллюстрирует рис. 4.

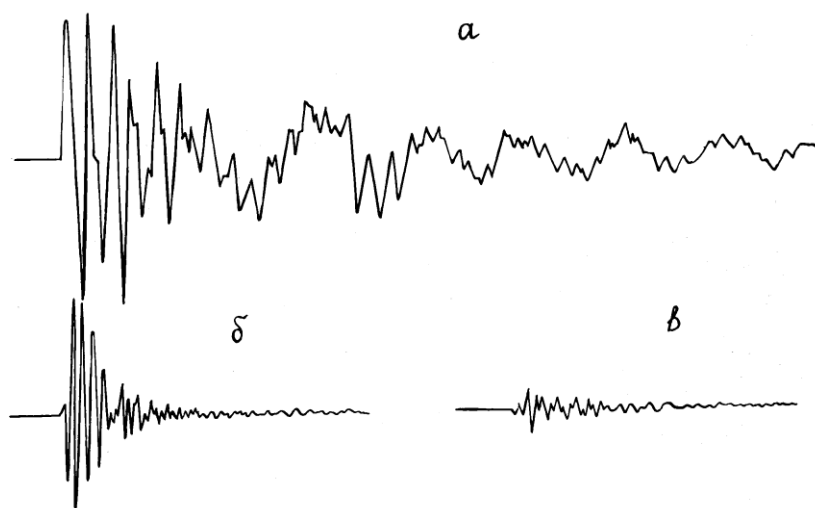


Рис. 4. Сейсмограммы сотрясений при промышленном взрыве и при калибровочных ударах:

- а* – взрыв 6 тонн граммонита на расстоянии 1 км от сейсмоприёмника СМ-3;
- б* – удар при падении массы 9 кг на расстоянии 4 м от прибора;
- в* – такой же удар на расстоянии 10 м

Сейсмограммы модельного удара и промышленного взрыва в большинстве случаев различаются частотным составом, так как длительности процессов удара и взрыва различны. Модельное воздействие можно приблизить к ожидаемому воздействию взрыва, используя в качестве модели, например, торможение тяжёлого грузовика.

В качестве практического применения таких оценок можно рассчитать размеры металлической ёмкости, которой можно закрыть заряд взрывчатки (например, оставленного террористом взрывного устройства), чтобы обезопасить окружающих от его действия. Так как давление частиц обратно пропорционально расстоянию до заряда, то, если прикрыть заряд полусферой, выполненной из достаточно прочного материала, заряд внутри полусферы может быть взорван достаточно безопасно. Например, полусфера, выполненная из стальной проволоки радиусом 0,5 м, может обезопасить взрыв килограммового заряда тротила.

Заключение

Проведённые эксперименты позволяют заключить, что при взрыве заряда вся химическая энергия взрывчатки переходит в кинетическую энергию продуктов реакции. Масса продуктов реакции приобретает механический импульс, который распространяется в среде в виде пакета сейсмического излучения. Фронт излучения создает давление на окружающую среду, которое приводит к разрушению массивных тел и их перемещению в пространстве.

Литература

1. *Суханов А.Ф., Кутузов Б.Н.* Разрушение горных пород взрывом. М: Недра, 1983. 340 с.
2. *Мишин С.В.* О физике сейсмических процессов. LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 196 с. <http://www.lap-publishing.com>.
3. *Липцис Г.Я., Мишин С.В., Шищенко А.П.* Регистрация сотрясений от промышленных взрывов // Колыма. 1991. № 1. С. 17-20.
4. *Цейтлин Я.И., Смолий Н.И.* Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. М.: Недра, 1981. 190 с.
5. *Федоренко П.И.* Буровзрывные работы. М.: Недра, 1991. 272 с.