

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗОК В МЯГКИХ ГРУНТАХ НА ИНЖЕНЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Л. И. Кошелев, Н. Н. Попов, П. И. Ярцев
(Москва)

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проблема расчета инженерных конструкций на действие взрыва в грунте за последние годы получила большое развитие. Особенное внимание было привлечено к исследованию процессов распространения взрывных волн в грунте и определению их параметров. Вопросы взаимодействия взрывных волн в грунте с конструкциями исследованы в меньшей степени и являются более сложными, поэтому применение точных методов динамического расчета конструкций на действие взрывных волн в грунтах во многих случаях представляет известные трудности.

В силу этого, наряду с разработкой точных методов расчета, представляет интерес метод, который позволил бы определять деформации и напряжения, вызываемые в конструкции взрывом в грунте, одним из обычных способов, хорошо известных инженерам. Этому условию удовлетворяет метод расчета, в котором определяется эквивалентная действию взрыва статическая нагрузка, поскольку расчет конструкции на эту нагрузку может выполняться обычными приемами строительной механики. Методы определения эквивалентных действию взрыва статических нагрузок на конструкции в воздухе, по данным о параметрах воздушных ударных волн, общеизвестны.

Разработка теоретическим путем метода определения эквивалентных действию взрыва в грунте нагрузок по данным о параметрах взрывных волн — задача большой трудности. Она осложняется тем, что грунт является не только средой, передающей взрывные нагрузки на конструкцию, но также и средой, участвующей в работе конструкции. В воздухе под воздействием мгновенного взрывного импульса конструкция совершает относительно длительное время свободные затухающие колебания (рис. 1, а), в грунте, при воздействии импульса той же длительности, колеба-

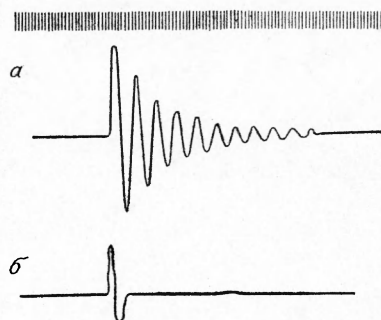


Рис. 1. Осциллограммы колебаний балочных конструкций; по оси абсцисс отложено время, масштаб которого отмечен черточками через 0,002 сек, по оси ординат — скорость деформирования конструкций в середине пролета.

ния конструкции затухают значительно быстрее, а во многих случаях носят характер аperiodического смещения (рис. 1, б).

В настоящей работе для выработки необходимых практических рекомендаций величины эквивалентных нагрузок были получены опытным путем, при этом исследовалось влияние на величину эквивалентной нагрузки как параметров взрыва, так и динамических свойств конструкции. Для получения зависимостей по определению расчетных эквивалентных действию взрыва в грунте статических нагрузок авторами было проведено специальное экспериментальное исследование по методике, позволяющей непосредственно из опытов устанавливать эквивалентные нагрузки.

В качестве прибора для определения эквивалентных нагрузок использовались балочные конструкции, устанавливаемые в специальных стендах. По прогибам, вызванным действием взрыва в грунте, определялись величины эквивалентных действию взрыва статических нагрузок. Экспериментальная зависимость, определяющая величины эквивалентных действию взрыва в грунте нагрузок, была установлена по результатам модельных опытов с малыми зарядами и затем проверялась опытами с относительно большими зарядами.

МОДЕЛЬНЫЕ ОПЫТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ НАГРУЗОК

Исследовалось влияние на величину нагрузки следующих параметров: веса заряда (C), расстояния от центра заряда до преграды (R), глубины заложения заряда (h), угла встречи волны взрыва с преградой (β), частоты собственных колебаний преграды (ω), свойств грунта

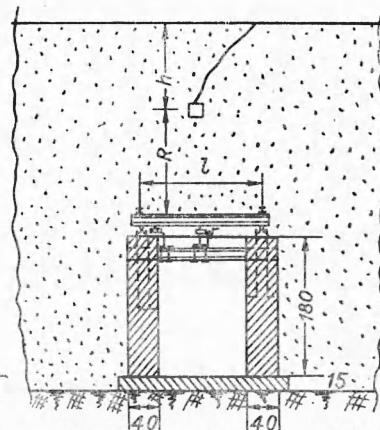


Рис. 2. Схема опытов и стенд для испытания горизонтальной балочной преграды.

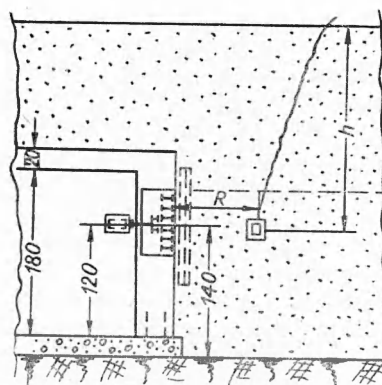


Рис. 3. Схема опытов и стенд для испытания вертикальной балочной преграды.

(рис. 2, 3). Эти параметры в модельных опытах изменялись в следующих пределах: C — от 0,2 до 1 кг, R — в пределах от 15 до 60 радиусов заряда r_0^1 , h — от 0 до 50 радиусов заряда, β — от 0 до 75° , ω (в воздухе) — от 480 до 4550 1/сек. Грунт брался трех категорий: насыпной песок естественной влажности, уплотненный трамбованием и взрывами

¹ Средний радиус заряда $r_0 = 0,053 \sqrt[5]{C}$, где C — вес тротилового заряда в кг.

до плотности, близкой к естественной; песок, насыщенный водой; глина естественной влажности. Все опыты проводились с горизонтальной и вертикальной преградами, с балками пролетом $l=1,0$ и $1,5$ м из двутавров № 16, 18 и 22 и швеллера № 20; заряды — тротилловые.

Прогибы балок измерялись в середине и в четверти пролета. Для их измерения использовались механические и магнитоэлектрические приборы. Показания магнитоэлектрических прогибомеров фиксировались на осциллограммах.

По опытным данным были подсчитаны для каждого опыта эквивалентные действию взрыва статические нагрузки с учетом неравномер-

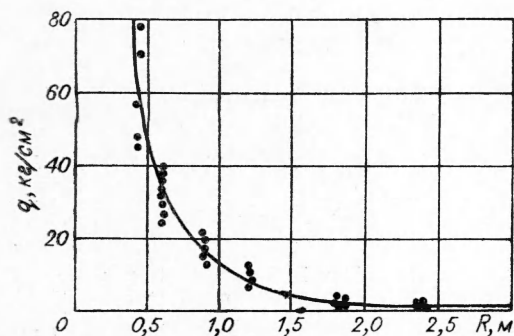


Рис. 4. Результаты опытов по исследованию $q(R)$ с зарядами весом 0,2 кг.

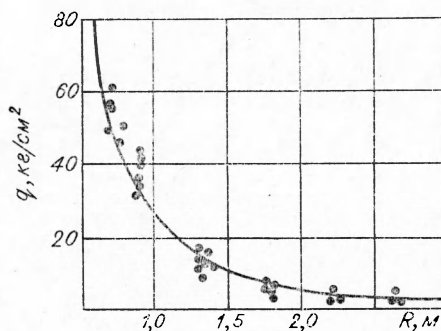


Рис. 5. Результаты опытов по исследованию $q(R)$ с зарядами весом 0,6 кг.

ности распределения нагрузки по пролету, и построены экспериментальные кривые, позволяющие оценить влияние на величину эквивалентной нагрузки исследуемых параметров.

На рис. 4, 5, 6 даны экспериментальные кривые зависимостей эквивалентных нагрузок от расстояния центра взрыва до преграды, по данным опытов с горизонтальными и вертикальными преградами с балками пролетом $l=1$ м из двутавра № 18.

В результате обработки данных опытов получена зависимость эквивалентной нагрузки от веса заряда и расстояния от центра взрыва в виде

$$q = D \frac{C^{2/3}}{R^2}. \quad (1)$$

Такие же графики были построены для опытов с балками из двутавра № 18 пролетом $l=1,5$ м и балок пролетом $l=1,0$ и $1,5$ м из двутавров № 16, 22 и швеллера № 20. Они также подтвердили зависимость (1).

Для опытов с балками различной жесткости и пролета был определен коэффициент D , он оказался различным, при этом была отмечена прямая пропорциональная зависимость коэффициента D от частоты низшего тона собственных колебаний конструкции в воздухе (рис. 7).

По совокупности 249 опытов с балками различной жесткости и пролета, с зарядами различного веса и расстояниями от преграды в песках естественной влажности была построена на рис. 8 экспериментальная зависимость $q=q(C, R, \omega)$ и получена формула:

$$q = K_{\text{гр}} \frac{C^{2/3}}{R^2} \omega, \quad (2)$$

где q , C , R , ω имеют размерность такую, как на рис. 7.

Коэффициент $K_{гд}$, по данным 249 опытов для песка естественной влажности, оказался равным 0,011, при этом среднеквадратичное отклонение было 21,6%. По результатам специально проведенных опытов для песка, насыщенного водой, $K_{гд} = 0,013$, для глины естественной влажности — 0,014.

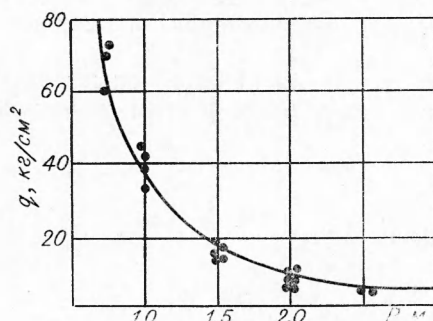


Рис. 6. Результаты опытов по исследованию $q(R)$ с зарядами весом 1,0 кг.

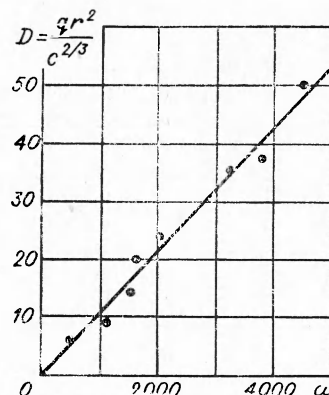


Рис. 7. Зависимость эквивалентной нагрузки от частоты

низшего тона собственных колебаний конструкции в воздухе. Каждая точка — средний результат опытов с балкой данного пролета и жесткости (q в кг/см^2 , r в м , C в кг , ω в $1/\text{сек}$).

Опыты по изучению влияния глубины заложения заряда на величину эквивалентной нагрузки проводились в песке естественной влажности с зарядами весом 200 г, при расстоянии 0,6 и 0,9 м, что соответствует 20 и 30 r_0 , с балками из двутавра № 18 пролетом $l = 1,0$ и 1,5 м (рис. 9, 10).

Анализ результатов опытов по изучению влияния глубины заложения заряда на величину, эквивалентную действию взрыва статической нагрузки, позволяет сделать следующие выводы:

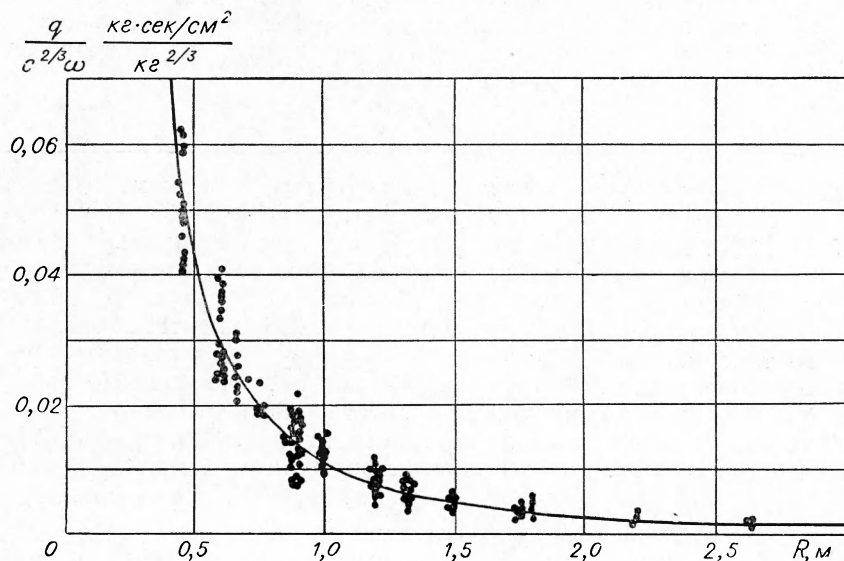


Рис. 8. Обобщенная кривая зависимости нагрузки q от C , R , ω .

- 1) нагрузка на преграду от действия взрыва в грунте с увеличением глубины заложения заряда от $h=0$ до $h=5 r_0$ резко возрастает;
- 2) с увеличением глубины заложения заряда от $h=5 r_0$ до камуфлета и далее нагрузка на преграду остается практически постоянной;
- 3) величина нагрузки от взрыва заряда с полной забивкой (при $h \geq 5 r_0$), по сравнению со взрывом на поверхности грунта, увеличивается в 5,2 раза;

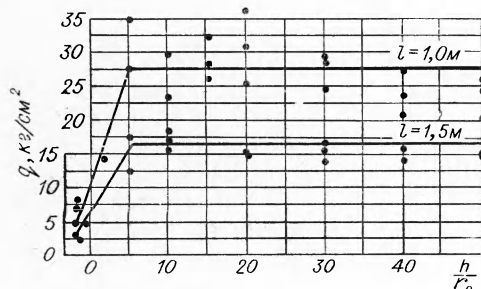


Рис. 9. Зависимость нагрузки $q(h)$ для опытов с зарядами $C=0,2$ кг при расстоянии $R=0,6$ м ($R=20 r_0$) от преграды.

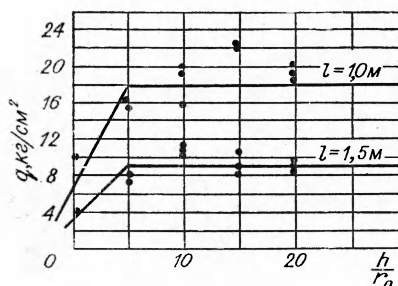


Рис. 10. Зависимость нагрузки $q(h)$ для опытов с зарядами $C=0,2$ кг при расстоянии $R=0,9$ м ($R=30 r_0$) от преграды.

- 4) величина нагрузки от взрыва заряда в грунте с полной забивкой по сравнению с величиной нагрузки от взрыва в воздухе на тех же расстояниях увеличивается в 3,2 раза.

Сравнение величин нагрузок на преграду от взрыва заряда в грунте при различных заглублениях и при взрыве в воздухе приводится в таблице.

Зависимость величины нагрузки от глубины заложения заряда может быть выражена аналитически. Однако для практических расчетов проще ее выразить введением специального коэффициента забивки, величину которого, по данным опытов, следует принимать равной: при взрыве заряда с полной забивкой (при $h \geq 5 r_0$) $K_{зab} = 1,0$; при взрыве заряда с заглублениями на его высоту $K_{зab} = 0,5$.

Величина заглубления заряда	Величина q	Отношение нагрузок		
		$\frac{q_i}{q_1}$	$\frac{q_i}{q_2}$	$\frac{q_i}{q_4}$
Взрыв в воздухе	q_1	1,0	1,67	0,31
Взрыв на поверхности грунта . . .	q_2	0,6	1,0	0,19
Заряд заглублен на свою высоту . .	q_3	1,55	2,56	0,48
Заряд заглублен на $h \geq 5 r_0$. . .	q_4	3,2	5,2	1,0

Опыты по исследованию влияния на величину нагрузки угла встречи взрывной волны с преградой проводились на стенде (см. рис. 2) по схеме, приведенной на рис. 11, при расстояниях от исследуемой преграды $R=20 r_0$ и $R=30 r_0$, при этом угол β изменялся от 0 до 75° .

На рис. 12 приводятся экспериментальные кривые зависимости величины нагрузки от угла встречи взрывной волны с преградой.

Анализ результатов опытов, приведенных на рис. 12, позволяет сделать следующие выводы:

- 1) влияние угла встречи волны взрыва с преградой на величину нагрузки различно при разных расстояниях от центра взрыва до кон-

струкции; при этом с увеличением расстояния в пределах до $30 r_0$ нагрузка уменьшается с изменением угла β от 0 до 90° более интенсивно;

2) для практических расчетов зависимость величины нагрузки от угла встречи взрывной волны с преградой, по данным опытов в песчаных грунтах, можно принять: при расстояниях $15 r_0 \leq R \leq 25 r_0$ $q_\beta = \bar{q}_\beta = 0$; при расстояниях $R > 25 r_0$ $\bar{q}_\beta = q_{\beta=0} (0,3 + 0,7 \cos \beta)$.

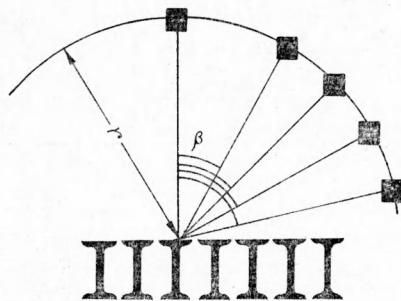


Рис. 11. Схема опытов по исследованию влияния на величину нагрузки угла встречи взрывной волны с преградой.

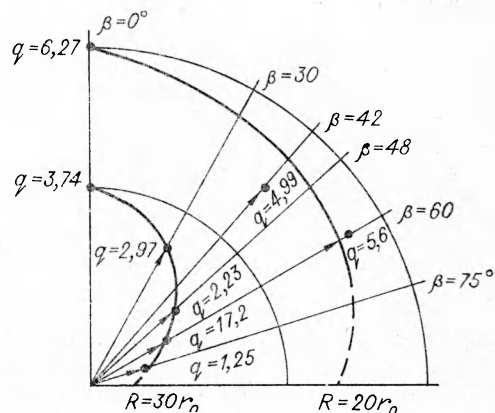


Рис. 12. Результаты опытов по исследованию зависимости $q(\beta)$ с зарядами $C=0,2$ кг при расстояниях $R=20 r_0$ и $R=30 r_0$.

На основе обобщения частных результатов модельных опытов по исследованию зависимости нагрузки от параметров взрыва, свойств грунта и динамических характеристик преграды получена следующая формула для определения эквивалентной действию взрыва в грунте статической нагрузки:

$$q = K_{гр} \cdot K_{заб} \frac{C^{2/3}}{R^2} \omega f(\beta), \quad (3)$$

где $f(\beta)$ — зависимость нагрузки от угла встречи взрывной волны с преградой при $15 r_0 \leq R \leq 25 r_0$ равная 1, при $R > 25 r_0$ $f(\beta) = 0,3 + 0,7 \cos \beta$; $K_{гр}$ — коэффициент, зависящий от свойств грунта: для песка естественной влажности равен 0,011, для песка, насыщенного водой — 0,013, для глины естественной влажности — 0,014; $K_{заб}$ — коэффициент, зависящий от глубины заложения заряда: при взрыве заряда на глубине $h \geq 5 r_0$ равен 1, при взрыве на поверхности грунта — 0,2, при взрыве заряда, заглубленного на его высоту, — 0,5.

ПРОВЕРКА ПОЛУЧЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ОПЫТАМИ С ЗАРЯДАМИ БОЛЬШЕЙ МОЩНОСТИ

Поскольку формула (3) получена по результатам опытов с зарядами весом до 1,0 кг, были проведены специальные контрольные экспериментальные исследования с зарядами, существенно большими по весу. Методика опытов была принята такой же, как и в модельных опытах. Для этой цели был построен специальный стенд (см. рис. 3) с размерами в плане $5,1 \times 5,5$ м, высотой 3,5 м. В стенд были вмонтированы балоч-

ные конструкции из двутавров № 24 пролетом 3,0 и 4,0 м. На расстояниях 20 и 30 r_0 от опытных конструкций в песке естественной влажности взрывались заряды весом 10, 25, 100 и 225 кг с заглублением $h > 5 r_0$. На рис. 13 точками представлены результаты опытов с большими зарядами, кривой — величины нагрузок, подсчитанные по формуле (3).

Наряду с проведением опытов с зарядами весом до 225 кг была проведена обработка опытных данных других авторов по разрушению железобетонных сооружений зарядами весом от 500 до 5000 кг. При анализе разрушенных стен были получены величины нагрузок, причем они оказались близки к нагрузкам, вычисленным по формуле (3).

Таким образом, данные опытов с большими зарядами, а также обработка результатов опытов по разрушению железобетонных сооружений зарядами весом до 5000 кг подтверждают справедливость формулы, полученной из опытов с малыми зарядами.

Анализ результатов опытов позволил установить, что зависимостью (3) можно пользоваться, когда между параметрами взрыва (C , R) и периодом собственных колебаний конструкции (T) соблюдается неравенство:

$$\frac{\sqrt[6]{C} \sqrt{R}}{T} \leq 1000.$$

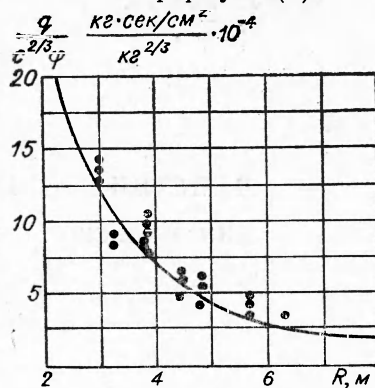


Рис. 13. Результаты опытов с большими зарядами.