

В заключение подчеркнем, что полученные здесь аналитические результаты относятся к случаю нагружения подкрепленной оболочки одной радиальной силой. При действии на ребра циклически симметричной нагрузки из нескольких сосредоточенных сил предложенные упрощения теряют смысл и нужно строить периодические решения по угловой координате, как это сделано в [11, 12] и других работах по теории орребренных оболочек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Образцов И. Ф., Нерубайко Б. В., Ольшанский В. П. Оболочки при локализованных воздействиях (обзор работ, основные результаты и направления исследований).— М., 1988.— Деп. ВИНТИ 12.02.88, № 1222.
2. Гольденвейзер А. Л. К вопросу о расчете оболочек на сосредоточенные силы // ПММ.— 1954.— Т. 18, вып. 2.
3. Чернышев Г. Н. О контактных задачах в теории оболочек // Тр. VII Всесоюз. конф. по теории пластин и оболочек.— М.: Наука, 1970.
4. Odquist F. K. G. Action of forces and moments symmetrically distributed along a generatrix of thin cylindrical shells // J. Appl. Mech.— 1946.— V. 13, N 2.
5. Schores H. Line loads action on thin cylindrical shells // Proc. ASCE.— 1935.— V. 61, N 3.
6. Бейтмен Г., Эрдейи А. Таблицы интегральных преобразований. Преобразования Фурье, Лапласа, Меллина.— М.: Наука, 1969.
7. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции.— М.: Наука, 1977.
8. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции.— М.: Наука, 1973.— Т. 1.
9. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и производных.— М.: Физматгиз, 1962.
10. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления.— М.: Наука, 1969.— Т. 2.
11. Григлюк Э. И., Толкачев В. М. Контактные задачи теории пластин и оболочек.— М.: Машиностроение, 1980.
12. Максименко В. Н., Филытинский Л. А. Упругое равновесие анизотропных оболочек, подкреплённых ребрами жесткости // ПММ.— 1976.— Т. 39, вып. 5.

г. Харьков

Поступила 26/XII 1990 г.

УДК 534.222.2 + 624.131

Н. Н. Гердюков, А. Г. Иоилев, С. А. Новиков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗОК НА МЯГКИЙ ГРУНТ

Мягкие грунты являются сложными многофазными средами, состоящими из твердых зерен, воды и воздуха, заключенных в межзеренном пространстве. Исследование поведения мягких грунтов при интенсивных ударных нагрузках имеет большой научный и практический интерес.

Систематическое экспериментальное изучение механических свойств мягких грунтов при взрывном нагружении было начато в конце 50-х годов (см., например, [1—6]). Однако почти во всех работах максимальное измерявшееся давление не превышало 75 МПа. Свойства песка при ударно-волновом нагружении в области больших давлений рассматривались в [2, 4]. В [2] получены ударная адиабата сухого песка плотностью $\rho_{00} = 1,66 \text{ г/см}^3$ в интервале напряжений от 100 МПа до 5 ГПа, а также зависимость массовой скорости частиц в волне разгрузки при выходе плоской ударной волны (УВ) на свободную поверхность u_1 от массовой скорости в падающей УВ u в интервале от 50 до 800 м/с. Оказалось, что во всем этом интервале $u_1/u = 1,36$. В [4] получены ударные адиабаты четырех фракций сухого песка в интервале напряжений от 1 до 6 ГПа и двух фракций водонасыщенного песка в интервале от 2 до 12 ГПа.

Ниже приводятся некоторые результаты измерений сжимаемости насыпного песка естественной влажности в проходящей и отраженной УВ, создаваемых детонацией плоского слоя взрывчатого вещества (ВВ),

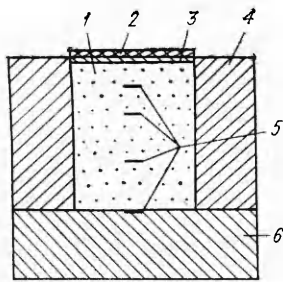


Рис. 1

в интервале напряжений от 6 до 230 МПа. Представлены также результаты измерений массовой скорости частиц в волне разгрузки при выходе УВ на свободную поверхность.

Распространение плоских УВ в насыпном песке плотностью $\rho_{00} = 1,66 \text{ г/см}^3$ и влажностью $w = 4-5 \%$ исследовалось на установке, изображенной на рис. 1. Песок 1 засыпался в отрезок толстостенной стальной трубы 4 (внутренний диаметр 75 мм, толщина стенок 40 мм, высота 4; 8; 12 и 16 см), установленной на стальной плите 6. Песок нагружался взрывом диска пластического ВВ 2 толщиной $\Delta_{ВВ} = 1,5; 3,0$ и 4,5 мм, инициируемого в центре. Между ВВ и песком помещалась пластина-ударник 3 из алюминиевого сплава АМг6 толщиной 2 мм. Нормальное напряжение в песке измерялось пьезоэлектрическими датчиками давления 5 [7], помещенными в песок на расстоянии $x = 2; 4; 8; 12$ см от ударника. Нормальное напряжение в отраженной от стальной плиты УВ измерялось датчиком давления, установленным в плите заподлицо с ее поверхностью.

Для исключения воздействия бокового давления на пьезоэлемент между боковой поверхностью пьезоэлемента датчика и корпусом из тита-

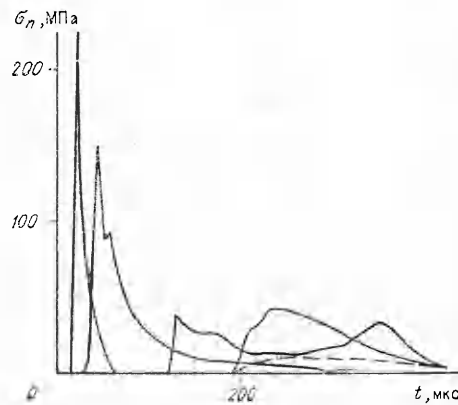


Рис. 2

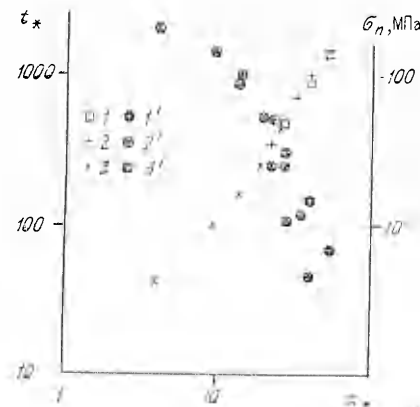


Рис. 4

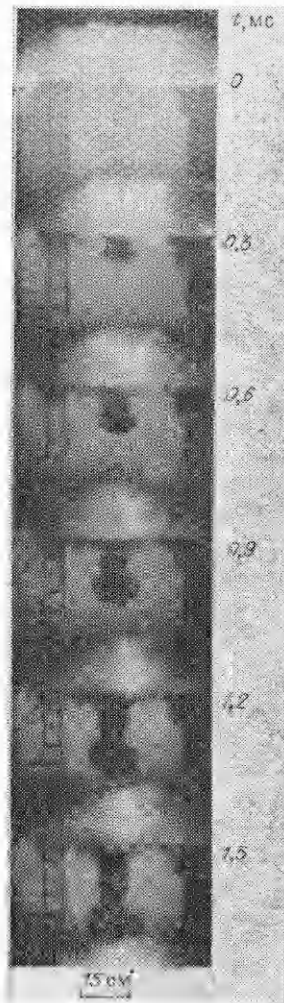


Рис. 3

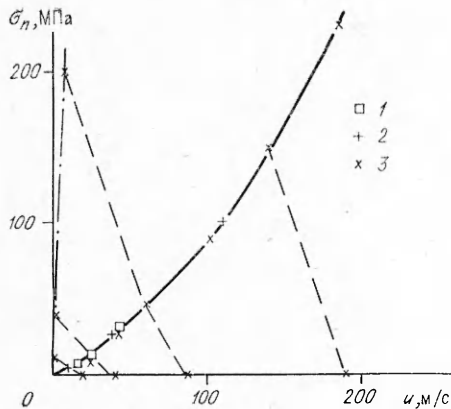


Рис. 5

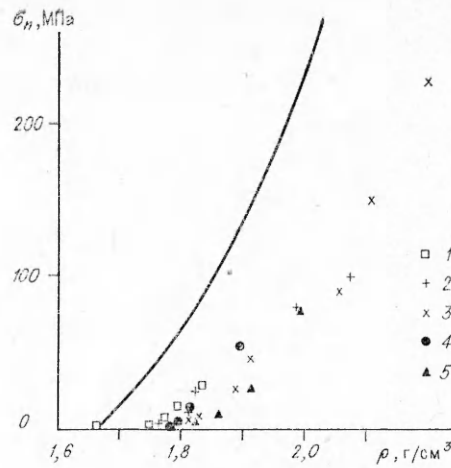


Рис. 6

нового сплава ВТ-4 был оставлен воздушный зазор $\sim 0,5$ мм, поэтому датчик измерял только нормальное к своей поверхности напряжение. Диаметр датчика 14 мм, толщина 4 мм, средняя плотность ~ 3 г/см³, поэтому датчики легко увлекаются песком и слабо искажают его движение. Давление в пьезоэлементе выравнивается за время < 5 мкс, погрешность измерения временных интервалов $< 8\%$, погрешность измерения давления $< 15\%$, максимальная длительность измерения 80 мс.

Типичные записи нормального напряжения σ_n в проходящей (кривые 1—3) и в отраженной волне (кривая 4) представлены на рис. 2. В этом опыте стальная плита установлена на расстоянии $x = 12$ см от ударника, $\Delta_{ВВ} = 4,5$ мм, датчики расположены на расстояниях $x = 2; 4; 8$ и 12 см (линии 1—4). Для сравнения здесь же приведена запись σ_n в проходящей волне на расстоянии $x = 12$ см (штриховая линия) из другого опыта с $\Delta_{ВВ} = 4,5$ мм, когда плита находилась на расстоянии $x = 16$ см от ударника.

Для регистрации скорости разлета свободной поверхности песка толстостенная труба устанавливалась на стальную плиту с отверстием по внутреннему сечению трубы, закрытому тонкой полиэтиленовой пленкой, удерживавшей песок в трубе. Нагружение, как и ранее, осуществлялось взрывом диска ВВ ($\Delta_{ВВ} = 4,5$ мм) через пластину-ударник. Скорость разлета регистрировалась кинокамерой СКС-1М, расположенной на расстоянии 3 м так, что объектив и нижний срез трубы были на одном уровне. Типичная кинограмма разлета песка показана на рис. 3.

На рис. 4 даны диаграммы распространения УВ в приведенных координатах ($x_{\pm} = x/\Delta_{ВВ}$, $t_{\pm} = t/\Delta_{ВВ}$). Точки 1—3 и 1'—3' — результаты опытов с $\Delta_{ВВ} = 1,5; 3,0$ и 4,5 мм соответственно, 1—3 — $x-t$ диаграмма, 1'—3' — σ_n-x диаграмма. По известным σ_n и D (скорость УВ определяется по $x-t$ диаграмме распространения УВ графическим дифференцированием) из соотношений на фронте УВ можно найти массовую скорость и сжатие в проходящей УВ:

$$u = \sigma_n / \rho_{00} D, \quad 1 - \rho_{00} / \rho = u / D.$$

Зависимость $\sigma_n - u$ для песка (точки 1—3 отвечают $\Delta_{ВВ} = 1,5; 3,0$ и 4,5 мм) и ударная адиабата стали (штрихпунктирная линия) приведены на рис. 5. Здесь же отмечены и значения напряжения в отраженной волне и скорости разлета. Штриховые линии соединяют точки, соответствующие параметрам проходящей и отраженной УВ и скорости разлета песка на расстояниях $x = 2; 4; 8$ и 12 см от ВВ толщиной $\Delta_{ВВ} = 4,5$ мм. Значения коэффициента отражения σ_r / σ_n и отношения u_1 / u представлены в таблице (σ_r — максимальное нормальное напряжение в отраженной волне). Заметим, что коэффициент отражения существенно выше 2 — значе-

σ_n , МПа	u , м/с	σ_r/σ_n	u_1/u
150	139	—	1,37
45	60,25	4,44	1,44
11	25,5	2,73	1,57

ния, характерного при таких давлениях для большинства твердых материалов [8], и согласуется со значением $\sigma_r/\sigma_n = 2,56$ при $\sigma_n = 9$ МПа, найденным в [9] для аллювия, а значения отношения u_1/u лежат между 2 («правило удвоения скоростей» в акустическом приближении [8]) и 1,36 [2].

Полученная зависимость $\sigma_n - \rho$ для песка в сравнении с результатами других авторов по ударно-волновому [2] и взрывному [3] нагружению песка приведена на рис. 6 (точки 1—3 отвечают $\Delta_{ВВ} = 1,5; 3,0$ и $4,5$ мм, линия — данные из [2] ($\rho_{00} = 1,66$ г/см³, $w = 0$), 4 и 5 — из [3] ($\rho_{00} = 1,74$, $w = 6$ % и $\rho_{00} = 1,76$, $w = 7,5$ %)). Некоторое расхождение можно объяснить как различным составом и влажностью исследованного песка, так и разными условиями нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В. Д., Григорян С. С., Новгородов А. Ф., Рыков Г. В. Некоторые экспериментальные исследования по динамике мягких грунтов // ДАН СССР.— 1960.— Т. 133, № 6.
2. Лагунов В. А., Степанов В. А. Измерение динамической сжимаемости песка при высоких давлениях // ПМТФ.— 1963.— № 1.
3. Ляхов Г. М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах.— М.: Недра, 1974.
4. Дианов М. Д., Златин Н. А., Мочалов С. М. и др. Ударная сжимаемость сухого и водонасыщенного песка // Письма в ЖТФ.— 1976.— Т. 2, вып. 12.
5. Рыков Г. В., Скобеев А. М. Измерение напряжений в грунтах при кратковременных нагрузках.— М.: Наука, 1978.
6. Поведение грунтов под действием нагрузок.— Киев: Наук. думка, 1984.
7. Бодренко С. И., Гердюков Н. Н., Крысанов Ю. А., Новиков С. А. Применение кварцевых датчиков давления для исследования ударно-волновых процессов // ФГВ.— 1981.— № 3.
8. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.— М.: Наука, 1966.
9. Gaffney E. S., Brown J. A. Comparative response of alluvium to Hopkinson bar and gas gun loading // Shock waves in condensed matter/Ed. Y. M. Gupta.— N. Y.; L.: Plenum press, 1985.

г. Арзамас

Поступила 12/II 1991 г.

УДК 624.131.3 + 624.131.5

А. М. Ильницкий, О. В. Кантур, Г. В. Рыков

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КРУГЛОГО ШТАМПА С ГРУНТОМ, РАССМАТРИВАЕМЫМ КАК УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО

Выполнено численное решение двумерной осесимметричной задачи о взаимодействии круглого штампа с грунтом, рассматриваемым как упруговязкопластическое полупространство, под действием динамической нагрузки. Задача о движении круглого штампа на упругом полупространстве при динамическом нагружении решалась в [1, 2]. В [3] в двумерной постановке численным методом решалась задача об ударе плоского плоского штампа по полупространству, моделируемому упругопластической средой.