

безразмерного времени σ . Кривые 1—3 соответствуют $\nu = 1,0; 0,5; 0,27$. Видно, что коэффициент C_p значительно зависит от ν в законе горения.

Таким образом, из расчетов следует, что ν является существенным параметром при изменении формы горящего тела. Величина ν может быть восстановлена для конкретного материала из анализа снимков горящего тела в разные моменты времени либо из закона торможения горящего тела по изменению коэффициента C_p .

ЛИТЕРАТУРА

1. Баулин Н. Н., Кувалкин Д. Г., Пилюгин Н. Н. и др. Исследование яркости излучения газов около горячей модели при движении со сверхзвуковой скоростью // Космич. исслед.— 1987.— Т. 25, вып. 1.
2. Алфимов Н. А. Горение графита в потоке воздуха при высоких температурах // Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение.— 1964.— № 5.
3. Вильямс Ф. А. Теория горения.— М.: Наука, 1971.
4. Зельдович Я. Б., Лейпунский О. Н., Либрович В. Б. Теория нестационарного горения пороха.— М.: Наука, 1975.
5. Булгаков В. К., Липанов А. М. Взаимодействие турбулентности и химической реакции в теории эрозийного горения конденсированных веществ // Хим. физика.— 1986.— Т. 5, № 4.
6. Пилюгин Н. Н., Талинов Р. Ф. Асимптотическая теория сверхзвукового обтекания горящих моделей и определение экспериментальных констант // Струйные и отрывные течения.— М.: Изд-во МГУ, 1989.
7. Пилюгин Н. Н., Талинов Р. Ф. Асимптотическое решение уравнений Эйлера в ударном слое при неравномерном обтекании затупленного тела и подаче газа с его поверхности // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1989.— № 6.
8. Алштейн Э. З., Пилюгин Н. Н., Тирский Г. А. Унос массы и изменение формы трехмерного тела при движении по траектории в атмосфере Земли // Космич. исслед.— 1979.— Т. 17, вып. 2.
9. Эльсгольд Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление.— М.: Наука, 1965.

г. Москва

Поступила 8/IV 1992 г.,
в окончательном варианте —
27/VII 1992 г.

УДК 534.222.2 + 624.131

Н. Н. Гердюков, А. Г. Иоилев, А. Д. Ковтун,
Ю. М. Макаров, С. А. Новиков

ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИМАЕМОСТИ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

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 напряжение не превышало 75 МПа. Свойства песка при ударно-волновом нагружении в области больших напряжений исследовались в [2, 4]. В [2] получена ударная адиабата сухого песка с начальной 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 $u_1/u \approx 1,36$. 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 парусенного песчаного грунта естественной влажности в проходящей и

© Н. Н. Гердюков, А. Г. Иоилев, А. Д. Ковтун, Ю. М. Макаров, С. А. Новиков, 1993

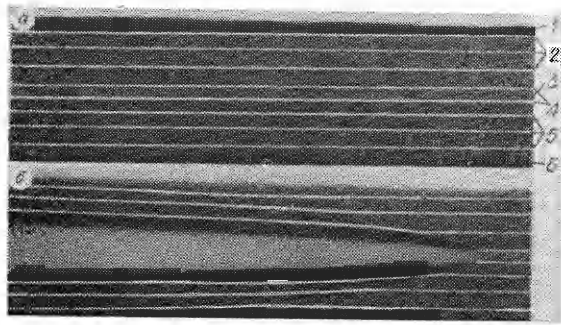


Рис. 1

Максимальный размер частиц грунта $d = 0,5$ мм. Рентгенограмма, сделанная до проведения опыта, приведена на рис. 1, а: в кювету со стальным дном *б* и стенками из оргстекла засыпался песчаный грунт *1*, в котором располагались полоски медной фольги *2* сечением $0,1 \times 5$ мм, плоский заряд пластического ВВ *3* толщиной 2 мм, отделенный от грунта лавсановой пленкой *4* толщиной 0,2 мм, и медные проволочки *5* диаметром 1 мм. При закладывании в кювету грунт (с насыпной плотностью $1,54 \text{ г/см}^3$) разравнивался и подтрамбовывался до плотности $1,68 \text{ г/см}^3$. Толщина слоя грунта над зарядом ВВ и под ним ~ 15 мм. Ширина сборки в направлении рентгенографирования 52 мм, из них по 4 мм приходилось на боковые стенки кюветы, выполненные из оргстекла. Иницирование заряда ВВ осуществлялось одновременно по всему левому торцу, рентгенографирование — через 33, 9 мкс после иницирования, рентгенограмма приведена на рис. 1, б.

Скорость движения нагрузки по слою грунта равна скорости детонации ВВ ($D_{\text{ВВ}} = 7,85 \text{ км/с}$), что значительно превышает скорости распространения УВ и волны разгрузки в грунте, поэтому с хорошей точностью можно считать, что рентгенограмма, приведенная на рис. 1, б, может служить временной разверткой движения грунта, которое имело бы место при мгновенном иницировании всего слоя ВВ (при этом координата l по горизонтальной оси соответствует времени $t = l/D_{\text{ВВ}}$).

Для исследования сжимаемости насыщенного песчаного грунта естественной влажности (около 4 %) плотностью $\rho_{00} = 1,54 \text{ г/см}^3$ при ударно-волновом нагружении в области более низких давлений использовались пьезоэлектрические датчики давления ПДД [7, 8]. Максимальный размер частиц грунта $d = 0,5$ мм. Схема проведения опытов приведена на рис. 2. Нормальное напряжение в грунте *2* измерялось датчиками давления *3*, помещенными на расстоянии $x = 10, 20, 30$ и 40 мм от плоского заряда ВВ *1* (квадратная пластина толщиной 2 мм со стороной 25 см). Нормальное напряжение в УВ, отраженной от стальной плиты *4* толщиной 4 см, измерялось датчиком давления, установленным в плите заподлицо с ее поверхностью. Сверху заряд ВВ засыпался слоем того же грунта толщиной 5 см.

По результатам опытов были построены $t-x$ -диаграммы распространения УВ по грунту, приведенные на рис. 3, а, б (x — расстояние от заряда ВВ, точки 1 и 2 — результаты измерения в грунте соответственно над и под зарядом ВВ, полученные при обработке рентгенограммы, 3 — результат измерений с помощью датчиков, штриховая линия — аппроксимация полиномом). Усредненная зависимость скорости УВ D от x получается при дифференцировании соответствующего аппроксими-

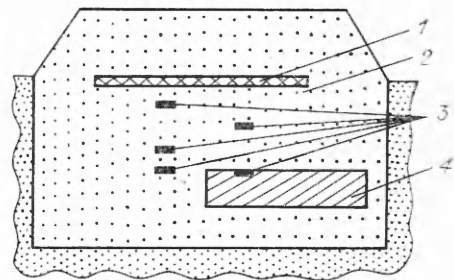


Рис. 2

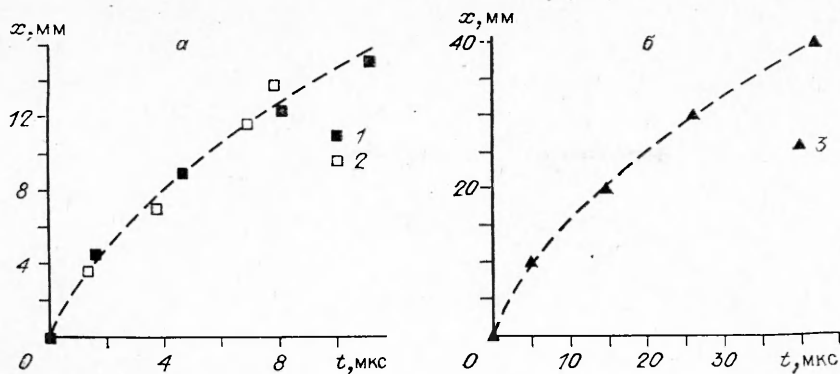


Рис. 3

рующего полинома. В опыте с рентгенографической регистрацией по отклонению фольги и проволочек при прохождении УВ по грунту определялась его массовая скорость u , а из соотношений на фронте УВ можно получить нормальное напряжение σ_n и сжимаемость $\beta = 1 - \rho_{00}/\rho$ в проходящей УВ (ρ — плотность сжатого вещества):

$$\sigma_n = \rho_{00} u D, \quad \beta = u/D.$$

В опыте с использованием датчиков ПДД сжимаемость и массовая скорость определялись из этих же соотношений по известным D и σ_n . Под действием УВ датчики, находившиеся на расстоянии 10 и 20 мм от заряда ВВ, разрушались, поэтому по их показаниям можно судить только о факте прихода УВ.

Диаграмма $D-u$ для песчаного грунта представлена на рис. 4. Экспериментальные точки, полученные при обработке рентгенограммы, вполне удовлетворительно аппроксимируются штриховой прямой $D = a + bu$, где $a = 0,406$ км/с и $b = 2,43$ (см. таблицу) (1, 2 — результаты измерения в грунте соответственно над и под зарядом ВВ, найденные при обработке рентгенограммы, 3 — результат измерений с помощью датчиков ПДД). В таблице приведены аналогичные зависимости, полученные в [2, 4] для сухого (прокаленного перед опытом) песка, параметры грунта и коэффициенты a и b . Отметим близкие значения a и b для нефракционированного песчаного грунта, найденные в [2], которые заметно отличаются от значений для фракционированного грунта, приведенных в [4].

В опытах были также получены: для насыпного песка естественной влажности значение коэффициента отражения $\sigma_r/\sigma_n = 7,5$ при $\sigma_n = 0,07$ ГПа (σ_r — максимальное нормальное напряжение в отраженной волне), для сухого песка значение отношения массовой скорости при выходе УВ на свободную поверхность к массовой скорости в проходящей УВ $u_1/u = 1,4$ при $u = 0,22$ км/с, которое вполне согласуется со значением 1,36, приведенным в [2].

Полученная зависимость $\sigma_n - \beta$ для песчаного грунта в сравнении с данными других авторов приведена на рис. 5 (обозначения те же, что

Параметры грунта		Коэффициенты		Источник	Номер кривой на рис. 4,5
ρ_{00} , г/см ³	d , мм	a , км/с	b		
1,68	$\leq 0,5$	0,406	2,43		
1,66	—	0,5	2,404	[2]	4
1,52	0,85—1,4	0,571	1,61	[4]	5
1,54	0,85—1,4	0,56	1,7	[4]	6
1,49	0,07—0,14	0,504	1,6	[4]	7
1,29	$\sim 0,07$	0,187	1,86	[4]	8

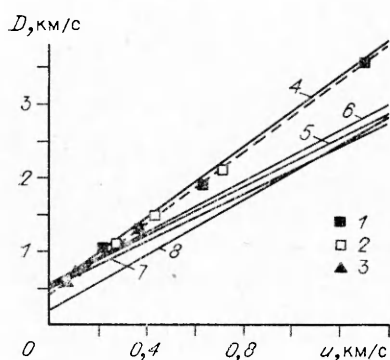


Рис. 4

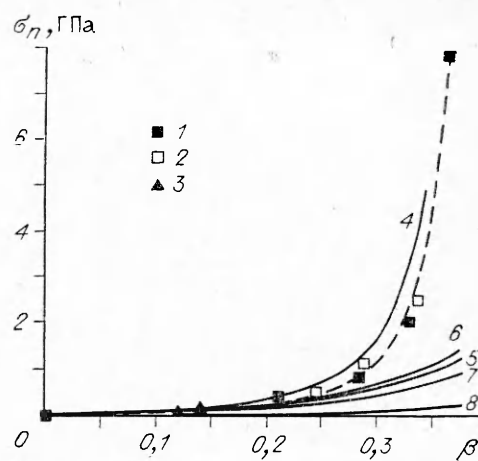


Рис. 5

и на рис. 4). 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 импульсных 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. Гердюков Н. Н., Ионлев А. Г., Новиков С. А. Исследование воздействия взрывных нагрузок на мягкий грунт // ПМТФ.— 1992.— № 2.

г. Арзамас

Поступила 7/VIII 1992 г.

УДК 532.525.2 : 533.6.011.72

Г. Ф. Горшков, В. И. Усков, В. С. Фаворский

ОСОБЕННОСТИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ОБТЕКАНИЯ БЕЗГРАНИЧНОЙ ПРЕГРАДЫ НЕДОРАСШИРЕННОЙ СТРУЕЙ

Взаимодействие сверхзвуковой недорасширенной струи с плоской преградой, расположенной перпендикулярно набегающему потоку, является одной из проблемных задач газовой динамики. Это обусловлено прежде всего тем, что при определенных сочетаниях режимных параметров могут происходить резкие переходы от стационарного характера обтекания к нестационарному: в системе струя — преграда возникают интенсивные автоколебания [1—7]. Так, при фиксированных значениях

© Г. Ф. Горшков, В. И. Усков, В. С. Фаворский, 1993