

Приведем простейшую оценку уменьшения температурного напряжения в слое при заданном тепловом потоке, принимая, согласно (1),  $B = Rl_0^2/\kappa$  и, согласно (14),  $R = \eta_r \nabla p h / \eta_r^0 \eta^*$ . Полагая  $\eta_r/\eta_r^0 = 1$ ,  $\eta^* = 10^{-2}$ ,  $\nabla p = 0,6$ ,  $h = 1$ ,  $l_0 = 10^{-2}$ ,  $\kappa = 10^{-5}$  (ед. СГС), получаем  $B \simeq 6$ . Подставляя найденное значение  $B$  в (17), находим, что температурный перепад уменьшается в три раза ( $\Theta_1 = 0,3$ ).

Таким образом, рассмотренный механизм может привести к существенной интенсификации теплопередачи и модификации температурного профиля при сдвиговых течениях суспензий при наличии в них объемных моментов сил.

Поступила 31 III 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. McTague J. P. Magnetoviscosity of magnetic colloids. — *J. Chem. Phys.*, 1969, N 51, p. 133.
2. Zwetkoff V. Bewegung anisotroper Flüssigkeiten im rotierenden Magnetfeld. — *Acta Physicochimica*, 1939, vol. 10, N 4, p. 554.
3. Moskowitz R., Rosensweig R. E. Nonmechanical torqued driven of ferromagnetic fluid by an electromagnetic field. — *Appl. Phys. Lett.*, 1967, vol. 11, N 10, p. 301.
4. Каган И. Я., Рыков В. Г., Литовский Е. И. О течении диэлектрической ферромагнитной суспензии во вращающемся магнитном поле. — *МГ*, 1973, № 2, с. 135.
5. Шлюмис М. И. Эффективная вязкость магнитных суспензий. — *ЖЭТФ*, 1971, т. 61, № 6 (12), с. 2411.
6. Глазгов Ю. А. Роль высших гармоник при движении ферросуспензий во вращающемся магнитном поле. — *МГ*, 1975, № 4, с. 31.
7. Цеберс А. О. Межфазные напряжения в гидродинамике жидкостей с внутренним вращением. — *МГ*, 1975, № 1, с. 79.
8. Вислович А. И. О воздействии вращающегося поля на ферромагнитную суспензию в слое со свободной границей. — *Письма в ЖТФ*, 1975, т. 1, № 16, с. 744.
9. Jenkins J. T. A theory of magnetic fluids. — *Arch. Rational Mech. and Analysis*, 1972, vol. 46, N 1, p. 42.
10. Суязов В. М. О структурно-континуальном подходе в магнито- и электрогеологии дисперсных систем. — *МГ*, 1972, № 2, с. 3.
11. Цеберс А. О. Течение дипольных жидкостей во внешних полях. — *МГ*, 1974, № 4, с. 3.
12. Баштовой В. Г., Кашевский Б. Э. Асимметричная модель магнитной жидкости с учетом конечной анизотропии ферромагнитных частиц. — *МГ*, 1976, № 4, с. 24.
13. De Groot S. R., Mazur P. *Non-equilibrium thermodynamics*. Amsterdam, 1962. Рус. пер. де Гроот С., Мазур П. *Неравновесная термодинамика*. М., «Мир», 1964.
14. Лыков А. В., Берковский Б. М. *Законы переноса в ньютоновских жидкостях*. — В кн.: *Тепло- и массоперенос в ньютоновских жидкостях*. М., «Энергия», 1968.

УДК 534.222

### ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ВЗРЫВНЫЕ ВОЛНЫ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕДАХ

В. А. Плаксий

(Киев)

Вопросу применимости к водонасыщенным грунтам модели [1] посвящены работы [2, 3]. С использованием этой модели решены задачи в работах [4—7]. В данной работе определены зависимости на фронте ударной волны от расстояния, а также изменение этих параметров со временем в фиксированных точках среды. Проведенное сопоставление полученных данных с результатами экспериментов свидетельствует о применимости к грунтам модели многокомпонентной среды.

1. Грунт полагается трехкомпонентной средой, деформирование которой определяется сжимаемостью воздуха, воды и твердого компонента. Согласно модели многокомпонентной среды [1], деформации протекают мгновенно в момент приложения нагрузки, уравнение сжатия и разгрузки имеет вид

$$(1.1) \quad \frac{\rho_0}{\rho} = \alpha_1 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{-\kappa_1} + \alpha_2 \left[ \frac{\gamma_2 (p - p_0)}{\rho_2 c_2^2} + 1 \right]^{-\kappa_2} + \alpha_3 \left[ \frac{\gamma_3 (p - p_0)}{\rho_3 c_3^2} + 1 \right]^{-\kappa_3}$$

$$(\kappa_1 = 1/\gamma_1, \kappa_2 = 1/\gamma_2, \kappa_3 = 1/\gamma_3),$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  — содержание по объему газообразного, жидкого и твердого компонентов в среде;  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  — плотности;  $c_1, c_2, c_3$  — скорости и  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  — показатели изэнтроп в этих компонентах при давлении  $p = p_0$ ;  $\rho_0, \rho$  — естественная и текущая плотности среды соответственно.

Детонация заряда полагается мгновенной, т. е. волновая картина в полости не рассматривается. Как и в работах [2, 8], уравнение изэнтропы продуктов детонации (ПД) имеет вид

$$(1.2) \quad p = A \rho_{\text{ПД}}^n + B \rho_{\text{ПД}}^{\gamma+1}.$$

Это уравнение при больших и малых давлениях переходит соответственно в уравнения

$$(1.3) \quad p = p_n (\rho_{\text{ПД}}/\rho_n)^{kn}, \quad p = p_0 (\rho_{\text{ПД}}/\rho_0)^{k_0}.$$

Для определения величин  $A, B, n, \gamma$  составляется система четырех уравнений, которые получаются из следующих условий: первое уравнение (1.3) и уравнение (1.2) имеют общую точку  $p_n, \rho_n$  и в этой точке общую касательную, при  $\rho \rightarrow 0$  уравнение (1.2) и второе уравнение (1.3) имеют общую касательную, продукты детонации при расширении от  $p_n, \rho_n$  совершают работу, равную теплоте взрывчатого превращения,

$$(1.4) \quad A \rho_n^n + B \rho_n^{\gamma+1} = p_n, \quad k_n = n + \frac{B \rho_n^{\gamma+1}}{p_n} (\gamma + 1 - n),$$

$$\gamma = k_0 - 1, \quad Q = \frac{p_n}{\rho_n (n-1)} + \frac{B \rho_n^\gamma}{\gamma (n-1)} (n - \gamma - 1).$$

Уравнения движения грунта в переменных Лагранжа имеют вид

$$(1.5) \quad \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{1}{\rho_0} \frac{R}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{R}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad u = \frac{\partial R}{\partial t}, \quad V = 1/\rho,$$

где  $R, r$  — координаты Эйлера и Лагранжа соответственно;  $t$  — время;  $u$  — скорость частиц грунта.

Система (1.5) имеет два семейства характеристик

$$\frac{dp}{\rho c} \pm du + \frac{uc}{R} dt = 0 \quad \text{при} \quad dr = \frac{cR}{\rho_0} \frac{R}{r} dt.$$

Уравнения (1.4), (1.5) представляют замкнутую систему. Граничными условиями являются условия на фронте ударной волны  $S$  и условие на границе продукты детонации — грунт (на контактном разрыве  $T$  при  $r = r_0, r_0$  — радиус заряда):

$$(1.6) \quad p - p_0 = \rho_0 u D, \quad \rho u = (\rho - \rho_0) D, \quad \rho_{\text{ПД}}/\rho_n = (r_0/R)^2,$$

где  $D$  — скорость фронта ударной волны.

Счет удобнее вести в безразмерных величинах и переменных. Переход к ним осуществляется по формулам

$$(1.7) \quad p^0 = p/p_n, u^0 = u/c_n, D^0 = D/c_n, \rho^0 = \rho/\rho_n, \\ R^0 = R/r_0, x = r/r_0, \tau = tc_n/r_0.$$

В безразмерных переменных характеристические соотношения записываются следующим образом:

$$\frac{dp^0}{k_n \rho_0^0 c_0^0} \pm du^0 + \frac{u^0 c_0^0}{R^0} d\tau = 0 \text{ при } dx = \pm \frac{c_0^0 \rho^0}{\rho_0^0} \frac{R^0}{x} d\tau.$$

Уравнение состояния трехкомпонентной среды в безразмерном виде

$$\frac{\rho_0^0}{\rho^0} = \alpha_1 \left( \frac{p^0}{p_0^0} \right)^{-\alpha_1} + \alpha_2 \left[ \frac{\gamma_2 (p^0 - p_0^0)}{k_n \rho_2^0 c_2^0} + 1 \right]^{-\alpha_2} + \alpha_3 \left[ \frac{\gamma_3 (p^0 - p_0^0)}{k_n \rho_3^0 c_3^0} + 1 \right]^{-\alpha_3}.$$

Уравнение изэнтропы (1.2) в новых переменных имеет вид

$$p^0 = A^0 (\rho_{\text{ПД}}^0)^n + B^0 (\rho_{\text{ПД}}^0)^{\gamma+1}, \quad A^0 = A \rho_n^n / p_n, \quad B^0 = B \rho_n^{\gamma+1} / p_n.$$

Величины  $A^0$ ,  $B^0$ ,  $n$ ,  $\gamma$  определяются из уравнений, которые получены из (1.2), (1.4):

$$A^0 + B^0 = 1, \quad k_n = n + B^0 (\gamma - n + 1), \quad \gamma = k_0 - 1, \quad Q^0 = \frac{Q \rho_n}{p_n} = \\ = \frac{1}{n-1} + \frac{B^0}{\gamma(n-1)} (n - \gamma - 1).$$

Граничные условия (1.6) с учетом (1.7) преобразуются к виду

$$\rho_{\text{ПД}}^0 = (R^0)^{-2} \text{ при } x = 1, \quad p^0 - p_0^0 = k_n \rho_0^0 D^0 u^0, \quad \rho^0 u^0 = (\rho^0 - \rho_0^0) D^0.$$

Задача решена для четырех типов водонасыщенных грунтов и воды, взрывчатого вещества типа тротила.

Параметры, характеризующие свойства ВВ, имеют значения  $k_n = 3$ ,  $k_0 = 1,25$ ,  $p_n = 96 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>,  $\rho_n = 1600$  кг/м<sup>3</sup>,  $Q = 4,19 \cdot 10^6$  Дж/кг. Грунты имеют одинаковую пористость  $\alpha_1 + \alpha_2 = 0,4$ .

Характеристики компонентов грунтов имеют значения

$$\rho_1 = 1,20 \text{ кг/м}^3, \quad \rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3, \quad \rho_3 = 2650 \text{ кг/м}^3, \\ c_1 = 330 \text{ м/с}, \quad c_2 = 1500 \text{ м/с}, \quad c_3 = 4500 \text{ м/с}, \quad \gamma_1 = 1,4, \quad \gamma_2 = 7, \quad \gamma_3 = 4.$$

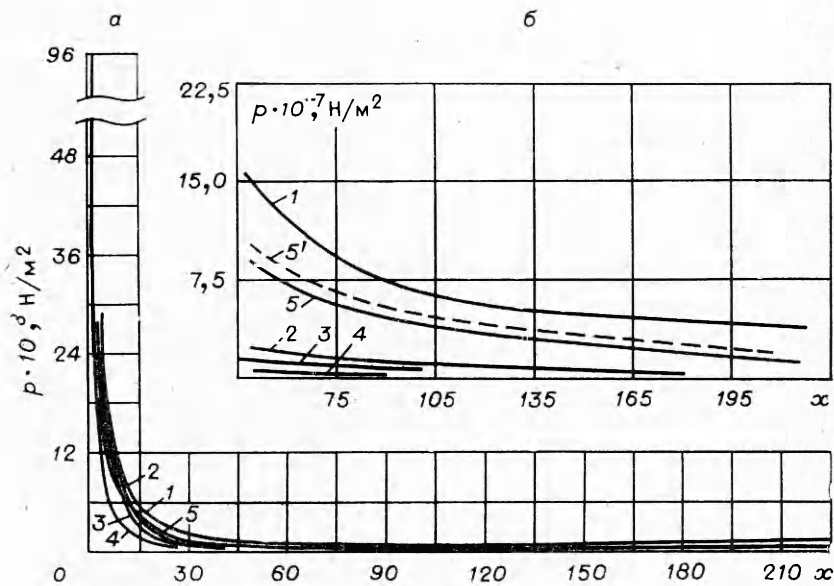
Содержание компонентов в рассмотренных грунтах приведено в таблице.

В данной задаче нужно рассматривать три типа точек: на фронте ударной волны  $S$ , в среде между фронтом  $S$  и контактным разрывом  $T$ , на контактном разрыве  $T$ . Для каждого из этих типов точек свой алгоритм счета.

При решении шаг по пространственной координате  $\Delta x$  оставался постоянным, величина его определяется требуемой точностью решения. Шаг по времени  $\Delta t$  менялся от слоя к слою в соответствии со схемой Хартри [9] следующим образом:

$$\Delta t_i = 2\Delta x / (D_{i-1} + D_i),$$

Номер среды	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
1	0	0,4	0,6
2	0,02	0,38	0,6
3	0,04	0,36	0,6
4	0,10	0,30	0,6
5	0	1	0

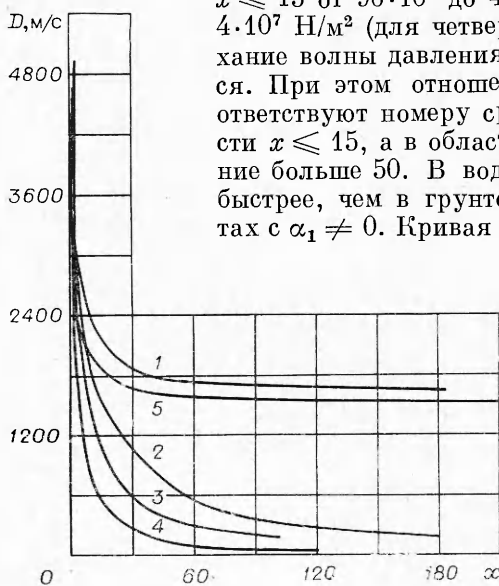


Фиг. 1

где  $i$  — номер временного слоя;  $D_i$ ,  $D_{i-1}$  — скорость фронта на  $i$ -м и  $i-1$ -м слоях.

Последовательность расчета параметров для всех типов точек выбиралась такой же, как и в работе [4]. Количество итераций при счете определялось требуемой точностью (по давлению точность счета составляла  $0,01 \text{ кгс/см}^2$ ).

2. На фиг. 1—6 нумерация кривых соответствует нумерации сред в таблице. На фиг. 1 приведены графики изменения давления с расстоянием, где видно, что наиболее интенсивно давление убывает в области  $x \leq 15$  от  $96 \cdot 10^8$  до  $4 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$  (для первой среды) и до  $4 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$  (для четвертой среды). С увеличением  $\alpha_1$  затухание волны давления с расстоянием также увеличивается. При этом отношение давления  $p_1/p_4$  (индексы соответствуют номеру среды) возрастает от 1 до 10 в области  $x \leq 15$ , а в области  $x \geq 60$  (см. фиг. 1, б) это отношение больше 50. В воде затухание давления происходит быстрее, чем в грунте с  $\alpha_1 = 0$ , и медленнее, чем в грунтах с  $\alpha_1 \neq 0$ . Кривая 5' соответствует взрывам цилиндрических зарядов в воде [8].



Фиг. 2

Скорость фронта (фиг. 2), как и давление, наиболее интенсивно убывает с расстоянием во всех средах в области  $x \leq 15$ , при этом с увеличением содержания воздуха интенсивность уменьшения скорости возрастает. При  $x > 15$  убывание скорости происходит медленнее, при этом в пределе скорость фронта стремится к скорости звука  $c_0$  в соответствующей среде. Наиболее быстро скорость фронта стремится к  $c_0$  в во-

де и в грунте с  $\alpha_1 = 0$ , а в грунтах, содержащих воздух, это стремление  $D$  к  $c_0$  происходит значительно медленнее.

Зависимость скорости частиц  $u$  от расстояния показана на фиг. 3. Падение скорости частиц для всех грунтов, как и параметров  $p$  и  $D$ , наиболее быстро происходит в близкой к заряду области ( $x \leq 15$ ). В отличие от параметров  $p$  и  $D$ , величины которых во всей области движения тем больше, чем меньше содержание воздуха в среде, скорость частиц в зависимости от величины  $\alpha_1$  с расстоянием меняется несколько иначе. При  $x \leq 2,5$  скорость частиц  $u$  тем выше, чем больше содержится воздуха, а уже при  $x \geq 4$  характер зависимости  $u$  от  $\alpha_1$  противоположный. В воде скорость частиц больше на всех расстояниях, чем в остальных средах.

На фиг. 4 представлены зависимости координаты фронта от времени.

Из сопоставления графиков следует, что движение фронта ударной волны в значительной степени зависит от содержания воздуха в грунте, при этом чем больше  $\alpha_1$ , тем меньше величина  $R$ .

На фиг. 5,  $a-v$  показано изменение скорости частицы со временем (координаты частиц  $x = 8,68$ ;  $31,72$  и  $59,98$ ). Видно, что чем меньше содержание воздуха, тем больше скорость частицы. При этом интенсивность убывания скорости со временем сразу же после прихода волны в данную точку увеличивается с уменьшением величины  $\alpha_1$ . Это указывает на тот факт, что в более плотных грунтах при всех остальных одинаковых условиях распространяются более высокочастотные волны. После участка резкого спада наступает длительный пологий участок уменьшения скорости.

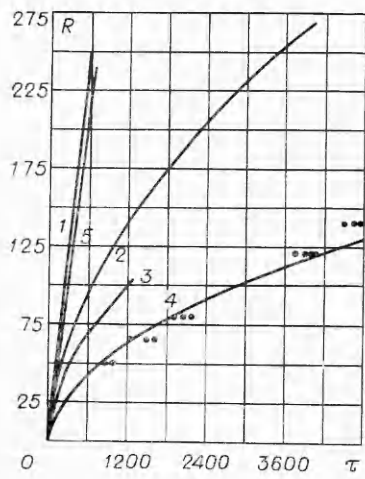
Опыты проводились в водонасыщенном песке с примерным содержанием компонентов  $\alpha_1 = 0,1$ ;  $\alpha_2 = 0,3$ ;  $\alpha_3 = 0,6$ . Волны в грунте создавались взрывами цилиндрических зарядов. Погонный вес заряда определялся количеством нитей ДШ, в опытах количество нитей изменялось от 2 до 5. Водонасыщение песка производилось в котловане размерами  $1,5 \times 1,5 \times 1,5$  м, дно которого бетонировалось, а боковые стенки покрывались полиэтиленовой пленкой. После каждого опыта песок из котлована вынимался, потом вновь производилась засыпка котлована и водонасыщение.

Давления, создаваемые взрывом волны, измерялись высокочастотными тензодатчиками, сигналы с которых усиливались с помощью тензостанции УТС-1-12 и записывались на шлейфном осциллографе Н-115. Установка датчиков производилась в плоскости, перпендикулярной оси заряда, на различных расстояниях от оси.

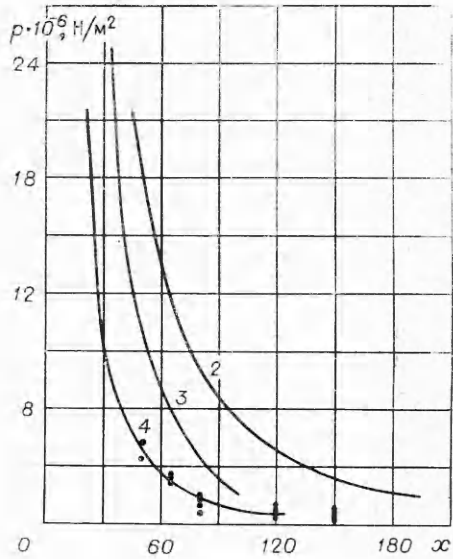
На фиг. 6 точки соответствуют полученным экспериментально величинам давления. Кривая 4 получена решением задачи и относится к грунту, по содержанию ком-



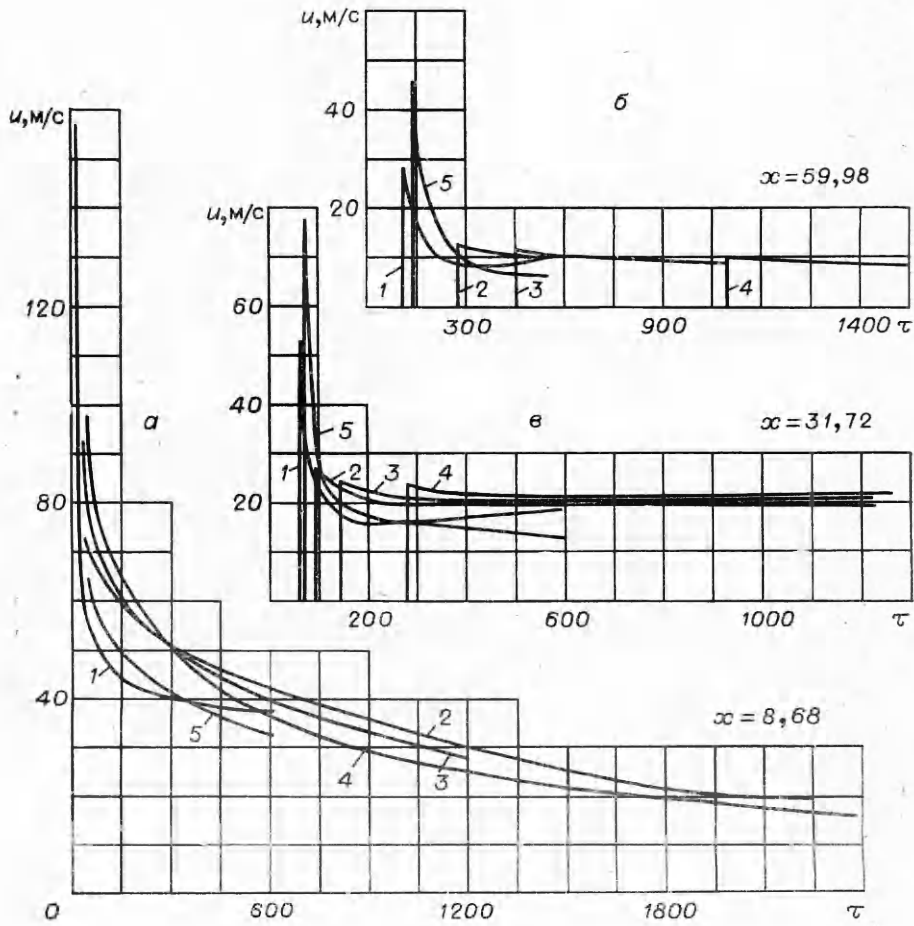
Ф и г. 3



Ф и г. 4



Ф и г. 6



Ф и г. 5

попентов примерно такому же, в котором производились опыты; соответствие расчетной кривой и экспериментальных точек вполне удовлетворительное. Точки на фиг. 4 отражают зависимость координаты фронта максимальных давлений, полученную опытным путем. Неплохое соответствие экспериментальных и расчетных данных о закономерности распространения фронта волны в грунте 4 (см. таблицу) указывает, что волну в измеренном диапазоне расстояний с приближением можно считать ударной.

Таким образом, в результате сопоставления расчетных и опытных данных можно сделать вывод, что модель многокомпонентной среды [1] позволяет хорошо описывать распространение волн в водонасыщенных грунтах.

Автор выражает благодарность Г. М. Ляхову и А. А. Вовку за постановку задачи и обсуждение работы.

Поступила 28 IV 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ляхов Г. М. Ударные волны в многокомпонентных средах.— «Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение», 1959, № 1.
2. Кривцов В. А. Уравнение сжатия водонасыщенного песка и границы его применимости.— ПМТФ, 1974, № 4.
3. Рахматулин Х. А. О распространении волн в многокомпонентных средах.— ПММ, 1969, т. 33, вып. 4.
4. Ляхов Г. М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М., «Недра», 1974.
5. Ляхов Г. М., Охитин В. Н., Чистов А. Г. Ударные волны в грунтах и в воде вблизи от места взрыва.— ПМТФ, 1972, № 3.
6. Legowski Z., Włodarczyk E. Regular reflection of an oblique stationary shock wave from an indeformable plane partition in saturated soil.— «Proc. Vibrat. Probl. Pol. Acad. Sci.», 1974, vol. 15, N 2.
7. Włodarczyk E., Luc Du Khuong. Propagacja płaskiej fali uderzeniowej w niejednorodnym gruncie uwodnionym.— «Biuletyn Wojskowej Akademii technicznej im J. Dąbrowskiego», 1976, r. 25, N 7.
8. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П., Челышев В. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. М., «Наука», 1975.
9. Хоскин Н. Э. Метод характеристик для решения уравнений одномерного установившегося течения.— В кн.: Вычислительные методы в гидродинамике. М., «Мир», 1967.

УДК 532.52 + 532.503.2

#### О НЕКОТОРЫХ ЭФФЕКТАХ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВЗРЫВНОМ ОБЖАТИИ ВЯЗКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Н. И. Матюшкин, Ю. А. Тришин

(Новосибирск)

В работах [1—3] рассматривается процесс схлопывания металлической цилиндрической оболочки к оси симметрии под действием продуктов взрыва. В основу расчетов для схлопывающейся оболочки положена модель идеальной несжимаемой жидкости. Сопоставление результатов численного решения задачи о сжатии к оси оболочки идеальной несжимаемой жидкости с экспериментальными данными, полученными при съемке на рентгеноимпульсной установке процесса схлопывания металлических трубок, окруженных слоем ВВ, показы-