

## О МЕТАНИИ ПЛОСКОГО НЕСЖИМАЕМОГО ПОРШНЯ ПРОДУКТАМИ ДЕТОНАЦИИ

С. А. Кинеловский

(Новосибирск)

Среди задач, относящихся к вопросу об ускорении тел с помощью взрыва, особое место занимают задачи об одномерном метании пластины — плоского поршня. Интерес к одномерным задачам обусловлен относительной простотой их теоретического исследования и тем, что, помимо возможности непосредственной практической реализации этого способа метания, одномерный подход является упрощенной моделью многих реальных задач о метании тел продуктами взрыва (ПВ).

Аналитический подход в решении одномерных задач основывается, как правило, на предположении о несжимаемости материала поршня, предположении о слабости ударных волн в ПВ и предположении, что ПВ формально удовлетворяют уравнению состояния совершенного газа с показателем адиабаты  $k = 3$ . Последние два предположения означают, что характеристики уравнений движения газа являются прямыми и не меняют свой наклон при пересечении со встречными ударными волнами (волнами сжатия), а давление и скорость звука в газе в течение всего процесса связаны соотношением

$$p = Ac^3,$$

где константа  $A$  определяется начальным термодинамическим состоянием ПВ.

В перечисленных предположениях ранее получено аналитическое решение ряда задач о движении плоского поршня при взрыве слоя ВВ конечной толщины. В [1, 2] рассматривалась задача о метании поршня, когда детонация инициируется на свободной границе заряда и детонационная волна падает на поршень, в [3] — подобная задача с тем отличием, что детонация начинается у жесткой неподвижной стенки. В [4] рассматривалась задача о метании в противоположные стороны двух плоских поршней (как частный случай — масса одного из поршней равна нулю), разделенных продуктами мгновенной детонации заряда ВВ. В [5] рассмотрен случай, когда детонация инициируется в плоскости поршня и распространяется в направлении свободной границы заряда. Кроме того, в ряде работ по одномерному метанию поршня процесс ускорения поршня фактически не рассматривался, а из различных физических предположений сразу находилась предельная скорость поршня. Обзор этих работ имеется в [6, 7].

Рассмотрим случай, когда противоположный от поршня конец заряда ВВ граничит с вакуумом. Входящие сюда три известных способа метания поршня приведены и проанализированы в [5]. Ниже в указанных предположениях и для указанного случая исследуются отличные от известных способы метания плоского поршня. Задачи рассматриваются в безразмерном виде: за единицу длины принята толщина  $l_0$  слоя ВВ, за единицу скорости — скорость детонации  $D$ , за единицу массы — масса заряда ВВ (на единицу площади), время отнесено к величине  $l_0/D$ , а давление — к величине  $\rho_0 D^2$ , где  $\rho_0$  — плотность ВВ.

В [5] отмечено, что на различных стадиях ускорения поршня его движение может быть описано двумя типами решений. Это остается справедливым и для рассмотренных ниже задач, хотя каноническая форма записи решений дается в несколько отличной от [5] форме.

В областях, где значение инварианта, переносимого догоняющими поршень характеристиками, постоянно во всей области, решение для координаты  $X(t)$  и скорости  $U(t)$  поршня может быть записано в виде

$$(1) \quad X(t) = \gamma[\tau + (2/a)(S_2 - \sqrt{a\tau + S_1})], \quad U(t) = \gamma[1 - 1/\sqrt{a\tau + S_1}],$$

а в областях, где ускорение поршня осуществляется в отраженной от поршня волне разрежения, решение имеет вид

$$(2) \quad X(t) = \gamma[K_2\tau - \sqrt{(4/a)(K_1\tau^2 - \tau)}] - x_0, \quad U(t) = \gamma[K_2 - (2K_1\tau - i)/\sqrt{a(K_1\tau^2 - \tau)}].$$

Значения входящих в эти решения параметров определяются конкретно для каждой задачи. Решение (2) описывает в числе других и заключительную фазу ускорения поршня после прихода на него волны разрежения

с левой свободной границы ВВ. В этом случае оно остается справедливым при  $t \rightarrow \infty$  и может быть дополнено выражением для предельной скорости поршня:

$$(3) \quad U_{\infty} = \gamma(K_2 - 2\sqrt{K_1/a}).$$

Сохраняя принятую в [5] нумерацию задач, рассмотрим различные, включая известные, способы метания плоского поршня массы  $M$ .

1. *Детонация инициируется на свободной границе заряда.* Иницирование заряда производится при  $t = 0$  в сечении  $x = -1$ . При  $t = 1$  детонационная волна достигает поршня ( $x = 0$ ) и отражается от него ударной волной. Для  $t \geq 1$  движение поршня описывается решением (2), где надо положить

$$\gamma = x_0 = 1, \quad a = 32/(27M), \quad \tau = t, \quad K_1 = 1 + 1/a, \quad K_2 = 1 + 2/a.$$

Предельная скорость поршня дается выражением (3).

2. *Детонация инициируется в плоскости поршня.* Иницирование заряда производится при  $t = 0$  в сечении  $x = 0$ . В момент времени  $t = 1$  детонационная волна выходит на свободную границу заряда ( $x = -1$ ) и рождает центрированную волну разрежения, передний фронт которой при  $t = t_1$  догоняет уже движущийся поршень. В данной задаче  $\gamma = 1/2$ ,  $a = 8/(27M)$ . При  $0 \leq t \leq t_1 = 3 + 9a/4$  движение поршня описывается решением (1):  $\tau = t$ ,  $S_1 = S_2 = 1$ , а при  $t \geq t_1$  — решением (2):  $\tau = t - 1$ ,  $x_0 = 1$ ,  $K_1 = 8(9a^2 + 10a + 2)/[a(8 + 9a)^2]$ ,  $K_2 = 1 + 4(2 + 3a)/[a(8 + 9a)]$ .

3. *Метание поршня продуктами мгновенной детонации.* В момент времени  $t = 0$  к поршню, находящемуся в  $x = 0$ , слева примыкает слой газа (продукты мгновенной детонации) единичной ширины. При расширении сжатого газа поршень ускоряется. В момент времени  $t = t_1$  на поршень приходит передняя характеристика центрированной волны разрежения со свободной границы и дальнейшее ускорение поршня происходит в отраженной от него волне разрежения.

В данной задаче  $\gamma = c_0 = \sqrt{3/8}$ ,  $a = 1/(\sqrt{6}M)$ . При  $0 \leq t \leq t_1$  движение описывается решением (1):

$$\tau = t, \quad S_1 = S_2 = 1, \quad t_1 = [1 + a/(4c_0)]/c_0,$$

а при  $t \geq t_1$  — решением (2):  $\tau = t$ ,  $x_0 = 1$ ,

$$K_1 = 8c_0^2(a^2 + 4ac_0 + 2c_0^2)/[a(a + 4c_0)^2], \quad K_2 = (a^2 + 8ac_0 + 8c_0^2)/[a(a + 4c_0)].$$

Для предельной скорости поршня из (3) с учетом полученных значений констант имеем

$$(4) \quad U_{\infty} = \sqrt{3/8}(1 + 12M + 18M^2 - 6M\sqrt{2 + 12M + 9M^2})/(1 + 6M).$$

Несложными алгебраическими преобразованиями можно показать, что записанные выше решения совпадают для задач 1 и 2 с приведенными в [5], а для задачи 3 — с решением, приведенным в [8], а также с более ранним известным решением этой задачи [4]\*.

4. *Иницирование заряда ВВ одновременно на свободной границе и в плоскости поршня.* При  $t = 0$  в слое ВВ с двух сторон одновременно инициируется детонация: в плоскости поршня ( $x = 0$ ) и на свободной границе заряда ( $x = -1$ ). К детонационной волне со свободной поверхности, как и в задаче 1, примыкает центрированная волна разрежения, рождаемая разлетом газообразных ПВ в вакуум. При  $t = 1/2$  обе детонационные волны встречаются в сечении  $x = -1/2$ . Пересечение детонационных волн рождает две ударные волны: одна распространяется к поршню, а вторая — к свободной границе. Первая из них в момент времени  $t = t_1$  догоняет

\* Отметим, что в [4] в формуле, аналогичной (4), для  $U_{\infty}$  допущена опечатка: в подкоренном выражении вместо коэффициента 12 напечатано 16.

поршень и отражается от него также ударной волной, вызывая дополнительное ускорение поршня.

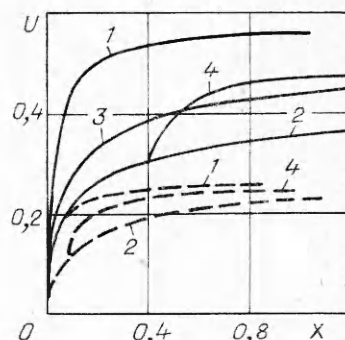
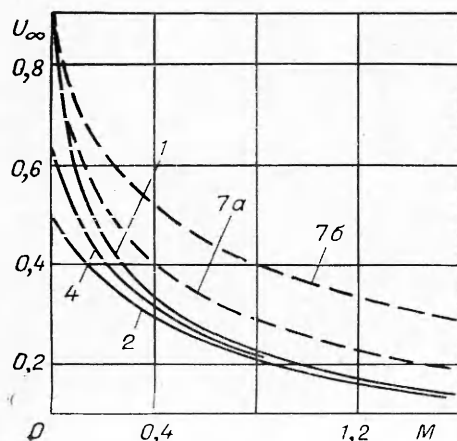
В данной задаче  $\gamma = 1/2$ ,  $a = 8/(27M)$ ,  $t_1 = 2[2(1 + a - \sqrt{17 + 8a})/(8 - a)]^2$ . Первая стадия ( $0 \leq t \leq t_1$ ) ускорения поршня описывается решением (1), полностью совпадающим с решением задачи 2. При  $t \geq t_1$  движение поршня описывается решением (2):

$$\tau = t, \quad x_0 = 1, \quad K_1 = \frac{a}{b^2 - 1} \{1 + b^2(b^2 - 1)/[2ab - (b - 1)^2]\},$$

$$K_2 = \frac{1}{b^2 - 1} \{2a + (b - 1)^2 + 2b(b^2 - 1)/[2ab - (b - 1)^2]\}, \quad b = \sqrt{at_1 + 1}.$$

На фиг. 1 приведены построенные по (1) зависимости  $U_\infty$  от относительной массы поршня  $M$  для различных задач (здесь и далее номера кривых на фигурах соответствуют номерам задач). Из графика видно, что кривая  $U_\infty(M)$  для задачи 4 занимает примерно среднее положение между аналогичными зависимостями для задач 1 и 2. Из решения задачи 4 следует, что получаемое в данном случае двухступенчатое ускорение поршня обеспечивает скорости метания, близкие к достигаемым в задаче 1, где реализуется наиболее «жесткий» режим ускорения [5]. При этом длина участка разгона поршня до скорости  $(0,7-0,9) U_\infty$  в 2—4 раза больше, чем в задаче 1. На фиг. 2 для двух значений  $M$  и различных задач приведены расчетные зависимости скорости поршня от пройденного им пути, позволяющие судить о характере его ускорения ( $M = 0,1$  — сплошные кривые,  $M = 0,6$  — штриховые кривые).

5. *Детонация инициируется внутри заряда ВВ.* В начальный момент времени  $t = 0$  в сечении, отстоящем на расстоянии  $l$  от поршня, возбуждается детонация и в обе стороны идут детонационные волны. На этой стадии процесс симметричен относительно сечения  $x = -l$ , т. е. в каждую сторону эквивалентен распространению детонационной волны от жесткой неподвижной стенки. В этом случае (см., например, [3]) от стенки простирается область покоя, занимающая в любой момент времени половину расстояния до фронта детонационной волны. В момент времени  $t = l$  правая детонационная волна падает на поршень ( $x = 0$ ), отражаясь от него ударной волной и вызывая начало ускорения поршня. Левая детонационная волна в момент времени  $t_0 = 1 - l$  выходит на свободную границу заряда ( $x = -1$ ) и отражается от нее центрированной волной разрежения, передний фронт которой в принципе может догнать поршень. В данной задаче  $\gamma = 1/2$ ,  $a = 8/(27M)$ . Процесс ускорения поршня существенным образом зависит от того, догонит или не догонит поршень передняя характеристика «области покоя» (аналогично работе [3]). В случае очень легких поршней, когда  $a \geq 2/l$ , т. е.  $M \leq 4l/27$ , эта характеристика (и никакое другое возмущение) не догоняет поршень. Тогда имеется всего одна стадия уско-



Ф и г. 1

Ф и г. 2

рения поршня, которая для любых  $t \geq l$  описывается решением (2):

$$\tau = t, x_0 = l, K_1 = (1 + 4al)/(4al^2), K_2 = (1 + 2al)/(al).$$

Предельная скорость поршня дается формулой (3).

В случае более тяжелых поршней ( $a < 2/l$ ) «область покоя», а затем и центрированная волна разрежения догоняют поршень соответственно в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  и ускорение поршня разделяется на несколько стадий. При  $l \leq t \leq t_1 = 4l/(2 - al)$  движение поршня описывается приведенным выше решением для легких поршней. При  $t_1 \leq t \leq t_2 = (a^2 b^2 - S_1)/a$ , где  $b = 1 + S_2/a + t_0/2$ , движение поршня описывается решением (1):

$$\tau = t, S_1 = 4(1 + 2a^2 l^2)/(2 - al)^2, S_2 = (2 + a^2 l^2)/(2 - al).$$

И, наконец, при  $t \geq t_2$  движение поршня снова описывается решением (2), где

$$\tau = t - t_0, x_0 = 1, K_1 = (\tau_2 + ab^2)/\tau_2^2, K_2 = 1 + 2a/\tau_2, \tau_2 = t_2 - t_0.$$

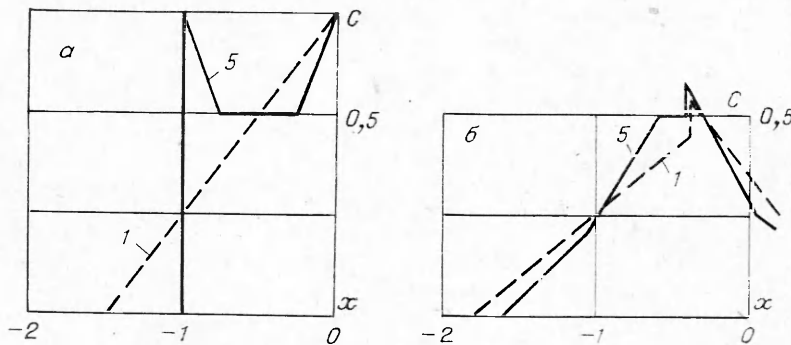
Последние выражения для  $K_1$  и  $K_2$  и формула (3) определяют предельную скорость поршня.

Отмеченный выше для задачи 5 факт существования в газе в течение некоторого отрезка времени «неподвижной стенки» позволял надеяться, что для  $M > 0$  предельная скорость поршня окажется более высокой, чем в задаче 1. Однако анализ решения показал, что это не так. Эффективное давление газа, ускоряющее поршень, в задаче 5 в среднем всегда меньше, чем в задаче 1. Это, в частности, иллюстрируется фиг. 3, где для обеих задач показаны распределения скорости звука в газе:  $a$  — в момент прихода детонационной волны на поршень;  $b$  — когда поршень  $M = 0,1$  прошел путь  $0,2$  (для задачи 5  $l = 0,5$ ). Для других значений  $l$  и  $M$  картина качественно остается примерно такой же.

Из решения задачи 5 следует, что она является промежуточной как по предельной скорости, так и по режиму ускорения поршня между задачами 1 и 2. Действительно, варьирование величины  $l$  дает набор режимов ускорения поршня от самого «мягкого» ( $l = 0$ , задача 2) до самого «жесткого» ( $l = 1$ , задача 1).

Проведенный в [5] анализ задач 2 и 3 можно дополнить замечанием, относящимся также и к задаче 5. В этих задачах поршень к моменту прихода на него волны разрежения со свободной границы заряда успевает набрать 95% ( $M = 0,1$ ) — 80% ( $M = 1,4$ ) своей предельной скорости. Таким образом, в указанном диапазоне значений  $M < 1,4$  движение поршня в основном определяется первоначальным импульсом давления ПВ, а вклад остаточного давления довольно мал.

6. *Метание поршня продуктами мгновенной детонации через зазор.* При  $t = 0$  на отрезке  $-1 \leq x \leq 0$  находится сжатый газ, являющийся продуктом мгновенной детонации заряда ВВ. Левая граница газа свободна, а на правой в общем случае находится промежуточный поршень массы  $\mu$  (частный случай  $\mu = 0$ ). В сечении с координатой  $x = \delta_0$  находится



Ф и г. 3

основной поршень массы ( $M - \mu$ ). Оба поршня несжимаемы, между ними и слева от газа — вакуум.

При  $t \geq 0$  движение промежуточного поршня описывается решением задачи 3 с  $a = \alpha = 1/(\sqrt{6\mu})$ . В момент времени  $t_0$  промежуточный поршень достигнет основного. Удар между ними считаем абсолютно неупругим и из этого условия находим начальную скорость  $U_0$  основного поршня массы  $M$ ; при ударе поршней в газ пойдет ударная волна. Массу промежуточного поршня  $\mu$  считаем достаточно малой, так что волна разгрузки со свободной границы не догоняет его до момента удара. При  $t = t_1$  поршень догонит передний фронт центрированной волны разрежения со свободной границы.

Для данной задачи

$$\gamma = c_0 = \sqrt{3/8}, \quad a = 1/(\sqrt{6M}).$$

Из ее решения имеем

$$t_0 = \delta_0(1 + 2\lambda)/c_0, \quad U_0 = ac_0/[\alpha(1 + \lambda)], \quad \lambda = \sqrt{c_0/(\alpha\delta_0)}.$$

При  $t_0 \leq t \leq t_1$  движение поршня описывается решением (1), где

$$t_1 = t_0 + \frac{1}{a} \left[ \left( \frac{a(1 - 2\lambda\delta_0)}{2c_0} + \sqrt{S_1} \right)^2 - S_1 \right], \quad \tau = t - t_0,$$

$$S_1 = [c_0/(c_0 - U_0)]^2, \quad S_2 = a\delta_0/(2c_0) + \sqrt{S_1},$$

а при  $t \geq t_1$  — решением (2), где  $\tau = t$ ,  $x_0 = 1$ ,

$$K_1 = (2t_1 - t_0 + S_1/a)/t_1^2, \quad K_2 = 1 + (1/c_0 + 2S_2/a - t_0)/t_1.$$

7. *Метание поршня через зазор; детонация инициируется на противоположном от поршня конце заряда.* Эта задача по постановке аналогична предыдущей и отличается от нее только способом инициирования заряда ВВ. Движение промежуточного поршня массы  $\mu$  начинается в момент прихода на него детонационной волны ( $t = 1$ ) и описывается решением задачи 1. В момент времени  $t_1$  после абсолютно неупругого удара начинается движение основного поршня суммарной массы  $M$  с начальной скоростью  $U_0$ . Как и в задаче 1, здесь имеется всего одна стадия ускорения поршня, которая для  $t \geq t_1$  описывается решением (2):

$$a = 32/(27M), \quad \alpha = 32/(27\mu), \quad \tau = t, \quad \gamma = x_0 = 1,$$

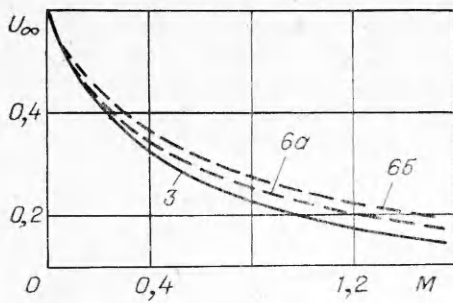
$$t_1 = 1 + \delta_0 + 2\delta_0 [1 + \sqrt{1 + \alpha(1 + \delta_0)/\delta_0}]/\alpha,$$

$$U_0 = \frac{a}{\alpha} \left[ 1 - \frac{2(t_1 + \delta_0)}{(\alpha + 2)t_1 - \alpha(1 + \delta_0)} \right],$$

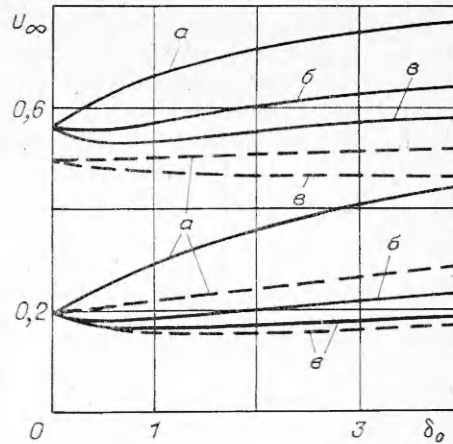
$$K_1 = \frac{1}{t_1} \left[ 1 + \frac{t_1}{a(1 + \delta_0 - U_0 t_1)^2} \right], \quad K_2 = \frac{1}{t_1} \left[ 1 + \delta_0 + \frac{2(t_1 + \delta_0)}{a(1 + \delta_0 - U_0 t_1)} \right].$$

Физическим обоснованием постановки двух последних задач является то, что введение зазора увеличивает количество газа, массовая скорость которого направлена к поршню и, следовательно, может увеличить импульс, передаваемый газом поршню. Эти рассуждения в принципе подтверждаются полученными решениями, которые для обеих задач дают качественно похожие результаты.

При отсутствии промежуточного поршня ( $\mu = 0$ ) введение зазора дает увеличение конечной скорости поршня, растущее с увеличением зазора. Для задачи 6 это иллюстрируется фиг. 4, где приведены зависимости  $U_\infty(M)$  при разных  $\delta_0$  для случая  $\mu = 0$ :  $\delta_0 = 0$  (задача 3) — кривая 3,  $\delta_0 = 1$  и  $\delta_0 = 2$  — кривые 6а и 6б соответственно. Для задачи 7 аналогичные результаты приведены на фиг. 1: 7а —  $\delta_0 = 0,5$ ; 7б —  $\delta_0 = 2$ . На фиг. 5 приведены зависимости  $U_\infty(\delta_0)$  для различных случаев. Сплошные кривые здесь относятся к задаче 7, а штриховые — к задаче 6; для верхней группы (сплошных и штриховых) кривых  $M = 0,1$ , для нижней —  $M =$



Ф и г. 4



Ф и г. 5

$= 1,0$ ; масса промежуточного поршня  $\mu = 0$  (кривые *a*),  $0,1$  (кривые *б*) и  $0,25$  (кривые *в*).

Рассмотренные выше задачи показывают, что различные схемы метания дают достаточно широкие возможности управления процессом метания поршня. Иницирование детонации внутри заряда ВВ (задача 5) позволяет реализовать практически любой (от самого «мягкого» (задача 2) до самого «жесткого» (задача 1)) режим ускорения поршня. Иницирование заряда с двух сторон (задача 4) дает двухступенчатое ускорение поршня и обеспечивает конечную скорость поршня, более близкую к случаю падающей на поршень детонационной волны (задача 1) при существенно более «мягком» режиме ускорения. Введение вакуумного зазора между зарядом и поршнем, наоборот, позволяет в некоторых случаях (задача 7) получить более «жесткий» режим ускорения и достигнуть более высоких скоростей поршня, чем в задаче 1, или с примерным сохранением скорости метания заметно увеличить путь, на котором достигается эта скорость.

Необходимо отметить, что в действительности получение более высоких скоростей метания при создании зазора между ВВ и поршнем, вообще говоря, проблематично. Исследования [9, 10] по метанию пластин через воздушный зазор не показали увеличения конечной скорости пластин, причем в [9], где масса пластины довольно велика ( $M \approx 1,35$ ), получено уменьшение конечной скорости пластины при увеличении зазора. Сопоставление результатов этих работ и решений рассмотренных выше модельных задач оставляет неясным, является ли существенным наличие или отсутствие воздуха в зазоре. Эксперименты [9] показали заметное увеличение скорости пластины при откачке воздуха из зазора. Если предположить, что наличие воздуха в зазоре в какой-то мере эквивалентно наличию рассмотренного в задачах промежуточного поршня, то даже при очень малой массе этого поршня из решения задач следует, что скорость основного поршня остается примерно такой же, как и без зазора, или даже несколько снижается при небольших зазорах и начинает увеличиваться только при достаточно больших зазорах, когда в эксперименте довольно сложно реализовать предполагаемую в задачах одномерность процесса. Время разгона с ростом зазора увеличивается, что качественно соответствует результатам [9, 10]. Итак, в данном случае экспериментальные результаты качественно согласуются с решением модельных задач, если в последних попытаться учесть наличие воздуха в зазоре. С другой стороны, если рассмотреть экспериментальные результаты [10] для равнотолщинных стальных пластин, то из решения задачи 7 с  $\mu = 0$  получаем, что расчетное отношение скоростей поршня при зазоре  $10$  мм ( $\delta_0 = 0,25$ ) и без зазора равно  $1,05$  (т. е. расчетный прирост скорости действительно мал), причем расчетное значение абсолютной величины скорости поршня близко к  $4,1$  км/с, которая была зарегистрирована в экспериментах. Следовательно, определенное согласие экспериментальных результатов с решени-

ем задачи здесь достигается без учета наличия воздуха в зазоре. Таким образом, проведенное сопоставление не дает пока оснований полагать, что решения модельных задач 6 и 7 в качественном отношении сильно противоречат известным экспериментальным результатам.

Автор признателен Ю. А. Тришину за внимание к работе и полезные обсуждения.

Поступила 4 XI 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Станюкович К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды. М.: Гостехиздат, 1955.
2. Aziz A., Hurwitz P., Sternberg H. Energy transfer to a rigid piston under detonation loading.— Phys. Fluids, 1961, vol. 4, N 3.
3. Abarbanel S., Zwas G. The motion of shock waves and products of detonation confined between a wall and a rigid piston.— J. Mathemat. Anal. Applicat., 1969, vol. 28, N 3.
4. Ляхов Г. М. Направленное метание тел продуктами взрыва.— ПМТФ, 1962, № 3.
5. Иванов А. Г., Карпенко Г. Я. О разгоне тонких пластин продуктами взрыва при различных способах инициирования ВВ.— ФГВ, 1980, т. 16, № 2.
6. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.
7. Кузьмин Г. Е. Применение численных методов в задачах прессования и сварки взрывом. Дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, ИГ СО АН СССР, 1978.
8. Исправление к статье А. Г. Иванова, Г. Я. Карпенко.— ФГВ, 1981, т. 17, № 1.
9. Пыпкин В. И., Минеев В. Н. и др. Исследование процесса разгона медных пластин продуктами взрыва через зазор.— ЖТФ, 1975, т. 45, № 3.
10. Огородников В. А., Пинчук С. Ю. и др. Экспериментально-расчетное исследование разгона пластин продуктами взрыва через зазор.— ФГВ, 1981, т. 17, № 1.

УДК 539.412 : 539.42

### ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВЕЛИЧИНЫ ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ СКОРОСТИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦА

С. А. Новиков, А. В. Чернов

(Москва)

Измерения скорости движения свободной поверхности образца при отражении от нее нестационарной ударной волны позволяют получить необходимые данные для определения величины откольной прочности материала  $\sigma_0$ , которая вычисляется по формулам [1]

$$(1) \quad \sigma_0 = \rho_0 C_0 (W_0 - W_k) / 2;$$

$$(2) \quad \sigma_0 = \rho_0 C_0 (W_0 - \bar{W}),$$

где  $\rho_0$  — начальная плотность материала;  $C_0$  — скорость пластических волн в нем;  $W_0$  — максимальное значение скорости свободной поверхности образца, реализующееся при выходе ударной волны на эту поверхность;  $W_k$  — значение в первом минимуме зависимости скорости свободной поверхности от времени;  $\bar{W}$  — средняя скорость движения отколовшейся части образца. Значения  $W_0$  и  $W_k$  определяются по непрерывной записи измерения скорости свободной поверхности методом емкостного датчика [2];  $W_0$  также можно определить как скорость тонкого искусственного откола (готового откола), т. е. тонкой фольги из того же материала, плотно притертой к образцу;  $\bar{W}$  — средняя скорость обычного откола.

В литературе не приводится анализ границ применимости этих формул и предположений, принимаемых при их выводе. Поэтому целью данной работы является выяснение предположений, необходимых для вывода формулы и границ ее применимости.

Рассмотрим с помощью метода характеристик [3] течение в образце, претерпевающем откольное разрушение, для случая распространения