

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОДЕЛИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ МЕТАЛЛОВ

В. И. Лаптев, М. В. Рубцов, Ю. А. Тришин
(Новосибирск)

В исследовании явления плоской кумуляции для описания некоторых отклонений экспериментальных результатов от теории [1, 2], основанной на модели идеальной жидкости, используются модели среды, учитывающие диссипацию энергии при деформировании. В работе [3] предложено вводить в уравнение Бернулли дополнительный член Y , характеризующий прочность. В [4] описана формальная модель процесса, учитывающая реальный предел прочности металла σ . В работах [5, 6] приведены качественные оценки влияния постоянной вязкости на характерные параметры процесса. Если к недостаткам [3, 4] следует отнести достаточно формальное введение прочностного параметра, то в [5, 6] показано, по крайней мере качественно, чем отличается реальный процесс от описываемого в [1, 2], но для расчета скорости струи приходится определять эффективную вязкость металла из тех же измерений скорости струи по рентгеновским снимкам. В [5, 7, 8] введено предположение о пограничном слое вблизи свободной поверхности, которое использовано в [9] для приближенного анализа течения при соударении двух плоских свободных струй.

В настоящей работе анализируется применимость модели ньютоновской жидкости для описания плоских струйных течений металлов в сравнении с экспериментальными результатами.

1. С целью исследования влияния физико-механических свойств материалов на кинематику течения проведены две серии опытов. В первой оценивалась интегральная вязкость материала при соударении пластин по измерению скорости кумулятивной струи, во второй вязкость оценивалась по деформации запрессованных в пластину проволок после взрыва. Условия метания пластин были одинаковы. Оценочные значения вязкости сравнивались между собой.

Принципиально схема экспериментов в первой серии опытов не отличается от приведенной в [6], поэтому остановимся лишь на основных ее отличиях. Чтобы выделить неучтенную в [6] длину участка установления процесса струеформирования, проведены однотипные опыты с последовательно увеличивающимся временем задержки рентгеновской вспышки от момента иницирования заряда. Под участком установления понимается участок, введенный в работе [11]. Для контроля и сопоставления значений скорости струи в каждом опыте работали три рентгеновских аппарата. Первый давал снимок в плоскости, перпендикулярной

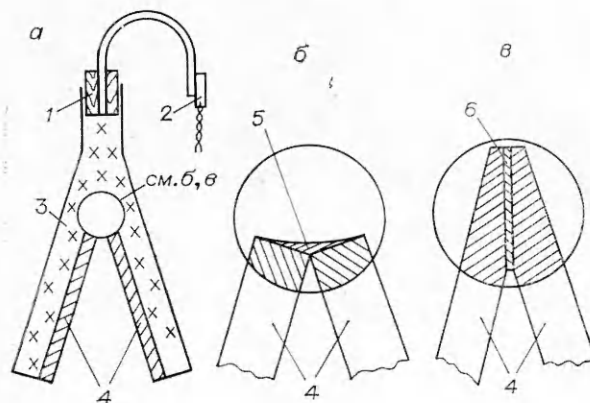


Рис. 1.

линии при вершине двугранного угла, образованного металлическими пластинами, второй и третий делали снимки в плоскостях, повернутых на углы $\pm 45^\circ$ вокруг линии пересечения плоскости симметрии заряда с плоскостью первого снимка. Назовем первый снимок профильным, второй и третий — боковыми. Схема установки заряда в профильной плоскости приведена на рис. 1, а.

Форма пластин в вершине угла выполнена в двух вариантах. В первом варианте пластины 4 с перпендикулярными торцевыми граями устанавливались вплотную под пужным углом и в части опытов торцевые грани запаивались припоем марки ПОС-30, ПОС-40 для предотвращения вылета продуктов детонации в зазор между пластинами. Назовем этот вариант установки пластин (см. рис. 1, б) вариантом с жестким началом (вариант А). Во втором варианте торцевые грани пластин срезались под углом 16° и соединялись эпоксидной смолой 6 (см. рис. 1, в). Назовем этот случай вариантом с мягким началом (вариант В). Заряд 3 инициировался детонатором 2 через боевик 1 (см. рис. 1, а), выполненный из семи отрезков детонирующего шнура, вставленных в отверстия в деревянном бруске. На расстоянии 50 мм от боевика детонационная волна становится плоской, что проверялось экспериментально в специальных опытах. Заряд ВВ метает пластины 4 из меди МЗ симметрично друг на друга. В качестве ВВ использовался аммонит 6ЖВ. Параметры заряда: $d = 110$ мм — длина пластин в направлении движения детонации; $l = 60$ мм — размер пластин в направлении движения детонации; $h = 3,9$ мм — толщина пластин; $\delta = 14$ мм — толщина ВВ; $2\alpha = 32^\circ$ — угол установки; $2\gamma = 45^\circ$ — угол соударения; $U = 0,93$ км/с — расчетная скорость набегающих струй в системе отсчета точки контакта.

$$U = D(1 - \sin \alpha / \sin \gamma),$$

где D — скорость детонации, равная 3,2 км/с в слое толщиной 14 мм.

Очевидно, что изложенная методика позволяет измерить только скорость головной части кумулятивной струи, поскольку на рентгеновских снимках струя выглядит однородной. Поэтому значение скорости струи получается приближенным, так как элементы струи за головной частью могут иметь как большую, так и меньшую скорость. Измерение распределения скорости за головной частью проводилось в специальных опытах. В отличие от описанных в них на поверхности одной из двух пластин перпендикулярно направлению движения фронта детонации делались четыре прямоугольные канавки размером $0,5 \times 0,5$ мм, которые заполнялись затем эпоксидной смолой. Канавки располагались на внутренней поверхности угла, образованного пластинами. Первая канавка находилась на расстоянии 20 мм от вершины угла, расстояние между канавками 10 мм. Образующаяся струя в месте расположения канавки оказывается тоньше и канавку можно различить в кумулятивной струе на боковом рентгеновском снимке.

2. Во второй серии опытов исследовались характеристики течения в пестовой струе. Две пластины одинаковой толщины симметрично металась скользящей детонационной волной внутрь образованного ими угла. В пластины были запрессованы проволоочки по методике, изложенной в [10]. Сравнение формы проволоочек (меток) в пластинах до и после взрыва позволяет оценить интегральную вязкость в песте в период соударения.

В этих опытах $\delta = 14$ мм, $2\alpha = 32^\circ$. Расстояние от вершины угла, образованного пластинами, до первой метки на поверхности пластины равно 30 мм, расстояние между метками 15 мм, длина и ширина пластин 110 и 90 мм соответственно, толщина 3,85—3,95 мм, материал — медь М1. Меток на пластине 3, диаметр запрессованной медной проволоочки 0,4 мм. Для улавливания песта использовалась стальная труба диаметром 350 и длиной 800 мм, заполненная снегом. Поверхность пластины, прилегающая к ВВ, защищалась приклеенной медной фольгой толщиной 0,1 мм для уменьшения искажения меток в поверхностном слое пластины. После взрыва пластины разрезались возле меток по направлению движения детонации и готовился шлиф. Деформация меток на шлифах измерялась на микроскопе, имеющем точность измерения 0,005 мм.

Очевидно, что искажение формы меток после взрыва пестет на себе информацию о течении металла как при соударении пластин, так и на стадии разгона при метании слоем ВВ. С целью выделения информации

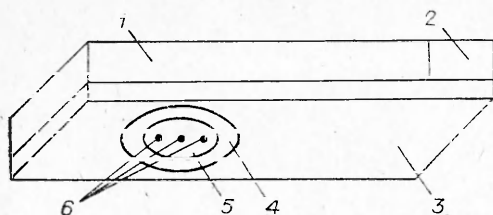


Рис. 2.

о течения металла только на стадии разгона пластины проводились специальные опыты. Конструкция зарядов в этих опытах изображена на рис. 2. Детонация от боевика 2, описанного ранее, передается слою ВВ 1 (аммонит 6ЖВ, толщина 14 мм). Скользящая детонационная волна метает пластину в наполненную снегом трубу. Пла-

стина 3 имеет отверстие, в которое плотно вставлено кольцо 4, в которое, в свою очередь, вставлен вырезанный из пластины круг 5 с запрессованными в него метками 6. Кольцо и круг не связаны с пластиной с целью уменьшения прогиба круга в процессе метания. Поверхность круга, прилегающая к ВВ, заклеивалась медной фольгой толщиной 0,1 мм. Толщина пластины, кольца и круга была одинаковой и равной 3,85—3,95 мм, материал — медь М1. Размеры пластины 80 × 120 мм, центр кольца находился на расстоянии 80 от передней и 40 мм от боковой кромок пластины. Диаметры кольца 60 и 42,5 мм, диаметр круга 42,4 мм. Метки расположены на линии, параллельной направлению движения фронта детонации, одна в центре, две другие на расстоянии 15 мм от центральной метки. Ширина боевика 20 мм. Пойманный круг с метками разрезался возле меток и готовился шлиф. Деформация меток также измерялась на микроскопе.

3. При измерении скорости кумулятивной струи проведено 9 опытов с жестким началом и 11 опытов с мягким началом. Установлены следующие закономерности.

В опытах с жестким началом при достижении детонационной волной вершины угла между пластинами образуется быстрая струя, имеющая скорость существенно выше установившейся. Затем она становится тоньше, растягивается и рассеивается. Ее появление, вероятно, связано с взаимодействием ударной волны с клиновидной полостью, образованной пластинами в вершине угла (см. рис. 1, б). Исследование таких струй проведено в работах [12, 13], хотя в [12] использовались в основном мощные ВВ (ТГ 50/50). Вслед за быстрой образуется низкоскоростная струя с примерно постоянной скоростью по длине. Последовательное развитие процесса представлено на рис. 3, а (цифры у кадров — время в мкс).

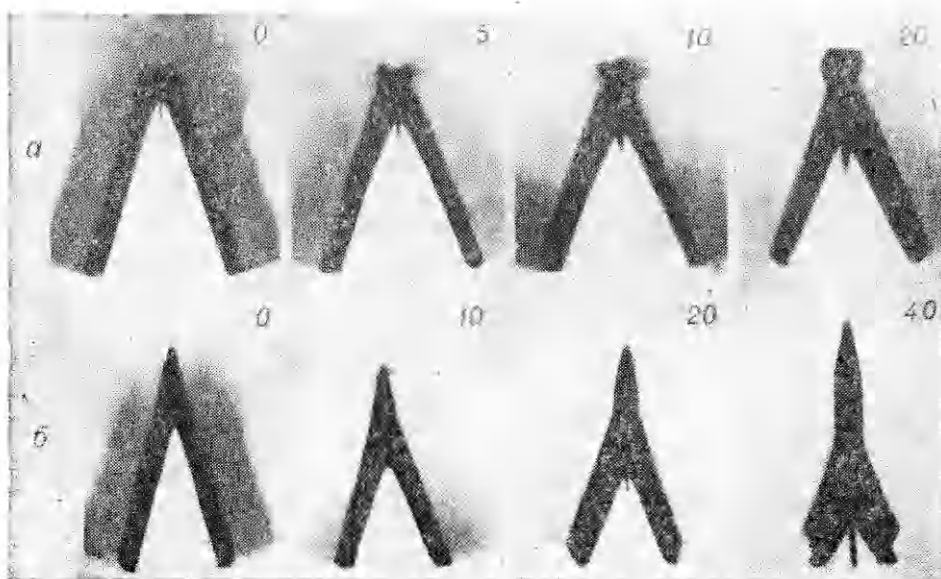


Рис. 3.

В опытах с мягким началом быстрая струя отсутствует, а участок установления процесса больше (см. рис. 3, б).

На рис. 4 приведены результаты измерения длины струй l_1 по рентгеновским снимкам. Здесь l_2 — длина схлопнувшейся части; l_0 — длина участка установления процесса; λ_0 — длина срезающего участка в опытах с мягким началом. При определении скорости струй по отдельному кадру величину l_0 следует отнимать от длины схлопнувшейся части ($l_0 \approx 1,5h$ и $l_0 \approx 3,5h$ соответственно в опытах с жестким и мягким началом).

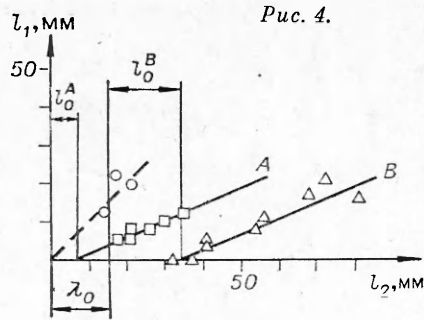


Рис. 4.

Отношение v_1/v_2 скоростей струй и песта в системе отсчета точки контакта определялось как тангенс угла наклона прямой, проведенной через экспериментальные точки, к оси l_2 . В опытах с жестким началом $v_1/v_2 = 0,46$, в опытах с мягким началом $v_1/v_2 = 0,43$. Усредненное значение $v_1/v_2 = 0,45$.

Если скорость пестовой струи v_2 в системе отсчета точки контакта была бы существенно меньше U , то пест сжимался бы по длине. Измерение длины песта после взрыва показывает, что сжатия не происходит, а, вероятно, вследствие краевых эффектов, пест несколько удлиняется (длина образцов после взрыва $L \approx 61 \div 63$ мм при начальной длине 60 мм). Поэтому будем считать, что $v_2 = U$. Тогда усредненное экспериментальное отношение $v_1/U = 0,45$. Измерение скоростей по рентгеновским снимкам дало средние значения: $D \approx 3,2$; $U \approx 1,0$; $v_k \approx 1,05$ км/с, где v_k — скорость точки контакта. Измерение скорости головы струи на боковых снимках дало значение $v_c = 1,40 \pm 0,10$ км/с. Поскольку v_c определяется как

$$v_c = v_k + v_1,$$

то, складывая экспериментальные значения v_k и v_1 , получим $v_c \approx 1,50$ км/с, что согласуется с прямыми измерениями на боковых снимках. Таким образом, скорость головной части струи в системе отсчета точки контакта

$$v_1 = 0,45 \text{ км/с.}$$

Измерение массовой скорости струи за головной частью по канавкам на струе показывает, что в опытах с жестким началом элементы струи, расположенные за головной частью, движутся быстрее самой головной части. На рис. 5 приведены два боковых кадра одного из опытов по из-

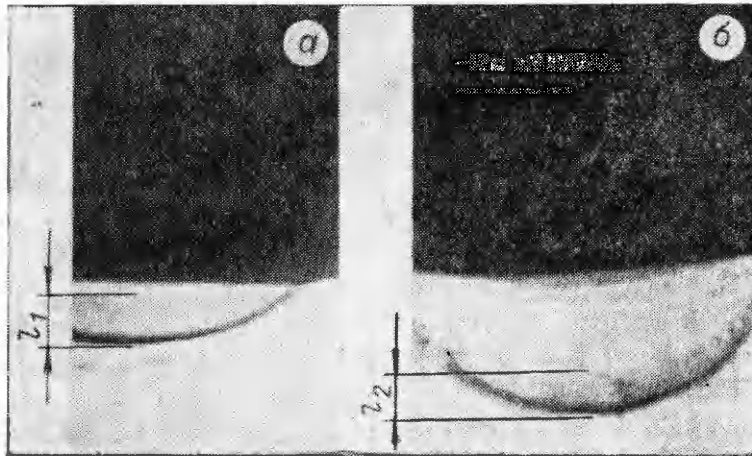


Рис. 5.

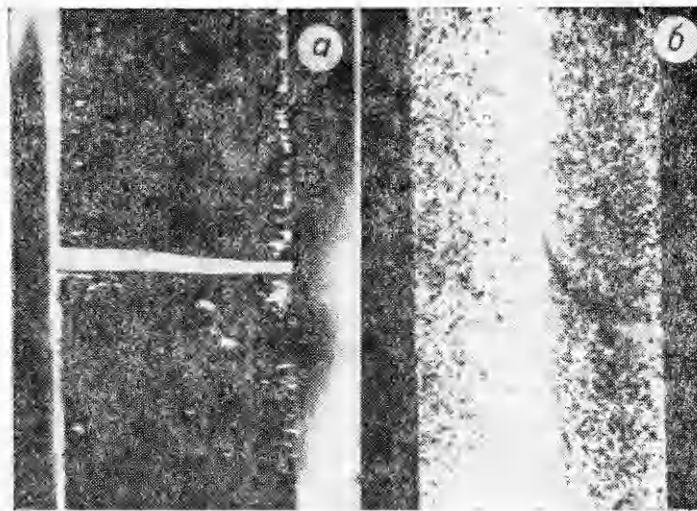


Рис. 6.

мерению массовой скорости. Расстояние между канавкой и головной частью на рис. 5, *a* составляет $11,5 \pm 0,25$ мм, а на рис. 5, *б* — $10,0 \pm 0,25$ мм. Время задержки между кадрами $\tau = 10,2$ мкс, откуда разница в скоростях головной части и материала возле канавки $\Delta v = 150 \pm 50$ м/с. С учетом значения v_1 скорость элементов струи должна быть $v_1 = 0,60 \pm 0,05$ км/с. Введем величину $w' = 1 - v_1'/U$, тогда $w' = 0,40 \pm 0,05$.

4. При измерении деформации меток выявлены следующие закономерности.

Относительное смещение частиц метки на поверхности пластины в процессе метания слоем аммонита 6ЖВ толщиной 14 мм в среднем равно 2%, но не превышает 4%. Слой меди, прилегающий к ВВ, смещается в направлении движения фронта детонации, как бы увлекаясь движущейся детонационной волной (рис. 6, *a*). Прогиб круга с метками после торможения не превышает 2 мм. Смещение частиц метки относительно частиц на свободной границе при соударении пластин на одинаковой относительной глубине повторяется в пределах разброса, не превышающего 0,3 мм (8%). Разброс в смещениях меток увеличивается с глубиной. Смещение метки на относительной глубине 0,9 в среднем равно 0,59 (см. рис. 6, *б*). Под относительной глубиной понимается величина $s = 2y/H$, где y — глубина от свободной границы; H — толщина песта. С учетом

смещения при метании $s(0,9) = 0,61$. На рис. 7 приведены экспериментальные значения смещения.

5. Рассчитаем деформацию индикаторной линии (меток), считая материал пластин вязкой жидкостью. Будем предполагать, что имеется симметричное соударение плоских струй вязкой жидкости. Предположим, что число Рейнольдса $Re = \rho U h / \mu \gg 1$, где U — скорость втекания; h — толщина пабегающих струй; ρ , μ — плотность и вязкость материала соответственно. Тогда разумно предположить, что основные отличия вязкого течения от невязкого сосредоточены в узком слое вблизи

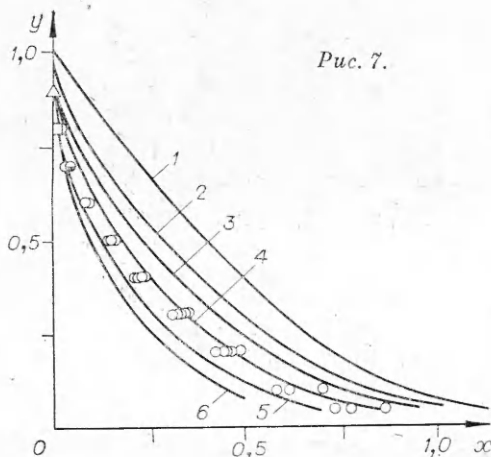


Рис. 7.

свободной границы [9], а области вязкого и невязкого течений в первом приближении совпадают. В плоскости комплексного потенциала скорость лагранжевой частицы, определенная как

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dz} \frac{dz}{dt} = \zeta \frac{dz}{dt},$$

находится по формуле

$$\frac{dW}{dt} = u_0 e^{-i\omega} (u_0 + w) e^{i\alpha} = u_0 (u_0 + w),$$

где u_0 — модуль невязкой скорости; α — аргумент комплексной скорости; w — вязкая поправка к скорости; $W = \varphi + i\psi$ — комплексный потенциал; $z = x + iy$ — комплексная координата. Тогда деформацию индикаторной линии в области течения можно рассчитать методом, предложенным в работе [14], а вязкую поправку $w(\varphi, \psi)$ найти из уравнений [9]

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} = \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 w}{\partial \psi^2},$$

$$\left. \frac{\partial w}{\partial \psi} \right|_{\Sigma} = - \left. \frac{\partial u_0^2}{\partial \psi} \right|_{\Sigma}.$$

Форма индикаторной линии рассчитывалась численно для $2\gamma = 45^\circ$ при разных числах Re. Результаты расчета приведены на рис. 7. Цифрами 1—6 обозначены расчетные кривые при различных Re: 1 — идеальная жидкость; 2 — Re = 200; 3 — Re = 100; 4 — Re = 50; 5 — Re = 15; 6 — Re = 5. Сравнение расчета с экспериментом по смещению меток показывает, что эффективные числа Re заключены в интервале $10 \leq \text{Re} \leq 50$, а среднее значение $\text{Re}_* \approx 25$. Пересчитанное из Re_* среднее значение вязкости лежит вблизи $\mu_* \approx 1,4 \cdot 10^4$ Пз.

6. В работе [9] приведено также выражение для установившейся скорости кумулятивной струи

$$v_1 = U \left(1 - \frac{4(\pi - \gamma)}{\text{Re}(1 - \cos \gamma)} \right).$$

Сравнивая его с экспериментальным значением скорости w' , можно получить оценку характерного числа Re для течения в кумулятивной струе

$$\text{Re}^* \approx \frac{4(\pi - \gamma)}{0,4(1 - \cos \gamma)} = 350$$

при $2\gamma = 45^\circ$. Тогда

$$\text{Re}^*/\text{Re}_* = \mu_*/\mu_* \approx 14,0,$$

где μ^* — характерная вязкость в кумулятивной струе, характерные вязкости в струе и песте различаются примерно на порядок.

Таким образом, исследование процесса плоской кумуляции с помощью трехкадровой рентгеновской съемки позволяет более точно измерить скорость кумулятивной струи. Последовательность профильных кадров позволила выделить участок установления процесса. Как показали опыты, он не превышает двух-трех толщин пластин, что является определенным основанием для рассмотрения стационарной задачи при теоретическом анализе. Обнаружено, что в опытах с жестким началом вначале формируется быстрая струя, стимулирующая более раннее появление основной, замедленной струи. Головная часть основной кумулятивной струи в опытах с жестким началом движется несколько медленнее последующих элементов струи. Исследовано искажение запрессованных в пластину проволочек как при метании пластин слоем ВВ, так и при их соударении. Оценочные значения вязкости в кумулятивной струе и песте различаются на порядок.

Следовательно, подход к описанию высокоскоростных струйных течений металлов, основанный на модели жидкости с постоянной вязкостью, качественно объясняет некоторые экспериментальные закономер-

ности (например, деформацию метки в песце) и может использоваться для расчета отдельных характеристик течения. Для описания же процесса в целом косоугольного соударения металлических пластин с образованием кумулятивной струи необходимо рассматривать модель с более сложной зависимостью между напряжениями и скоростями деформирования.

Авторы выражают благодарность В. П. Урушкину за помощь в проведении экспериментов, С. А. Кинеловскому — за ряд полезных советов в ходе выполнения работы.

Поступила в редакцию 9/VII 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Лаврентьев. УМН, 1957, XII, 4(76).
2. G. Birkhoff, D. McDougall, E. Pugh et al. J. Appl. Phys., 1948, 19, 563.
3. R. J. Eichelberger. J. Appl. Phys., 1956, 27, 1.
4. С. А. Кинеловский, Ю. А. Тришин. ФГВ, 1980, 16, 5, 26.
5. С. К. Годунов, А. А. Дерибас. Докл. АН СССР, 1972, 202, 5.
6. С. К. Годунов, А. А. Дерибас, В. П. Мали. ФГВ, 1975, 11, 1, 3, 3.
7. В. А. Батницев. ПМТФ, 1980, 1, 62.
8. Дж. Бэтчелор. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973.
9. М. В. Рубцов.— В кн.: Динамика сплошной среды. Вып. 51. Новосибирск, 1981.
10. Н. С. Козин, В. П. Мали, М. В. Рубцов. ФГВ, 1977, 13, 4, 619.
11. М. В. Рубцов. ФГВ, 1977, 13, 6, 930.
12. В. А. Симонов. ФГВ, 1971, 7, 2, 280.
13. Н. С. Козин, В. А. Симонов. ФГВ, 1973, 9, 4, 551.
14. М. В. Рубцов. ПМТФ, 1977, 6.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В АЭРОВЗВЕСИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

Т. П. Гавриленко, В. В. Григорьев

(Новосибирск)

Экспериментальные исследования распространения ударных волн в аэровзвеси твердых частиц ограничиваются, по существу, тремя работами [1—3]. В основном это связано с трудностями получения больших объемов однородной аэровзвеси порошка, размеры частиц которого лежат в диапазоне 40—100 мкм. В работе [1] аэровзвесь порошка получали вбрасыванием порции порошка сверху в вертикально расположенную трубу. Концентрация аэровзвеси определялась весовым методом, т. е. построением зависимости накопления твердой фазы в сосуде от времени работы дозатора. Известно, что полученная таким способом аэровзвесь имеет неоднородную концентрацию как вдоль оси, так и по ее поперечному сечению.

В работе [4] экспериментально показано, что в вертикальном потоке аэровзвеси концентрация в различных местах отличается более чем в 2 раза. Неоднородность концентрации тем выше, чем больше размер частиц и удельный вес материала.

Получить однородную аэровзвесь с заданной концентрацией довольно трудно. Наиболее перспективные способы перевода порошка в аэровзвесь: пневматический (струей воздуха под большим давлением) и механических колебаний. В работе [5] получена довольно однородная по концентрации аэровзвесь при помощи механических колебаний с использованием механического вибратора. Поэтому и в настоящих опытах за основу при создании устройства для получения аэровзвеси выбран способ механических колебаний.

Устройство для создания аэровзвеси. Для получения аэровзвеси использован механический вибратор. Металлический канал квадратного сечения с прозрачными окнами на торцах и сбоку перемещался вертикально по направляющим. На валу электродвигателя с варьируемым