

что подтверждается результатами, полученными рентгенофазовым анализом конечного продукта.

Повышение T_0 с 20 до 300 °С приводит к сокращению t_{\max} с 47,9 до 31,5 мс.

Хорошее соответствие наблюдаемого фазового состава продуктов и состава, предсказанного на основе измерений яркостным пирометром высокого разрешения, может служить очевидным доказательством адекватности предложенных моделей фазообразования. Тем не менее представляется целесообразным получить подтверждение выдвинутым моделям фазообразования с помощью прямых методов визуализации, таких как дифрактометрия синхротронного излучения [10], либо быстрой закалкой продукта по достижении того или иного температурного пика (что осложняется быстрым протеканием процессов в реакционной зоне). Однако уже полученные результаты свидетельствуют о возможности успешного применения созданных аппаратуры и методики обработки данных для оптимизации процессов получения материалов с заданным фазовым составом, а также для контроля технологических процессов СВС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез тугоплавких соединений // Вестн. АН СССР. — 1976. — № 10. — С. 64—76.
2. Найбороденко Ю.С., Итин В.И., Мержанов А.Г. и др. Безгазовое горение смеси металлов и самораспространяющийся высокотемпературный синтез интерметаллидов // Изв. вузов. Физика. — 1973. — № 6. — С. 145—146.
3. Найбороденко Ю.С., Итин В.И. Исследование процесса безгазового горения смеси порошков разнородных металлов. I. Закономерности и механизм горения // ФГВ. — 1975. — 11, № 3. — С. 343—353.
4. Корчагин М.А., Александров В.В., Неронов В.А. Фазовый состав промежуточных продуктов взаимодействия никеля с алюминием // Изв. СО АН СССР, сер. хим. наук. — 1979. — Вып. 6, № 14. — С. 104—111.
5. Мержанов А.Г. Новые элементарные модели горения 2-го рода // Докл. АН СССР. — 1977. — 233, № 6. — С. 1130—1133.
6. Александров В.В., Смирнов В.И., Болдырев В.В. О стадийности взаимодействия двуокиси свинца с двуокисью вольфрама в режиме горения // ФГВ. — 1979. — 15, № 3. — С. 53—58.
7. Итин В.И., Найбороденко Ю.С. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. — Томск: Изд-во ТГУ, 1989. — 214 с.
8. Гарколь Д.А., Гуляев П.Ю., Евстигнеев В.В. и др. Новая методика высокоскоростной яркостной пирометрии для исследования процессов СВ-синтеза // ФГВ. — 1994. — 30, № 1.
9. Самсонов Г.В., Виницкий И.М. Тугоплавкие соединения. — М.: Металлургия, 1976. — 560 с.
10. Болдырев В.В., Александров В.В., Корчагин М.А. и др. Исследование динамики образования фаз при синтезе моноалюминида никеля в режиме горения // Там же. — 1981. — 259, № 5. — С. 1127—1130.

656099, г. Барнаул,
Алтайский политехнический институт

Поступила в редакцию 8/IV 1993,
после доработки — 29/IX 1993

УДК 531.66:(539.3+532.522)

В.Д. Захматов

ИМПУЛЬСНЫЙ СТРУЙНЫЙ ГАЗОДИСПЕРСНЫЙ ПОТОК

Для описания дальнего направленного распыления порошков в виде струйного импульсного потока предложена математическая модель, которая основывается на дифференциальных уравнениях. Для решения последних используются аналитические и численные методы. Подробное рассмотрение происходящих физических процессов и анализ экспериментальных результатов позволяют сделать выводы о преимуществах взрывного направленного распыления огнетушащих порошков перед другими методами.

В настоящее время внедряется новая импульсная техника многоплановой защиты, способной тушить пожары, предотвращать взрывы пылей, паров

© В.Д. Захматов, 1994.

и газов, ставить свето-теплозащитные экраны заданных размеров и конфигураций, наносить локализирующие покрытия на различные поверхности, содержащие осаждаемые активные пыли, аэрозоли, а также разрушать и осаждаемые активные выбросы. Эта техника основана на процессе управляемого распыления с помощью энергии направленного взрыва огнетушащих порошков и жидкостей, что позволяет получать импульсные газодисперсные потоки с гибко регулируемыми параметрами: скорость, конфигурация, плотность и площадь фронта потока.

В работах [1, 2] рассмотрен процесс взрывного образования огнетушащего двухфазного (равномерного по объемной концентрации) газодисперсного импульсного потока.

Для описания дальнего направленного распыления порошков в виде струйного импульсного потока предлагается следующая математическая модель, в которой поток рассматривается как одномерное движение совокупности частиц газа и конденсированной фазы (смесь дисперсных частиц — шариков, пространство между которыми заполнено газовой средой). В настоящей работе использован подход Х.А. Рахматуллина о взаимопроникающих континуумах. Принято допущение, что в начальной стадии разлета порошка под действием давления продуктов взрыва (ПВ) содержание газа в порах насыпной массы порошка (и соответственно его влияние на процесс) пренебрежимо мало, поэтому процессами фильтрации газа сквозь массу порошка можно пренебречь. Первое допущение предполагает второе и третье, состоящие в том, что температура газа и порошка изменяется незначительно, а скорости фаз в порошкообразной среде в каждый момент времени совпадают. При этом рассматривая скелет порошка в рамках модели нелинейно упругого тела, при условии баротропии среды можно построить простую волну Римана, распространяющуюся по скелету порошка.

При принятых допущениях, как показано в [3], система уравнений упрощается, принимая следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p_1}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \rho_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + u_2 \frac{\partial \rho_2}{\partial x} &= 0, \\ p_f = p_f(\rho_2) &= \begin{cases} \rho_2^{\alpha_1} \alpha_B^2 \alpha_B \left(\frac{\alpha_B}{\alpha_1} - 1 \right), & \alpha_1 \leq \alpha_B, \\ 0, & \alpha_1 > \alpha_B, \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

где $u_2, \rho_2, x, p, t, a, \alpha$ — соответственно скорость, плотность фазы, перемещение частиц, давление, время, скорость звука, объемная доля порошка и воздуха. Первое уравнение описывает движение структуры частиц порошка по Эйлеру, второе — сохранение массы, третье — состояние частиц в скелете в предположении баротропии. Решаем систему (1) в виде

$$u_2 = u_2(\rho_2), \quad \rho_2 = \rho_2(x, t). \quad (2)$$

Плотность частиц в газодисперсной среде определяем из выражения

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + a(\rho_2) \frac{\partial \rho_2}{\partial x} &= 0, \\ a &= u_2 + a_2. \end{aligned} \quad (3)$$

По уравнению состояния конденсированной фазы находим скорость порошка

$$u_2 = \pm a_{20} \alpha_{10} \ln \left(\frac{\alpha_2 \alpha_{10}}{\alpha_{20} \alpha_1} \right) \quad (4)$$

и координату (задней границы) фронта газопорошкового облака

Параметры начальной стадии разлета порошка

$t, \text{мс}$	\bar{t}	$x_1(t)$	$\alpha_2(\bar{x}_1)$	$\alpha_1(\bar{x}_1)$	a_2	$\bar{u}_2(\bar{x}_1)$	$\bar{t}_* - \bar{t}$
0	0	1	0,7867394	0,2132606	1,0784926	0,02236	3,6336592
0,0825	0,5	1,011168	0,7864897	0,2135003	1,0772818	0,0219976	3,1336592
0,165	1	1,022618	0,7862693	0,2137307	1,0761205	0,0216823	2,8336592
0,2475	1,5	1,0330029	0,7860474	0,2139526	1,0750044	0,0213787	2,1336592
0,33	2	1,0436922	0,7858335	0,2141665	1,0739307	0,0210881	1,6336592
0,4125	2,5	1,0542352	0,7856273	0,2143727	1,0728977	0,0208044	1,1336592
0,495	3	1,0646374	0,7854283	0,0719027	1,0719027	0,020533	0,6336592
0,6	—	1,0776483	0,785	0,2148	1,0706907	0,0202015	0-момент

$$x = a_2. \quad (5)$$

В таблице приведены результаты расчетов стадии образования газодисперсного потока — прессования порошка до начала его движения. На рис. 1, 2 показана иллюстрация метания. При $\bar{t}_* - \bar{t} = 0$ волна сжатия выходит на переднюю границу массы порошка. При этом достигается максимально возможная степень сжатия массы порошка (образовался прессованный порожковый конгломерат). Плотность и структура конгломерата зависят от длительности и интенсивности нагрузки взрывной волны, проходящей по порошку. В свою очередь, прочность и структура порошкового конгломерата определяют его аэродинамическую устойчивость и, следовательно, дальность полета конгломерата и механизм его аэродинамического разрушения — аэродинамическую живучесть конгломерата. Если прочность конгломерата недостаточна, то сразу за срезом канала ствола он превращается в несколько веерообразно разлетающихся конгломератов или в газопорошковый малоплотный поток, быстро растущий в размерах. Последний смешивается с воздухом и превращается в воздушно-газопорошковое облако, движущееся лишь под действием воздушных потоков. Начальные параметры конгломерата непосредственно за срезом ствола: $\bar{x}_1 = x_1/x_{10}$, $\bar{u}_2(\bar{x}_1) = u_2(x)/a_{20}$, $a_{20} = 420 \text{ м/с}$, $\bar{t}_* = t_*/T_x$, $T_x = x/a_{20}$ (t_* — время прихода взрывной волны сжатия на переднюю границу порошка).

Волновые профили объемного содержания конденсированной фазы α_2 , скорости порошка и межфазового давления p_f в газопорошковом потоке по различным текущим значениям показаны на рис. 3.

Давление в газовой пробке

$$p_f(\alpha_2) = \alpha_2 p_{1*} \left(\frac{x_{10}}{x_1} \right)^y \Big|_{x=x_1(t)}, \quad (6)$$

где p_{1*} — начальное давление в газовой пробке. Отсюда получаем неявную зависимость $\alpha_2|_{x=x_1(t)}$.

В пренебрежении кинетической энергией дополнительно сообщаемой частицам порошка при разгрузке от переднего фронта, для условий задачи выполнены расчеты начальной стадии разлета порошка. Как известно, проблемы учета разгрузки требуют дополнительного изучения состояния материала, что не входило в задачи исследования.

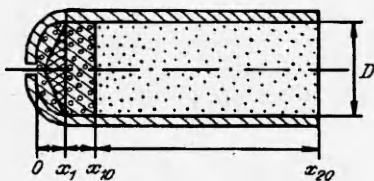


Рис. 1. Профиль устройства для метания порошка.

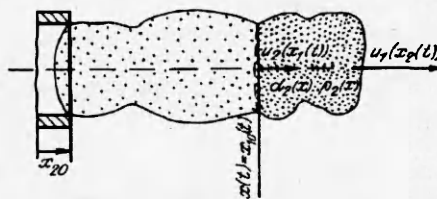


Рис. 2. Взрывное метание порошка из цилиндрического устройства.

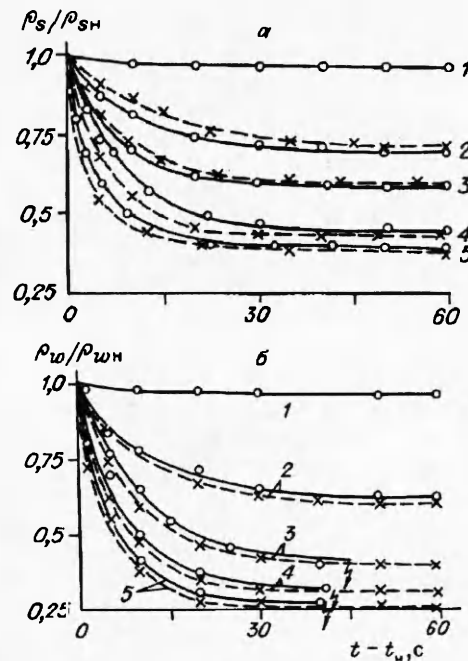


Рис. 3. Профили объемного содержания фаз (а), скорости порошка (б) и давления (в).

Траектория контактной границы $x_1(t)$ определяется соотношениями

$$\frac{dx_1}{dt} = u_2(x_1) = u_2[\alpha_2(x_1)], \quad (7)$$

$$x_1(0) = x_{10}.$$

Численно интегрируя первое выражение из (7), находим

$$x = a_{20}\alpha_{10} \left[\ln \left(\frac{\alpha_2\alpha_{10}}{\alpha_1\alpha_{20}} \right) + \frac{1}{\alpha_1} \right] t + x_1(t), \quad x_{10} \leq x \leq x_{20}.$$

По уравнению (5) определяем $u_2(x)$ в момент времени t . По известному $x_1(t)$ находим текущее давление газа в газовой пробке. Из граничного условия определяем $\alpha_2(x_1)$, а по нему $u_2(\alpha_2)$. Далее повторяется приведенный порядок вычислений. Расчеты по указанной схеме следует выполнять до момента прихода фронта волны сжатия на переднюю границу порошкообразного состава $x = x_{20}$.

В результате разгрузки объемное содержание порошка снижается и при $\alpha_2 \leq 0,5$ следует учитывать фильтрацию газа сквозь порошок, а также межфазные взаимодействия, что также требует специальных исследований. Поэтому дальнейший этап процесса теоретически не изучался. Приводятся только результаты экспериментов по дальности распространения импульсного газопорошкового потока от ряда начальных факторов: соотношения масс ВВ и огнетушащего состава (ОС), вида и формы заряда ВВ, конструкции патрона, длины ствола.

Результаты экспериментов (рис. 4, 5) по направленному струйному распылению порошка показали, что механизм полета и аэродинамического разрушения порошкового конгломерата подобен механизму полета и разрушения капли. Определены диапазоны Δv_0 начальных скоростей потока v_0 для ряда калибров стволов K_c , при которых обеспечивается наибольшая длина траектории полета L порошкового конгломерата, его равномерное аэродинамическое разрушение по всей длине траектории и образование равномерного, плотного, газодисперсного потока. При увеличении v_0 ($v_0 \rightarrow \Delta v_0$) равномерно возрастает L , диаметр газопорошкового потока D_{Π} и

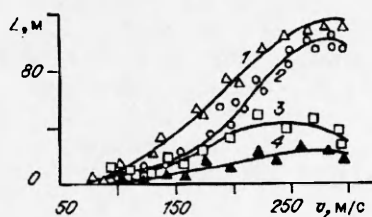


Рис. 4. Зависимость дальности движения порошка от начальной скорости.

1 — лидер в форме конуса; 2 — лидер в форме диска; 3 — без лидера; 4 — картонный ствол.

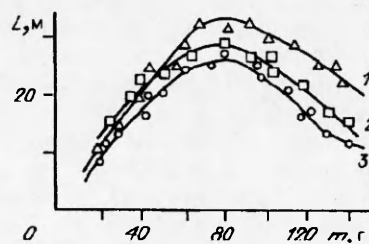


Рис. 5. Зависимость дальности полета конгломерата от изменения массы и метательного заряда и от калибра ствола.

K_c , мм: 1 — 200, 2 — 130, 3 — 100.

его функциональная эффективность. При $v_0 > \Delta v_0$ интенсивность процесса аэродинамического разрушения конгломерата резко возрастает, соответственно уменьшается L , увеличивается D , но также растет неравномерность потока.

Дальность полета конгломерата определяется дальностью его аэродинамического разрушения. Поэтому в режимах устойчивого стабильного метания порошка при $\Delta v_0 = 55 \div 75$ м/с больший по массе порошковый конгломерат имеет большую длину траектории полета.

Результаты экспериментов с распылительными зарядами, имеющими различную форму, показали, что наиболее эффективна для дальнего метания низкоскоростная плоская взрывная волна, получаемая при взрыве низкоимпульсных ВВ или быстрогорающих порохов. Начальная скорость газодисперсного потока, определенная по результатам скоростной киносъемки, на 20—35 % меньше скорости потока, рассчитанной по приведенной модели одномерного разлета порошка. Причина этого заключается в том, что в упрощенной модели не учтены диссипативные потери взрывной волны при взаимодействии с пористыми стенками патрона, пластичными и пористыми материалами пыжа, эластичной оболочкой и корпусом патрона, в котором содержится огнетушащий порошок.

В процессе полета порошковый конгломерат разрушается по механизму «обдирка» встречным потоком воздуха. На траектории полета на порошковый конгломерат воздействует комплекс сил

$$F_1 + F_5 = F_2 + F_3 + F_4, \quad (8)$$

где F_1 — фронтальное тормозящее встречное аэродинамическое сопротивление воздуха, послонно разрушающее фронтальную и боковую поверхности конгломерата; F_2 — локальные множественные разгрузочные напряжения, возникающие при отрыве частиц и малых конгломератов в поверхностном структурном слое конгломерата; F_3 — структурные внутренние напряжения, возникающие при формировании конгломерата взрывной волной в канале ствола; F_4 — расширяющие напряжения от проникающих внутрь конгломерата струй воздуха; F_5 — силы сцепления между частицами порошка внутренней структуры конгломерата.

Нарушения этого равновесия, в частности от резкого возрастания F_4 , при прорыве струи воздуха внутрь конгломерата приводят к взрывообразному разрушению конгломерата на траектории полета. В процессе полета конгломерата при непрерывном аэродинамическом разрушении уменьшаются F_3, F_4 . Силы F_1 и F_2 пропорциональны текущей скорости конгломерата v . За летящим порошковым конгломератом в результате его аэродинамического разрушения создается спутный газопорошковый поток, состоящий из частиц порошка и высокоскоростной несущей фазы газообразных продуктов взрыва.

По конфигурации, изменяющейся по мере возрастания v_0 , и механизму распространения спутный поток можно условно разделить на три вида. На рис. 5 показаны зависимости дальности полета конгломерата от начальной скорости или изменения массы метательного заряда при постоянной массе

метаемого порошка, равной 10 кг (длина ствола 1 м, ОС — пирант дисперсностью 20 мм).

При $v_{01} < 55$ м/с — это оптически плотный поток (низкоскоростная струя), равномерно заполняющий пространство, ограниченное телесным углом $\alpha = 20 \div 40^\circ$. Вследствие низкой интенсивности взрывной волны порошок в стволе не спрессовывается, поэтому порошковая струя как бы выливается из ствола, скользит по земле на расстояние не более 10—18 м.

В случае $\Delta v_0 = 55 \div 75$ м/с — это полет плотного, спрессованного порошкового конгломерата, описанный выше. По траектории полета конгломерата образуется равномерный плотный, мощный газопорошковый поток диаметром 2—4 м. На конечном участке траектории полета происходит взрывообразное разрушение конгломерата. При этом он полностью разрушается и расплывается в газопорошковый поток, в течение 0,5—1 с тормозящийся и превращающийся в газопорошковое облако, движущееся лишь под воздействием воздушных струй.

Третий вид газопорошкового потока создается при $v_0 > 75$ м/с и представляет наиболее нестабильный поток с нестационарной формой, дальностью распространения. Непосредственно за срезом ствола происходит распыление и нестабильное непредсказуемое каждый раз разрушение порошкового конгломерата на несколько меньших частиц, летящих параллельно, чаще разлетающихся по непредсказуемым траекториям. При разрушении конгломерата выделяются 2—3 более мелких конгломерата, летящих со значительной скоростью на расстояние до 20—30 м и образующих по траектории полета узкие газопорошковые струи.

Для увеличения дальности полета конгломерата необходимо уменьшить интенсивность аэродинамического разрушения этого конгломерата, для чего надо в первую очередь исключить проникновение струй встречного воздуха сквозь лобовую поверхность конгломерата. Поэтому важно уменьшить лобовую поверхность конгломерата. Этим объясняется тот факт, что наибольшая дальность полета конгломерата достигается при горизонтальных или восходящих под небольшим углом траекториях. С возрастанием кривизны траектории увеличивается лобовая поверхность конгломерата и соответственно интенсивность аэродинамического разрушения конгломерата. Эксперименты показывают, что при траекториях полета крутизной более 20° процесс разрушения завершается до падения конгломерата на землю. В случае кривизны траектории более 30° процесс разрушения завершается на восходящей части траектории.

Значение предельной величины метательного заряда ВВ, при которой достигается максимальная дальность полета постоянной массы конгломерата и распространения спутного газодисперсного потока, в основном зависит от калибра и длины ствола (рис. 6) в определенных исследованных пределах значений последних. Увеличение длины ствола до 400—500 калибров позволяет повысить дальность тушения L на $15 \div 20\%$. Этот эффект можно объяснить тем, что при такой длине ствола в условиях прессования порошка взрывной волной в полузамкнутом стволе обеспечивается формирование структуры конгломерата, обладающего близкими к максимально возможными характеристикам по прочности и устойчивости к аэродинамическому разрушающему воздействию.

Как показано в описанной выше математической модели, при движении массы порошка по длинному стволу задняя граница массы движется быстрее передней. До момента максимально возможного прессования порошка градиент скоростей гасится в массе порошка за счет диссипации кинетической энергии. Задерживается на-

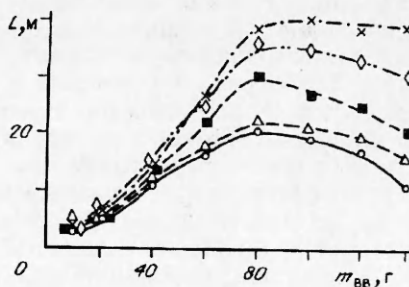


Рис. 6. Зависимость дальности распространения импульсного потока от длины ствола.

чало взаимодействия фронтальной и боковой поверхностей порошкового конгломерата с окружающей средой, что позволяет получить плотную, ровную и «гладкую» поверхность конгломерата, устойчивую к поверхностному, скользящему и проникающему аэродинамическому разрушающему воздействию.

Возможности увеличения дальности за счет прессования в стволе порошковой массы ограничены. Другой способ ее повышения обеспечивается за счет лидирующих обтекателей (конической или полусферической формы), толкаемых массой порошка. Эти обтекатели закрывают от аэродинамического воздействия фронтальную часть порошкового конгломерата. Поэтому аэродинамическое разрушение осуществляется только с боковой поверхности конгломерата. Применение плоского лидера позволяет доставить при выстреле из одного ствола на дальность 70—80 м до 30—50 % начальной массы метаемого порошка. При этом по траектории полета за летящим конгломератом создается узкое газопорошковое облако. На месте приземления конгломерат скользит 5—8 м по поверхности земли, оставляя след шириной 0,4—0,7 м и создавая над ним оптически плотное облако высотой 0,5—1 м и шириной 1 м.

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Теоретические исследования начальной стадии дают несколько завышенную оценку параметров движения порошковой массы, что связано с трудностями корректного учета факторов неоднородности взрывного горения пороха и нерегулярной структуры порошковой массы.

2. Зависимости дальности полета от массы ускорителя и начальной скорости разлета носят ярко выраженный унимодальный характер, определяемый лавинообразным разрушением порошкового тела при высоких скоростях его перемещения, что сопровождается ростом аэродинамического сопротивления.

3. Экспериментальные исследования позволяют получить достаточно полную количественную и качественную картину процесса распространения газодисперсного потока для того, чтобы обосновать наиболее простой и эффективный метод управления параметрами потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рахматуллин Х.А. Газодинамические основы взаимопроникающего движения сжимаемых сред // ПММ. — 1956. — 20, № 2. — С. 164—195.
2. Ивандаев А.И., Кутушев А.Г., Нигматулин Р.И. Ударные и детонационные волны в газозвзвесах // Итоги науки и техники. Серия «Механика жидкости и газа». — М., 1981. — 16. — С. 209—274.
3. Ахатов И.Ш., Вайнштейн П.Б. Переход горения в детонацию в пористых системах унитарного топлива // Отчет Института механики МГУ, 1982. — № 2668.

252680, г. Киев
Институт проблем материаловедения
и.м. И.Н. Францевича

Поступила в редакцию 27/VII 1992,
после доработки — 5/V 1993

УДК 531.66:(539.3+532.522)+621.7.044.2

С.А. Кинеловский

КОНЦЕПЦИЯ УПРУГИХ — НЕУПРУГИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ СТРУЙНЫХ ПОТОКОВ И СОУДАРЕНИЕ СТРУЙ ИДЕАЛЬНОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

В рамках аналогии между соударением тел конечных размеров и бесконечно длинных тел концепция упругих — неупругих взаимодействий распространена на случай соударения «струйных потоков», что позволило без детального рассмотрения протекающих в области

© С.А. Кинеловский, 1994.