

Время t_s стремится к бесконечности при $m \rightarrow m_0$; m_0 — полная масса, способная оказаться за фронтом при $t \rightarrow \infty$. Время возникновения фронта

$$t_i = \left[\left(\frac{2A}{\gamma - 1} \right)^{1/2} a^{\frac{1}{n} + \frac{\gamma-1}{2}} \beta^{1/n} \frac{1}{n} m_0^{-1/n} \right]^{\frac{2}{n(\gamma-1)}}, \quad (7)$$

так что решение имеет смысл в интервале времени $t_i < t < \infty$.

Пользуясь снова условиями на разрыве, восстанавливаем поле скорости во всей области перед фронтом

$$v_{10} = (\alpha\beta)^{-1/n} [(n+1) m^{1/n} - n m_0^{1/n}]. \quad (8)$$

Скорость $v_{10} < 0$ (сжатие) при $m < m_1 = [n/(n+1)]^n m_0$; $v_{10} > 0$ (расширение) при $m > m_1$; $v_{10} = 0$ при $m = m_1$.

В соответствии с (8) расстояние до данной частицы перед фронтом дается соотношением

$$r_1 = (\alpha\beta)^{-1/n} [(n+1) m^{1/n} - n m_0^{1/n}] (t - t_1(m)), \quad (9)$$

где

$$t_1(m) = \left[\left(\frac{2A}{\gamma - 1} \right)^{1/2} a^{\frac{1}{n} + \frac{\gamma-1}{2}} \beta^{1/n} \right]^{\frac{2}{n(\gamma-1)}} \frac{[n(m_0^{1/n} - m^{1/n})]^{1 - \frac{2}{n(\gamma-1)}}}{n m_0^{1/n} - (n+1) m^{1/n}}. \quad (10)$$

Наконец, плотность в области перед фронтом

$$\rho_1 = \left(\beta n r^n \frac{\partial r}{\partial m} \right)^{-1} = \\ = a (\gamma - 1) m^{1 - \frac{1}{n}} \frac{[n(m_0^{1/n} - m^{1/n})] t_s - (n m_0^{1/n} - (n+1) m^{1/n}) t]^{1-n}}{[2 - n(\gamma - 1)] t_s + (n+1)(\gamma - 1) t}. \quad (11)$$

Как видно непосредственно из (11), а также и из соотношения

$$\rho_1(t_s) = \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \rho_2(t),$$

плотность среды перед фронтом убывает с расстоянием от фронта. Последнее и создает возможность ускоряющегося со временем распространения ударной волны (см., например, [2]).

Построенное решение описывает неустановившееся течение (ср. [3]) и является неавтомоделным. При $m_0 = 0$ (и замене t на $|t|$) оно переходит в аналог (без гравитации) автомоделного решения Голубятникова [4].

Литература

- [1] Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1972. 440 с.
 [2] Гуревич Л. Э., Румянцев А. А. ЖЭТФ, 1970, т. 58, № 4, с. 1395—1399.
 [3] Станюкович К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды. М.: Наука, 1971. 854 с.
 [4] Голубятников А. Н. ДАН СССР, 1976, т. 227, № 5, с. 1067—1070.

Ленинградский государственный
 педагогический институт
 им. А. И. Герцена

Поступило в Редакцию
 1 сентября 1987 г.

О ЛАЗЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРА

А. С. Баланкин

При соударении твердых тел со сверхвысокими скоростями, когда плотность энергии во фронте ударной волны, формируемой в момент контакта, оказывается значительно выше удельной энергии испарения материалов сталкивающихся тел, процесс выделения кинетической энергии носит взрывной характер [1-4]. Пороговая скорость соударения $v_{кр}$, начиная

с которой столкновение данной пары тел сопровождается явлением взрыва, определяется физическими свойствами сталкивающихся тел. Для большинства материалов $v_{кр} > 10$ км/с [4]. Так как прямое физическое моделирование удара с $v_0 > 10$ км/с представляет значительные технические трудности, большое значение приобретают методы моделирования высокоскоростного удара по аналогии.

В основе моделирования по аналогии лежит, во-первых, закон сохранения и превращения энергии, в частности, устанавливающий механический эквивалент теплоты; во-вторых, абстрактность математических операций, позволяющая разные физические процессы описывать уравнениями одного и того же типа. Благодаря этому оказывается возможным моделирование высокоскоростного удара, например, с помощью взрыва [5] или излучения лазеров и других импульсных систем, обеспечивающих необходимые плотности энерговыделения в исследуемой мишени [6].

В литературе рассматривалось несколько подходов к задаче лазерного моделирования высокоскоростного удара [6-9], приводящих к существенно различным критериям подобия и, как следствие, к различным требованиям на параметры светового импульса, имитирующего высокоскоростной удар.

Очевидно, что любое моделирование по аналогии наиболее эффективно при исследовании конкретного физического процесса, имеющего один определяющий критерий подобия. Высокоскоростной удар сопровождается целым рядом различных физических явлений, имеющих разные определяющие критерии подобия. Поэтому строгая имитация высокоскоростного удара высококонцентрированным потоком энергии, в частности лазерным импульсом, не представляется возможной. В то же время отдельные процессы могут моделироваться с использованием определенного набора критериев подобия, определяющего требования к параметрам лазерного импульса, позволяющего исследовать тот или иной процесс (процессы). Соответственно методы моделирования, рассмотренные в [6-9], не отрицают, как предполагалось в [9], а дополняют друг друга, так как позволяют моделировать различные процессы, сопровождающие высокоскоростной удар. При этом ни один из них в отдельности не позволяет на основе результатов модельных экспериментов достаточно полно и надежно прогнозировать поведение мишени при высокоскоростном ударе.

Наличие конечного числа определяющих критериев подобия процесса взаимодействия соударяющихся тел (включающего формирование сильных ударных волн, испарение вещества в волне разгрузки, затухание ударной волны, приводящее к смене процесса испарения процессами плавления и дробления материала мишени; в мишенях конечной толщины выход ударной волны на тыльную поверхность может приводить к отколу, в пористых мишенях возможны эффекты кумуляции и т. п.) требует постановки систематических многовариантных модельных экспериментов. При этом полный цикл многовариантных экспериментов наряду с экспериментами по нагружению мишени абляционным давлением с использованием лазерных импульсов, имеющих различные параметры и обеспечивающих соблюдение определенных условий подобия, должен включать эксперименты по нагружению мишени светодетонационной волной (см. [10]).

Особо следует подчеркнуть, что, как и любое моделирование по аналогии, например, с использованием электротепловой аналогии (см. [11]), лазерное моделирование высокоскоростного удара требует наличия достаточно полной математической модели разрушения мишени при высокоскоростном ударе. При этом естественной целью модельных экспериментов является, во-первых, проверка адекватности модели; во-вторых, определение параметров, необходимых для количественного прогнозирования результатов высокоскоростного удара на основе математической модели. Т. е. в этом случае прогнозирование осуществляется не простым переносом результатов с модели на природу, как при прямом физическом моделировании, а путем расчетов с использованием параметров, получаемых в модельных экспериментах.

При этом на первый план выдвигается проблема диагностики в экспериментах по лазерному моделированию удара. Использование плоских мишеней простой геометрии обуславливает жесткие требования на размеры мишени и практически позволяет получать лишь часть информации, требуемой для дальнейших расчетов (см. [12]).

Здесь предлагается методика, существенно повышающая уровень информативности модельных экспериментов. Для этого исследуемая мишень изготавливается либо в форме полого конуса, либо в форме цилиндра с одной или несколькими коническими или полусферическими выемками с тыльной стороны, которые обеспечивают кумуляцию энергии ударной волны и выброс кумулятивной струи. Минимальный диаметр выемки, обеспечивающий формирование кумулятивной струи, определяется динамической вязкостью материала мишени и для большинства металлов меньше 25 мкм. Параметры кумулятивных струй, формируемых

в результате воздействия на лицевую сторону мишени лазерного импульса, как и в результате высокоскоростного удара, легко рассчитываются численно, например, с привлечением моделей [12, 13]. Результаты расчета схлопывания конической облицовки, нагружаемой све-

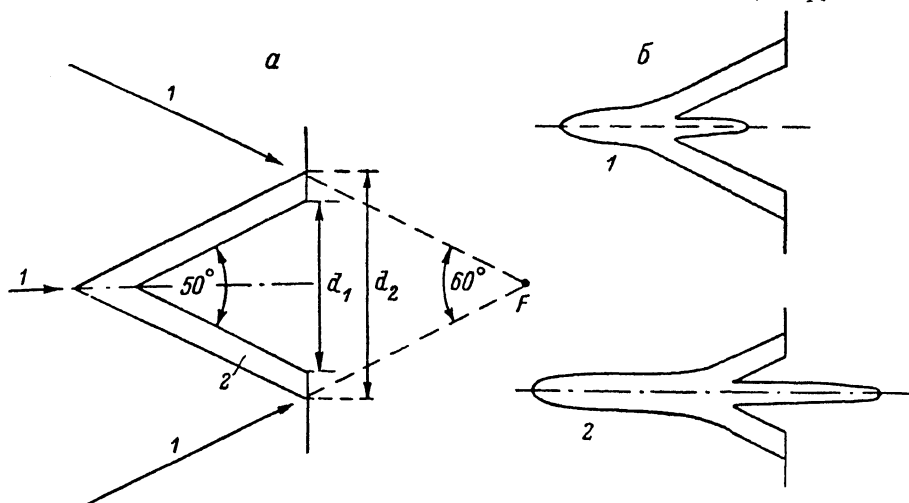


Рис. 1. Результаты расчета схлопывания полого конуса под действием сходящегося светового импульса $I=10^8$ Вт/см², $\tau=10^{-5}$ с ($d_1=6$ мм, $d_2=10$ мм, Cu).

а: схема постановки эксперимента. 1 — световой луч, 2 — кумулятивная облицовка. $t=0$; б: динамика схлопывания с формированием кумулятивной струи. 1 — $t=10^{-5}$, 2 — $2 \cdot 10^{-5}$ с.

товым импульсом с $I=10^8$ Вт/см², представлены на рис. 1, а на рис. 2 приведены результаты расчета скорости и длины кумулятивных струй при воздействии лазерного импульса на мишень с пятью коническими выемками.

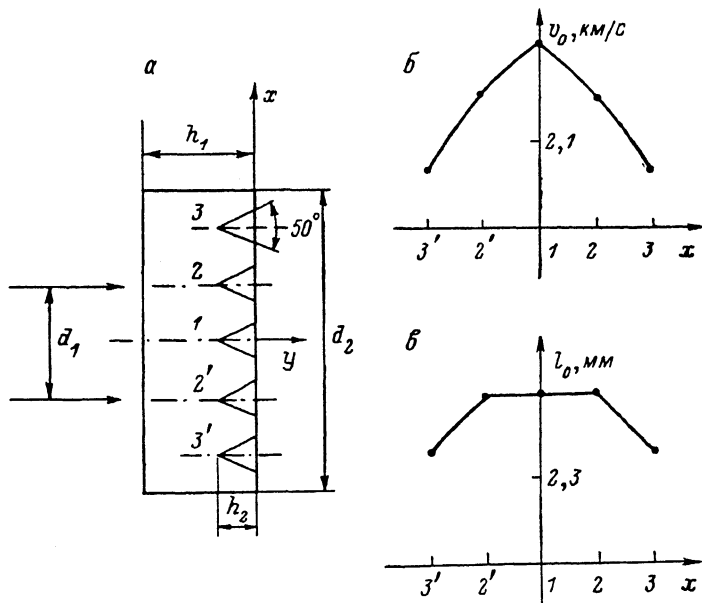


Рис. 2. Результаты расчета скорости и длины кумулятивных струй, формируемых при воздействии на цилиндрическую мишень с пятью коническими выемками импульса излучения с $I=10^8$ Вт/см², $\tau=10^{-5}$ с ($d_1=9$ мм, $d_2=24$ мм, $h_1=9$ мм, $h_2=3$ мм, Cu).

а — схема постановки эксперимента, б — $v_0(x)$, в — $l_0(x)$.

Результаты экспериментов,¹ которые будут подробно опубликованы в отдельной работе, хорошо согласуются с численными расчетами. Это позволяет на основе экспериментальных измерений скорости, температуры, массы, длины и плотности кумулятивных струй, форми-

¹ Эксперименты проводились совместно с В. П. Основняным, Г. Н. Яневичем, А. А. Горшковым, С. В. Павловым, А. В. Полевым.

руемых из выемок, расположенных на различных расстояниях от центра фокального пятна, определять как параметры, характеризующие динамику взаимодействия излучения с мишенью, так и параметры формируемых в мишени ударных волн. В результате численных и экспериментальных исследований установлена возможность достижения полного подобия процессов, сопровождающих высокоскоростной удар бояка, плотность которого в несколько раз меньше плотности мишени, и лазерный удар (с параметрами, обеспечивающими наряду с равенством интенсивности, времени и полной величины энерговыделения равенство площади фокусировки диаметру бояка и равенство произведения абляционного давления на площадь фокусировки и длительность импульса количеству движения бояка, передаваемого в мишень) при $t > \tau_n$ (метод расчета τ_n предложен в [9]).

Аналогичные эксперименты могут быть поставлены с использованием нагружения мишени светодетонационной волной.

Автор благодарит В. П. Основина, Г. Н. Яневича, А. А. Горшкова, С. В. Павлова, А. В. Полевого за помощь в проведении экспериментов и обсуждение результатов, А. А. Кожушко, А. А. Любомудрова, И. Т. Севрюкова и Г. С. Пугачева за полезные обсуждения.

Литература

- [1] Станюкович К. П. Неустановившееся движение сплошной среды. М.: Наука, 1971. 854 с.
- [2] Лаверентьев М. А. В сб.: Искусственные спутники земли. М., 1959, № 3, с. 61—65.
- [3] Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 534 с.
- [4] Златин Н. А. ЖТФ, 1961, т. 31, № 8, с. 982—990.
- [5] Обербек В. Р. Механика. М.: Мир, 1977, в. 12, с. 33—61.
- [6] Burton W. M., Wallis M. K. Proc Intern. Conf. Coment. Explor. Budapest, 1982, v. III, p. 215—222.
- [7] Denis S., Farny J., Wolowski J. Proc. Intern. Conf. Coment. Explor. Budapest, 1982, v. III, p. 223—228.
- [8] Bilring J. P., Cottet F., Hallowin M. et al. J. Phys. Lett., 1983, v. 44, p. L189—L201.
- [9] Анисимов С. И., Кравченко В. А., Сагдеев Р. З. Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, № 21, с. 1293—1296.
- [10] Симонс Ж. А. Аэрокосмическая техника, 1985, т. 3, № 9, с. 21—27.
- [11] Кутателадзе С. С. Анализ подобия в теплофизике. Новосибирск: Наука, 1982. 280 с.
- [12] Анисимов С. И., Прохоров А. М., Фортос В. Е. Изв. АН СССР. Сер. физ., 1982, т. 46, № 6, с. 1081—1089.
- [13] Ях К. ПМТФ, 1987, № 2, с. 123—129.

Поступило в Редакцию
30 октября 1987 г.