

УДК 533.6.011

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ УДАРЕ СТРУИ О ПРЕГРАДУ

Г. А. АТАНОВ, Н. Г. УЛАНОВ, Т. Д. УЛАНОВА

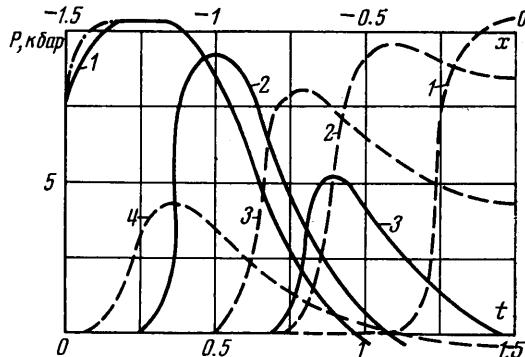
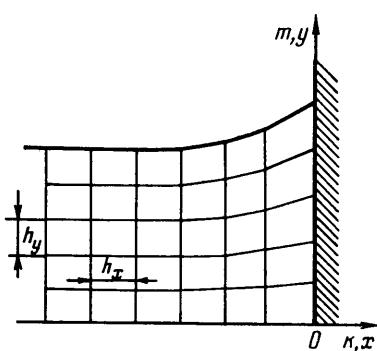
(Донецк, Тула)

Рассматривается начальная стадия удара осесимметричной струи жидкости с плоским торцом о жесткую преграду. Приведен пример численного расчета конечно-разностным методом [1].

1. Полубесконечная круглая струя идеальной сжимаемой жидкости, движущаяся со скоростью U_0 , в момент времени $t=0$ ударяет о плоскую стенку. Осесимметричное движение жидкости описывается следующей системой уравнений в дивергентной форме:

$$(1.1) \quad \begin{aligned} \frac{\partial \rho y}{\partial t} + \frac{\partial \rho U y}{\partial x} + \frac{\partial \rho V y}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \rho U y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} y [\rho (\rho^{n-1} + n U^2) - 1] \frac{1}{n} + \frac{\partial \rho U V y}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \rho V y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \rho U V y + \frac{\partial}{\partial y} y [\rho (\rho^{n-1} + n V^2) - 1] \frac{1}{n} &= (\rho^n - 1) \frac{1}{n} \end{aligned}$$

где U , V — осевая и радиальная составляющие скорости, ρ — плотность жидкости, n — показатель изэнтропы. Давление исключено с помощью уравнения изэнтропы $(P_* + B)/\rho_*^n = \text{const}$, где P_* — давление, ρ_* — плотность, B и n — постоянные (для воды $B=3045 \text{ бар}$, $n=7,15$).



Фиг. 1

Фиг. 2

Система (1.1) записана в безразмерном виде; в качестве масштабов выбраны начальная скорость звука a_0 , радиус струи до соударения R_0 , начальная плотность ρ_0 и давление B .

Решение системы (1.1) должно удовлетворять следующим начальным и граничным условиям:

$$(1.2) \quad -\infty < x < 0, \quad 0 \leq y \leq 1 \quad U(x, y, 0) = U_0, \quad V(x, y, 0) = 0, \quad \rho(x, y, 0) = 1$$

$$(1.3) \quad 0 \leq y \leq R_+ \quad U(0, y, t) = 0$$

$$(1.4) \quad -\infty \leq x \leq 0 \quad \rho(x, R_+, t) = 1$$

$$(1.5) \quad -\infty \leq x \leq 0 \quad V(x, 0, t) = 0$$

Здесь $R_+(x, t)$ — радиус деформированной струи.

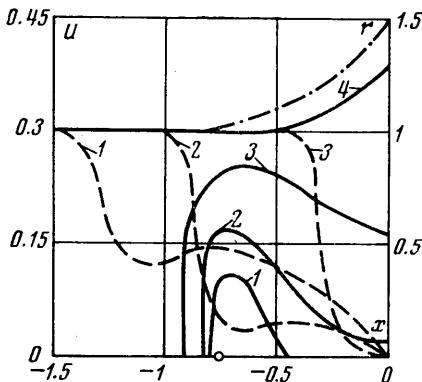
2. Задача решается численно методом С. К. Годунова в подвижной сетке. В отличие от работы [2] используется сетка с фиксированным шагом h_x по оси x и переменным шагом h_y по оси y (фиг. 1). По координате x область ограничивается на расстоянии l от стени и разбивается на K частей. Шаг h_y определяется по формуле

$$(2.1) \quad (h_y)_k = R_+/M, \quad k = 1, 2, 3, \dots, K$$

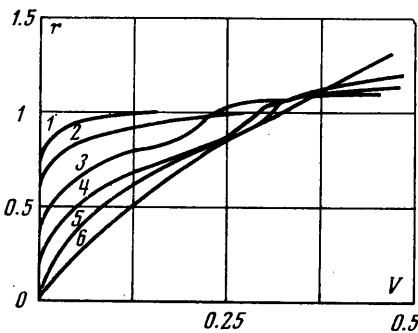
где M — целое число, так что произведение $M \times K$ определяет число расчетных ячеек. При расчете распадов разрывов волны малой интенсивности заменяются характеристиками, а условия на них — условиями на характеристиках, сильные волны рассчитываются по точным формулам.

3. Ниже приведены результаты расчета для воды при следующих данных: скорость струи до соударения $U_0=0.3$; $l=1.5$; $K=30$; $M=10$.

На фиг. 2 сплошными линиями 1, 2, 3 дана зависимость давления на оси от времени для значений x , равных соответственно 0; -0.5; -1. Давление на стенке возрастает от 0 до 10.3 кбар. Когда волна разрежения со свободной поверхности достигает оси, давление начинает резко падать и при $t>1$ имеет отрицательные значения; на стенке у оси возникает откол. Расчет прекращается через некоторое время после появления откола. Штрихпунктирная линия представляет расчеты, проведенные при



Фиг. 3



Фиг. 4

$M \times K = 15 \times 45$. Пунктирными линиями 1, 2, 3, 4 показано распределение давления по оси x для моментов времени, равных соответственно 0.24; 0.5; 0.67; 1.03. Ударная волна от стенки движется влево, ослабевая с течением времени. Давление за волной уменьшается, что можно объяснить упомянутой выше волной разрежения.

На фиг. 3 сплошными линиями 1, 2, 3, 4 изображены изобары для давлений 6.1; 4.5; 1.5 и 0 при $t=0.67$; линия $P=0$ соответствует свободной поверхности. Самое высокое давление ($P=7.9$ кбар) наблюдается на оси в точке, помеченной кружочком. Штрихпунктирная линия представляет форму свободной поверхности в момент прекращения счета. Зависимость осевой скорости от x на оси для моментов времени 1.03; 0.67; 0.24 представлена пунктирными линиями 1, 2, 3. Характер распределения скорости находится в соответствии с распределением давления (см. фиг. 2, пунктирные линии).

Профили радиальной скорости на стенке в моменты времени 0.08; 0.13; 0.29; 0.4; 0.5; 0.73 даны на фиг. 4 кривыми 1—6.

Поступила 11 XII 1974

ЛИТЕРАТУРА

- Годунов С. К., Забродин А. В., Прокопов Г. П. Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отошедшей ударной волной. Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1961, т. 1, № 6.
- Годунов С. К., Прокопов Г. П. Об использовании подвижных сеток в газодинамических расчетах. Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1972, т. 12, № 2.