

Следует также отметить, что отличие плотности молекул на оси и у стенок канала при $\delta \geq 1$ (фиг. 1) можно объяснить, во-первых, неточностью постановки задачи и, во-вторых, неточностью используемого метода [6], что хорошо иллюстрирует решение задачи о самодиффузии газа в коротком канале.

Поступила 25 III 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Clausing P. Over de Stationnaire Strooming van Zeer Verdunde Gassen. Physica, 1929, Bd. 9, No. 3.
2. De Marcus W. C. Report K-1302. Union Carbide Nuclear Company, Oak Ridge, Tennessee, 1957.
3. Неудачин И. Г., Породнов Б. Т., Суегин П. Е. Формирование узких молекулярных пучков цилиндрическими каналами. Ж. техн. физ., 1972, т. 42, № 5.
4. Горелов С. Л. Течение разреженного газа в трубе. Изв. АН СССР, МЖГ, 1974, № 1.
5. Шахов Е. М. Решение осесимметричных задач теории разреженных газов методом конечных разностей. Ж. вычислит. матем. и матем. физ., 1974, т. 14, № 4.
6. Власов В. И. Расчет методом Монте-Карло потока тепла между параллельными пластинами в разреженном газе. Уч. зап. Центр. аэрогидродинам. ин-та, 1970, т. 1, № 4.
7. Михайлов Г. А. Некоторые вопросы теории методов Монте-Карло. Новосибирск, «Наука», 1974.

УДК 534.222.2

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПО СТРУЕ ВОДЫ

Г. А. АТАНОВ, А. Н. СЕМКО

(Донецк)

Численно решена задача о распространении ударной волны, вышедшей из круглой трубы в струю воды. Решение проведено методом [1].

1. В стационарную осесимметричную струю воды (область 1 на фиг. 1), истекающую из цилиндрической трубы 2 со скоростью u_0 , выходит стационарная ударная волна с плоским фронтом 3.

Математическая задача сводится к решению уравнений нестационарной газовой динамики. В цилиндрической системе координат безразмерная система уравнений имеет вид [2]

$$(1.1) \quad \begin{aligned} \frac{\partial \rho r}{\partial t} + \frac{\partial \rho u r}{\partial x} + \frac{\partial \rho v r}{\partial r} &= 0 \\ \frac{\partial \rho u r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(r \frac{\rho^n - 1}{n} + r \rho u^2 \right) + \frac{\partial \rho u v r}{\partial r} &= 0 \\ \frac{\partial \rho v r}{\partial t} + \frac{\partial \rho u v r}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\rho^n - 1}{n} + r \rho v^2 \right) &= \frac{\rho^n - 1}{n} \end{aligned}$$

Здесь x, r — продольная и радиальная координаты, t — время, ρ — плотность, u, v — компоненты скорости по осям x и r , $n=7.15$ — показатель изэнтропии в уравнении состояния воды, взятом в форме Тэта.

Примем за начальный момент момент достижения ударной волной выходного сечения трубы; тогда

$$(1.2) \quad \begin{aligned} u(x, r, 0) &= u_1, & v(x, r, 0) &= 0, & \rho(x, r, 0) &= \rho_1 \\ -\infty < x < 0, & 0 \leq r \leq 1 \\ u(x, r, 0) &= u_0, & v(x, r, 0) &= 0, & \rho(x, r, 0) &= 1 \\ 0 < x < \infty, & 0 \leq r \leq 1 \end{aligned}$$

Граничные условия

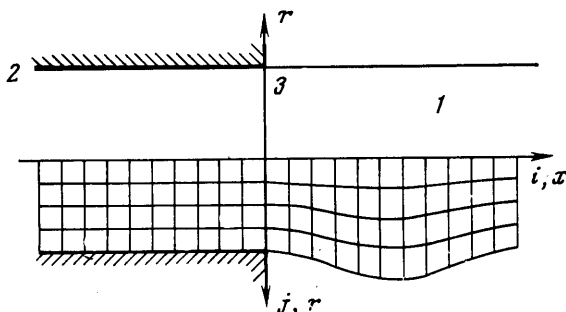
$$(1.3) \quad -\infty < x < 0, \quad v(x, 1, t) = 0$$

$$(1.4) \quad 0 < x < \infty, \quad \rho(x_*, r_*, t) = 1$$

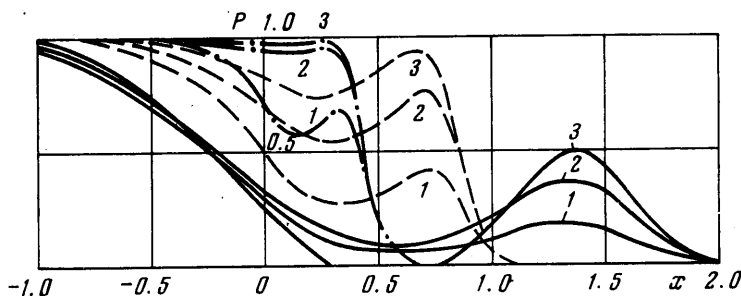
Здесь u_1 , ρ_1 — параметры за фронтом ударной волны, x_* , r_* — координаты свободной поверхности. При переходе к безразмерным величинам в качестве масштабов выбраны: радиус трубы R , скорость звука в воде a_0 и плотность ρ_0 при нормальных условиях; время R/a_0 .

Задача (1.1) — (1.4) решена конечно-разностным методом [1]. Расчетная сетка (фиг. 1) состоит из двух областей. При $x < 0$ она неподвижна и регулярна по осям x и r с шагами H_x и H_r соответственно.

При $x > 0$ сетка неподвижна по x с шагом h_x . По оси r сетка опирается на свободную поверхность и движется вместе с ней. Шаг h_r на каждом временном слое



Фиг. 1



Фиг. 2

определяется заново из условия сохранения числа слоев по оси r . По координате x слева и справа область ограничивалась, и на границах ставилось условие невозмущенного течения. Расчет велся до возникновения откола на оси. Размеры области выбирались такими, чтобы откол возник раньше, чем возмущения дойдут до границ области.

2. Ниже приведены результаты расчета при следующих значениях параметров: $u_0=0.3$, $u_1=0.413$, $\rho_1=1.101$, $H_x=0.1$, $H_r=0.1$, $h_x=0.05$ (значения u_1 и ρ_1 соответствуют давлению за фронтом ударной волны, равному 3000 бар, которое взято за масштаб).

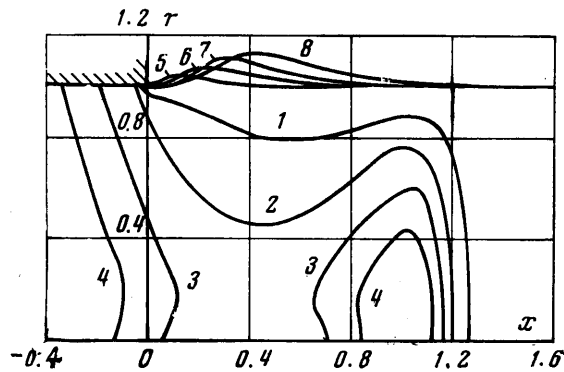
На фиг. 2 изображено распределение давления по оси x для моментов времени: $t=0.305$ — штрихпунктирная линия, $t=0.584$ — штриховая, $t=1.035$ — сплошная. Кривые 1 соответствуют $r=0.75$; 2 — $r=0.45$; 3 — $r=0$. Из графиков видно, что интенсивность ударной волны уменьшается по мере распространения ее по струе. От свободной поверхности распространяются волны разрежения, которые снижают давление за фронтом ударной волны. Дойдя до оси, волны разрежения отражаются от нее, сохраняя свой характер, и снижают давление до отрицательного значения — возникает откол (см. сплошную кривую 3).

На фиг. 3 приведены изобары (кривым 1–4 соответствуют давления 500, 1000, 1500 и 2000 бар) для момента времени $t=0.773$ и эволюция свободной поверхности во времени. Из хода изобар следует, что за ударной волной образуется зона пониженного давления. Возникновение этой зоны связано с волнами разрежения.

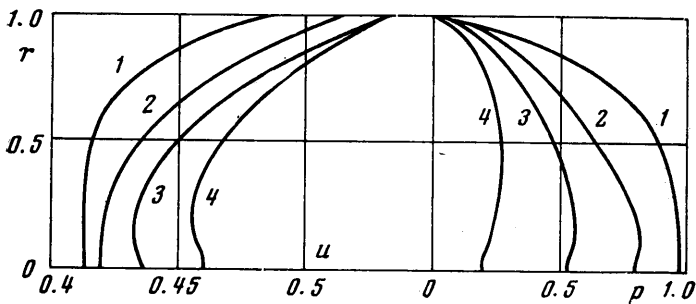
Кривые 5–8 изображают форму свободной поверхности для моментов времени 0.305, 0.584, 0.773, 1.035 соответственно. Радиальное течение, возникающее после прохождения ударной волны, приводит к утолщению струи. Максимальное отклонение

свободной поверхности от невозмущенного состояния увеличивается со временем и сносится осевым течением вправо по струе.

На фиг. 4 представлено распределение давления и осевой компоненты скорости в сечении среза трубы для разных моментов времени: 1 — для $t=0.305$, 2 — $t=0.584$,



Фиг. 3



Фиг. 4

3 — $t=0.773$, 4 — $t=1.035$. С течением времени величина давления уменьшается, на оси возникает локальный минимум, а скорость возрастает до величины, соответствующей полному расширению. К моменту $t=0.773$ вода в слоях, прилегающих к свободной поверхности, расширяется полностью, и при дальнейшем счете скорость здесь не изменяется (кривые 3 и 4 сходятся). На оси образуется локальный максимум.

Поступила 16 V 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. вычислит. матем. и матем. физ., 1961, т. 1, № 6.
2. Атанов Г. А. Расчет гидродинамической кумуляции. Ж. вычислит. матем. и матем. физ., 1975, т. 15, № 3.

Технический редактор Н. С. Евсеева

Сдано в набор 17/XI-1976 г. Т-00614 Подписано к печати 24/I-1977 г. Тираж 1990
 Зак. 1374 Формат 70×108^{1/16} Усл. печ. л. 16,8 Бум. л. 6 Уч.-изд. л. 18,2

2-я типография издательства «Наука». Москва, Г-99, Шубинский пер., 10