

УДК 533.6.011.72

© 1990 г.

АЛЬЕВ Г. А.

**ДИФРАКЦИЯ ПЛОСКОГО СКАЧКА УПЛОТНЕНИЯ НА ДИСКЕ,
НАКЛОННО ПОГРУЖАЮЩЕМСЯ В СЖИМАЕМУЮ ЖИДКОСТЬ**

Рассматривается пространственная задача о взаимодействии несимметрично погружающегося в воду диска с движущимся ему навстречу скачком уплотнения. Вода полагается идеальной сжимаемой жидкостью, течение — адиабатическим. Изменения параметров течения и состояния определяются путем численного интегрирования уравнений, описывающих данное течение, с помощью трехмерного варианта конечно-разностной схемы [1] по методике [2]. Исследуется влияние интенсивности скачка уплотнения на коэффициент лобового сопротивления диска и форму свободной поверхности.

1. Пусть диск радиусом r_0 , находящийся под углом α к свободной поверхности воды плотностью ρ_0 , в момент времени $t=0$ начинает погружаться с постоянной скоростью V_0 и углом атаки β . Плоский скачок уплотнения с давлением p_1 и плотностью ρ_1 , двигающийся по жидкости навстречу диску, находится при этом на расстоянии z_1 от свободной поверхности и ориентирован параллельно ей.

Задача решается в цилиндрической системе координат z, r, φ , жестко связанной с диском. Ось z при этом совмещена с осью диска и направлена в противоположную движению сторону. Поверхность диска лежит в плоскости $z=0$.

Параметры течения и состояния определяются уравнениями сплошности и движения жидкости [1] совместно с экспериментально установленной адиабатой для воды [3]

$$p = (\rho^{\kappa} - 1) / \kappa, \quad \kappa = 7,15 \tag{1.1}$$

где p — избыточное давление, ρ — плотность.

Граничные условия таковы: на свободной поверхности $p=0$; на диске $u=0$. Начальные условия в невозмущенном потоке воды имеют вид

$$\begin{aligned} p=0, \quad \rho=1, \quad u=M_0 \cos \beta, \quad v=-M_0 \sin \beta \cos \varphi \\ w=M_0 \sin \beta \sin \varphi, \quad M_0=V_0/a_0 \end{aligned} \tag{1.2}$$

Значения параметров потока в области, располагающейся за скачком уплотнения вверх по течению, в момент времени $t=0$ полагаются постоянными и задаются следующими:

$$\begin{aligned} \rho=\rho_1, \quad p=p_1, \quad u=M_1 \cos \alpha + M_0 \cos \beta \\ v=-(M_1 \sin \alpha + M_0 \sin \beta) \cos \varphi \\ w=(M_1 \sin \alpha + M_0 \sin \beta) \sin \varphi \end{aligned} \tag{1.3}$$

Здесь u, v, w — осевая, радиальная и угловая составляющие вектора скорости, M_0 — число Маха набегающего потока.

Обозначенные величины записаны в безразмерном виде. Координаты отнесены к r_0 ; u, v, w — к скорости звука a_0 в невозмущенном потоке жидкости; плотность среды — к ρ_0 ; давление — к $\rho_0 a_0^2$.

Величины p_1, M_1 определяются из законов сохранения на плоском скачке уплотнения в воде [3] по заданной величине p_1

$$p_1 = (\rho_1^* - 1) / \kappa, \quad M_1 = 1/4 (\sqrt{1 + 8p_1} - 1) \quad (1.4)$$

Решение задачи находится путем интегрирования системы уравнений [1] по пространственному варианту разностной схемы сквозного счета С. К. Годунова.

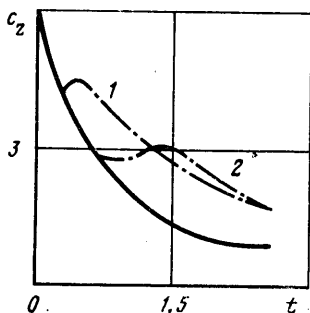
Дробление рассчитываемой области, выбор ее размеров, задание начальных параметров и положения свободной поверхности производится аналогично [2].

Начальное положение скачка уплотнения задается уравнением $z = (r \cos \varphi - 1) \operatorname{tg} \alpha - z_1$. Параметры потока в расчетных ячейках, у которых значение координаты z средней линии в плоскости $\varphi = \text{const}$ не превосходит по величине координаты скачка уплотнения, определяются по соотношениям (1.3).

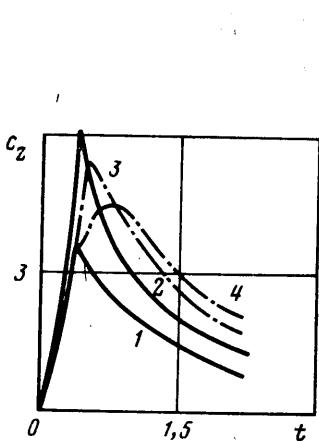
Расчет параметров течения и состояния в элементарных ячейках, определение формы свободной поверхности и каверны, распределения давления по поверхности диска и коэффициента лобового сопротивления проводятся по методике [2].

На фиг. 1 для числа $M_0 = 1$ представлены рассчитанные зависимости коэффициента лобового сопротивления c_z при вертикальном погружении диска в жидкость. Сплошной линией нанесены результаты расчета течения без скачка уплотнения, штриховая отвечает взаимодействию со скачком уплотнения интенсивностью $p_1 = 1, 2$, располагавшимся при $t = 0$ на расстоянии $z_1 = 1; 1,5$ (кривые 1, 2 соответственно).

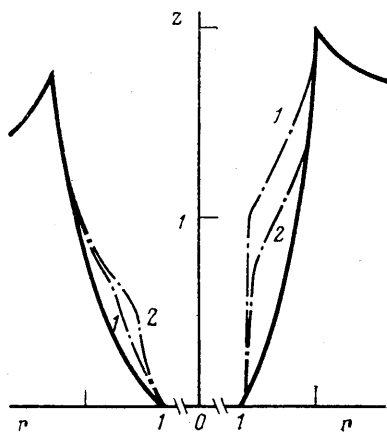
В этом случае наблюдается следующая картина течения. Ударная волна, возбуждаемая в воде диском, движется по жидкости с числом Маха $M_2 = 1 + 2M_0$ [3, 4]. Сила сопротивления движению диска при этом уменьшается. После взаимодействия ударной волны со скачком уплотнения образуется отраженная волна сжатия, которая распространяется вниз по потоку и достигает поверхности диска. С этого момента времени начинается возрастание коэффициента c_z . Затем,



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

однако, в результате разрежения давления на диске, идущем от свободной поверхности воды, лобовое сопротивление уменьшается. Наиболее интенсивно этот процесс протекает при меньших значениях величины z_1 .

При наклонном входе диска ($\alpha = 10^\circ, \beta = 0, M_0 = 1$) взаимодействие со скачком уплотнения ($p = 1, 2$) приводит к увеличению максимального значения c_z по сравнению с погружением в невозмущенную жидкость (кривая 1, фиг. 2). Это можно объяснить наложением влияния скачка уплотнения на процесс возрастания лобового сопротивления при пересечении диском свободной поверхности жидкости. Цифрами 2—4 на фиг. 2 обозначены зависимости c_z , полученные при $z_1 = 0; 1; 1,5$ соответственно.

На фиг. 3 для значений $z_1=1$ и $1,5$ (штриховая, цифры 1 и 2) нанесены формы каверны в плоскостях $\varphi=0$ и π при $M_0=1$, $\alpha=10^\circ$. Сплошной линией обозначена каверна, рассчитанная для течения без скачка уплотнения.

Относительное сужение каверны начинается ранее при меньших значениях z_1 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Численное решение многомерных задач газовой динамики/Под ред. Годунова С. К. М.: Наука, 1976. 400 с.
2. Альев Г. А. Пространственная задача о погружении диска в сжимаемую жидкость // Изв. АН СССР. МЖГ. 1988. № 1. С. 17-20.
3. Замышляев Б. В., Яковлев Ю. С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. Л.: Судостроение, 1967. 387 с.
4. Ерошин В. А., Романенков Н. И., Серебряков И. В., Якимов Ю. Л. Гидродинамические силы при ударе тупых тел о поверхность сжимаемой жидкости // Изв. АН СССР. МЖГ. 1980. № 6. С. 44-51.

Ленинград

Поступила в редакцию
25.XI.1988