

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕГРУЗОК ПРИ УДАРЕ ПРОФИЛЯ О ПОВЕРХНОСТЬ ЖИДКОСТИ

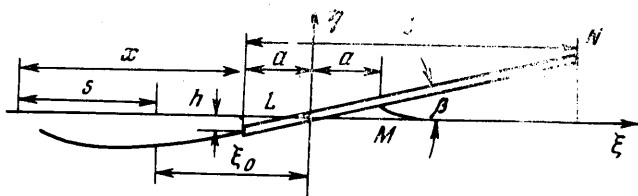
Г. Л. БОЙКО, В. А. ЕРОШИН

(Москва)

При расчете на прочность подводных и надводных крыльев необходимо знать величину перегрузок при ударе о свободную поверхность жидкости. Падение тел различной формы на поверхность жидкости исследовалось в [1-4].

В данной работе содержатся теоретические и экспериментальные результаты по определению ударных перегрузок при падении плоской пластинки на свободную поверхность жидкости, а также указывается на возможность приближенного моделирования этого явления.

**1. Гидродинамические силы при ударе профиля о поверхность жидкости.** Рассмотрим плоскую задачу об ударе тонкого слабо изогнутого профиля о поверхность идеальной несжимаемой жидкости (фиг. 1). Предпо-



Фиг. 1

лагаем, что его передняя кромка всегда находится над невозмущенным уровнем свободной поверхности. Горизонтальную составляющую скорости в момент соприкосновения со свободной поверхностью полагаем равной  $c_0$ , вертикальную —  $v_0$ , угол профиля с невозмущенным уровнем свободной поверхности считаем малым и равным  $\beta$ . При малых значениях угла падения погружение профиля незначительно и свободная поверхность жидкости мало отличается от своего невозмущенного уровня, поэтому граничные условия на границе вода — воздух сносим на невозмущенный уровень свободной поверхности. В условии на свободной поверхности жидкости пренебрегаем весомостью и квадратом скорости абсолютного движения. В этом случае на смоченную часть профиля  $LM$  действует подъемная сила нестационарного глассирования, величина которой равна [2]

$$Y_1 = \frac{d}{dt} \left( \frac{\pi \rho_1 a^2}{2} v_1 \right) + \pi \rho_1 a \left( c + \frac{da}{dt} \right) v_2 +$$

$$+ \frac{\rho_1 a}{2} \left( c + 2 \frac{da}{dt} \right) \int_0^x \frac{\varphi(s) ds}{\sqrt{(2a+x-s)(x-s)}}$$

$$v_1 = -(v + \omega a) + c\beta, \quad v_2 = v_1 + 1/2 \omega a$$

где  $c$  и  $v$  — горизонтальная и вертикальная составляющие скорости про-

филя,  $\omega$  — угловая скорость,  $2a$  — смоченная длина,  $\varphi(x)$  — плотность распределения вихрей, сбегаящих с задней кромки, и  $\rho_1$  — плотность жидкости.

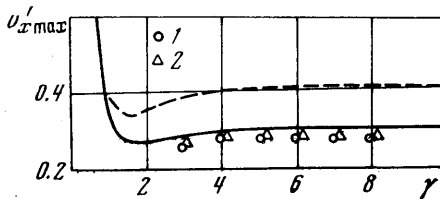
На несмоченную часть  $MN$ , которую можно рассматривать как профиль с нулевым отстоянием от экрана, действует подъемная сила воздуха, величину которой нетрудно получить, используя выражение для комплексно-сопряженной скорости при обтекании верхней полуплоскости с выброшенным отрезком длины  $b$ , наклоненным под углом  $\beta$  [5]

$$Y_2 = \pi \rho_2 b c^2 \lambda^{1-2\beta} / \pi / \sin \beta$$

где  $\lambda = \beta / (\pi - \beta)$ ,  $\rho_2$  — плотность воздуха.

Гидростатические силы незначительны и их влияние не учитывается.

**2. Определение перегрузок при ударе пластинки о поверхность жидкости.** Пусть горизонтальная составляющая скорости пластинки во время



Фиг. 2

удара постоянна и угол пластинки с невозмущенным уровнем свободной поверхности не меняется. В качестве независимой переменной возьмем путь, пройденный пластинкой с момента соприкосновения со свободной поверхностью, и дифференцирование по времени заменим дифференцированием по пути ( $d/dt = cd/dx$ ). В этом случае движение пластинки в вертикальной плоскости опишем

следующей системой интегродифференциальных уравнений [6]:

$$m c_0^2 \frac{d^2 h}{dx^2} = Y_1 + Y_2 - mg, \quad -2\pi a v_2 = \int_0^x \varphi(s) \sqrt{\frac{2a+x-s}{x-s}} ds$$

с начальными условиями

$$x=0, \quad h(0)=0, \quad h'(0)=-v_0/c_0$$

где  $x$  — путь, пройденный пластинкой с момента соприкосновения со свободной поверхностью,  $h(x)$  — глубина погружения задней кромки,  $m$  — масса единицы ширины пластинки. Интегральное уравнение в этой системе представляет собой условие конечности скорости жидкости на задней кромке пластинки, из которого определяется плотность распределения вихрей.

Система определяющих параметров задачи  $c_0, v_0, l, \beta, m, \rho_1, \rho_2, g$  ( $l$  — длина пластинки) допускает следующие безразмерные комбинации:

$$\alpha = \frac{v_0}{c_0}, \quad \beta, \quad \gamma = \frac{c_0}{\sqrt{(m/\rho_1)^{1/2} g}}, \quad \frac{l}{\sqrt{m/\rho_1}}, \quad \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

при этом  $\gamma$  по существу является числом Фруда, так как  $\sqrt{m/\rho}$  имеет размерность длины и может рассматриваться как характерный размер.

Система интегродифференциальных уравнений сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, которая была проинтегрирована на ЭВМ. Изложение метода и оценка погрешности приведены в [6].

Попытка оценить влияние воздуха хотя бы в квазистационарном приближении была предпринята в связи с тем, что при ударе подводных крыльев о волну в ряде случаев воздушная прослойка заметно демпфировала удар [4]. В данном случае замкнутой воздушной прослойки не обра-

зуются. Как показал анализ уравнений, сама подъемная сила воздуха на величину ударных перегрузок влияет незначительно. Однако присутствие воздуха может привести к изменению формы свободной поверхности и за счет этого к изменению перегрузок. По-видимому, влияние воздуха сводится к некоторому понижению уровня свободной поверхности и уменьшению смоченной длины, т. е. полученные в данной работе результаты представляются собой оценку перегрузок сверху.

Приведем результаты численного интегрирования. На фиг. 2 приведен график безразмерных максимальных перегрузок  $v_x'$  при  $\alpha=0.2$ ,  $\beta=0.1$  в зависимости от безразмерной скорости  $\gamma$  ( $v_i' = g\gamma^2 v_x'$ ). Пунктиром изображена кривая расчета без учета вихрей, сбегаящих с задней кромки. Как видно из графика, величина безразмерной перегрузки  $v_x'$  с ростом  $\gamma$  быстро приближается к асимптотическому значению, зависящему только от геометрических параметров, т. е., начиная с некоторых скоростей, перегрузка становится пропорциональной квадрату числа Фруда. Быстрый рост  $v_x'$  при приближении  $\gamma$  к нулю лежит не на рабочих режимах и объясняется способом введения безразмерных переменных.

Существование асимптоты было проверено авторами экспериментально в гидроканале

Института механики МГУ на установке маятникового типа. Результаты экспериментов изображены на фиг. 2, где точкам 1 соответствуют эксперименты с пластинкой весом 1.75 кг, точкам 2 — с пластинкой весом 2.8 кг, ширина пластинок 0.3 м. Скорость в момент удара изменялась в пределах  $2 \div 8$  м/сек. Относительное удлинение смоченной части пластинок в момент максимальных перегрузок было порядка  $6 \div 8$ . При изменении глубины жидкости в пределах  $0.15 \div 1.5$  м влияние дна на величину  $v_x'$  обнаружено не было. Перегрузки измерялись пьезооптическим датчиком [7].

Для экспериментального определения зависимости смоченной длины от пути была проведена киносъемка пластинки 2 из-под воды при  $\alpha=0.2$ ,  $\beta=0.1$ ,  $\gamma=6$ . Результаты обработки кинограммы приведены в таблице в безразмерном виде (отнесенные к  $\sqrt{m/\rho_1}$ ), где  $2a_1$  — теоретическое значение смоченной длины,  $2a_2$  — результаты эксперимента. Из таблицы видно, что в начальный момент экспериментальные значения лежат выше теоретических. Это объясняется, очевидно, наличием сил поверхностного натяжения, которые существенны в момент касания.

В некоторый момент времени значения совпадают. Затем экспериментальные значения становятся меньше. Это объясняется тем, что теоретические расчеты соответствуют плоской задаче, а в эксперименте относительное удлинение смоченной поверхности уменьшается от  $\infty$  до 3.5 при  $x=0.5$ . Величины асимптотических значений максимальных перегрузок в зависимости от  $\alpha$  и  $\beta$  приведены ниже.

X	0.03	0.08	0.19	0.30	0.40	0.50
$2a_1$	0.09	0.25	0.54	0.77	0.93	1.04
$2a_2$	0.13	0.25	0.51	0.72	0.84	0.98

Пользуясь этими данными, по асимптотическим значениям безразмерной максимальной перегрузки можно определить значения размерной перегрузки ( $v_i' = g\gamma^2 v_x'$ ). По этой же формуле производится пересчет модельных перегрузок на натурные при приближенном моделировании удара с помощью первых трех безразмерных комбинаций ( $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ ). Влияние параметра  $m/\rho B^3$ , где  $B$  — ширина пластинки, в большинстве случаев несущ-

щественно, так как относительное удлинение смоченной поверхности в момент максимальных ударных перегрузок достаточно велико.

Авторы благодарят М. И. Гуревича за обсуждение результатов и ценные замечания.

Поступила 16 XII 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Wagner H.* Uber Stoss- und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten. ZAMM, 1932, Bd 12, N. 4.
  2. *Седов Л. И.* Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. М., «Наука», 1966.
  3. *Повицкий А. С.* Посадка гидросамолетов. Тр. ЦАГИ, 1939, вып. 423.
  4. *Егоров И. Т., Соколов В. Т.* Гидродинамика быстроходных судов. Л., «Судостроение», 1971.
  5. *Лаврентьев М. А., Шабат Б. В.* Методы теории функций комплексного переменного. М., Физматгиз, 1958.
  6. *Ерошин В. А.* Рикошет пластинки от поверхности идеальной несжимаемой жидкости. Вестн. МГУ, Матем. и механ., 1970, № 6.
  7. Виброметрия. Материалы конференции. М., 1973.
-