

УДК 532.528.013.13

© 1994 г. Э. Л. АМРОМИН, А. В. ВАСИЛЬЕВ

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ ПРИ ЧАСТИЧНОЙ КАВИТАЦИИ

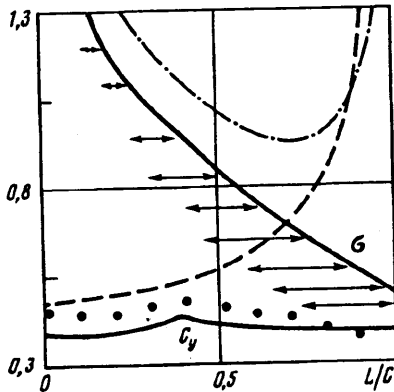
Постулированы новые способы вычисления циркуляции скорости вокруг профилей с частичными кавернами: один — для коротких, другой — для длинных. Приведены сопоставления использующих эти способы расчетов с известными измерениями. Полученные расчетные зависимости не имеют участков неограниченного роста подъемной силы и числа кавитации при приближении конца каверны к выходящей кромке профиля.

Расчеты частичной кавитации крыльев, лопастей гидромашин и других подобных тел традиционно производятся методами механики идеальной жидкости. При выполнении таких расчетов в рамках одной схемы течения не удавалось достичь удовлетворительных результатов как для размеров каверн, так и для подъемной силы. Для замкнутых схем кавитации расчетные значения коэффициента подъемной силы C_p и числа кавитации σ неограниченно возрастали при приближении длины каверны L к хорде профиля C , т. е. конца каверны к его задней кромке (см. штрихпунктирные и штриховые кривые на фиг. 1, 2; эти расчеты относятся к использованному в опытах [1] 8%-ному профилю). Экспериментальные же значения этих величин (точки — для C_p , стрелки, размер которых указывает размах пульсаций длины каверны, — для L) убывают при $L \rightarrow C$.

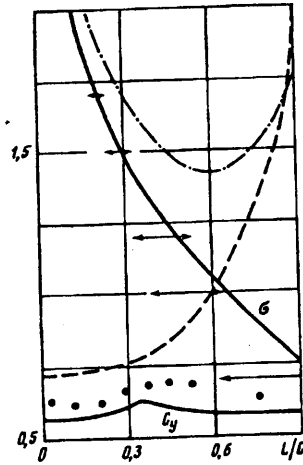
Авторы произвели расчеты с использованием обобщенной схемы Рябушинского, при замыкании каверны на перпендикулярный хорде отрезок и с помощью одной из модификаций метода А. Н. Иванова [2]. Аналогичные зависимости были представлены в [1], а задолго до того получены [3] с помощью линейной теории. Для открытых схем, как отмечено и в [1], нет такого роста σ и C_p ; но само понятие частичной кавитации для таких схем не вполне ясно и определять длину частичной каверны для них затруднительно. Между тем совместное определение L и C_p важно в инженерной практике, поскольку информация о размерах каверн используется при анализе опасности эрозии, прорыва воздуха в каверны на крыльях и пр.

Очевидно, что резкий рост σ при $L \rightarrow C$ обусловлен именно ростом C_p , а рост C_p для закрытых схем связан с выполнением постулата Жуковского — Чаплыгина на задней кромке крыловых профилей. Для открытых схем этот постулат не используется и даже для бескавитационного обтекания крыльев он хорошо соответствует опыту только при малых углах атаки [4]. Отказ от этого постулата приводит к появлению бесконечной скорости в задней кромке профиля. Однако появление интегрируемой особенности скорости в одной точке — вполне традиционная ситуация в гидромеханике идеальной жидкости [5, 6]. Нарушающие этот постулат способы определения циркуляции вокруг профилей уже использовались [7, 8] с определенным успехом при расчетах очень коротких каверн.

Представляется правдоподобным, что изменение в подъемной силе профилей при появлении не слишком короткой частичной каверны происходит главным



Фиг. 1



Фиг. 2

образом из-за перераспределения давления под каверной на засасывающей стороне профиля. Оставаясь в рамках механики идеальной жидкости, измененную подъемную силу по-прежнему следует связывать с циркуляцией скорости Γ вокруг профиля с каверной. При приближающихся к единице значениях L/C и умеренных α в месте расположения каверны, т. е. при $S \in (S_0, S_0 + L)$, выполняется условие $\chi = |U^2/(1 + \sigma) - 1| \ll 1$, где U — модуль скорости на профиле в отсутствие кавитации. Это условие может нарушаться только вблизи максимума скорости, т. е. на дуге длины порядка $\alpha \delta^2$, где δ — относительная толщина профиля. Поскольку величина χ мала, допустимо записать линейную связь циркуляции с возмущениями давления и для Γ при наличии частичной каверны можно рекомендовать формулу

$$\Gamma(L) = \Gamma(0) + \int_{s_0}^{s_0+L} (\sqrt{1 + \sigma} - U) ds \quad (1)$$

Легко видеть, что формула (1) формализует заявленное предположение о формировании подъемной силы при частичной кавитации. Постоянная $\sigma(L)$ определяется здесь при решении типичной для идеальной кавитации нелинейной краевой задачи для потенциала скорости жидкости Φ

$$\Delta \Phi = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial N} \Big|_{s_h + s_k + s_f} = 0 \quad (3)$$

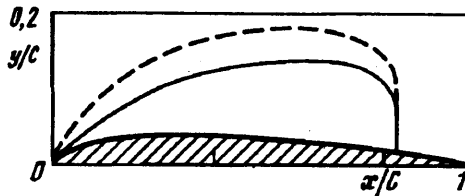
$$|\text{grad } \Phi|_{s_k} = \sqrt{1 + \sigma} \quad (4)$$

$$\oint_{(s_h + s_k + s_f)} U ds = \Gamma(L) \quad (5)$$

$$\lim_{|x| \rightarrow \infty} \{\text{grad } \Phi\} = \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + \beta^2}}, \frac{\beta}{\sqrt{1 + \beta^2}} \right\} \quad (6)$$

В этой задаче, проиллюстрированной изображением профиля с каверной на фиг. 2, S_h — его свободная от кавитации часть, S_k — заранее не известная граница каверны заданной длины L , S_f — фиктивное тело, $\beta = \text{arctg } \alpha$.

На фиг. 3 приведены расчетные формы каверны (сплошная кривая — для



Фиг. 3

условия (1), штриховая — для условия Жуковского). Здесь $\alpha = 6,3^\circ$, значения σ для каверн — 0,83 и 1,6 соответственно.

Задачу (2)—(6) отличает от традиционных [2] нелинейных задач кавитации крыльев только замена той или иной записи постулата Жуковского — Чаплыгина на (5). Значение U и Γ (0) здесь определяется из (2), (3), (6) при использовании этого постулата, однако, вообще говоря, $\Gamma(0)$ может задаваться в (1) и по экспериментальным данным.

Различные методы численного решения подобных (2)—(6) краевых задач уже достаточно известны [2, 9] и здесь можно сразу приступить к изложению результатов введения формулы (1) в расчеты частичной кавитации. Нужно только напомнить, что значение σ в (1), (4) заранее не известно и поэтому при фиксированном L правые части (4), (5) уточняются в итерациях, из которых состоит процесс решения нелинейной задачи (2)—(6). Для использованного на фиг. 1, 2 профиля из [1] при $\alpha = \pi/45, \pi/30$ результаты этих расчетов приведены сплошными кривыми. Степень их соответствия опыту для $L/C \rightarrow 1$ вполне удовлетворительна не только для $C_p(L)$, но и для $\sigma(L)$, поскольку надо иметь в виду также заметное [2] влияние стеснения потока в гидродинамической трубе на размеры каверн. Изломы этих кривых вызваны тем, что для $L \ll C$ такой расчет не схватывает наблюдаемого в экспериментах участка некоторого роста $C_p(L)$ и там использован другой способ вычисления C_p .

Рост C_p при малых L в наблюдениях вызван увеличением эффективной толщины и эффективной кривизны профиля из-за оттеснения потока каверной, а количественное отличие $\Gamma(L)$ от результатов, получаемых с помощью постулата, связано главным образом еще не с перераспределением давления под каверной, а с падением C_p из-за конечной толщины потери импульса вязкого следа за крылом.

Для отыскания $\Gamma(L)$ при $L \ll C$ рекомендуется уже проверенная авторами [7] на начальных стадиях кавитации разных тел полуэмпирическая формула В. Г. Мишкевича [8], которая здесь используется в виде

$$\Gamma = \Gamma^* - \pi (1 + 0,87\delta) \{ \alpha\mu + 2,03\delta_c [1 - \kappa(1 - \mu)] \} \quad (7)$$

$$\mu = \text{Re}^{-0,186} e^{12,6\delta - 0,069}, \quad \kappa = 1 + \delta (\delta_c - 0,05) (0,047 \ln \text{Re} - 0,44)^{-2}$$

где δ и δ_c — наибольшие относительные толщина и кривизна профиля, Γ — циркуляция скорости, вычисляемая для известного контура $S_k + S_h + S_f$ из (2), (3), (6) с использованием постулата Жуковского — Чаплыгина. В отличие от расчетов [8] принято, что значение C_p зависит не только от $\{L, \text{Re}\}$, но и от σ . Оно заранее не известно и для определения Γ^* не может быть использована просто «сдвинутая на постоянную вниз» кривая типа штриховой с фиг. 1, поскольку Γ и форма каверны — взаимосвязаны. Здесь предполагается только, что на начальных стадиях кавитации потери C_p , связанные с вязкостью, сохраняются. Поэтому соотношения (2), (3), (6) на каждой итерации процесса решения нелинейной краевой задачи приходится использовать дважды: сначала для вычисления Γ^* , затем — вместо (5), т. е. в системе (2), (3), (6), (7) для

вычисления непосредственно $|\text{grad } \Phi|$. Матрица линейной алгебраической системы, к которой сводится соответствующее (2)—(7) интегральное уравнение, вычисляется лишь однажды за итерацию, что ускоряет вычисления. Соответствие расчетов опыту после введения (7) для малых L стало удовлетворительным для всех σ .

Предложенный способ определения $C_d(\alpha, \sigma)$ несложно приспособить к расчетам трехмерных каверн, применяя формулы (1) и (7) к плоским сечениям тел. Это особо актуально именно для трехмерного случая, поскольку для него весьма распространены такие каверны, которые накрывают заднюю кромку лишь части лопасти или крыла. Чрезмерный рост C_d при $L \rightarrow \infty$ лишил прикладного значения расчет подобных каверн, но формулы (1), (7) устраняют эти затруднения и кажется возможным ввести эти формулы также в методы линейной теории [6].

Таким образом, оказывается возможным расширить область применения относительно простых (по сравнению с [7, 8]) традиционных методов расчета частичной кавитации, для чего надо заменить традиционный способ вычисления циркуляции скорости на предложенный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yamaguchi H., Kato H. Development of foil section with improved cavitation performance.//J. Soc. Naval Arch. Japan. 1983. V. 154. № 12. P. 102—108.
2. Иванов А. Н. Гидродинамика развитых кавитационных течений. Л.: Судостроение, 1980. 236 с.
3. Geurst J. A. Linearized theory for partially cavitated hydrofoils//Intern. Shipbuild. Progr. 1959. V. 6. № 60. P. 369—384.
4. Daily J. W. Cavitation characteristics and infinite-aspect ratio characteristics of a hydrofoil section//Trans. ASME. 1949. V. 71. № 3. P. 269—284.
5. Седов Л. И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. М.: Наука, 1980. 448 с.
6. Басин М. А., Шадрин В. П. Гидроаэродинамика крыла вблизи границы раздела сред. Л.: Судостроение. 1980. 304 с.
7. Амромин Э. Л., Васильев А. В., Дробленков В. В. О различных приближениях в теории кавитационных течений вязкой и капиллярной жидкости//ПМТФ. 1988. № 6. С. 117—126.
8. Амромин Э. Л., Мишкевич В. Г., Рождественский К. В. Приближенный расчет трехмерного кавитационного обтекания лопастей гребных винтов вязкой капиллярной жидкостью//Изв. АН СССР. МЖГ. 1990. № 6. С. 83—90.
9. Uhlman J. S. The surface singularity method applied to partially cavitating hydrofoils//J. Ship Res. 1987. V. 31. № 2. P. 107—124.

Санкт-Петербург

Поступила в редакцию
7.V.1993