## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАВИТАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ БАРОТРОПНОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА

© 2012 В.М. Румахеранг, Г.И. Топаж

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Поступила в редакцию 06.03.2012

Представлены результаты расчетных исследований кавитационного обтекания профиля с помощью баротропной модели расчета. Дается сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: *цилиндрическое крыло, кавитация, методика расчета, давление, плотность* среды

Кавитация – явление разрыва капельной жидкости под действием растягивающих напряжений. Обычно кавитация возникает в потоке в местах наибольшего разряжения, где давление становится ниже некоторого критического значения. Критическое давление зависит от многих факторов: от чистоты жидкости и ее температуры, содержания воздуха, формы и состояния обтекаемой поверхности. Для реальных жидкостей можно принять, что кавитация возникает при давлении, равном давлению насыщенного пара для данной температуры жидкости. При кавитации образуются полости - кавитационные пузырьки, заполненные паром, газом или их смесью. Существуют различные формы и стадии кавитации. В зависимости от условий течения и свойств среды кавитация может быть пузырьковой, состоящей из отдельных пузырьков в жидкости, или пленочной, возникающей на поверхности обтекаемого тела в виде каверны, состоящей из заполненного пара. Одним из основных параметров, характеризующих кавитацию, является число кавитации К, равное

$$K = \frac{p_{\infty} - p_{\text{B.}\Pi}}{\rho \frac{V_{\infty}^2}{2}} \tag{1}$$

где  $p_{\infty}$  и  $V_{\infty}$  – давление и скорость невозмущенного потока далеко перед профилем;  $p_{\rm B,\Pi}$  – давление парообразования жидкости

Румахеранг Вулфилла Максмилиан, аспирант. E-mail: maxrumaherang72@gmail.com

Топаж Григорий Ицкович, доктор технических наук, профессор кафедры гидромашиностроения. Е-mail:topaj@mail.ru

при данной температуре;  $\rho$  — плотность жидкости. С уменьшением коэффициента К кавитация становится более развитой.

В настоящее время в нашей стране и за границей разработаны разнообразные методы моделирования кавитационных потоков, однако не существует такого метода, который одинаково хорошо описывал бы все сложные физические процессы, происходящие при кавитации. Важными, но пока недостаточно разработанными проблемами теории кавитации являются: переход начальной пузырьковой стадии кавитации к пленочной форме кавитационного течения с образованием каверны, нестационарный характер кавитационного потока в хвостовой части каверны, расчет пространственных кавитационных течений жидкости. Развитие моделей расчета кавитационных течений шло по пути решения сравнительно простых задач динамики роста и захлопывания отдельных паровых пузырьков до рассмотрения кавитационного течения двухфазной квазигомогенной среды.

Модели двухфазной среды получили распространение для расчета развитых кавитационных течений. В этом случае двухфазная среда рассматривается как состоящая из жидкости и пара и имеющая непрерывное распределение плотности. В основе этих моделей лежит уравнение переноса объемной или массовой доли одной их фаз, включая источниковое слагаемое, которое описывает испарение и конденсацию. При снижении давления среды до давления насыщенного пара происходит практически скачкообразный переход жидкости в пар, однако при численной реализации, предполагающей непрерывность физических переменных, такой скачок не может быть описан.

В связи с этим в области давления близкого к давлению парообразования вводится узкая промежуточная зона давлений (шириной порядка 1 кПа), в которой плотность среды резко меняется по баротропному закону от плотности жидкости до плотности пара. Модели, использующие такой подход, получили большое распространение при расчете кавитационных течений и называются баротропными.

В данной работе рассматривается задача расчета кавитационного обтекания одиночного профиля на основе баротропной модели, реализованной коммерческой программе В FINE/TURBO [4], разработанной фирмой NUMECA International. Указанная баротропная модель была предложена и развита в работах Coutier-Delgosha [6], Delannoy and Kueny [5], Ciro Pascarella and Vito Salvatore [7]. Эта модель представляет собой модель сплошной среды, состоящей из однородной смеси, изменение плотности которой связано с изменением статического давления баротропным законом  $\rho = \rho(p)$ . Интенсивность кавитации в указанной модели характеризуется соотношением объема пара ко всему объему рассматриваемой ячейки (жидкость плюс пар). В этом случае для моделирования кавитации может быть принята модель однофазной жидкости, характеризующей переменной плотностью, изменяющейся в пределах расчетной области. Баротропный закон  $\rho = \rho(p)$  используется для оценки местной плотности в зависимости от местного статического давления (рис. 1). Расчетные ячейки рассматриваются как полностью заполненные жидкостью ( $\rho = \rho_{\lambda}$ ), паром  $(\rho = \rho_{v})$ , или их смесью в зависимости от величины давления в ячейке. Предполагая, что скорость звука не зависит от энтропии, уравнение скорости звука в смеси может быть представлено в виде [5-7]:

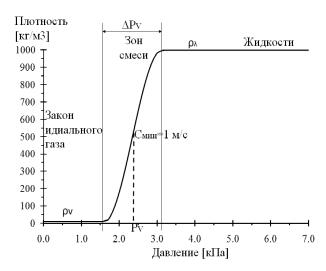
$$c_{\cdots}^2 = dp/d\rho. \tag{3}$$

где  $C_m$  — скорость звука в гомогенной смеси, которая связана со скоростями звука в чистой жидкости  $c_{\lambda}$  и в паре  $c_{\nu}$  следующей зависимостью:

$$\frac{1}{c_m^2} = \left[\alpha \rho_v + (1 - \alpha)\rho_\lambda \right] \frac{\alpha}{\rho_v c_v^2} + \frac{1 - \alpha}{\rho_\lambda c_\lambda^2}, \quad (4)$$

где  $\alpha = \frac{1-\rho/\rho_{\lambda}}{1-\rho_{\nu}/\rho_{\lambda}}$  — коэффициент, зависящий, в

основном, от отношения плотности смеси к плотности жидкости. Из формулы (4) видно, что изменения плотности смеси зависит от трех основных параметров; минимальной скорость звука  $C_m$ , плотности жидкости и плотности пара. При пренебрежении массой теплообмена между двумя фазами можно с помощью динамического подхода Jacobsen [7] найти минимальную скорость звука. Значения плотностей жидкости и пара задаются с учетом фиксированной температуры. Учитывая зависимость (4), в результате интегрирования уравнения (3) получим непрерывное изменение плотности смеси в интервале изменения давлений в зоне  $p_v - \Delta p/2 . (рис.1).$ 

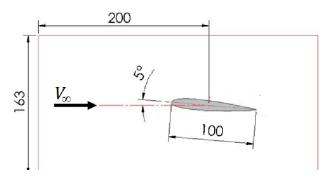


**Рис. 1.** Баротропный закон состояния воды при температуре 20°C

В программном комплексе FINE/Turbo численная реализация баротропной модели кавитационного течения проводится в рамках расчета трехмерного турбулентного потока вязкой жидкости. Для решения трехмерной задачи используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса. В расчете принимается стандартная  $k-\varepsilon$  модель турбулентности. В работе [6] численная модель решения трехмерной задачи была адаптирована к условиям кавитационного течения жилкости. Ключевым моментом этой адаптации является изменение закона состояния жидкости. Применение баротропного закона подразумевает одновременное рассмотрение двух различных случаев: наличие сжимаемой смеси и практически несжимаемой жидкости. В этом случае возникает трудность в управлении двумя различными состояниями среды без создания какой-либо разрывов в поле течения. Следует отметить, что явление кавитации характеризуется очень резкими и быстрыми процессами, поэтому при расчетах изменения во времени и пространстве значения плотности

сглаживаются, чтобы избежать численных нестабильностей. С этой целью в расчет вводится на каждом шаге итерации псевдо-производная по времени [8].

В данной работе для оценки эффективности расчетного моделирования кавитационного течения жидкости были использованы результаты экспериментальных исследований обтекания изолированного крыла в кавитационной трубе [1]. В работе [1] приведены замеры распределения давлений по симметричному профилю цилиндрического крыла NACA-0012, обтекаемого с углами атаки при различных числах кавитации. Скорость течения воды  $V_{\infty}$ постоянна и равна 12 м/с, длина хорды профиля равна 100 мм. Значения чисел кавитации менялись в пределах К=0,6-3,0 за счет изменения статического давления  $P_{\infty}$  в кавитационной трубе. Замеры давлений проводились в 18 точках профиля с помощью монометрических датчиков давления. На рис. 2. представлена схема расположения профиля в рабочем участке кавитационной трубы [1] при фиксированном угле атаки  $\alpha^{\circ} = 5^{\circ}$ .

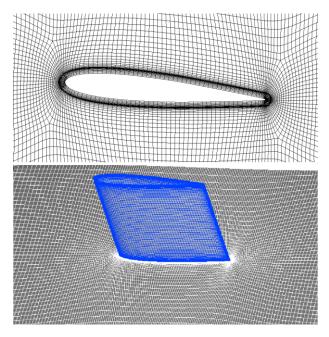


**Рис. 2.** Схема расположения профиля в кавитационной трубе

Режим бескавитационного обтекания профиля, при котором отсутствует появление пузырьков пара в жидкости, имеет место при числе кавитации K=3,0. По мере уменьшения статического давления и, соответственно, числа кавитации (при  $K=0,9\div0,6$ ) возникают различные стадии кавитации

В данной работе на основе баротропной модели кавитационного течения жидкости с помощью программного комплекса FINE<sup>TM</sup>/Turbo[4] были выполнены расчетные исследования кавитационного обтекания профиля NACA-0012 при угле атаки  $\alpha^o = 5^o$  и задании различных чисел кавитации, которые менялись в широких пределах. Число Рейнольдса находится в пределах  $Re=1,24\cdot10^6$ . При этом значения безразмерных величин  $Y^+$  составляет порядка 30, при расстоянии от

ближайшей точки сетки до стенки равном  $5.7\cdot10^{-4}$  м. Для проведения расчетов с помощью программного трехмерного автоматизированного генератора сеток  $IGG^{TM}$  в расчетной области была построена сетка, состоящая из 70000 узлов. Для корректного расчета течения в областях с большими градиентами изменения параметров потока (в области пограничного слоя), расчетная сетка имела сгущение. На рис. 3. показаны профиль цилиндрического крыла NACA-0012 и фрагмент расчетной области.

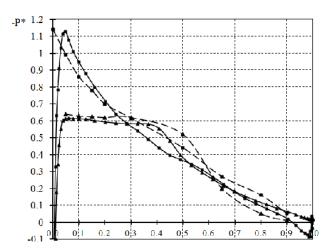


**Рис. 3.** Профиль крыла NACA-0012 и фрагмент расчетной области

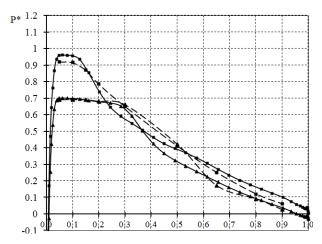
На входе в расчетную область задавались параметры потока. Масштаб турбулентности на входе задавался как одна десятая от диаметра входного сечения. Входная интенсивность турбулентности I=5%. Течение в области крыла рассчитывалось в неподвижной системе координат. При этом использовалась модель плоскости смешения. На твердой стенке ставилось условие прилипания. На рис.4, 5 представлены графики расчетного распределения коэффициентов давления  $P^* = 2(P-P_{\infty})/\rho V_{\infty}^2$  по стороне разряжения профиля NACA-0012 при различных числах кавитации и дается сопоставление с результатами соответствующих экспериментальных исследований.

Из рис. 4,5 видно, что при значениях коэффициента давления -P\*=К на профиле возникает пленочная каверна, в которой давление практически равно давлению парообразования. По мере уменьшения числа кавитации длина каверны увеличивается. При кавитации происходит

увеличения давления на входном участке каверны и ее уменьшения на хвосте каверны по сравнению по случаем безкавитационного обтекания профиля.



**Рис. 4.** Распределение коэффициентов давления  $_{-}$ р\* при K=3, и K=0,6



**Рис. 5.** Распределение коэффициентов давления  $_{\mathbf{P}^{*}}$  при K=0,9 и K=0,7

**Выводы:** выполненные расчетные исследования и их сопоставление с соответствующими результатами эксперимента показали, что баротропная модель расчета может быть эффективно использована для моделирования кавитационного течения жидкости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1. *Большаков, Д.С.* Развитие кавитации каверны и кавитационной эроции на цилидрическом крыле / Д.С. Большаков, В.Г. Старицкий. В кн.: Грянко Л.П., Папир А.Н. Лопастные насосы. М., Машиностроение, 1975. 432 с.
- 2. *Пылаев, Н.И.* Кавитация в гидротурбинах / *Н.И. Пылаев, Ю.У. Эдель.* Л., Машиностроение, 1974. 256 с.
- 3. *Перник, А.Д.* Проблемы кавитации. Л., Государственное союзное издательство судостроительной промышленности, 1963. 335 с.
- 4. Theoretical Manual FINETM/Turbo v8.7, Flow Integrated Environment, September 2009.
- 5. Delannoy, Y. Two phase flow approach in unsteady cavitation modeling / Y. Delannoy, J.L. Kueny // ASME Cavitation and Multi-phase Flow Forum (1990). 1990. Vol. 109. Pp. 153-159.
- Coutier-Delgosha, O. Numerical simulation of cavitating flow in an inducer geometry / O. Coutier-Delgosha, R. Fortes-Patella, JL. Reboud, N. Hakimi // Proc. 4-th European Conference on Turbomachinery, Firenze, Italy, March 2001.
- 7. Pascarella, C. Effects of speed of sound variation on unsteady cavitating flows by using a barotropic model / C. Pascarella, V. Salvatore // Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003) Osaka, Japan, November 1-4, 2003.

## ESTIMATION THE EFFICIENCY OF CAVITATIONAL LIQUID CURRENT MODELING WITH THE HELP OF BAROTROPIC MODEL OF CALCULATION

© 2012 V.M. Rumaherang, G.I. Topazh

St.-Petersburg State Polytechnical University

Results of calculation researches of cavitational streamlining of profile with the help of baroptopic model are presented. Comparison of the received results with experimental data is given.

Key words: cylindrical wing, cavitation, calculation method, pressure, medium density

Wulfilla Rumaherang, Post-graduate Student. E-mail: <u>maxrumaheramg72@gmail.com</u> Grigoriy Topazh, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Hydromachine Building. E-mail: topaj@mail.ru