

03

## Оценка моделей давления флуктуаций потока для расчета кавитирующих течений

© Anh Dinh Le<sup>1</sup>, Linh Le Ngoc<sup>1</sup>, Anh Truong Viet<sup>2</sup>, Hung The Tran<sup>3</sup><sup>1</sup> University of Engineering and Technology, Vietnam National University, Hanoi, Vietnam<sup>2</sup> Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam<sup>3</sup> Faculty of Aerospace Engineering, Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

E-mail: anh.ld@vnu.edu.vn, llinh9054@gmail.com

Поступило в Редакцию 13 января 2022 г.

В окончательной редакции 4 февраля 2022 г.

Принято к публикации 4 февраля 2022 г.

Поставлен численный эксперимент с целью моделирования кавитационного потока, в ходе которого выполнена оценка применимости различных моделей давления флуктуаций потока (flow fluctuation pressure, FFP), таких как модель FFP, предложенная Singhal (модель FFP Singhal), модифицированная модель FFP Singhal, модель сдвиговых напряжений и представленная здесь модель сдвиговых и вихревых напряжений. Для моделирования выбран случай осесимметричного затупленного тела, для которого доступны экспериментальные данные. В результате обнаружено, что первые три модели FFP дают очень похожие распределения коэффициента давления  $C_p$  на затупленном теле. С другой стороны, результаты численного моделирования показывают существенную роль как напряжения турбулентного сдвига (скорости турбулентной сдвиговой деформации), так и вихревого течения в потоке. Таким образом, представленная модель сдвиговых и вихревых напряжений несколько лучше предсказывает такие параметры потока, как  $C_p$  и длина кавитационной каверны.

**Ключевые слова:** кавитация, турбулентные флуктуации, сдвиговое напряжение, вихревое течение, однородная модель.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.08.52359.19136

Кавитация — это явление, играющее важную роль в работе гидравлических машин. При наличии кавитации существенно увеличиваются шумы и вибрация, что приводит к падению коэффициента полезного действия этих машин. Важно, что кавитация вызывает эрозию, приводящую порой к критическому снижению безопасности эксплуатации. Таким образом, получение правильного представления о механизме кавитации необходимо для конструирования гидравлических машин, соответствующих высоким требованиям к КПД и безопасности.

С недавнего времени считается, что однородная модель предоставляет более продуктивный метод описания механизма кавитации, происходящей в промышленных установках, чем другие модели [1–6]. В рамках такой модели многофазный поток можно представить упрощенно как псевдооднофазное течение с добавлением уравнения дополнительного фазового перехода и введением источников члена в модель процессов переноса массы. Ключевой задачей при этом является выбор такой модели кавитации, которая давала бы разумно обоснованное описание зарождения и развития кавитационного пузырька. В основе большинства кавитационных моделей лежит упрощенное уравнение Рэлея–Плессета [7–9], в котором величина давления фазового перехода является ключевым фактором, регулирующим процесс испарения и конденсации.

Обычно кавитация возникает в потоках с высоким числом Рейнольдса, что указывает на сильную взаимную

зависимость флуктуаций потока и механизма фазового перехода [6,7,10] и должно учитываться при проведении численного моделирования. Таким образом, цель настоящей работы состоит в оценке различных моделей давления флуктуаций потока (flow fluctuation pressure, FFP), применяемых в расчетах фазовых переходов при кавитации. Рассматриваются четыре модели: модель FFP Singhal (SM), модифицированная модель FFP Singhal (MSM), модель сдвиговых напряжений (SSM) и предлагаемая модель сдвиговых и вихревых напряжений (SVM). В первых трех моделях учитывается эффект турбулентного напряжения Рейнольдса, в то время как в последней модели рассматривается увеличение кинематических напряжений из-за наличия в потоке вихревых течений.

Для кавитационного потока применяется модель однородного сжимаемого двухфазного потока жидкость–газ [2–6]. При этом используется модель SST  $k-\omega$  [11] в сочетании с пристеночной функцией Аллмараса (Allmaras) [6]. Для расчета скорости массопереноса была выбрана кавитационная модель Сайто (Saito) [12]. Для вычисления критериального показателя — порогового давления фазового перехода  $p_v^*$  — использовалось следующее выражение:

$$p_v^* = p_v + p_{ff}. \quad (1)$$

Здесь  $p_v$  — давление насыщенного пара,  $p_{ff}$  — давление флуктуаций потока, которое в настоящей работе является

ся ключевым показателем и рассчитывается описанным далее образом.

**Модель давления флуктуаций потока Сингхала (Singhal) (SM).** Величина  $p_{ff}$ , обусловленная турбуленцией, вычислялась по локальной кинетической энергии турбулентности  $k$  следующим образом [7]:

$$p_{ff} = 0.195\rho k. \quad (2)$$

**Модифицированная модель давления флуктуаций потока Сингхала (Singhal) (MSM).** Чебли (Chebli) и др. [10] обнаружили, что в области каверны вязкое сдвиговое напряжение изменяется нелинейно с ростом плотности смеси. Таким образом, в модели MSM величина  $p_{ff}$  изменяется по следующему закону:

$$p_{ff} = \frac{(1 - \alpha)^{10}(\rho_l - \rho_v) + \rho_v}{(1 - \alpha)(\rho_l - \rho_v) + \rho_v} \rho k. \quad (3)$$

**Модель сдвиговой деформации (SSM).** В рамках этой модели в правые части уравнений (2) и (3) подставляется функция сдвиговых напряжений  $S$  [13]:

$$p_{ff} = \mu|S|. \quad (4)$$

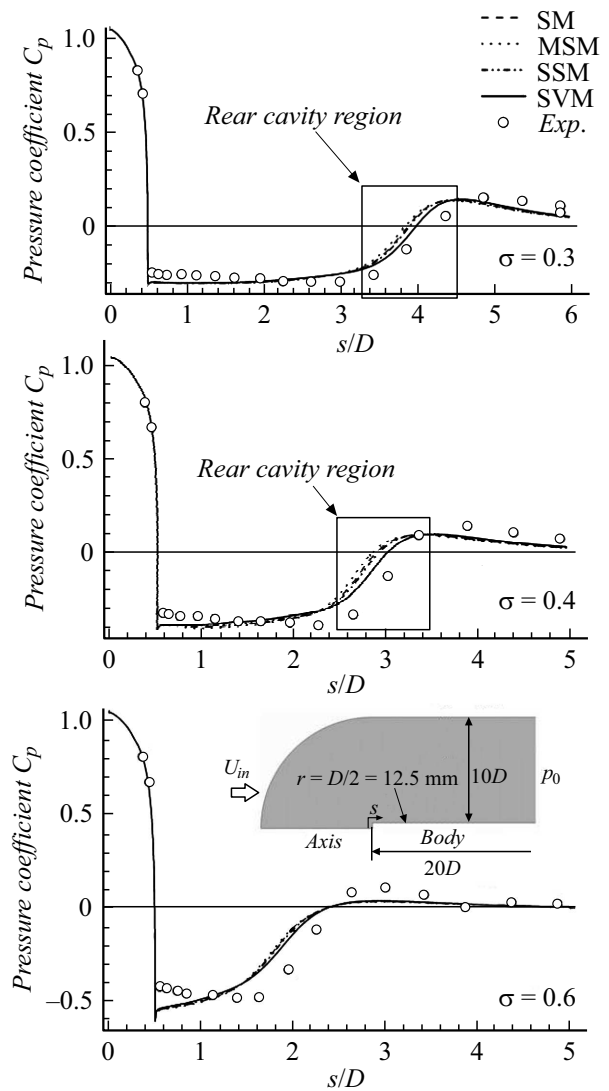
**Предлагаемая модель сдвиговых и вихревых напряжений (SVM).** Известно, что вихревые течения в потоке оказывают влияние на процесс кавитации, поскольку они вызывают повышение либо кинематического напряжения (Reynolds stress) на стенках, либо порогового давления фазового перехода [6]. Итак, в рамках данной модели величина  $p_{ff}$  вычисляется по следующим формулам:

$$p_{ff} = \mu|S|, \quad |\Omega| < |S|,$$

$$p_{ff} = \mu(|S| + |\Omega|), \quad |\Omega| > |S|. \quad (5)$$

В том случае, если доминирует величина завихренности  $\Omega$ , величина  $p_{ff}$  представляет собой сумму давления от сдвигового напряжения и дополнительного давления, обусловленного вихревыми течениями. В противоположном случае величина  $p_{ff}$  вычисляется через коэффициент сдвигового напряжения  $S$  согласно модели SSM.

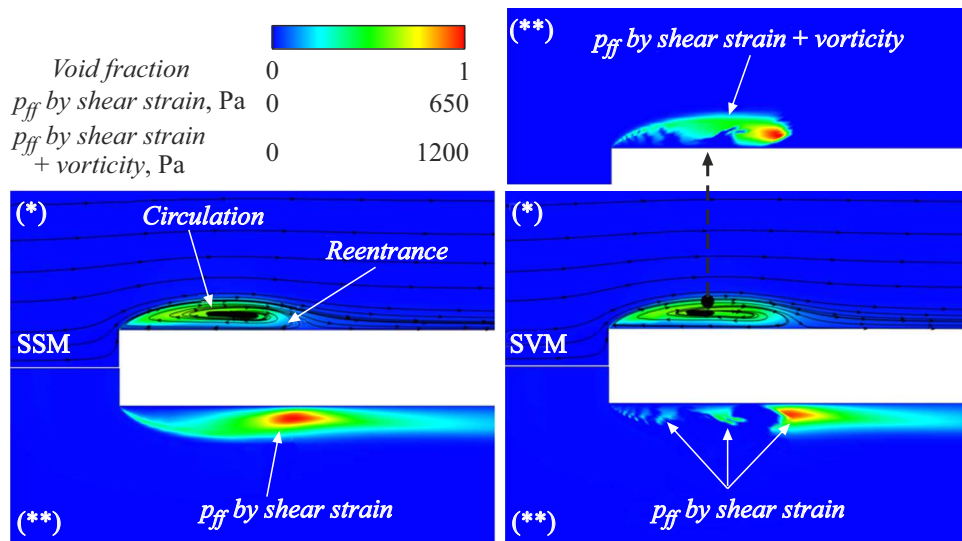
Для оценки перечисленных выше моделей был выбран случай кавитационного потока, обтекающего затупленное тело [14]. Следует отметить, что данному объекту присуща простая геометрия, поэтому вычисление проводилось с использованием симметричной двумерной (2D) модели со структурированной сеткой размером  $279 \times 85$  точек. Скорость потока на левой границе домена была определена как  $U_{in} = 5.45$  m/s со значениями числа Рейнольдса  $Re = 1.36 \cdot 10^5$  и доли паровой фазы  $\alpha_0 = 0.001$ . На правой границе вычислительной области значение давления считалось постоянным ( $p_0$ ) при кавитационном числе ( $\sigma = (p_0 - p_v)/0.5\rho U_{in}^2$ ), равном 0.6, 0.4 и 0.3. Как видно из рис. 1, для тела и оси устанавливались граничные условия, заключающиеся соответственно в отсутствии проскальзывания и симметрии. Моделирование проводилось с помощью оригинального



**Рис. 1.** Сравнительный анализ величин  $C_p$  на затупленном теле, полученных посредством четырех моделей  $p_{ff}$  и в эксперименте [14].

программного кода на основе метода конечных разностей и явной схемы убывающей полной вариации (TVD) второго порядка Harten–Yee. По результатам сравнительного тестирования этот численный алгоритм был признан применимым для различных полей течения [4–6].

По данным о распределении давления (рис. 1) видно, что все модели FFP при принятых кавитационных числах  $\sigma$  дают практически идентичные распределения коэффициента давления ( $C_p = (p - p_0)/0.5\rho U_{in}^2$ ) на носовой части тела и внутри каверны. Область низких значений  $C_p$  увеличивается с понижением  $\sigma$ , отражая тем самым увеличение длины кавитационной каверны. Расхождение становится наблюдаемым в задней области каверны. При этом в представленной модели SVM предсказываемые значения  $C_p$  несколько лучше согласуются с данными измерений, чем значения, которые даются



**Рис. 2.** Контурные изображения доли кавитационного объема, линий обтекания и величины  $p_{ff}$ , полученных с учетом сдвигового и вихревого напряжений согласно моделям SSM и SVM.

первыми тремя моделями кинематических напряжений (Reynolds stress), при  $\sigma = 0.4$  и  $0.3$ .

На рис. 2 для сравнения результатов, получаемых с помощью моделей SSM (слева) и SVM (справа), представлены доля объема кавитационных областей в каверне и линия потока (\*), а также величина  $p_{ff}$  (\*\*). При низком значении  $\sigma = 0.4$ . Полученные результаты позволяют лучше понять механизм, обеспечивающий более высокое качество оценки параметров потока с помощью представленной здесь модели SVM. Повторное присоединение потока имеет место в задней части каверны, при этом кавитационные пузыри отрываются от поверхности тела. Кроме того, обе модели указывают на возникновение циркуляции потока в области кавитации. В модели SSM визуализация величины  $p_{ff}$  выполняется начиная от острой кромки тупого конца тела, причем ее значение растет при продвижении вдоль области кавитации. Отрыв потока в этой области приводит к значительному изменению сдвигового напряжения  $S$ , которое дает максимальное значение  $p_{ff}$  (порядка 650 Па) в задней части области кавитации (рис. 2, слева). Внутри кавитационной каверны более высокое значение  $p_{ff}$  дается, очевидно, моделью SVM. Благодаря наличию циркуляции потока и вихревых течений к величине  $p_{ff}$  добавляется еще одна составляющая давления флуктуаций  $p_{vor}$ , при этом, как видно из рис. 2 (верхняя правая панель),  $p_{ff}$  достигает максимального значения 1200 Па. Видно, что представленная модель SVM дает результаты, лучше согласующиеся с данными измерений и свидетельствующие о более интенсивном испарении. В области позади каверны значения  $p_{ff}$ , обусловленного сдвиговым напряжением, примерно одинаковы в моделях SSM и SVM. Отсюда следует, что вихревое течение, присутствующее в потоке, должно влиять на процессы фазовых переходов и обязательно должно учитываться в

модельных расчетах. Итак, представленная модель SVM, в которой учитывается влияние на критерий фазового перехода как сдвигового, так и вихревого напряжения, действительно применима для моделирования кавитационных процессов.

В заключение отметим, что результаты настоящей работы продемонстрировали влияние характера флуктуаций потока на моделирование кавитационного потока. Различные модели FFP, построенные на базе сдвигового напряжения, дают похожие результаты с заниженной оценкой размера области кавитации и значений/распределения давления по поверхности тела. Представленная здесь модель сдвиговых и вихревых напряжений дает результаты, несколько более близкие к данным измерений, чем другие модели, основанные только на кинематических напряжениях. Результаты моделирования показали наличие значительного влияния вихревых течений и рециркуляции потока, которое необходимо учитывать при расчете процессов массопереноса. Если образовавшаяся кавитация устойчива, влияние вихрей может не быть значительным. Однако предлагаемая модель могла бы обеспечить гораздо лучшие результаты для случая неустойчивой кавитации. Уровень ее применимости в сочетании с другими моделями будет рассмотрен в следующей работе.

### Финансирование работы

Исследование проводилось в рамках научного проекта QG.21.32 „Исследование методов численного моделирования вихревой кольцевой кавитации в воде с учетом термодинамических эффектов и концентрации воздуха“ Вьетнамского государственного университета (Ханой).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] У. Ибен, А.В. Махнов, А.А. Шмидт, Письма в ЖТФ, **45** (2), 43 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.02.47223.17249 [U. Iben, A.V. Makhnov, A.A. Schmidt, Tech. Phys. Lett., **45** (1), 41 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019010255].
- [2] D.L. Anh, J. Okajima, Y. Iga, J. Fluids Eng., **141** (8), 081102 (2019). DOI: 10.1115/1.4042257
- [3] D.L. Anh, J. Okajima, Y. Iga, Cryogenics, **101**, 29 (2019). DOI: 10.1016/j.cryogenics.2019.04.010
- [4] D.L. Anh, P.T. Hoang, T.T. Hung, J. Fluids Eng., **143** (10), 101204 (2021). DOI: 10.1115/1.4051078
- [5] D.L. Anh, J. Fluids Eng., **144** (1), 011206 (2022). DOI: 10.1115/1.4051972
- [6] A.D. Le, H.T. Tran, J. Appl. Fluid Mech., **15** (2), 551 (2022). DOI: 10.47176/JAFM.15.02.33231
- [7] A.K. Singhal, M.M. Athavale, H. Li, Y. Jiang, J. Fluids Eng., **124** (3), 617 (2002). DOI: 10.1115/1.1486223
- [8] G.H. Schnerr, J. Sauer, in *4th Int. Conf. on multiphase flow* (New Orleans, USA, 2001).
- [9] P.J. Zwart, A.G. Gerber, T. Belamri, in *5th Int. Conf. on multiphase flow* (Yokohama, Japan, 2004), N 152.
- [10] R. Chebli, B. Audebert, G. Zhang, O. Coutier-Delgosha, Comput. Fluids, **221**, 104898 (2021). DOI: 10.1016/j.compfluid.2021.104898
- [11] F.R. Menter, *NASA Technical Memorandum 103975* (NASA, 1992).
- [12] Y. Saito, R. Takami, I. Nakamori, T. Ikohagi, Comput. Mech., **40** (1), 85 (2007). DOI: 10.1007/s00466-006-0086-1
- [13] A. Asnaghi, A. Feymark, R.E. Bensow, Int. J. Multiphase Flow, **93**, 142 (2017). DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.04.005
- [14] H. Rouse, J.S. McNown, *Cavitation and pressure distribution: head forms at zero angle of yaw* (State University of Iowa, 1948).