

УДК 532.528

ПРИСТЕНОЧНАЯ СУПЕРКАВИТАЦИЯ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТЕНКЕ

Ю. Н. САВЧЕНКО, Г. Ю. САВЧЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Отримано 18.07.2006

Экспериментально исследуются параметры суперкаверны, образованной плоским кавитатором на вертикальной плоской стенке. Приводится зависимость длины суперкаверны от числа кавитации. Полученные результаты сравниваются с теоретическими расчетами и параметрами суперкаверны в неограниченном потоке. Показано влияние пограничного слоя на размеры пристеночных суперкаверн.

Експериментально досліджуються параметри суперкаверни за плоским кавітатором на вертикальній плоскій стінці. Наводяться залежності довжини суперкаверни від числа кавітації. Отримані результати порівнюються з теоретичними розрахунками і параметрами суперкаверни в необмеженому потоці. Показано вплив пограничного шару на розміри пристінних суперкаверн.

The parameters of the supercavern that is created by the flat cavitator on the vertical flat wall are considered experimentally. The dependence between the length of the supercavity and the cavitation number is added. The received results are compared with the theoretical calculations and parameters of the supercavity in unbound flow. The influence of the wall layer to the parameters of the supercavity is shown.

ВВЕДЕНИЕ

Впервые вдув газа в погранслою на стенке для снижения сопротивления трения был предложен в работах Лойцянского Л. Г., Федяевского К. К в сороковых годах [?, ?].

Работы Бутузова А. А. по использованию искусственных каверн на днищах судов [?], Ватанабе К. и Киришнера А. по созданию газовых прослоек [?, ?] показали теоретические и практические возможности создания эффекта проскальзывания на обтекаемой стенке и значительного снижения сопротивления трения.

В Институте гидромеханики НАН Украины пристеночная суперкавитация исследовалась на телах вращения и плоских поверхностях [?, ?]. При этом уделялось внимание вопросам образования суперкаверны, их взаимодействия с пограничным слоем, брызговым эффектам внутри газового слоя и взаимодействию каверн с газовыми пузырьками.

Использование суперкаверн на вертикальных стенках корпусов судов для снижения гидродинамического сопротивления выглядит чрезвычайно привлекательно, так как они сообщаются с атмосферой и не требуют организации поддува воздуха. Однако использование пристеночной суперкавитации требует учета влияния пограничного слоя, гравитации и двухфазного следа.

Данная статья имеет своей целью оценить эффект пристеночной суперкаверны, показать особенности формы вертикальных каверн, а также получить данные о размерах суперкаверн в усло-

виях реального пограничного слоя.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СНИЖЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Размеры суперкаверн, образованных конусами и плоскими пластинками в безграничной жидкости, в настоящее время хорошо исследованы [?, ?, ?]. В случае, когда невозмущенный поток обтекает носовой кавитатор, использование модели течения идеальной жидкости оказывается вполне обоснованным и дает хорошее совпадение с экспериментом. Имеются теоретические и эмпирические формулы для основных размеров суперкаверн, которые показывают зависимость размеров суперкаверн от числа кавитации и коэффициента сопротивления кавитатора [?, ?, ?].

Схема пристеночного суперкавитационного течения для невязкой жидкости (рис. ??) соответствует суперкавитационному течению в верхней половине плоскости обтекания пластинки безграничной жидкостью.

При этом основные параметры суперкаверны определяются соотношениями [?]:

$$\frac{L(\sigma)}{2h} = \frac{4}{(4 + \pi)} \left\{ \left[\frac{(2 + \sigma)}{\sigma} \right]^2 - \frac{1}{2} \ln 4 \left[\frac{(2 + \sigma)}{\sigma} \right] - \frac{1}{4} \right\}; \quad (1)$$

$$C(\sigma) = \frac{2\pi}{(4 + \pi)} (1 + \sigma), \quad (2)$$

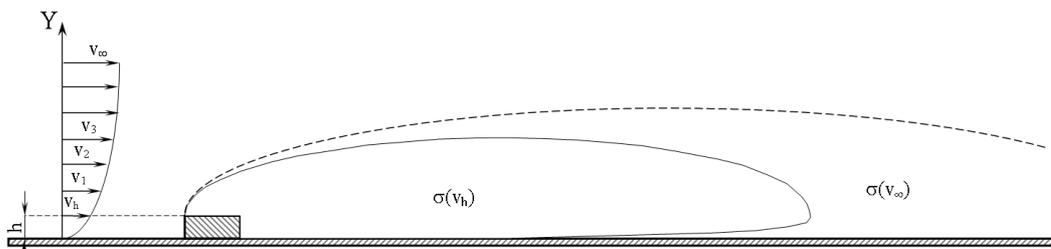


Рис. 1. Схема обтекания пристеночного кавитатора в пограничном слое

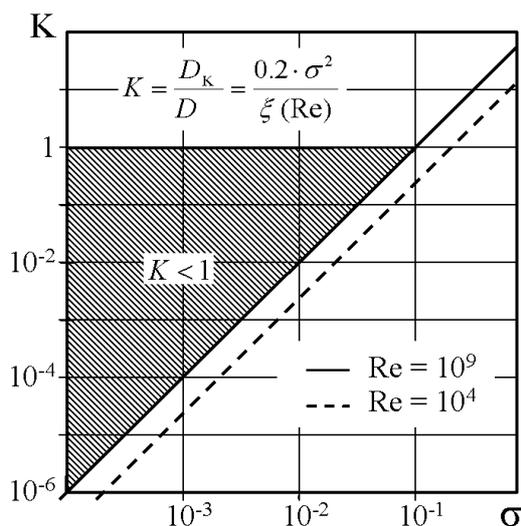


Рис. 2. График скоростей

где L – длина суперкаверны; $2h$ – ширина плоского кавитатора (пластинка); $\sigma = \frac{(P_0 - P_K)}{(\rho V^2)/2} = \frac{2gH}{V^2/2}$ – число кавитации; P_0 – давление; P_K – давление в каверне; H – глубина; V – скорость; ρ – плотность воды; $C(\sigma)$ – коэффициент сопротивления кавитатора.

Длина пристеночной каверны на вертикальной стенке будет зависеть от глубины H , поэтому каждому горизонтальному плоскому сечению пристеночной суперкаверны будет соответствовать свое число кавитации $\sigma = \frac{2gH}{V^2/2}$.

В пристеночных течениях вязкой жидкости на образование пристеночной суперкаверны оказывает влияние пограничный слой. И пользоваться решениями, полученными для течения идеальной жидкости, становится невозможно. Особенно большое влияние пограничного слоя ожидается в случае, когда толщина пограничного слоя и ширина кавитатора сравнимы по величине между собой.

Если сравнить кавитационное сопротивление плоского кавитатора

$$D_K = \frac{2\pi}{4 + \pi} (1 + \sigma) \frac{\rho V^2}{2} h L_K, \quad (3)$$

где h – толщина (высота) кавитатора, а L_K – элемент длины кавитатора, с гидродинамическим сопротивлением трения части стенки, покрытой суперкаверной,

$$D_{ГР} = \xi(Re) \frac{\rho V^2}{2} L(\sigma) L_K, \quad (4)$$

где $\xi(Re)$ – коэффициент сопротивления трения [?], то для малых чисел кавитации из выражений (1), (3) и (4) можно получить соотношение для оценки снижения сопротивления. Коэффициент K показывает, какую часть кавитационное сопротивление составляет от сопротивления трения полосы, покрытой каверной с площадью $L * L_K$, расположенной на глубине H :

$$K = \frac{D_K}{D_{ГР}} = \frac{C_0(\sigma)}{\xi(Re)} \frac{h}{L_K(\sigma)} \approx 0.2 \frac{\sigma^2}{\xi(Re)}. \quad (5)$$

Соотношение (5) показывает, что коэффициент снижения сопротивления K зависит от σ^2 и что условием наличия снижения сопротивления есть условие

$$\frac{\sigma^2}{\xi(Re)} < 5. \quad (6)$$

Область значений чисел Рейнольдса и кавитации для обеспечения снижения сопротивления показана на графике рис. ??.

Следует отметить, что проведенная оценка является максимально возможной для случая отсутствия влияния всех факторов пограничного слоя.

Влияние пограничного слоя можно учесть, осредняя динамическое давление по высоте кавитатора h в условиях распределенной скорости $v^2(y)$ в погранслое:

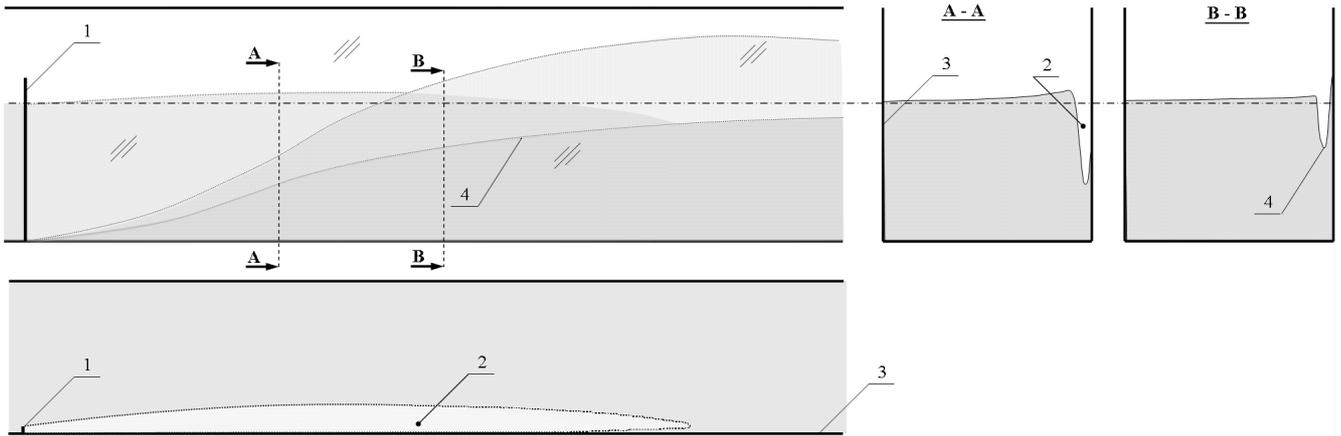


Рис. 3. Развертка схемы обтекания кавитатора потоком:
1 – кавитатор, 2 – суперкаверна, 3 – прозрачная стенка, 4 – нижняя граница суперкаверны

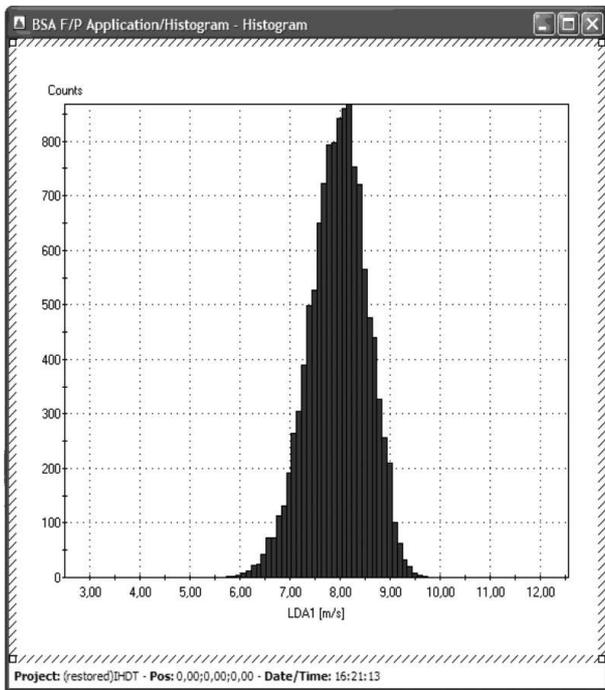


Рис. 4. Пример экспериментального замера скорости набегающего потока $V_\infty = 8.2$ м/с

$$\frac{\bar{\rho} V^2}{2} = \frac{1}{h} \int_0^h \frac{\rho}{2} v^2(y) dy = \frac{1}{h} \rho \frac{V^2}{2} \int_0^h \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{2}{7}} dy = \frac{\rho V^2}{2} \frac{7}{9} \left(\frac{h}{\delta}\right)^{\frac{2}{7}}, \quad (7)$$

где $v(y) = V \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{7}}$ – теоретическое распределение скорости в турбулентном пограничном слое на гладкой стенке [?], а δ – толщина погранслоя.

С учетом (7) можно ввести некоторое эффективное число кавитации σ^* , учитывающее распределение скорости в погранслое:

$$\sigma^* = \frac{P_0 - P_c}{\frac{\rho V^2}{2} \cdot \frac{7}{9} \left(\frac{h}{\delta}\right)^{\frac{2}{7}}} = \sigma \cdot 1.28 \left(\frac{\delta}{h}\right)^{\frac{2}{7}}. \quad (8)$$

Тогда выражения для длины каверны и сопротивления кавитатора (1), (3) будут иметь вид

$$\frac{L}{h}(\sigma^*) = \frac{4.48}{\sigma^{*2}} = \frac{4.48}{\sigma^2} \left(\frac{h}{\delta}\right)^{\frac{4}{7}}, \quad (9)$$

$$D_K^* = 0.88 \frac{\rho V^2}{2} \cdot 0.78 \left(\frac{h}{\delta}\right)^{\frac{2}{7}} h L_K. \quad (10)$$

А выражение (5) для коэффициента снижения сопротивления примет вид

$$K^* = 0.2 \frac{\sigma^{*2}}{\xi(Re)} = K \cdot 1.64 \left(\frac{\delta}{h}\right)^{\frac{4}{7}}. \quad (11)$$

В случае вертикальной суперкаверны, когда плоский кавитатор длиной L_K расположен вертикально на стенке, а его концы находятся на глубинах H_1 и H_2 , можно вычислить осредненное по глубине значение коэффициента:

$$\bar{K}^* = \frac{0.2}{\xi(Re)} \frac{1}{L_K} \int_{H_1}^{H_2} \sigma^{*2}(H) dH =$$

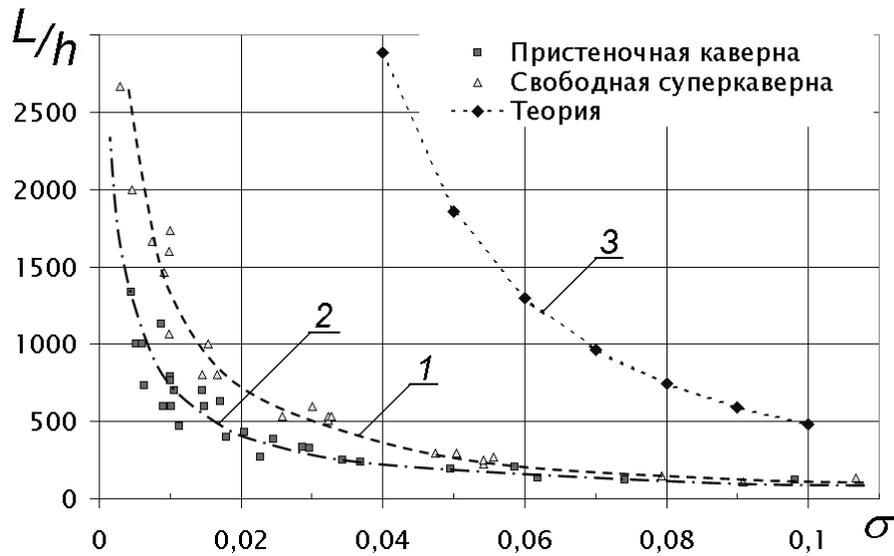


Рис. 5. Обработанные экспериментальные данные:
 $h=1.5$ мм, L/h – безразмерная длина каверны, σ – число кавитации;
 1 – пристеночная каверна, 2 – свободная каверна, 3 – теоретические данные

$$= \frac{0.44}{\xi(Re)} \frac{g^2}{LV^4} \left(\frac{\delta}{h}\right)^{\frac{4}{7}} (H_2^3 - H_1^3), \quad (12)$$

где $\xi(Re)$ следует также брать средним по $L(\sigma(H_2))$ и $L(\sigma(H_1))$.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах использовалось течение воды в рабочем участке импульсной гидродинамической трубы со скоростью течения до 14 м/с. Размеры рабочего участка 115×115×1500 мм. Кавитатор (пластинка шириной 1.5 мм и высотой 200 мм) устанавливался вплотную к прозрачной стеклянной стенке рабочего участка, как показано на рис. ??.

При открытом сверху рабочем участке пластинка пересекала свободную поверхность потока воды и искусственная суперкаверна снабжалась атмосферным воздухом. При этом давление в каверне P_K считалось равным атмосферному:

$$P_K = P_a.$$

Длина каверны L_K определялась с помощью разметки, нанесенной на боковое стекло рабочего участка (фотография на рис. ??).

В эксперименте задавались и поддерживались постоянными:

- плотность и температура воды – $\rho = 1$; $T = 16^\circ\text{C}$;
- ширина пластины (кавитатор) – число кавитации $h = 1.5$ мм.

Изменялись в процессе эксперимента:

- скорость потока $V = 4 \div 13$ м/с.

Измерялись в процессе эксперимента:

- давление перед рабочим участком – P_p ;
- скорость перед рабочим участком – V_∞ ;
- толщина пограничного слоя на стенке перед кавитатором – δ ;
- длина суперкаверны – L_K (H);
- глубина рассматриваемого сечения суперкаверны – H .

Рассчитывались следующие параметры:

- $P_o(H)$ – давление на глубине H ,

$$P_o = \rho g H + P_a;$$

- число кавитации

$$\sigma = \frac{(P_o - P_c)}{(\rho V^2)/2} = \frac{2gH}{\frac{V^2}{2}}.$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты эксперимента представлены графически зависимостью $L_c(\sigma)$ на рис. ???. Там же приведены результаты измерения длины каверны за плоским кавитатором, расположенным в середине потока рабочего участка (кривая 2) и изображена теоретическая кривая результатов расчетов $L_K(\sigma)$ по формуле (1).

Фотографии вертикальных пристеночных каверн представлены на рис. ??.

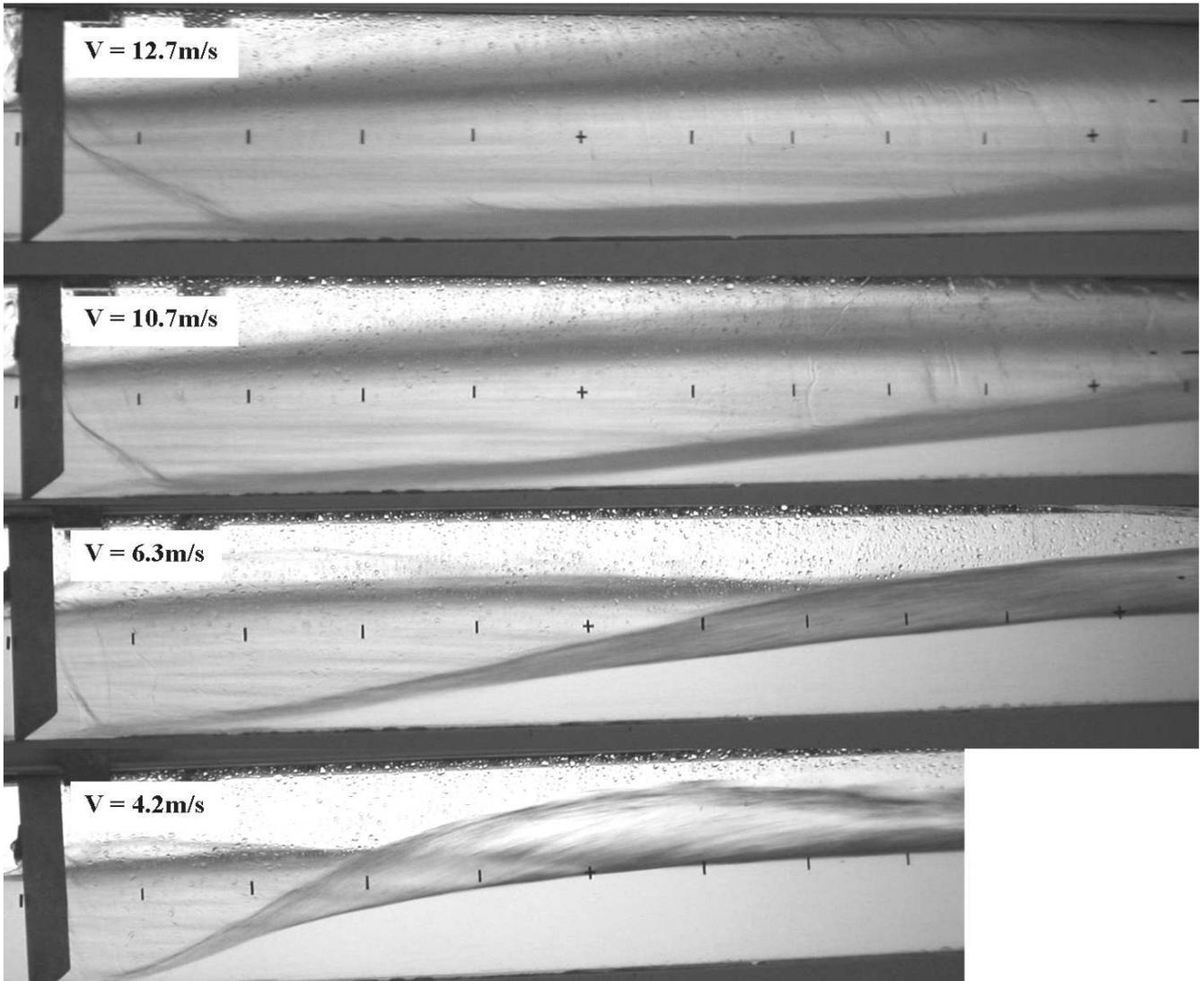


Рис. 6. Фотографии обтекания пристеночного кавитатора $h=1.5$ мм при разных скоростях

Для наглядной иллюстрации схемы обтекания пристеночного плоского вертикального кавитатора на рис. ?? приведены вид “сбоку” (позиция 1) и вид “сверху” на модель и каверну (позиция 2), а также два поперечных разреза А-А и В-В. Сложность картины обтекания обусловлена эффектом всплывания самой каверны, а также заторможенностью потока в области каверна – стенка (рис. ??, позиция 3) и каверна – дно. В результате влияния на каверну упомянутых эффектов, а также эффекта прилипания, она отрывается от дна и оттесняется от боковой стенки, а приторможенная жидкость поднимается вдоль стенки вверх и на некотором расстоянии от кавитатора образует водяной гребень. При ширине каверны 3–4 см и

скоростях 5–10 м/с эффекты поверхностного натяжения практически не влияют на форму каверны, поскольку число Вебера велико:

$$W = \frac{\rho V_{\infty}^2 D_K}{\zeta},$$

где ζ – сила поверхностного натяжения.

Как видно из схемы (рис. ??), длина каверны обусловлена высотой кавитатора h и скоростью потока V_h в сформированном профиле скорости, натекающем на кавитатор.

Гистограммы распределения скорости в пограничном потоке были получены с помощью однокомпонентного лазерного доплеровского анемометра. Пример, приведенный на рис. ??, соответствует скорости V_{∞} . По оси ординат на гистограмах

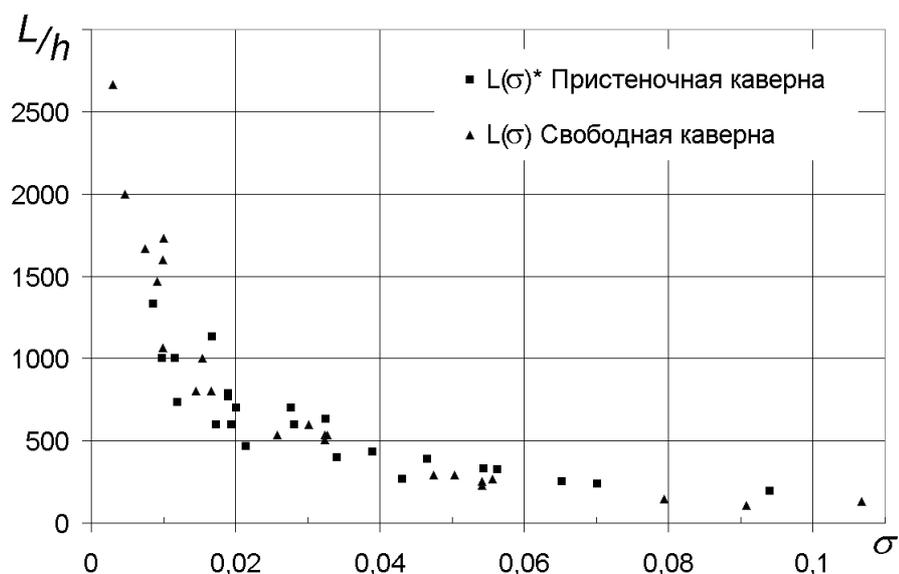


Рис. 7. Обработка экспериментальных данных. $L(\sigma^*)$ – данные пересчитаны с учетом эффективного числа кавитации

отложено количество замеров, а по оси абсцисс скорость. Отклонение значений в области среднего значения обусловлено турбулентностью потока.

4. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Анализ экспериментальных данных показывает, что в пограничном слое образуются суперкаверны значительно меньших размеров, чем в неограниченном потоке (кривые 1, 2 на рис. ??).

Как показано ранее, этот эффект можно объяснить пониженной скоростью в пограничном слое, что снижает эффективное значение для местного числа кавитации, рассчитанного по средней скорости потока V_h , набегающего на кавитатор (рис. ??).

Учет влияния погранслоя путем осреднения динамического давления по высоте кавитатора h (7) и введения эффективного числа кавитации σ^* (8) приводит к совпадению результатов по длине кавитатора для невозмущенного потока и в условиях пограничного слоя, что подтверждает правильность расчетов рис. ??.

В то же время, аналогичная коррекция теоретической кривой показывает значительное расхождение с результатами эксперимента (рис. ??, кривые 2 и 3). Расхождение теоретических и экспериментальных результатов можно объяснить несколькими причинами:

а. Турбулентностью потока в гидротрубе и по-

граничном слое, что может влиять на гидродинамическое сопротивление кавитатора в сторону его уменьшения за счет образования застойной области перед кавитатором.

б. Всплыванием каверны (хорошо видно на рис. ??) за счет действия гидростатических сил давления, что ясно видно на фотографиях по расположению нижней границы суперкаверны (рис. ??).

Важной особенностью пристенных суперкавитационных течений является образование характерного вторичного течения внутри суперкаверны в виде пристенного водяного гребня, направленного со дна внутрь каверны.

Анализ экспериментальных данных (рис. ??) показывает, что водяной гребень, подымающийся со дна каверны вдоль стенки, уже на половине длины суперкаверны достигает свободной поверхности и отсекает каверну от стенки. На второй половине длины суперкаверны водяной гребень по инерции поднимается над свободной границей потока и замыкает ранее свободную от замыва площадь стенки.

Интересно отметить, что зарегистрированное вторичное течение в пристеночных плоских вертикальных кавернах соответствует аналогичному течению в нижней части суперкаверны за дисками при малых числах Фруда, когда восходящее течение разделяет заднюю часть суперкаверны на два полых вихря [?].

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально исследованы параметры вертикальных пристеночных каверн, образованных плоским кавитатором.

2. Показана роль пограничного слоя на величину пристеночных каверн, когда размеры кавитатора меньше размеров пограничного слоя.

3. Предложено ввести в расчеты размеров пристеночных суперкаверн эффективное число кавитации σ^* по формуле (8), учитывающей снижение скоростного напора в пограничном слое.

4. Обнаружено характерное вторичное течение в виде водяного гребня, направленное внутрь каверны, которое отсекает газовую полость суперкаверны от стенки на половине длины каверны.

5. Предметом дальнейших исследований могут быть нестационарные пристеночные суперкаверны, изолированные суперкаверны и системы пристеночных суперкаверн.

1. Эпштейн Л. А. Методы теории размерностей и подобия в задачах гидромеханики судов.- Л.: Судостроение, 1970.- 208 с.
2. Шашин Н. И. Гидромеханика.- М.: Высшая школа, 1990.- 384 с.

3. Савченко Ю. Н., Семенов Ю. А. Метод расчета кавитационного течения в вихревом набегающем потоке // Прикладна гідромеханіка.- 2005.- 7, N 2.- С. 54-62.
4. Логвинович Г. В. и др. Течения со свободными поверхностями.- К.: Наукова думка, 1985.- 295 с.
5. Савченко Ю. Н., Савченко Г. Ю. Оценка эффективности использования суперкавитации на осесимметричных корпусах // Прикладна гідромеханіка.- 2005.- 6, N 4.- С. 78 - 83.
6. Keizo Watanabe Drag reduction research in Japan.- Proc. Int. Symp. Seawater Drag Reduction: Newport, R1, USA, July 1988.
7. Kirschner I. N., Imas L. G. Plume Supercavity Interaction Proc. Int. School "High Speed Hydromechanics" // Russia.- June 2002.
8. Лойцянский Л. Г. Об изменении сопротивления тел путем заполнения ПГС жидкостями с другими физическими константами // ПММ.- 1942.- Том VI.
9. Федяевский К. К. Снижение сопротивления трения путем изменения физических констант на стенке // ДАН.- 1943.- 9-10.- С. 70-78.
10. Бутузов А. А., Горбачев Ю. А., Иванов А. Н., Калужный В. Г. Снижение сопротивления судна с помощью искусственных газовых каверн.- Л.: Судостроение, 1990.- 234 с.
11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.- М.: Наука, 1969.- 742 с.
12. Кнепп Р., Дейли Дж., Хэммит Э. Кавитация.- М.: Мир, 1974.- 687 с.