

УДК 532.528

ВЛИЯНИЕ УГЛА АТАКИ ПЛОСКОГО ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО КАВИТАТОРА НА ПАРАМЕТРЫ ИСКУССТВЕННОЙ СУПЕРКАВЕРНЫ

Ю. Н. САВЧЕНКО, Ю. Д. ВЛАСЕНКО, Г. Ю. САВЧЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев
03680 Киев – 180, МСП, ул. Желябова, 8/4
e-mail office@hydromech.com.ua

Получено 20.09.2014

Излагаются результаты экспериментального исследования изменения вертикального размера миделевого сечения суперкаверны, вертикального смещения хвостовой части каверны и коэффициента уноса газа из искусственной суперкаверны при изменении угла наклона плоского эллиптического кавитатора в диапазоне $\delta = \pm 30^\circ$. В экспериментах величина горизонтальной оси эллиптического кавитатора была постоянной $P_1 = 21.5$ мм, а величина вертикальной оси изменялась по закону $D_2 = D_1 \cos^{-1} \delta$ в соответствии с установленным углом наклона кавитатора $\delta = \pm 5^\circ; \pm 10^\circ; \pm 20^\circ; \pm 30^\circ$. Полученные результаты сравнивались с известными теоретическими зависимостями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кавитатор, каверна, обтекание

Викладаються результати експериментального дослідження зміни вертикального розміру мідельового перерізу суперкаверни, вертикального зсуву хвостової частини каверни і коефіцієнта виносу газу з штучної суперкаверни при зміні кута нахилу плоского еліптичного кавітатора в діапазоні $\delta = \pm 30^\circ$. У експериментах величина горизонтальної осі еліптичного кавітатора була сталою $P_1 = 21.5$ мм, а величина вертикальної осі змінювалася згідно із законом $D_2 = D_1 \cos^{-1} \delta$ відповідно до встановленого кута нахилу кавітатора $\delta = \pm 5^\circ; \pm 10^\circ; \pm 20^\circ; \pm 30^\circ$. Отримані результати порівнювалися з відомими теоретичними залежностями.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: кавітатор, каверна, обтікання

The results of experimental research of varying the vertical dimension of the supercavity mid-section, vertical shift of the cavity transom and the gas loss coefficient from an artificial supercavity when varying the angle of slope of flat elliptic cavitator in the range $\delta = \pm 30^\circ$ are stated. In experiments, the value of the horizontal axis of elliptic cavitator was constant $P_1 = 21.5$ mm, and the vertical axis value was changed by law $D_2 = D_1 \cos^{-1} \delta$ in accordance with the set angle of the cavitator slope $\delta = \pm 5^\circ; \pm 10^\circ; \pm 20^\circ; \pm 30^\circ$. The obtained results are compared with the known theoretical dependences.

KEY WORDS: cavitator, cavity, flow

ВВЕДЕНИЕ

Изучению геометрии каверн за некруговыми кавитаторами посвящен ряд теоретических и экспериментальных работ [1–3]. При этом были установлены важные закономерности:

1. Поперечное сечение каверн, образованных плоскими кавитаторами эллиптической формы, установленными поперек набегающего потока, по мере удаления от кавитатора изменяют свою первоначальную эллиптическую форму, приближаясь к круговой, а затем эволюционируют к эллиптической с противоположной ориентацией большой и малой осей.

2. Локальные особенности кавитатора в виде выступающих углов или, наоборот, впадин вызывают на поверхности каверн гребни или впадины противоположного знака, чем те, что имеет кавитатор. Доказательством к сказанному могут служить приведенные на рис. 1 результаты обмера се-

чений каверны за кавитатором в форме ромба с отношением осей 1/6. В данном случае имело место совмещение указанных процессов [4].

Также в литературе имеется ряд исследований, посвященных характеристикам кавитаторов конической формы под углом атаки к набегающему потоку и деформации каверн за ними [4, 5].

Небольшое количество исследований для углового положения плоских эллиптических кавитаторов были выполнены для условий отклонения кавитатора вдоль большой оси, расположенной горизонтально [1].

Вместе с тем имеется большой научный и практический интерес к исследованию деформации суперкаверн за эллиптическими кавитаторами, имеющими различный наклон но одинаковую площадь проекции на вертикальную плоскость.

В этом случае на кавитатор возлагается выполнение сразу двух функций:

1. Создание боковой силы для балансировки суперкавитирующего тела в суперкаверне и управ-

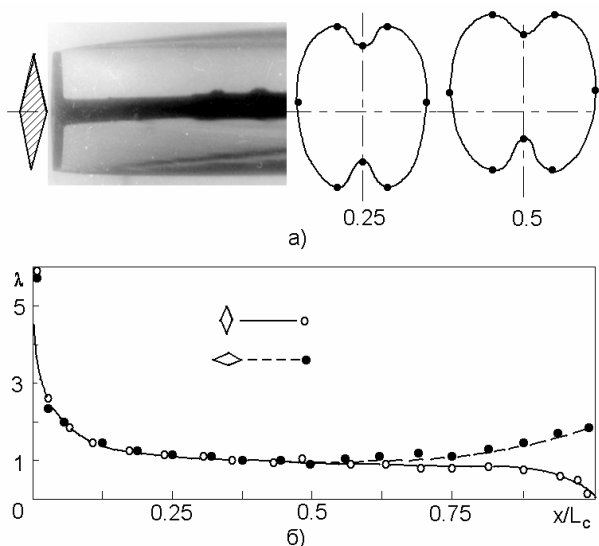


Рис. 1. Эволюция формы сечения каверны за ромбическим кавитатором с соотношением осей 1:6:
 а) – характерная форма сечения каверны для двух отстояний;
 б) – соотношение вертикальной и горизонтальной осей в сечении каверны по длине

ления его движением.

2. Организация суперкаверн с минимальными отклонениями для размещения в ней тела вращения с минимальными зазорами между границей суперкаверны и корпусом тела вращения.

В настоящей работе ставилась задача:

1. Исследовать возмущения формы сечения каверны в зависимости от изменения угла атаки кавитатора.

2. Оценить отклонения средней оси суперкаверны при изменении угла атаки кавитатора и создании боковой силы.

3. Оценить величину изменения необходимого поддува искусственной суперкаверны при создании боковой силы за счет отклонения кавитатора на угол атаки.

1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования проводились в гидродинамической лаборатории ИГМ НАН Украины на импульсной гидронапорной трубе (ИГТ). Основные принципы работы установок такого типа изложены в работе [6]. Конструктивная схема данной ИГТ показана на рис. 2. Импульсная гидронапорная труба включает следующие части:

1 – напорный бак;

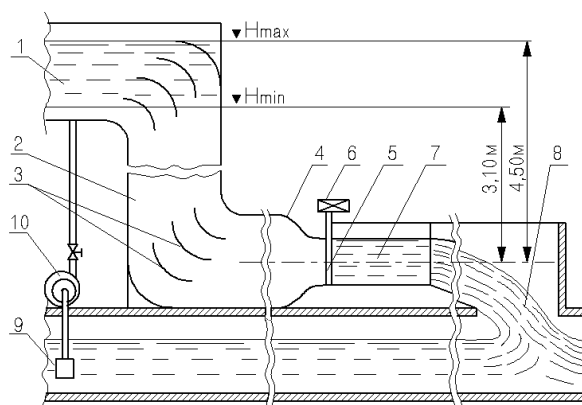


Рис. 2. Схема импульсной гидронапорной ИГТ

- 2 – подводящий канал;
- 3 – направляющие лопатки;
- 4 – конфузур;
- 5 – пусковая заслонка;
- 6 – электропривод пусковой заслонки;
- 7 – рабочий участок;
- 8 – сливной канал;
- 9 – подземный резервуар;
- 10 – насос заполнения ИГТ.

Работа гидротрубы обеспечивается за счет слива воды из напорного бака 1 от максимального уровня $H_{max} = 4.50$ м до минимального $H_{min} = 3.10$ м, процесс регулируется с помощью пусковой заслонки 5 с электроприводом 6. Проведение систематических исследований включает, как правило, многократные повторения рабочего цикла.

Скорость потока в рабочем участке 7 определяется величиной напора H по формуле

$$V = \varphi \sqrt{2gH},$$

где $H_{max} > H > H_{min}$; $\varphi = 0.954$ – коэффициент скорости.

В указанном диапазоне изменения напора скорость потока изменяется в пределах $V_{max} = 8.96$ м/с, $V_{min} = 7.44$ м/с.

Схема модели, установленной в рабочем участке со вспомогательной аппаратурой, показана на рис. 3. Цифрами на схеме обозначены:

- 1 – конфузур;
- 2 – рабочий участок;
- 3 – пусковая заслонка;
- 4 – электропривод пусковой заслонки;
- 5 – корпус модели;
- 6 – кавитатор;
- 7 – боковая державка;
- 8 – обтекаемая стойка из оргстекла;
- 9 – ресивер сжатого воздуха;

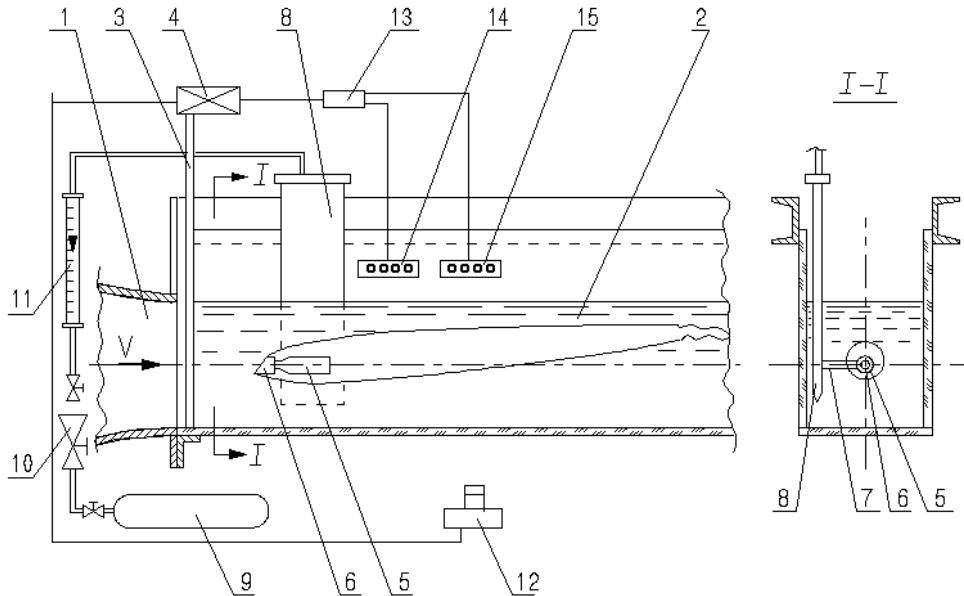


Рис. 3. Схема модели и вспомогательной аппаратуры в рабочем участке ИГДТ

- 10 – редуктор;
 11 – ротаметрический расходомер;
 12 – цифровая камера;
 13 – блок управления;
 14 – дисплей таймера;
 15 – дисплей датчика напора.

Размер поперечного сечения потока в рабочем участке составлял 340×340 мм, установленный по оси потока корпус модели 5 снабжался сменными кавитаторами 6 с различными углами наклона к оси потока и постоянным номинальным диаметром $D_n = 21.5$ мм. Воздух для поддува каверны подавался по каналам в обтекаемых державке 7 и стойке 8. Пересекающая поверхность каверны боковая державка, выполненная в виде симметричного крыльцевого профиля толщиной 6 мм, практически не создавала возмущений. Расход поддуваемого в каверну воздуха измерялся ротаметрическим расходомером 11 типа РС-5.

Для получения сопоставимых результатов регистрации исследуемых режимов обтекания проводилась при постоянной величине напора, и, следовательно, скорости потока. С учетом особенностей процесса формирования начальной каверны были проведены специальные тестовые эксперименты, по результатам которых определено рабочее значение напора $H_0 = 3.84$ м и, соответственно, скорость $V_0 = 8.28$ м/с, при которых формируется достаточно устойчивый квазистационарный режим кавитационного обтекания. Постоян-

ство длины каверны при указанной скорости достигалось путем проведения предварительных настроечных экспериментов за счет регулировки величины поддува.

Для регистрации исследуемых процессов применялась цифровая камера типа Sony Cyber-Shot модель DSC-HX50. Для настроечных экспериментов использовалась видеосъемка в формате Full HD с частотой 50fps. Фотографии для последующей обработки выполнялись с выдержкой $1/1600$ с. Для определения по фотографиям натуральных размеров использовалась масштабная сетка и масштабные метки на стеклянных стенках рабочего участка.

Импульсный режим работы гидродинамической трубы требует автоматизации экспериментального процесса и синхронизации средств измерения и регистрации с рабочим циклом установки. Эта задача решалась с помощью блока управления 13, соединенного с электроприводом 4 и датчиками положения (концевыми выключателями) пусковой заслонки 3, цифровой камерой 12, таймером и датчиком напора, установленным в проточном тракте ИГМ. В этом случае проведение эксперимента включает следующие операции:

- при закрытой пусковой заслонке 3 и наполненном напорном баке ИГМ непосредственно перед пуском устанавливается требуемая величина поддува, контролируемая ротаметром 11;
- включается блок управлений 13, по сигналу которого электропривод 4 поднимает пусковую за-

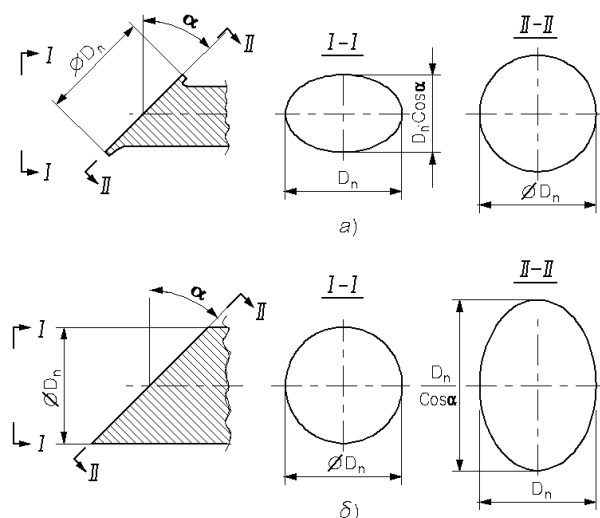


Рис. 4. Геометрические параметры кавитаторов: Тип-1(а) и Тип-2 (б)

слонку 3, одновременно показания датчика напора выводятся на цифровое табло 15;
 – в момент полного открытия заслонки 3 автоматически включается таймер, показания которого выводятся на цифровое табло 14;
 – в момент понижения напора до указанного выше рабочего значения $H = 3.84$ м автоматически включается камера 12.

При регистрации картины обтекания в поле кадра располагались также ротаметр 11 и цифровое табло таймера 14 и датчика напора 15, таким образом, фотография включала всю полную информацию о параметрах исследуемого процесса.

В экспериментах использовались кавитаторы двух типов (называемые далее "Тип-1" и "Тип-2") с одинаковым указанным выше номинальным диаметром $D_n = 21.5$ мм и с конструктивными различиями, проявляющимися при изменении ориентации кавитатора (см. рис. 4):

– Тип - 1 (рис. 4,а) представляет собой диск диаметром $D_n = 21.5$ мм с обтекаемой поверхностью постоянной площади в форме круга, проекция которого на поперечное сечение потока при наклоне диска принимает эллиптическую форму с уменьшающейся площадью;

– Тип - 2 (рис. 4, б), обтекаемая поверхность которого представляет эллипс, площадь которого при наклоне увеличивается, а проекция на поперечное сечение потока сохраняет постоянную форму и размер $D_n = 21.5$ мм.

При ориентации по нормали к оси потока ($\alpha = 0^\circ$) описываемые кавитаторы идентичны.

Очевидно, что при наклоне в вертикальной пло-

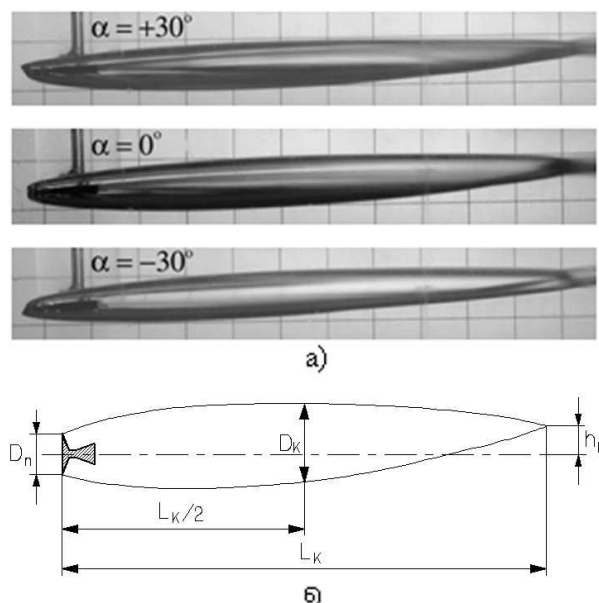


Рис. 5. Фотографии каверн за кавитаторами разной ориентации (а) и схема измерения геометрических параметров каверны (б)

скости ($\alpha \neq 0^\circ$) различия геометрических параметров двух типов кавитаторов обусловят различия в величинах продольной и поперечной компонент действующих на них гидродинамических сил и, как следствие, различия геометрических параметров формирующихся за ними каверн. Для изучения этого вопроса были изготовлены наборы кавитаторов каждого типа с идентичными углами наклона относительно продольной оси.

С целью получения достаточно выраженного эффекта систематические эксперименты были выполнены для сравнительно больших углов наклона кавитатора $\alpha = 20^\circ$ и $\alpha = 30^\circ$, при этом каждый кавитатор испытывался в двух противоположных позициях, что давало диапазон $\alpha = \pm 20^\circ$ и $\alpha = \pm 30^\circ$.

Фотографии каверн для указанного диапазона углов $\alpha = (-30^\circ), (0^\circ), (+30^\circ)$ приведены на рис. 5,а. На рис. 5,б показана схема измерения по фотографиям геометрических параметров каверн, где D_n – диаметр кавитатора; L_k и D_k соответственно длина и диаметр каверны; h_k – превышение точки замыкания над центром кавитатора.

С учетом флуктуации вентилируемых каверн, обусловленных процессами уноса газа, в каждом эксперименте проводилось 3–4 однотипных пуска гидротрубы с соответствующей регистрацией и независимыми обмерами каверн. На приведенных

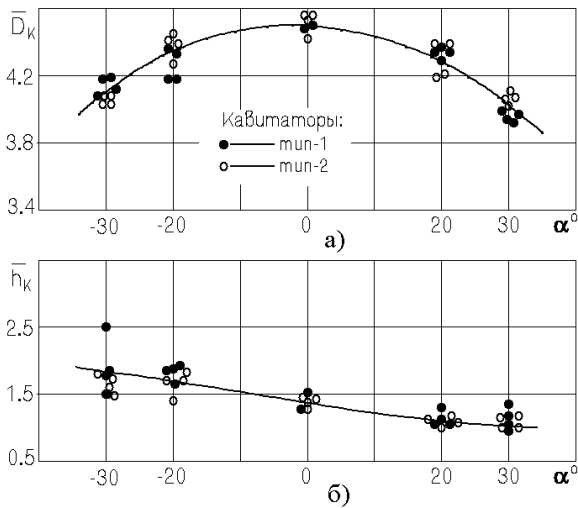


Рис. 6. Графики влияния ориентации кавитатора на геометрические параметры каверны

ниже графиках результаты измерений отнесены к диаметру кавитатора, т.е. $\bar{D}_k = \frac{D_k}{D_n}$; $\bar{h}_k = \frac{h_k}{D_n}$, а интенсивность поддува представлена в виде безразмерного коэффициента поддува

$$C_Q = \frac{4Q_g}{V_0 \pi D_n^2},$$

где Q_g – расход поддуваемого в каверну воздуха; $V_0 = 8.28$ м/с – скорость потока, при которой проводилась регистрация; $D_n = 21.5$ мм – диаметр кавитатора.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Влияние ориентации кавитатора на геометрические параметры каверны характеризуется представленными на рис. 6 экспериментальными графиками $\bar{D}_k(\alpha)$ и $\bar{h}_k(\alpha)$.

Прежде всего следует отметить достаточно четко выраженное уменьшение диаметра каверны как при положительных, так и отрицательных углах наклона кавитатора (рис. 6,а). Некоторая асимметричность графика может быть связана с влиянием на суммарный результат процесса всплывания каверн.

Косвенным подтверждением этому может служить график $\bar{h}_k(\alpha)$ на рис. 7 и 6,б, из которого следует, что возникновение на наклонном кавитаторе подъемной силы ($\alpha > 0^\circ$) приводит к относительному опусканию хвостовой части каверны и, наоборот, образование топящей силы на наклон-

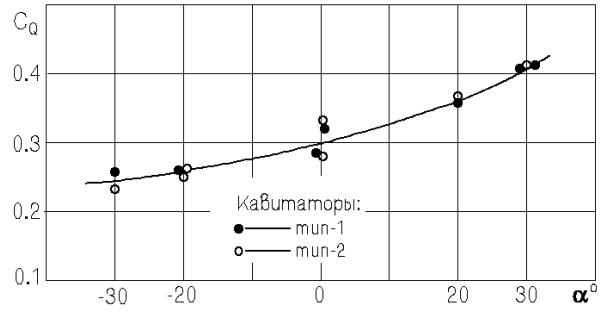


Рис. 7. График влияния ориентации кавитатора на интенсивность уноса газа из каверны

ном кавитаторе ($\alpha < 0^\circ$) сопровождается относительным подъемом хвостовой части каверны. Такой результат согласуется с отмеченной ранее общей качественной закономерностью: изменение геометрии кавитатора сопровождается противоположным по знаку изменением геометрии каверны.

С такой интерпретацией согласуются и представленные на рис. 7 данные о влиянии ориентации кавитатора на интенсивность уноса газа из каверны. Сопоставление графиков $C_Q(\alpha)$ и $\bar{h}_k(\alpha)$ на рис. 6,а показывает, что при однонаправленных процессах всплывания и деформации хвостовой части каверны ($\alpha < 0^\circ$) интенсивность уноса газа снижается, а при их противоположной направленности ($\alpha > 0^\circ$) соответственно увеличивается.

Следует также отметить отсутствие выраженных различий во всех экспериментальных результатах, полученных при испытаниях двух типов кавитаторов, несмотря на значительные абсолютные величины углов наклона.

2.1. Анализ экспериментальных данных

В экспериментах рассматривалось семейство кавитаторов, образованных сечением цилиндра постоянного диаметра $D = 21.5$ мм плоскостями под углами $\alpha = 0^\circ; \pm 5^\circ; \pm 10^\circ; \pm 15^\circ; \pm 20^\circ; \pm 30^\circ$.

При этом в сечениях образовывались эллипсы с осями $D_1 = 21.5$ мм, $D_2 = D_1 / \cos \alpha$.

Для кавитаторов круговой формы $D_1 = D_2 = 21.5$ мм коэффициент сопротивления C_x и подъемной силы C_y записываются в виде [2]

$$C_x = C_{x0}(1 + \sigma) \cos^2 \alpha, \tag{1}$$

$$C_y = C_{x0}(1 + \sigma) \cos \alpha \sin \alpha,$$

где $C_{x0} = 0.82$.

В нашем случае все семейство кавитаторов будет иметь одинаковую круговую проекцию при любых удлинениях $\lambda_n = D_2/D_1$. Поэтому площадь сечения набегающего потока будет одинаковой при любых α , а формулы для семейства кавитаторов эллиптической формы примут вид

$$C_x = C_{x0}(1 + \sigma) \cos \alpha, \tag{2}$$

$$C_y = C_{x0}(1 + \sigma) \sin \alpha,$$

где $C_{x0} = 0.82 \div 0.88$ при изменении удлинения $\lambda = 1 \div \infty$.

В нашем случае $0 < \alpha < 30^\circ$ удлинение изменяется в пределах $1 < \lambda_n < 1.15$ и можно считать, что $C_{x0} \approx 0.82$ как для диска $\lambda = 1$. ($C_{x0}(\infty) = 0.88$) [1].

В этом особом случае гидродинамическое сопротивление W_x будет постоянным и не будет зависеть от угла α , а подъемная сила W_y будет превышать подъемную силу диска:

$$\begin{aligned} W_x &= C_{x0}(1 + \sigma) \cos \alpha \frac{\rho V^2 \pi}{2} \frac{D_n}{4 \cos \alpha} D_n = \\ &= C_{x0}(1 + \sigma) \frac{\rho V^2}{2} \pi \frac{D_n^2}{4}, \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} W_y &= C_{x0}(1 + \sigma) \sin \alpha \frac{\rho V^2 \pi D_n}{2} \frac{D_n}{4 \cos \alpha} = \\ &= C_{x0}(1 + \sigma) \frac{\rho V^2}{2} \pi \frac{D_n^2}{4} \operatorname{tg} \alpha. \end{aligned}$$

Интересно сравнить экспериментальную величину всплывания хвоста суперкаверны с теоретической величиной, рассчитанной по формуле Л.А. Эпштейна [7]:

$$\bar{h}_k = \frac{h_k}{D_n} = 0.34 \left(\frac{\bar{L}}{\operatorname{Fr}} \right)^2 - 0.016 \left(\frac{\bar{L}}{\operatorname{Fr}} \right)^4, \tag{4}$$

где $\operatorname{Fr} = \frac{V}{\sqrt{gD_n}} = 18.4$; $\bar{L} = 52.45$.

Эксперимент (рис. 6) и расчет по формуле (4) дают близкие величины: в эксперименте $\bar{h}_k = 1.5$, расчет дает $\bar{h}_k = 1.73$. Различие составляет 15%.

Деформацию миделевого сечения каверны можно сравнить с теоретическими данными Г.В. Логвиновича [8].

Согласно теоретическим данным сечение каверны за наклонным диском $S_k(\alpha)$ уменьшается по сравнению с сечением за диском с нулевым углом

наклона $S_k(0)$. При этом вводится некоторый средний диаметр $2R_k(\alpha)$, связанный с вертикальным и горизонтальным размерами миделя каверны R_{k1} R_{k2} соотношением

$$R_k^2(\delta) = R_{k1} \cdot R_{k2},$$

где $\frac{R_{k1}}{R_{k2}} \approx \cos \alpha$.

Из этих соотношений следуют приближенные формулы для размеров миделя каверны:

$$R_{k1} = R_k \sqrt{\alpha}; \quad R_{k2} = \frac{R_k}{\sqrt{\cos \alpha}}. \tag{5}$$

В таблице 1 приводятся отношения площадей и средних радиусов для миделевого сечения каверны в зависимости от угла наклона диска.

Таблица 1

Отношения	α					
	0	5°	10°	15°	20°	30°
$\frac{S_k(\alpha)}{S_k(0)}$	1	0,99	0,96	0,92	0,86	0,71
$\frac{R_k(\alpha)}{R_k(0)}$	1	1,00	0,99	0,96	0,93	0,84
$\frac{R_{k1}(\alpha)}{R_{k1}(0)}$	1	0,99	0,98	0,94	0,89	0,78

Если учесть результаты эксперимента (рис. 6), где $\bar{D}_k(0) = 2\bar{R}_{k1} = 4.5$, то можно построить Таблицу 2 сравнительных данных эксперимента и расчета по формулам (5).

Таблица 2

Сравнительные данные	α			
	0	10°	20°	30°
Эксп. $\frac{D_{k1}}{D_n}$	4,5	4,45	4,3	4,0
Теор. $\frac{D_{k1}}{D_n}$	4,5	4,4	4,1	3,52

ВЫВОДЫ

Испытания кавитаторов Тип-1 и Тип-2 (рис. 4) показали близкие значения отклонения вертикального размера в миделе суперкаверны \bar{D}_k в диапазоне углов атаки $\alpha = \pm 30^\circ$ для этих двух типов кавитаторов (рис. 5).

Также были близкими отклонение хвоста суперкаверны $\bar{h}_k(\alpha)$ под действием изменения угла атаки на фоне гравитационного всплывания $h_k = 1.3$ (рис. 6).

Полученные результаты эксперимента показали преимущества использования кавитаторов Тип-2

Ю.Н. Савченко, Ю.Д. Власенко, Г.Ю. Савченко

по сравнению с круговыми кавитаторами Тип-1 в отношении создания подъемной силы (1), (2) при одинаковых отклонениях размеров каверны.

Экспериментально обнаружено снижение уноса газа из каверны в 1.7 раза при изменении угла атаки от $+30^\circ$ до -30° (рис. 7) и поддержании постоянными длины каверны $\bar{L} = 52.45$ и $Fr = 18.4$. Следует ожидать, что снижение уноса происходит за счет установления преимущественной формы уноса газа по вихревым шнурам [7].

1. Егоров И.Т., Садовников Ю.М., Исаев И.И., Басин М.А. Искусственная кавитация.– Л: Судостроение, 1971.– 284 с.
2. Vlasenko Yu.D. Control of Cavity Parameters at Supercavitating Flow // High Speed Body Motion in Water (AGARD Report 827). Proc. Fluid Dynamics Panel Workshop.– Kiev.– 1997.– P. 33-1–33-10.
3. Буйвол В.Н. Тонкие каверны в течениях с возмущениями.– К: Наукова думка, 1980.– 296 с.
4. Буйвол В.Н., Власенко Ю.Д., Журавлев Ю.Ф., Шевчук Ю.Р. Тонкие каверны за эллиптическими кавитаторами // ПМ.– Том XIV, № 10.– 1978.– С. 110 - 118.
5. Stinebring D.R., Holl J.W., Billet U.L. Water Tunnel Investigation of Ventilated Cavities on Conical Head Bodies // Int. Symp. on Jets and Cavities. ASME Winter Annual Meeteng, Miami Beach, FL.– Part 2.– 17 - 21 November 1985.– P. 203 - 214.
6. Власенко Ю.Д., Савченко Г.Ю., Козенко О.М., Козенко Р.М. Принципы расчета импульсной гидродинамической трубы // Прикладная гидромеханика.– 2012.– Т.14 (№4).– С. 26 - 36.
7. Эпштейн Л.А. Методы теории размерностей и подобия в задачах гидромеханики судов.– Л: Судостроение, 1979.– 208 с.
8. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами.– Киев: Наукова думка, 1969.– 216 с.
9. Кнепп Р., Дейли Дж., Хеммит Ф. Кавитация.– М: Мир, 1974.– 688 с.