

УДК 532.528

ГЛИССИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРА ПО ПОВЕРХНОСТИ СУПЕРКАВЕРНЫ

Ю. Н. САВЧЕНКО, Г. Ю. САВЧЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Отримано 07.08.2006

Экспериментально исследуется подъемная сила цилиндра, глссирующего по поверхности полукруглой впадины в рабочем участке гидродинамической трубы, что моделирует случай глссирования по поверхности суперкаверны. Приведены зависимости коэффициента подъемной силы цилиндра от угла атаки, от погружения задней кромки цилиндра и от отношения радиуса впадины к диаметру цилиндра. Сравнение с глссированием цилиндра по плоской поверхности показало, что коэффициент подъемной силы увеличивается по мере приближения радиуса цилиндра к радиусу полукруглой впадины (радиусу суперкаверны) и может превышать коэффициент подъемной силы для плоской поверхности в $3 \div 4$ раза. Предложены аппроксимационные соотношения для расчета коэффициента подъемной силы.

Експериментально досліджується підйомна сила циліндра, що глісує по поверхні півкруглої впадини на робочій ділянці гідродинамічної труби, що моделює випадок глісування по поверхні суперкаверни. Наведено залежність коефіцієнта підйомної сили циліндра від кута атаки, від занурення задньої кромки циліндра і від відношення радіуса впадини до діаметра циліндра. Порівняння з глісуванням циліндра по плоскій поверхні показало, що коефіцієнт підйомної сили збільшується в міру наближення радіуса циліндра до радіуса півкруглої впадини (радіусу суперкаверни) і може перевищувати коефіцієнт підйомної сили для плоскої поверхні в $3 \div 4$ рази. Запропоновані аппроксимационні співвідношення для обчислення коефіцієнта підйомної сили.

The lifting force of the cylinder gliding on the surface of the semicircular cavity in the working part of the hydrotunnel is considered experimentally. This case is modeling the gliding on the supercavern surface. The dependences for cylinder of the lifting force coefficient on the attack angle, rear edge submersion and the ratio of the cavern radius to the cylinder diameter are given. The compare with the cylinder gliding on the flat surface is showing that the coefficient of the lifting force is increasing with the cylinder radius approaching to the radius of the semicircular cavern (supercavern radius). The coefficient for this case can be $3 \div 4$ times greater then the coefficient for the flat surface. The approximation relations for the lift force coefficient calculation are proposed.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование глссирования цилиндра по поверхности суперкаверны вызвано необходимостью прогнозирования устойчивых режимов движения тел вращения в суперкавитационном режиме обтекания [1, 10].

Глссирование цилиндров и конусов по плоской поверхности исследовалось теоретическими и экспериментальными методами Г. В. Логвиновичем, Э. В. Парышевым, А. Д. Васиным, Т. Кисенюком [3–5, 7, 9].

Установлено, что определяющими параметрами при оценке коэффициентов гидродинамических сил, действующих на глссирующий цилиндр, являются: угол атаки – α , погружение задней кромки – h , величина поверхности замыва цилиндра – S и подъем уровня свободной поверхности – подпор [4].

Глссирование цилиндра во впадине суперкаверны имеет свою специфику – область контакта зависит от отношения диаметров цилиндра и впадины суперкаверны, условий подпора и действия брызговых струй, что невозможно учесть в теоретической модели и трудно измерить в реальной суперкаверне.

Целью данной работы было получить зависимости коэффициента подъемной силы от погружения задней кромки, угла атаки и отношения диаметров цилиндра и впадины.

Для этого на открытой поверхности рабочего участка гидродинамической импульсной трубы образовывалась впадина с сечением полукруга, что соответствовало нижней части полукаверны, отсеченной горизонтальной плоскостью по оси кавитатора. И в средней части впадины, где радиальная скорость равна нулю, проводились измерения подъемной силы для серии глссирующих цилиндров при различных погружениях и углах атаки.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты по определению подъемной силы F при стационарном глссировании по дну цилиндрической впадины проводились в открытом рабочем участке импульсной гидротрубы размером $115 \times 115 \times 1500$ мм на скорости 9.6 м/с.

Моделью служила серия цилиндров диаметром $D = 20; 30; 40; 51.5$ мм.

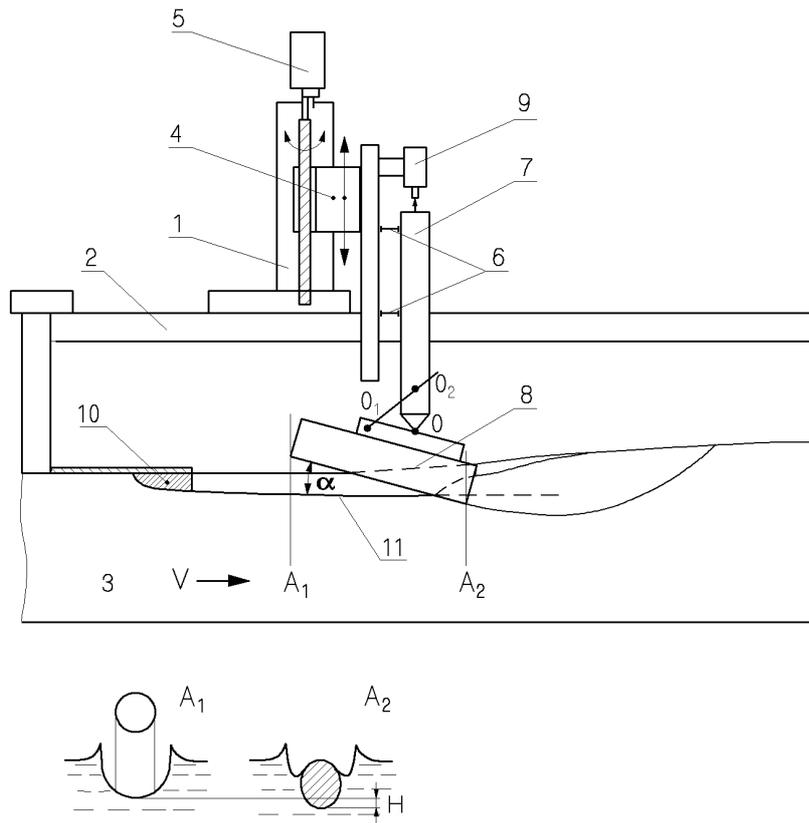


Рис. 1. Схема устройства для проведения исследований по глассированию цилиндра по стенке суперкаверны

Для проведения экспериментов использовалось специальное устройство, показанное на рис. 1. Для погружения цилиндра 8 в полукруглую впадину суперкаверны 11, образованной кавитатором 10 в потоке 3, использовалось траверсное устройство 1 с вертикальным перемещением каретки 4. На каретке 4 с помощью гибких упругих элементов 6 крепилась державка 7 модели 8.

Подъемная сила глассирующей модели измерялась с помощью электронного динамометра 9. Сигналы от электропривода 5 каретки 4 и динамометра поступали на запоминающий осциллограф. Угол атаки α изменялся с помощью изменения длины плеча $0_1 - 0_2$ в узле крепления модели.

В эксперименте задавалась и контролировалась скорость потока $V = 9.6$ м/с.

В эксперименте изменялись:

угол атаки модели $\alpha = 5^\circ; 10^\circ; 15^\circ$;

погружение модели – H мм.

форма свободной границы:

1) впадина $D_B = 57$ мм;

2) впадина $D_B = 40$ мм;

3) плоская поверхность.

диаметр цилиндра $D = 20; 30; 40; 51.5$ мм.

В эксперименте измерялись:

подъемная сила цилиндра – $F[N]$;

погружение модели – H мм (начиная с момента касания невозмущенной поверхности);

скорость в потоке – $V = 9.6$ м/с.

При обработке и анализе экспериментальных данных рассчитывались:

$$\text{число Рейнольдса} - Re = \frac{VD}{\nu} = 1.9 \cdot 10^5 \div 1.9 \cdot 10^6;$$

$$\text{число Фруда} - Fr_H = \frac{V}{\sqrt{gH}} \approx 15 \div 70;$$

$$\text{число Фруда} - Fr_D = \frac{V}{\sqrt{gD}} \approx 13 \div 22;$$

$$\text{коэффициент подъемной силы} - C_f = \frac{8F}{\rho V^2 \pi D^2};$$

$$\text{погружение} - \bar{H} = \frac{2H}{D};$$

$$\text{относительный диаметр} \bar{D} = \frac{D}{D_B}.$$

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В эксперименте модель (рис. 1 и 2), установленная под углом атаки вертикально, погружалась в

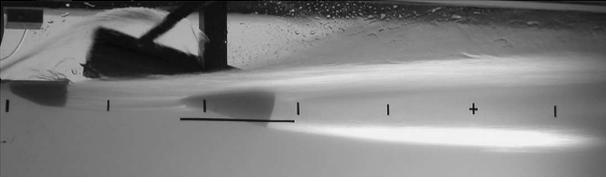


Рис. 2. Фото бокового вида глессирующего цилиндра $D = 51.5$ мм во впадине суперкаверны

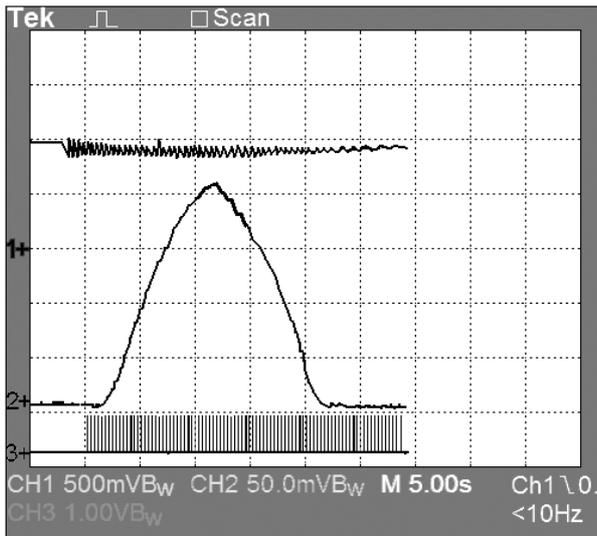


Рис. 3. Осциллограмма измеряемых параметров: 1 – сигнал подъемной силы \bar{F} [N]; 2 – сигнал погружения (штрих = 1 мм); 3 – сигнал давления перед рабочим участком импульсной гидротрубы

поток сквозь свободную поверхность со скоростью 2.5 мм/с. Датчик оборотов посылал сигналы на осциллограф через 1 мм вертикального перемещения, как это показано на осциллограмме рис. 3.

Отсчет погружения начинался с момента касания невозмущенной поверхности и появления подъемной силы на модели.

Результаты эксперимента представлены графиками на рис. 4, где показаны зависимости коэффициента подъемной силы \bar{F} от погружения $\bar{H} = \frac{H}{r}$ и угла атаки α для случая глессирования моделей по плоской поверхности.

На рис. 5 представлены графически зависимости коэффициента подъемной силы \bar{F} от угла атаки и погружения для глессирования моделей цилиндра по цилиндрической впадине диаметром 57 мм.

3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Картина обтекания глессирующего цилиндра показывает, что при обтекании возникает подъем уровня окружающей жидкости, зависящий от числа Фруда Fr [4].

Подъем уровня жидкости впереди цилиндра называют передним подпором.

Одновременно с передним подпором образуется и боковой подъем уровня воды в виде сплошных и брызговых струй (рис. 1 и 2).

При погружении цилиндра в жидкость возникает также и гидростатическая сила F_1 , являющаяся составляющей измеряемой в эксперименте подъемной силы F , но которая зависит от куба линейного масштаба – M^3 (объема), в то время как гидродинамическая сила зависит от M^2 (поверхности). Значение этой силы F_1 с повышением числа Фруда должна уменьшаться.

В общем виде подъемную силу при глессировании цилиндра по плоской поверхности следует записывать как сумму гидродинамической F_r , гидростатической F_c и брызговой (подпорной) F_6 составляющих:

$$F = F_r(\alpha, \bar{H}) + F_c(\alpha, \bar{H}) + F_6(\alpha, \bar{H}, Fr). \quad (1)$$

Такой характер зависимости подтверждается результатами экспериментов рис. 4.

Этим также можно объяснить разброс экспериментальных значений коэффициента подъемной силы, отнесенного к углу атаки – α , $\bar{F}_\alpha(\bar{H})$, достигающий 30% для малых погружений $H < 0.3$ [5, 6].

Результаты проведенных экспериментов для серии моделей цилиндров диаметром $D = 20 \div 51.5$ мм показали четкое возрастание коэффициента подъемной силы с увеличением масштаба моделей и соответствующим изменением величины числа Фруда $Fr = 13 \div 22$ (рис. 6).

Для использования результатов экспериментов (рис. 4) в практических целях можно рекомендовать аппроксимационное соотношение

$$\bar{F} = 0.8 \alpha \cdot \bar{H} + 1.2 \cdot 10^5 \frac{(\alpha \bar{H})^2}{Fr^4}, \quad (2)$$

где $\alpha = 1 \div 8^\circ$ в радианах; $\bar{H} \leq 0.5$; $Fr_D > 10$.

По результатам экспериментов для глессирования цилиндра по поверхности суперкаверны предлагается аппроксимационная формула для расчета коэффициента подъемной силы:

$$\bar{F} = 0.8 \alpha \bar{H} + 10 \bar{H} \alpha^2 \bar{D}^2, \quad (3)$$

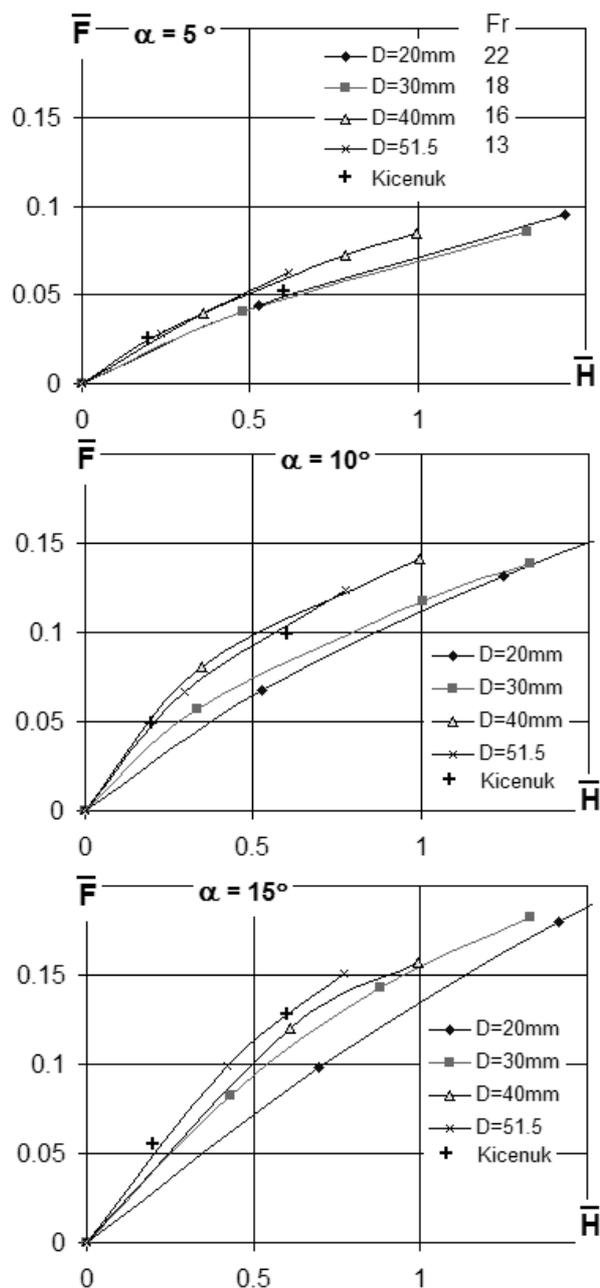


Рис. 4. Зависимость коэффициента подъемной силы \bar{F} от угла атаки α , погружения $\bar{H} = \frac{2H}{D}$ и числа Fr при глиссировании цилиндров по плоской поверхности:
 \diamond – $D = 20$ мм, $Fr = 22$; \square – $D = 30$ мм, $Fr = 18$;
 \triangle – $D = 40$ мм, $Fr = 16$; \times – $D = 51.5$ мм, $Fr = 13$;
 $+$ – результаты Kicenuk [9]

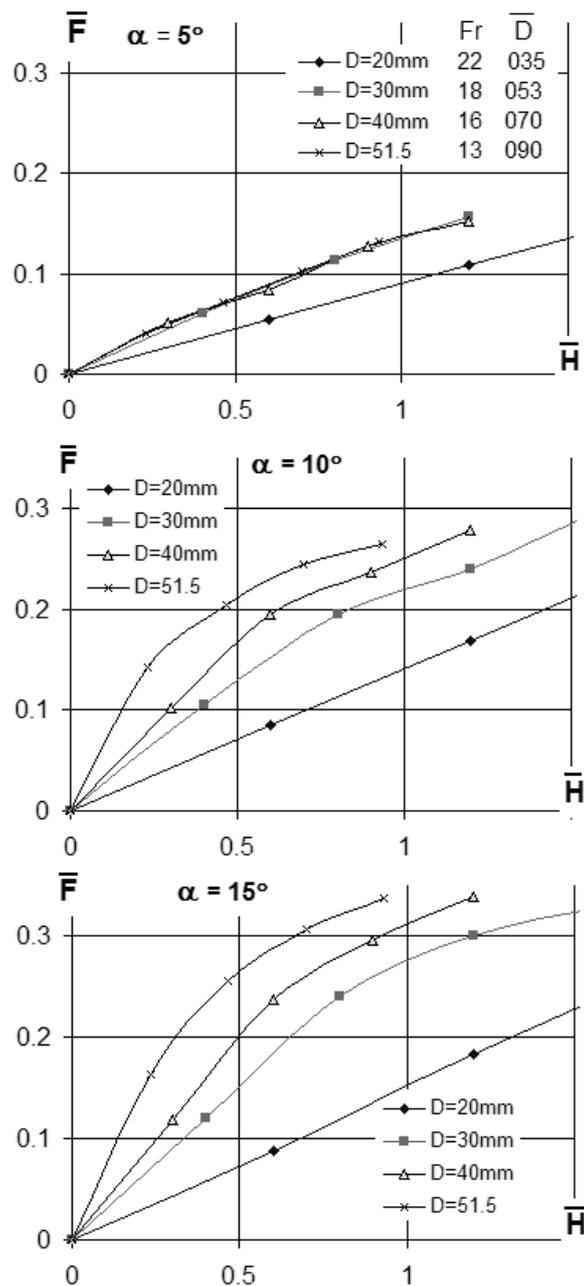


Рис. 5. Зависимости коэффициента подъемной силы \bar{F} от угла атаки α , погружения $\bar{H} = \frac{2H}{D}$ и относительного размера моделей $\bar{D} = D/D_B$ при глиссировании цилиндров во впадине супергидрофобной поверхности $D_B = 57$ мм

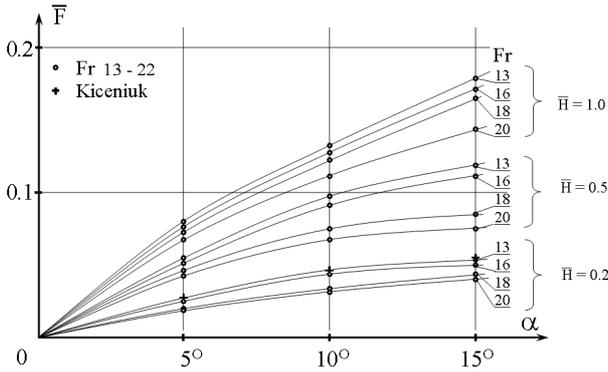


Рис. 6. Глиссирование цилиндра по плоской поверхности. Зависимости коэффициента подъемной силы $\bar{F}(\alpha; \bar{H}; Fr)$ по данным экспериментов рис. 4

где $\alpha = 1 \div 10^\circ$ в радианах; $\bar{H} = \frac{2H}{D} < 0.5$;
 $\bar{D} = D/D_B = 0 \div 0.9$.

Сравнение полученных результатов при глиссировании цилиндров по плоской поверхности с результатами других авторов [5, 6] показали хорошее совпадение для соответствующих величин α, H, Fr .

По результатам [5] $\bar{F}(5.8^\circ; 0.3; 11) = 0.032$.

В эксперименте $\bar{F}(5^\circ; 0.3; 13) = 0.37$.

По результатам [6] $\bar{F}(5^\circ; 0.3; 5) = 0.4$.

В эксперименте $\bar{F}(5^\circ; 0.3; 13) = 0.37$.

Таблица 1

По результатам [9]	Эксперимент
$\bar{F}(5^\circ; 0.6; 10) = 0.048$	0.06
$\bar{F}(10^\circ; 0.6; 10) = 0.095$	0.10
$\bar{F}(15^\circ; 0.6; 10) = 0.135$	0.13
$\bar{F}(5^\circ; 0.2; 10) = 0.025$	0.025
$\bar{F}(10^\circ; 0.2; 10) = 0.043$	0.050
$\bar{F}(15^\circ; 0.2; 10) = 0.058$	0.050

При глиссировании цилиндров во впадине можно видеть повышение коэффициента подъемной силы при увеличении отношения D/D_B от величины 0.3 до 0.9 (рис. 5).

Как показывают результаты эксперимента, для углов атаки $\alpha \approx 5^\circ$, это повышение находится в пределах 30–50%, когда \bar{H} изменяется от 0.1 до 1.0.

С увеличением угла атаки α до $10^\circ \div 15^\circ$ коэффициент подъемной силы увеличивается в $2 \div 4$ раза по сравнению с коэффициентом для плоской поверхности рис. 5.

Увеличение подъемной силы при глиссирова-

нии по цилиндрической впадине следует объяснить увеличением смоченных периметра и площади поверхности цилиндра и, как следствие, повышенного действия подпора.

ВЫВОДЫ

1. При глиссировании цилиндров по плоской поверхности наряду с гидродинамической подъемной силой следует учитывать действие гидростатической силы и подпора в виде носовых и боковых сплошных и брызговых струй.

2. Для расчета коэффициента гидродинамических сил при глиссировании цилиндра по плоской поверхности в диапазоне углов атаки $\alpha = 1 - 8^\circ$ и погружений кромки цилиндра $\bar{H} \leq 0.5$; $Fr > 10$ можно рекомендовать аппроксимационное соотношение (2).

3. Для расчета коэффициента гидродинамических сил при глиссировании цилиндра по цилиндрической впадине можно рекомендовать аппроксимационную формулу (3) для диапазона $\alpha = 1 \div 10^\circ$; $\bar{H} \leq 0.5$; $\bar{D} = 0 \div 0.9$.

1. Кубенко В.Д. Нестационарные поперечные движения тонкого длинного тела при суперкавитационном обтекании // Доповіді Національної академії наук України. – 2003. – 6. – С. 41-48.
2. Parishev E.V. Mathematical modeling of Unsteady Cavity Flows // Fifth Jut Symp. on Cavitation (CAV 2003) Osaka, Japan. – 2003. – Nov 1 - 6. – P. 1-10.
3. Васин А. Д., Парышев Э.В. Погружение цилиндра в жидкость через цилиндрическую свободную поверхность // МЖГ. – 2001. – N 2. – С. 3-12.
4. Парышев Э.В., Постнов С.Е. Оценка “переднего подпора” при глиссировании цилиндра по поверхности воды // Труды ЦАГИ. – 1984. – 2242. – С. 8-20.
5. Парышев Э.В., Рыков В.Н. Экспериментальное исследование глиссирования цилиндра по поверхности воды // Труды ЦАГИ. – 1984. – 2242. – С. 21-25.
6. Васин А.Д. Нестационарное глиссирование тел вращения по поверхности жидкости // Труды ЦАГИ. – 1993. – 2496. – С. 28-35.
7. Логвинович Г.В. Некоторые вопросы глиссирования // Труды ЦАГИ. – 1980. – 2052. – С. 3-12.
8. Шорыгин О.П. Скоростная гидродинамика. – Кн. ЦАГИ - основные этапы научной деятельности 1993 - 2003, М: Физматгиз, 2003. – 576 с.
9. Kiceniuk T., Creengard R. Measurements of lift coefficients for a family of cones planing on water // Hydrodynamics lab Caltech, Pasadena CA, USA. – Report N E-12.3. – 1952. – P. 15-23.
10. Савченко Ю.Н., Семенов В.Н., Путилин С.И. Нестационарные процессы при суперкавитационном движении тел // Прикладна гідромеханіка. – 1999. – Т. 1, № 1. – С. 63-80.