

УДК 532.528

**ГЛИССИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРА В СУПЕРКАВЕРНЕ****Г. Ю. САВЧЕНКО, Ю. Н. САВЧЕНКО***Институт гидромеханики НАН Украины, Киев,  
03680 Киев – 180, МСП, ул. Желябова, 8/4  
Savch@kiev ldc.net**Получено 24.04.2013*

Рассмотрены три составляющие полной гидродинамической силы при глиссировании цилиндра по суперкаверне цилиндрической формы – это подъемная гидродинамическая сила, сила трения замкнутой части корпуса и сила поддержания погруженной части корпуса. Расчеты выполнены с учетом величины гидродинамического бокового подпора, угла атаки, погружения задней кромки и зазора между корпусом и каверной. Проведено сравнение результатов с экспериментальными данными.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** суперкаверна, цилиндр, глиссирование

Розглянуто три складові повної гідродинамічної сили при глісуванні циліндра по суперкаверні циліндрової форми – це підймальна гідродинамічна сила, сила тертя замкритої частини корпусу і сила підтримки зануреної частини корпусу. Розрахунки виконувалися з врахуванням величини гідродинамічного бічного підпору, кута атаки, занурення задньої кромки і зазору між корпусом і каверною. Результати розрахунку порівняно з експериментальними даними.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** суперкаверна, циліндр, глісування

Three components of the full hydrodynamic force at the planing of a cylinder along the supercavity having a cylindrical shape are considered. These are the lift hydrodynamic force, force of friction of the wetted part of a hull and force of maintenance of the submerged part of the hull. Calculations were performed with taking into account the value of hydrodynamic lateral water lifting, angle of attack, immersion of back edge and clearance between the hull and cavity. The results of calculation were compared with experimental data.

**KEY WORDS:** supercavity, cylinder, planing

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время имеется ряд теоретических и экспериментальных работ, посвященных глиссированию цилиндра по плоской и криволинейной поверхности. В первых работах по этой тематике Г.В. Логвиновича в 1960 г. рассматривалось глиссирование цилиндра по плоской поверхности [1]. Экспериментальные исследования были выполнены Т. Кисенюком в 1952 г. [4]. Позднее Э.В. Парышев получил решение Вагнеровской задачи о погружении круга в жидкость через круговую границу [3].

Эксперименты показали, что глиссирование цилиндра в каверне сопровождается подпором уровня воды, который в каверне оказывается значительно большим, чем при глиссировании по ровной поверхности. Последующие эксперименты [10] позволили получить экспериментальные зависимости коэффициента подъемной силы от параметров глиссирования – угла атаки, погружения задней кромки и радиусов каверны и корпуса.

Однако в экспериментальных исследованиях существует общая проблема экспериментов – невозможность разделения составляющих полной гидродинамической силы. В теоретических работах, основанных на модели идеальной жидкости, име-

ет место другая проблема – отсутствие составляющих сил водоизмещения и сопротивления трения. В некоторых работах [6, 7] сделаны попытки оценить силу водоизмещения, но эти работы касаются глиссирования по плоской поверхности.

Цель настоящей работы – расчет и оценка влияния силы гидродинамического трения и подъемной силы на гидродинамическое качество глиссирующего в каверне корпуса. Интерес к таким исследованиям вызван тем, что они позволят усовершенствовать методы расчета и компьютерного моделирования параметров движения суперкавитирующих тел.

**1. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ГЛИССИРУЮЩИЙ ЦИЛИНДР**

Схема сил, действующих на глиссирующий цилиндр, показана на рис. 1. На схеме использованы две системы координат: система координат  $x'Oy'$ , связанная с корпусом глиссирующего цилиндра, и система  $xOy$ , связанная со скоростью набегающего потока  $V$ .

Для системы координат  $x'Oy'$ , связанной с телом, действующие силы имеют полные проекции:

$$F'_y = F_n + F_w; \quad F'_x = F_T.$$

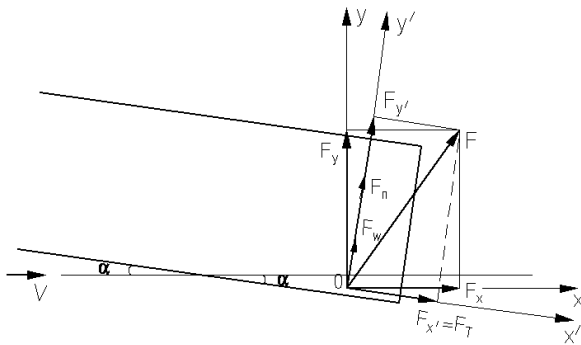


Рис. 1. Схема действующих сил

Здесь  $F_n$  – гидродинамическая подъемная сила;  $F_w$  – гидростатическая сила поддержания. В статике  $F_w$  действует по вертикали, но в движении при отрыве потока и отсутствии замыва торца  $F_w$  действует по нормали к корпусу;  $F_T$  – сила гидродинамического сопротивления трения.

Для системы координат  $xOy$ , связанной с вектором скорости потока, проекции сил имеют вид

$$\begin{aligned} F_y &= F_n \cos \alpha + F_w \cos \alpha - F_T \sin \alpha, \\ F_x &= F_n \sin \alpha + F_w \sin \alpha - F_T \cos \alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

В гидродинамике глиссирующих корпусов используются малые углы атаки  $\alpha \leq 10^\circ$  [6, 8] и отбрасываются члены с малым вкладом. Тогда система уравнений (1) принимает вид:

$$\begin{aligned} F_y &= F_n + F_w, \\ F_x &= (F_n + F_w)\alpha - F_T. \end{aligned} \quad (2)$$

В постановке задачи были приняты допущения об отсутствии переднего подпора для круглокилеватого глиссирующего днища и о постоянстве радиуса каверны  $R$  в месте глиссирования. В дальнейшем детально рассмотрим действующие силы  $F_n, F_w$  и  $F_T$ .

## 2. ОБТЕКАНИЕ ГЛИССИРУЮЩЕГО ЦИЛИНДРА

Схема обтекания глиссирующего цилиндра в каверне показана на рис. 2. Здесь представлены боковой вид и вид поперечного сечения каверны и корпуса по торцу глиссирующего цилиндра.

При глиссировании контур цилиндра радиуса  $r$  погружается в контур каверны радиуса  $R$ . При этом на схеме образуется геометрическая точка  $A$  пересечения контуров каверны и корпуса. Точка

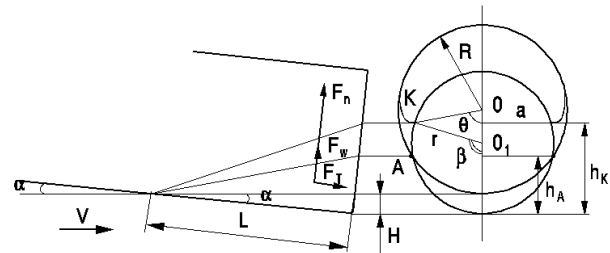


Рис. 2. Схема глиссирования цилиндра в каверне

$K$  отмечает границу замыва корпуса в результате подпора. Углы  $\theta$  и  $\beta$  характеризуют величину половины дуги замыва корпуса и положение точки  $K$  при центрах  $O$  и  $O_1$  каверны и корпуса.

Среди параметров, отмеченных на схеме обтекания рис. 2, можно выделить две группы. Базовые параметры, которые задаются:

$V$  – скорость набегающего потока;  $\alpha$  – угол атаки корпуса цилиндра;  $H$  – глубина погружения задней кромки;  $R, r$  – радиусы каверны и цилиндра. С помощью базовых параметров рассчитываются характерные параметры глиссирования:

$\Delta = R - r$  – зазор между корпусом и каверной при совпадении центров;  $E = R - r + H$  – эксцентриситет;  $h_A = \frac{H(R - 0.5H)}{E}$  – глубина погружения корпуса в контур каверны геометрическая;  $h_k = r(1 - \cos \beta)$  – глубина погружения корпуса с учетом подпора;  $L = H/\alpha$  – длина замыва корпуса по килевой линии;  $l = 2r \cdot \beta$  – длина дуги замыва (смоченный периметр корпуса);  $a = \sqrt{2h_k r - h_k^2} = r \sin(\pi - \beta)$  – половина ширины корпуса на уровне замыва,  $\theta = \arccos \frac{\Delta - H}{\Delta + H}$  – угол замыва или угол положения точки  $K$  из центра  $O$  (формула Э.В. Парышева [8]).

Связь углов  $\theta$  и  $\beta$  можно установить по теореме синусов для треугольника  $KOO_1$ :

$$\frac{r}{\sin \theta} = \frac{KO}{\sin(\pi - \beta)},$$

где  $KO = E \cdot \cos \theta + \sqrt{r^2 - E^2 \sin^2 \theta}$ .

После подстановки получим:

$$\sin \beta = \left( \frac{\Delta}{r} - \frac{H}{r} + \sqrt{1 - \frac{4\Delta H}{r^2}} \right) \cdot \sin \theta.$$

Углы  $\theta \left( \frac{\Delta}{r}; \frac{H}{r} \right)$  и  $\beta \left( \frac{\Delta}{r}; \frac{H}{r} \right)$  представлены на рис. 3 и 4.

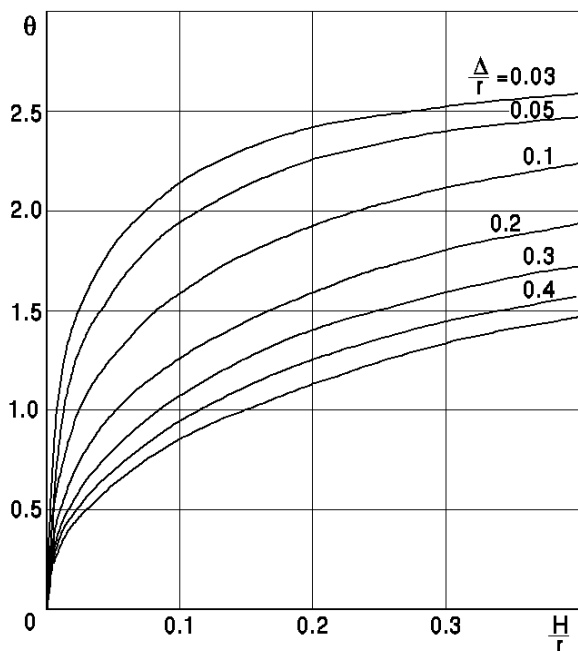


Рис. 3. Зависимость угла замыва  $\theta = \arccos \frac{\Delta - H}{\Delta + H}$  от безразмерных параметров глиссирования  $\frac{\Delta}{r}$  и  $\frac{H}{r}$

### 3. ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ПОДЪЕМНАЯ СИЛА

Формула гидродинамической подъемной силы в общем случае имеет вид:

$$F_n = C_n(\alpha; R; r; H) \cdot \frac{\rho V^2}{2} \pi r^2. \quad (3)$$

На практике часто известна сила давления на воду. Обычно этой силой является вес  $G$ . Если известен вес глиссирующей части корпуса  $G$ , а ось  $OY$  близка к вертикали, то при стационарном глиссировании сумма действующих вертикально сил  $F_y$  будет заведомо известна при любой скорости, а параметры глиссирования должны обеспечивать выполнение равенства

$$F_y = F_n + F_w = G. \quad (4)$$

При движении тел по поверхности воды в режиме глиссирования важно иметь в виду, что вклад гидродинамической силы  $F_n$  растет с ростом скорости, а гидростатическая сила поддержания  $F_w$  постепенно заменяется гидродинамической. При этом уменьшается осадка корпуса  $H$  и площадь смоченной поверхности  $S$ . Так, при значении числа Фруда

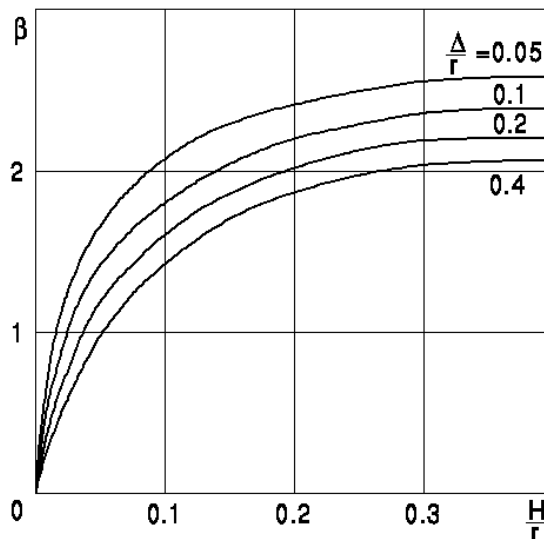


Рис. 4. Зависимость угла замыва  $\beta$  от параметров глиссирования  $\frac{\Delta}{r}$  и  $\frac{H}{r}$

$$Fr_D = \frac{V}{\sqrt{g^3 D}} > 3 \quad (5)$$

гидродинамическая сила становится основной и режим глиссирования сменяется режимом рекошетирования, что и отмечалось в экспериментах [6].

В результате решения задачи стационарного глиссирования цилиндра по стенкам круглой каверны постоянного диаметра предложено линеаризованное выражение для подъемной силы [8]:

$$F_n = \pi \rho R^2 V^2 \alpha \left( 1 + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \sin^2 \frac{\theta}{2}, \quad (6)$$

где  $\theta$  – угол между вертикалью и прямой к точке подпора из центра каверны (рис. 2, 3). С помощью предложенного в [8] выражения

$$\cos \theta = \frac{R - r - H}{R - r + H} \quad (7)$$

формулу (6) для  $F_n$  можно представить в виде функции основных безразмерных параметров:

$$F_n = \rho V^2 \pi r^2 \alpha \frac{H}{r} \cdot \frac{2 \left( \frac{R}{r} - 1 \right) + \frac{H}{r}}{\left( \frac{R}{r} - 1 + \frac{H}{r} \right)^2}. \quad (8)$$

Коэффициент гидродинамической подъемной силы  $C_n$  запишется в виде

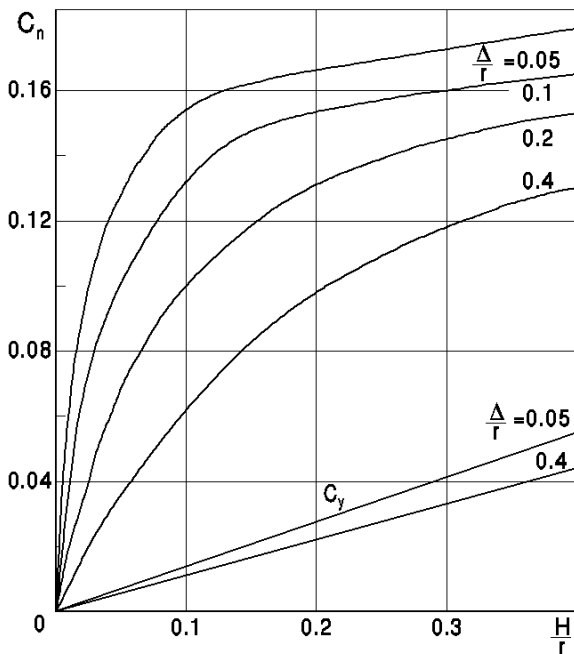


Рис. 5. Изменение коэффициента гидродинамической подъемной силы  $C_n \left( \frac{\Delta}{r}; \frac{H}{r} \right)$  (9) при  $\alpha = 0.0873 (5^\circ)$ ;  $C_y$  – результаты эксперимента (10)

$$C_n = \frac{2F_n}{\rho V^2 \pi r^2} = 2\alpha \frac{H}{r} \cdot \frac{2 \left( \frac{R}{r} - 1 \right) + \frac{H}{r}}{\left( \frac{R}{r} - 1 + \frac{H}{r} \right)^2}. \quad (9)$$

Графики  $C_n \left( \frac{\Delta}{r}; \frac{H}{r} \right)$  представлены на рис. 5.

Интерполяционный метод обработки экспериментальных данных позволил предложить эмпирическую формулу для коэффициента подъемной силы [10]

$$C_y = \frac{2F_y}{\rho V^2 \pi r^2} = \alpha \frac{H}{r} \left( 0.8 + 10 \alpha \left( \frac{R}{r} \right)^{-2} \right). \quad (10)$$

График  $C_y \left( \frac{\Delta}{r}; \frac{H}{r} \right)$ ,  $\alpha = 0.0873$  представлен на рис. 5.

#### 4. ГИДРОСТАТИЧЕСКАЯ СИЛА ПОДДЕРЖАНИЯ

Гидростатическая сила поддержания  $F_w$  обуславливается величиной объема  $W$  погруженной части корпуса и определяется формулой

$$F_w = \rho g W = C_w \rho g r^2. \quad (11)$$

Гидростатическая сила  $F_w$  в судостроении называется водоизмещением [6] и совместно с гидродинамической силой  $F_n$  компенсирует силу давления на воду. Если этой силой является сила веса объекта  $G$ , то можно записать равенство

$$G = C_n \frac{\rho V^2}{2} \pi r^2 + \rho g W. \quad (12)$$

Отношение действующих сил зависит от числа Фруда  $Fr$  и указывает на рост вклада подъемной силы  $F_n$  с ростом числа Фруда:

$$\frac{F_n}{F_w} = Fr^2 \frac{\pi C_n}{2 C_w}; \quad Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot r}}.$$

Согласно схеме обтекания (рис. 2), объем погруженной части корпуса можно представить объемом, отсеченным плоским косым сечением через торец цилиндра (в геометрии назван «копытном» [9]):

$$W_1 = \frac{2rL}{h_k} (h_k - r)\beta + (r \cdot \sin \beta), \quad (13)$$

где  $L = H / \sin \alpha$ ;  $h_k = r(1 - \cos \beta)$ .

Коэффициент  $C_w$  гидростатической силы поддержания  $F_w$ , согласно формул (11) и (13), будет иметь вид

$$C_w = \frac{F_w}{\rho \cdot g \cdot r^3} = \frac{H}{r \cdot \alpha} \left( \frac{\sin \beta - \frac{1}{3} \sin^3 \beta - \beta \cos \beta}{1 - \cos \beta} \right), \quad (14)$$

где

$$\beta = \arcsin \left[ \left( \frac{\Delta}{r} - \frac{H}{r} + \sqrt{1 - 4 \frac{\Delta \cdot H}{r^2}} \right) \sqrt{\frac{4 \Delta \cdot H}{(\Delta + H)^2}} \right].$$

Графики  $C_w \left( \frac{\Delta}{r}; \frac{H}{r} \right)$  представлены на рис. 6.

#### 5. ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРЕНИЯ

Гидродинамическое сопротивление вязкого трения зависит от величины смоченной площади  $S$ , коэффициента сопротивления  $\xi$  и скоростного напора:

$$F_T = \xi(\text{Re}_L) \frac{\rho V^2}{2} S, \quad (15)$$

где  $\text{Re}_L = \frac{LV}{\nu}$  – число Рейнольдса по длине пятна контакта  $L$  (рис. 3);  $\xi(\text{Re}_L)$  – коэффициент

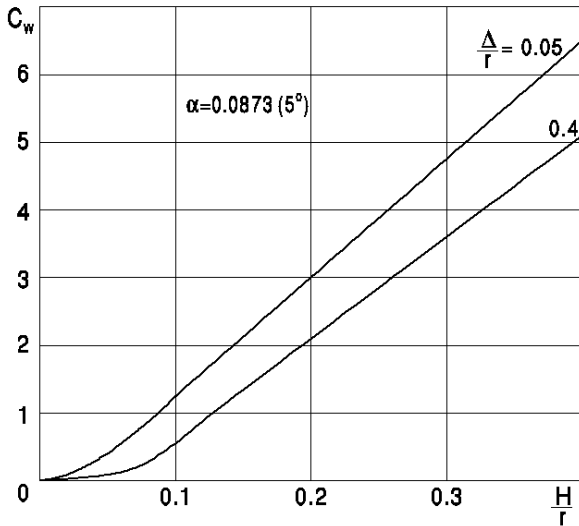


Рис. 6. Коэффициент гидростатической силы поддержания  $C_w \left( \frac{H}{r}; \frac{\Delta}{r} \right)$  при  $\alpha = 0.0873 (5^\circ)$

сопротивления трения плоской пластины [2],  $\xi = 0.455(\lg \text{Re}_L)^{2.58}$ , причем  $\text{Re}_L \leq 10^9$ ;  $\nu$  – кинематическая вязкость воды.

Согласно схеме обтекания (рис. 2), смоченная поверхность погруженной части глассирующего цилиндра определяется формулой [9]

$$S = \frac{2r \cdot H}{\alpha} \left( \frac{\sin \beta - \beta \cos \beta}{1 - \cos \beta} \right). \quad (16)$$

После подстановки (16) в (15) выражение для силы сопротивления трения  $F_T$  примет вид

$$F_T = \xi(\text{Re}_L) \cdot \rho V^2 \frac{r \cdot H}{\alpha} \left( \frac{\sin \beta - \beta \cos \beta}{1 - \cos \beta} \right). \quad (17)$$

Коэффициент гидродинамического сопротивления запишется в виде

$$C_T = \frac{2F_T}{\rho V^2 \cdot \pi r^2} = \xi(\text{Re}_L) \frac{2H}{\pi r \alpha} \left( \frac{\sin \beta - \beta \cos \beta}{1 - \cos \beta} \right). \quad (18)$$

График зависимости  $C_T = f \left( \frac{\Delta}{r}; \frac{H}{r} \right)$  для  $\xi(\text{Re}_L) = 2 \cdot 10^{-3}$ ;  $\alpha = 0.0873 (\alpha = 5^\circ)$  показан на рис. 7.

## 6. ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ КАЧЕСТВО ГЛИССИРОВАНИЯ

Гидродинамическое качество глассирования определяется отношением суммарной подъемной силы

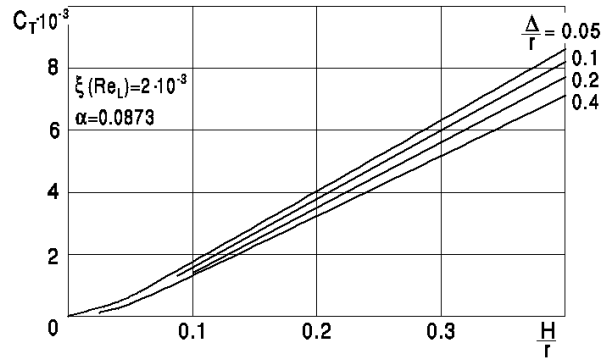


Рис. 7. Зависимость коэффициента сопротивления трения  $C_T$  (18) от безразмерных параметров

глассирования  $\frac{\Delta}{r}$  и  $\frac{H}{r}$  при  $\xi(\text{Re}_L) = 2 \cdot 10^{-3}$   $\alpha = 0.0873$

$F_y$  к суммарной силе гидродинамического сопротивления  $F_x$  в системе координат  $xOy$  (2):

$$K = \frac{F_y}{F_x} = \frac{F_y}{F_y \cdot \alpha + F_T} = \frac{C_y}{C_y \cdot \alpha + C_T}, \quad (19)$$

где

$$C_y = \frac{2F_y}{\rho \cdot V^2 \cdot \pi r^2} = C_n + C_w \cdot \frac{2}{\pi} \text{Fr}^{-2};$$

$C_n, C_w, C_T$  – коэффициенты действующих сил, которые определяются по формулам (9), (14), (18).

Формула (19) показывает, что влияние гидростатической силы быстро уменьшается благодаря наличию множителя  $\text{Fr}^{-2}$  при коэффициенте  $C_w$ . График гидродинамического качества

$$K \left( \frac{\Delta}{r}; \frac{H}{r} \right)$$

при  $\alpha = 0.0873$ ,  $\xi(\text{Re}_L) = 2 \cdot 10^{-3}$ ,  $\text{Fr} = 40$  показан на рис. 8. Штриховой линией на графике показаны результаты эксперимента [10], полученные подстановкой в (19) значений  $C_y$  (10). Ромбом отмечены данные экспериментов девидсоновской лаборатории [5].

## ВЫВОДЫ

Получены формулы для расчета коэффициентов действующих сил при глассировании цилиндра в суперкаверне:  $C_n$  – коэффициент гидродинамической подъемной силы (9),  $C_w$  – коэффициент гидростатической силы поддержания (14),  $C_T$  – коэффициент гидродинамического сопротивления трения (18).

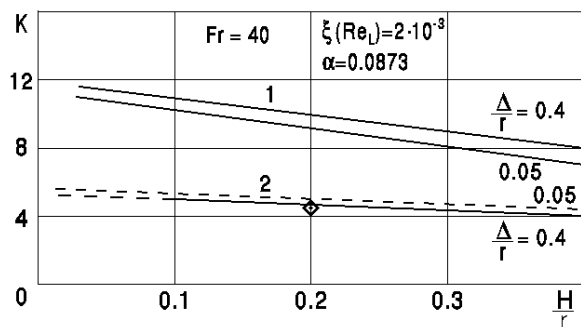


Рис. 8. Гидродинамическое качество глиссирования цилиндра в каверне  $K = \frac{F_y}{F_x}$ ; кривая 1 – расчет по формуле (19); кривая 2 – эксперимент [5, 10]

Предложены формулы и графики для оценки гидродинамического качества  $K$  при глиссировании цилиндра в каверне: (10), (19), рис. 8.

Полученные зависимости  $C_T$ ,  $C_w$  и  $K$  имеют линейный характер в широком диапазоне параметров  $0.05 < \frac{\Delta}{r} < 0.4$ ;  $0 < \frac{H}{r} < 0.4$  (при фиксированных  $\alpha$ ,  $Fr$ ,  $Re$  – рис. 6-8) и удобны для практических расчетов и компьютерного моделирования.

Подлежит дальнейшему выяснению, почему теоретические оценки подъемной силы  $C_n$  (6), [8] и гидродинамического качества  $K$  (рис. 8) оказались завышенными по сравнению с данными экспериментов [5, 10]. Причинами такого расхождения, например, могут быть брызговое сопротивление от носового обтекателя [5] и недостатка присоединенной массы в эксперименте на полупространстве [10].

1. Логвинович Г.В. Погружение тел в жидкость и нестационарное глиссирование // Тр. ЦАГИ.– 1960.– Вып.807.– С. 12–16.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.– М.: Наука, 1969.– 742 с.
3. Васин А.Д., Парышев Э.В. Погружение цилиндра в жидкость через цилиндрическую свободную поверхность // МЖГ.– 2001.– 2.– С. 3–12.
4. Kiceniuk T., Greengard R. Measurements of lift coefficients for a family of cones planing on water // Hydrodynamics lab Caltech, Pasadena CA, USA.– Report NE – 12.3.– 1952.– P. 15–23.
5. John Dzielski, Paul Sammut, Raju Datla. Planning Hull Forces and Moments on a Cylindrical Body in a Cavity. // Proc. of Eighth International Symp. on Cavitation.– Singapoure.– (CAV 2012).– P. 928–932.
6. Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля.– Л.: Судпром ГИЗ, 1960.– 688 с.
7. Timothy Yen, Michail Morabito, Len Jmas, John Dzielski, Raju Datla. Investigation of Cylinder Planing on a Flat Free Surface // Proc. of the 11 International Conference on Fast Sea Transportation, FAST 2011.– Honolulu, Hawaii, USA.– September 2011, ASNE.– P. 369–403.
8. Логвинович Г.В. Некоторые вопросы глиссирования // Тр. ЦАГИ.– Вып. 2052.– 1980.– С. 3–11.
9. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике.– М.: Изд. Наука, 1979.– 974 с.
10. Савченко Ю.Н., Савченко Г.Ю. Глиссирование цилиндра по поверхности суперкаверны // Прикладная гидромеханика.– Т. 9, № 1.– 2007.– С. 81–85.