

УДК 532.528

ОСОБЕННОСТИ МАНЕВРИРОВАНИЯ ПРИ СУПЕРКАВИТАЦИОННОМ ОБТЕКАНИИ

Ю. Н. САВЧЕНКО*, В. Н. СЕМЕНЕНКО, Г. Ю. САВЧЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев
ул. Желябова, 8/4, 03680, ГСП, Киев-180, Украина
*E-mail: savch@kiev ldc.net

Получено 15.12.2015

На примере модели тела вращения с дисковым кавитатором рассматриваются деформации суперкаверны, вызванные движением на циркуляции по курсу и наклоном кавитатора. Оцениваются допустимые углы перекаладки кавитатора как органа управления и минимальный радиус поворота суперкавитирующего аппарата, при которых нет дополнительного замыва корпуса границей суперкаверны. Приведены результаты компьютерного моделирования пространственного движения суперкавитирующего аппарата на циркуляции по курсу.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: суперкавитирующий аппарат, маневрирование, циркуляция

На прикладі моделі тіла обертання з дисковим кавітатором розглядаються деформації суперкаверни, викликані рухом на циркуляції за курсом і нахилом кавітатора. Оцінюються допустимі кути перекаладки кавітатора як органа управління і мінімальний радіус повороту суперкавітуючого апарата, при яких немає додаткового замиву корпусу границею суперкаверни. Наведено результати комп'ютерного моделювання просторового руху суперкавітуючого апарата на циркуляції за курсом.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: суперкавітуючий апарат, маневрирование, циркуляція

Supercavity deformation caused by both the motion in a turning circle on course and the cavitator inclination are considered on a model of a body of revolution with a disk-cavitator. One estimates admissible angles of inclination of the cavitator as an operating control, and a minimal radius of turning the supercavitating vehicle when additional wetting the vehicle body by the supercavity boundary is absent. Results of computer simulation of 3D motion of a supercavitating vehicle in a turning circle on course are given.

KEY WORDS: supercavitating vehicle, maneuvering, turning circle

ВВЕДЕНИЕ

В гидродинамике судна “маневренность” (maneuverability) или “поворотливость” определена как способность судна совершать повороты и описывать заданные траектории любой кривизны [1].

В свою очередь выполнение “маневренности” и “устойчивости” обеспечивают выполнение “управляемости”, определенное как качество судна изменять направление движения (курс) по заданию определенным образом.

На практике величина кривизны траектории в повороте оказывается ограниченной и маневренность (поворотливость) судна оценивается минимальным диаметром циркуляции, выполненной при постоянном угле перекаладки руля.

В процессе выполнения циркуляции (поворот на 360°) различают три периода:

1. Маневренный – участок траектории центра тяжести, выполненный за время перекаладки руля.

2. Эволюционный – участок траектории, выполненный при постоянном угле перекаладки руля, но при неустановившихся угловой и линейной скоро-

стях.

3. Установившийся – участок траектории при постоянном угле перекаладки руля и установившихся скоростях движения судна на циркуляции.

Движение на циркуляции обычно сопровождается появлением углов дрейфа и крена, которые могут достигать больших величин. Движение на циркуляции также сопровождается появлением нестационарных гидродинамических сил, действующих на корпус и рули движущегося объекта. В случае сплошного обтекания эти силы достаточно хорошо изучены в литературе по гидродинамике судна и аэродинамике летательных аппаратов [2, 3]. В случае суперкавитационного обтекания гидродинамика маневрирования не изучена и заслуживает особого внимания.

1. МАНЕВРИРОВАНИЕ ПРИ СУПЕРКАВИТАЦИОННОМ ОБТЕКАНИИ

Суперкавитационное обтекание обеспечивает минимальную смоченную поверхность. При этом функции управления возлагают на кавитатор при

его угловых отклонениях [4].

Движение суперкавитирующего (СК) аппарата по криволинейной траектории в случае маневрирования приводит к деформации самой суперкаверны и появлению опасных замывов корпуса. Различают деформации каверны двух типов:

1. Деформация оси каверны, вызванная кривизной траектории движения.
2. Деформации сечения каверны, вызванные увеличением наклона кавитатора при совершении маневра и разгрузки веса.

Наличие деформации каверны снижает возможности маневрирования СК-аппарата. Поэтому для каждого СК-аппарата, вписанного в каверну, можно указать минимально допустимый радиус циркуляции, при котором корпус помещается в искривленную каверну.

2. ОЦЕНКА МИНИМАЛЬНОГО РАДИУСА ЦИРКУЛЯЦИИ СК-АППАРАТА

При определении минимального радиуса циркуляции будем считать, что максимальный прогиб траектории движения СК-аппарата на циркуляции на длине аппарата определяется величиной зазора h между каверной и корпусом в центральной части каверны. Запишем это условие:

$$z_{max} = h = \frac{1}{2}(D_c - D_b), \quad (1)$$

где z_{max} – максимально допустимый прогиб траектории на длине суперкаверны L_c ; h – зазор в миделевом сечении суперкаверны между корпусом и каверной (маршевой); D_c, D_b – соответственно диаметры каверны и корпуса в миделевом сечении.

Действительно, согласно схеме обтекания, показанной на рис. 1, б, в случае движения по криволинейной траектории и бокового смещения центрального сечения каверны на величину проектного расчетного значения зазора h замытой окажется вся боковая часть корпуса, обращенная к центру циркуляции. Это приведет к катастрофическому повышению сил сопротивления, потере устойчивости движения и невозможности продолжить требуемое движение на циркуляции.

Если r – радиус окружности циркуляции, а длина модели L_b или близкая к этой длине длина каверны L_c будет являться хордой сегмента этой окружности, то прогиб $z = h$, L_c и r будут связаны соотношением:

$$L_c = 2\sqrt{2hr - h^2}. \quad (2)$$

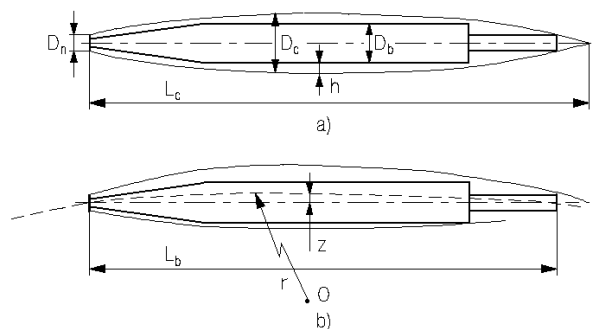


Рис. 1. Схема обтекания СК-аппарата на циркуляции: а – вид сбоку, б – вид сверху

Это соотношение можно переписать в виде

$$\frac{r}{h} = \frac{1}{8} \left(\frac{L_c^2}{h^2} + 4 \right) \quad (3)$$

или, поскольку $L_c \gg h$:

$$\frac{r}{L_c} \approx \frac{1}{8} \frac{L_c}{h}, \quad (4)$$

где $\bar{r} = r/L_c$ – безразмерный минимальный радиус циркуляции. Если представить длину и диаметр суперкаверны формулами Гарабедяна [5]:

$$L_c = \frac{D_n}{\sigma} \sqrt{c_x \ln \frac{1}{\sigma}}, \quad D_c = D_n \sqrt{\frac{c_x}{\sigma}},$$

то выражение (4) примет вид:

$$\frac{r}{L_c} \approx 0.125 \frac{D_n}{h} \sqrt{\frac{c_x \ln \frac{1}{\sigma}}{\sigma^2}}, \quad (5)$$

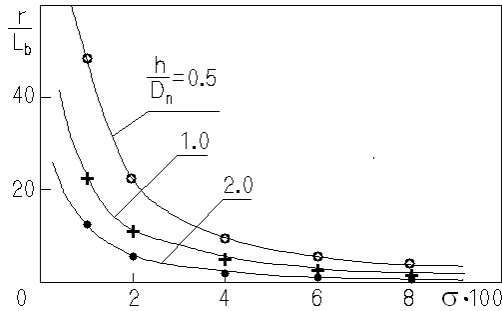
где c_x – коэффициент кавитационного сопротивления.

Формула (5) показывает, что радиус циркуляции \bar{r} является функцией двух гидродинамических параметров σ и c_x и одного конструктивного параметра D_n/h , равного отношению диаметра кавитатора к величине зазора h между корпусом и каверной в средней части корпуса $L_b \approx L_c$.

Если кавитатор является диском, то $c_x = 0.82$ и в формуле (5) останется только два независимых параметра:

$$\bar{r} = \frac{r}{L_b} = 0.113 \frac{D_n}{h} \sqrt{\frac{\ln \frac{1}{\sigma}}{\sigma^2}} = 0.113 \frac{D_n}{h} \frac{\lambda_c}{\sqrt{\sigma}}, \quad (6)$$

где $\lambda_c = L_c/D_c$ – удлинение каверны.

Рис. 2. Графики зависимости $r(\sigma)$ по (6)

Формула (6) удобна для практической оценки минимально возможного радиуса циркуляции СК-аппарата с дисковым кавитатором. На рис. 2 показан графический вид зависимости (6) для нескольких значений безразмерного зазора $\bar{h} = h/D_n = 0.5; 1.0; 2.0$.

Следует отметить, что зазор h в формуле (6) должен быть определен с учетом отклонения кавитатора для балансировки силы веса и центробежной силы при движении на криволинейной траектории радиуса \bar{r} .

3. ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО УГЛА НАКЛОНА КАВИТАТОРА

Для оценки деформации каверны под действием наклона кавитатора на угол α можно воспользоваться формулой [6]:

$$R_1 = R(\cos \alpha)^{3/2}, \quad (7)$$

где R_1 – радиус каверны в плоскости угла α ; R – радиус контура каверны при $\alpha = 0$. Деформация каверны в перпендикулярном направлении будет оцениваться формулой:

$$R_2 = R(\cos \alpha)^{0.5}. \quad (8)$$

Сравнение показывает, что деформация каверны будет максимальной в плоскости угла наклона кавитатора α и формула (7) дает максимальную величину деформации каверны.

Деформация суперкаверны при наклоне диска оценивалась экспериментально [7]. В экспериментах на гидротрубе измерялись размеры суперкаверны в миделе при изменении угла наклона дискового кавитатора $D_n = 21.5$ мм. Результаты эксперимента показаны на рис. 3, где по вертикали отложен относительный диаметр миделя каверны $\bar{D}_c = D_c/D_n$ в плоскости угла α .

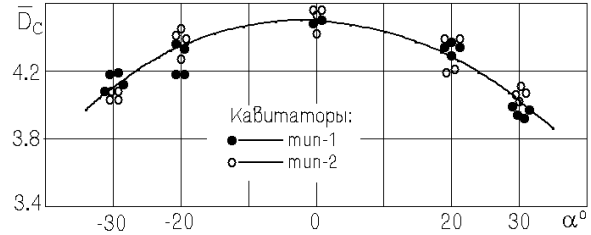


Рис. 3. Результаты эксперимента

Если заданы исходный радиус суперкаверны R при $\alpha = 0$ и зазор h между корпусом и каверной в миделевом сечении, то можно определить допустимый угол наклона кавитатора α_{max} из соотношения (7): $h = R - R_1 = R(1 - (\cos \alpha)^{3/2})$,

$$\alpha_{max} = \arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right)^{2/3}. \quad (9)$$

Заметим, что на практике допустимые углы отклонения кавитатора будут меньшими, чем дает формула (9), потому что кавитатор должен иметь начальное балансировочное отклонение в вертикальной плоскости и отклонение для маневра в горизонтальной плоскости будет являться дополнительным к уже существующему.

4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАНЕВРИРОВАНИЯ СК-АППАРАТА

В наших предыдущих работах [8–10] разработана методика компьютерного моделирования трехмерной динамики СК-аппаратов, исследованы различные способы управления их движением. Приведем здесь примеры расчета пространственного движения СК-модели на циркуляции по курсу при постоянном значении угла наклона кавитатора в горизонтальной плоскости $\alpha = \delta_y$. При расчетах использовалась модель СК-аппарата, описанная в [8]. Основные параметры модели и начальные параметры движения представлены в таблице 1.

Поскольку движение СК-аппарата является неустойчивым по глубине, оно стабилизировалось путем автоматического δ -управления (см. [8]).

На рис. 4 показана форма траектории центра масс модели на дистанции 4 км при $\delta_y = 15^\circ$. При этом время полной циркуляции составило ~ 24 с. Негладкость кривой объясняется работой автоматической системы стабилизации по глубине.

В таблице 2 представлены значения угловой скорости поворота $\dot{\chi}$ и относительного радиуса цир-

Табл. 1. Основные параметры расчетной модели и начальные параметры движения

L_b , м	D_b , мм	D_n , мм	m , кг	\bar{x}_c	I_z , кг м ²	V_0 , м/с	H_0 , м	σ	L_c , м	D_c , мм
5.00	340.0	70.0	600.0	0.600	900.0	120.0	5.0	0.02	6.58	469.7

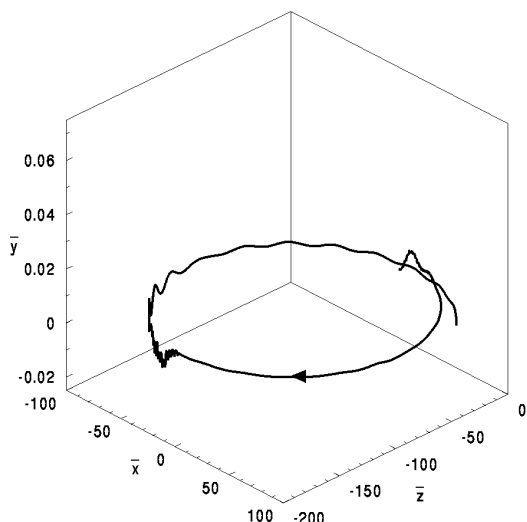


Рис. 4. Траектория СК-модели при движении на циркуляции по курсу

куляции по курсу $\bar{r} = r/L_b$ после прохождения моделью дистанции 4 км для ряда значений угла δ_y . В таблице обозначено: $\chi = \varphi - \beta$ – курсовой угол; φ – угол рыскания; β – угол скольжения; $r = ds/d\chi$.

Как видно из таблицы 2, увеличение угла δ_y свыше 15° приводит лишь к незначительному уменьшению радиуса циркуляции \bar{r} .

Для данной модели и параметров таблицы 1 имеем $h = 64.85$ мм и $\lambda_c = 14.0$. Тогда оценки (6), (9) дают $\bar{r}_{min} = 15.89$, $\alpha_{max} = 36.29^\circ$.

Таким образом, можно сделать вывод, что управление движением СК-аппаратов путем наклона кавитатора (δ -управление) не позволяет достичь радиусов циркуляции, близких к предельно допустимым оценкой (6).

Табл. 2. Значения параметров траектории в конце дистанции 4 км

δ_y	5°	10°	15°	20°
$\dot{\chi}, ^\circ/\text{с}$	-2.035	-8.856	-15.916	-16.498
\bar{r}	687.80	157.05	89.656	87.69

ВЫВОДЫ

Показано, что возможности маневрирования СК-аппаратов имеют принципиальное ограничение по величине достижимого радиуса циркуляции, обусловленное искривлением каверны и недопустимостью замыва корпуса водой. Получены простые оценки минимального радиуса циркуляции СК-аппарата по курсу и максимально допустимых углов наклона кавитатора как органа управления.

Прямое компьютерное моделирование маневрирования СК-аппарата показывает, что для достижения радиусов циркуляции, близких к предельно допустимым, наряду с δ -управлением следует использовать дополнительные органы управления, такие как гидродинамические рули [10].

1. *Войткунский Я.И., Першитц Р.Я., Титов И.А.* Справочник по теории корабля.– Л.: Судпром, 1960.– 688 с.
2. *Боднер В.А.* Системы управления летательными аппаратами.– М.: Машиностроение, 1973.– 506 с.
3. *Лукомский Ю.А., Чугунов В.С.* Системы управления морскими подвижными объектами.– Л.: Судостроение, 1988.– 272 с.
4. *Savchenko Yu.N.* Control of supercavitating flow and stability of supercavitating motion of bodies RTO-AVT/VKI Special Course on Supercavitating Flows. VKI, Brussels, Belgium.–2001.
5. *Garabedian P.R.* Calculation of axially symmetric cavities and jets // *Rac. J. Math.*– 1956.– Vol. 6, No. 4.– P. 611-684.
6. *Логвинович Г.В.* Гидродинамика течений со свободными границами.– Киев: Наукова думка, 1964.– 215 с.
7. *Савченко Ю.М., Власенко Ю.Д., Савченко Г.Ю.* Влияние угла атаки плоского эллиптического кавитатора на параметры искусственной суперкаверны // *Прикладная гидромеханика.*– 2014.– № 4, Т. 16.– С. 39 - 45.
8. *Семененко В.Н., Наумова Е.И.* Динамика суперкавитирующих тел // В сб.: Суперкавитация: достижения і перспективи.– Київ: Інститут гідромеханіки НАН України.– 2010.– С. 99-113.
9. *Савченко Ю.Н., Семененко В.Н.* О маневренности по курсу подводных суперкавитирующих аппаратов // *Прикладна гідромеханіка.*– 2011.– Т. 13, N 1.– С. 43-50.
10. *Семененко В.Н.* Исследование динамики и управления движением суперкавитирующих тел на основе теории Г.В.Логвиновича // *Прикладна гідромеханіка.*– 2013.– Т. 15, N 1.– С. 83-93.