

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ В ВОДНОЙ СРЕДЕ В РЕЖИМЕ СУПЕРКАВИТАЦИИ

К.Г. Перфильева, В.А. Архипов

*Национальный Исследовательский Томский Государственный Университет,
634050, г. Томск, Россия*

При движении тел в водной среде сила сопротивления намного выше, чем при движении в воздухе, плотность которого на три порядка меньше. Значительное снижение коэффициента сопротивления можно получить при движении тела в режиме суперкавитации [1,2]. При этом вокруг тела с помощью специального головного кавитатора образуется полость, заполненная водяным паром.

Рассмотрим характеристики движения осесимметричной модели в виде усеченного конуса (рис. 1) в водной среде в режиме суперкавитации.

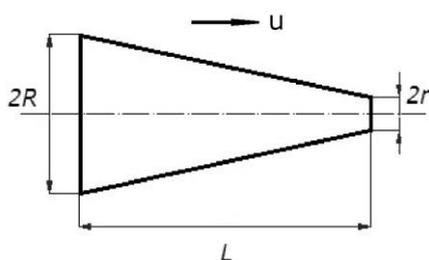


Рис.1. Конфигурация модели

Уравнение движения тела постоянной массы m в жидкой или газообразной среде имеет вид

$$m \frac{du}{dt} = -C_x S_M \frac{\rho u^2}{2}, \quad (1)$$

где u – скорость движения тела; C_x – безразмерный коэффициент сопротивления;

S_M – площадь миделева сечения тела; t – время; ρ – плотность окружающей среды.

Основным критерием подобия суперкавитационного движения является число кавитации

$$\sigma = \frac{2\Delta p}{\rho u^2},$$

где $\Delta p = p(H) - p_k$; $p(H)$ – гидростатическое давление, на глубине погружения H ; p_k – давление насыщенных паров воды при пузырьковой кавитации.

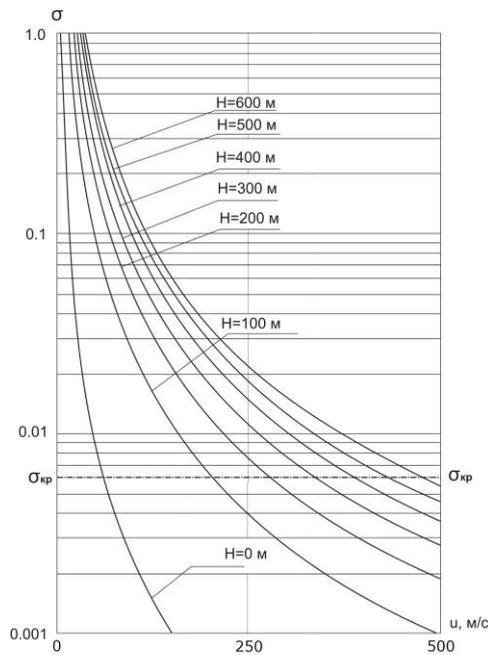
Проведенные оценки [1,2] показывают, что при значениях числа кавитации $\sigma < \sigma_{кр} = 0.06$ суперкавитирующая модель испытывает меньшее сопротивление, чем та же модель при сплошном обтекании.

Зависимость числа кавитации от скорости модели для разных значений глубины погружения и значения минимальной скорости u_{\min} , обеспечивающей режим суперкавитации, приведены на рис. 2.

Карта режимов движения модели в координатах (H, u) приведена на рис. 3. Линия, определяющая границу области суперкавитации, соответствует значению $\sigma_{кр} = 0.06$.

Движение суперкавитирующей модели существенно отличается от движения любого обычного тела при сплошном обтекании. Это различие определяется тем, что большая часть суперкавитирующей модели не взаимодействует с набегающим потоком и гидравлические силы возникают только на переднем торце модели (на кавитаторе).

Сопротивление движению суперкавитирующей модели, полностью охватываемой газовой каверной, определяется сопротивлением кавитатора и рассчитывается по формуле [1]



$H, \text{ м}$	$u_{\text{min}}, \text{ м/с}$
0	58
100	191
200	265
300	321
400	370
500	412
600	451

Рис. 2. Зависимость числа кавитации от глубины погружения и скорости модели

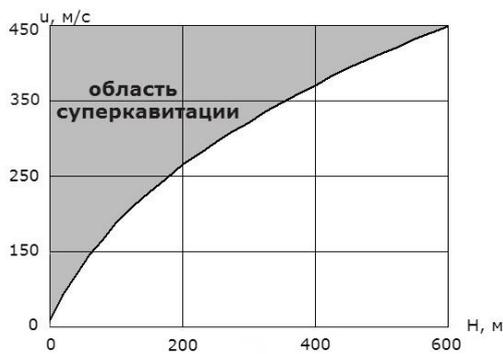


Рис. 3. Границы области суперкавитации

$$R_x = C_x S \frac{\rho u^2}{2} = 0.82(1 + \sigma) S_k \frac{\rho u^2}{2},$$

где $S = \pi r^2$ – площадь поперечного сечения кавитатора.

При больших скоростях движения и малых глубинах погружения $\sigma \ll 1$, поэтому $C_x = 0.82$ и уравнение движения (1) имеет вид:

$$\frac{du}{dt} = -ku^2,$$

где $k = 0.82 \frac{\rho S_k}{2m} = \text{const}$.

Интегрируя это уравнение (при $u = u_0$ для $t = 0$), получим формулу для зависимости скорости модели от времени:

$$u(t) = \frac{u_0}{1 + ku_0 t}. \quad (2)$$

С учетом (2) расстояние, пройденное моделью за время t_* (до момента достижения заданной скорости $u = u_*$), определяется интегралом

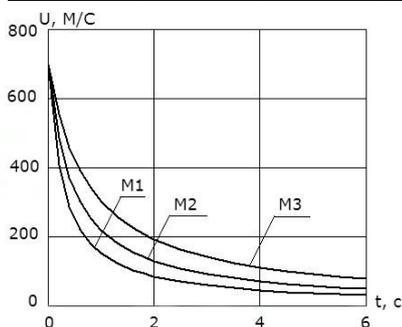
$$S_* = \int_0^{t_*} u(t) dt = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{u_0}{u_*} \right).$$

Рассмотрим характеристики движения трех моделей, параметры которых приведены в таблице.

Зависимости скорости и расстояния, пройденного моделью, от времени приведены на рис. 4 для следующих значений параметров: $u_0 = 700$ м/с; $u_* = 100$ м/с.

Таблица

Модель	R , см	r_k , см	L , мм	m , кг	$k \cdot 10^{-3}$, м ⁻¹	k_0 , м ⁻¹
М1	1.0	0.1	30	0.25	5.152	0.276
М2	1.5	0.15	45	0.92	3.15	0.169
М3	2.5	0.25	74	4.28	1.881	0.101



Модель	t_* , с	S_* , м
М1	1.66	378
М2	2.72	618
М3	4.56	1035

Рис. 4. Зависимости скорости и расстояния, пройденного моделями М1, М2, М3, от времени

Для сравнения приведены расчеты модели без кавитатора, где параметр k_0 определяется формулой

$$k_0 = 0.44 \frac{\rho S_M}{2m} = \text{const}.$$

Расчеты с k_0 показали, что модель М1 тормозится до u_* , через 0.03с; модель М2, через 0.05с; модель М3, через 0.08с.

При этом пройденные расстояния составляют $S_* = 7.0$ м; 11.5м; 19.2м.

Таким образом, при движении модели в водной среде в режиме суперкавитации скорость модели и пройденное расстояние намного превышают соответствующие значения при движении модели без кавитатора.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», соглашение № 14.578.21.0034, уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI57814X0034.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савченко Ю.Н., Семенов В.Н., Путилин С.И. Нестационарные процессы при суперкавитационном движении тел// Прикладная гидромеханика. 1999. Т. 1 (73), № 1, С. 79-97.
2. Савченко Ю.Н., Савченко Г.Ю. Оценка эффективности использования суперкавитации на осесимметричных корпусах// Прикладная гидромеханика. 2004. Т. 6 (78), № 4, С. 78-83.