

## 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.

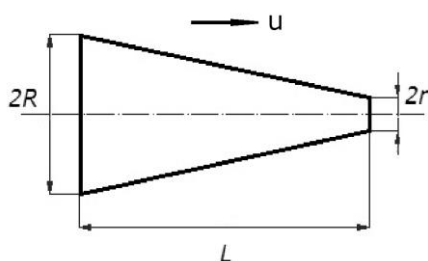


Рис.1. Конфигурация модели

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;  $\rho$  – 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.

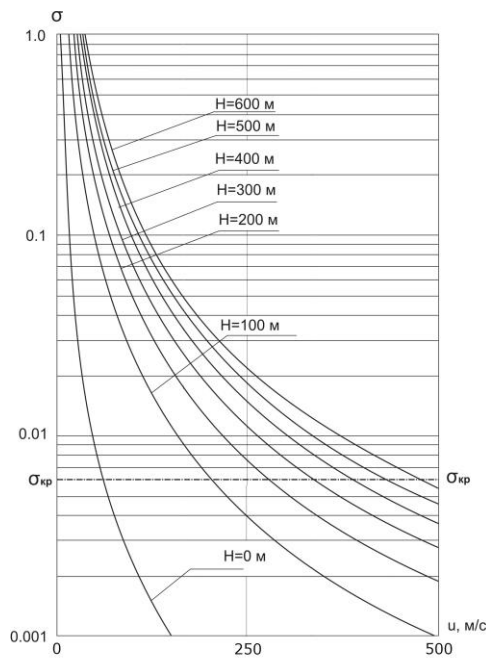
Проведенные оценки [1,2] показывают, что при значениях числа кавитации  $\sigma < \sigma_{кр} = 0.06$  суперкавитирующая модель испытывает меньшее сопротивление, чем та же модель при сплошном обтекании.

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

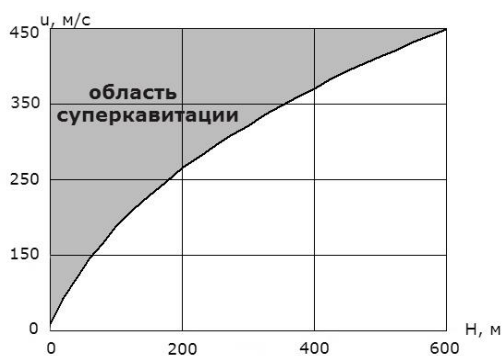


Рис. 3. Границы области суперкавитации

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

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

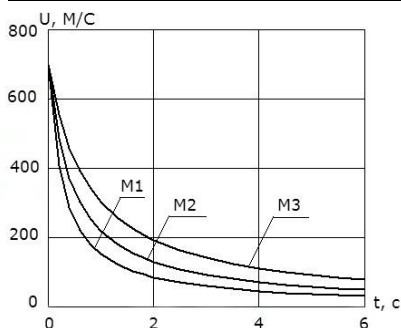
$$S_* = \int_0^{t_*} u(t) dt = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{u_0}{u_*} \right).$$

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 <sup>-1</sup>	$k_0$ , м <sup>-1</sup>
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.