

УДК 532.528

ДВИЖЕНИЕ СУПЕРКАВИТИРУЮЩЕГО АППАРАТА НА ПОДВОДНОМ УЧАСТКЕ РАЗГОНА

Ю. Н. САВЧЕНКО, В. Н. СЕМЕНЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев
ул. Желябова, 8/4, 03680, ГСП, Киев-180, Украина
E-mail: vnsvns60@gmail.com

Отримано 05.09.2015

Приведен анализ процесса разгона подводных суперкавитирующих аппаратов от малой начальной скорости до выхода на маршевый суперкавитационный режим обтекания. Метод исследования – компьютерное моделирование динамики суперкавитирующих аппаратов. Показано, что суперкавитирующие аппараты при разгоне имеют "горб сопротивления", который можно преодолеть с помощью маршевого движителя постоянной тяги только при наличии интенсивного вдува газа в каверну с целью ускорения ее развития. Рассмотрен режим разгона путем применения стартового ускорителя и одновременного повышенного вдува газа в растущую каверну. Для конкретной расчетной модели установлены минимальные и оптимальные значения тяги стартового движителя и поддува газа на подводном участке разгона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: суперкавитирующий аппарат, разгон, вентилируемая каверна

Проведено аналіз процесу розгону підводних суперкавітуючих апаратів від малої початкової швидкості до виходу на маршевий суперкавітаційний режим обтікання. Метод дослідження – комп'ютерне моделювання динаміки суперкавітуючих апаратів. Показано, що суперкавітуючі апарати при розгоні мають "горб опору", який можливо подолати за допомогою маршевого рушія зі сталою тягою тільки при наявності інтенсивного піддуву газу в каверну з метою прискорення її розвитку. Розглянуто режим розгону шляхом застосування стартового прискорювача і одночасного підвищеного вдуву газу в зростаючу каверну. Для конкретної розрахункової моделі визначено мінімальні і оптимальні значення тяги стартового рушія і піддуву газу на підводній ділянці розгону.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: суперкавітуючий апарат, розгін, вентильована каверна

The work purpose is analysis of acceleration process for underwater supercavitating vehicles from a low starting velocity up to the cruise supercavitation flow regime. The research method is computer simulation of the supercavitating vehicle dynamics. It is shown that supercavitating vehicles during acceleration have a "hump of drag which can be overcome with the cruise engine with constant thrust only in the presence of intensive gas supply into the cavity with the purpose of acceleration of its development. We consider a regime of speeding-up by means of application of a starting accelerator and simultaneous advanced gas-supply into a growing cavity. For a concrete calculation model one determines minimal and optimal values of both the starting engine thrust and the gas supply on the underwater acceleration part.

KEY WORDS: supercavitating vehicle, acceleration, ventilated cavity

ВВЕДЕНИЕ

Все транспортные аппараты, использующие динамические средства поддержания, нуждаются в предварительном разгоне до расчетной (маршевой) скорости движения, при которой аэрогидродинамические силы могут уравновешивать вес аппарата.

Выполнение разгона часто требует наличия большой тяги, значительно превышающей расчетную величину тяги для маршевого режима движения. Использование при разгоне большой тяги бывает вызвано необходимостью сократить путь разгона и преодолеть "горб сопротивления", который возникает при разгоне по поверхности воды у судов на подводных крыльях и гидросамолетов [1].

На практике для разгона стараются применять внешние источники энергии путем использования

катапульт различных систем. В качестве бортовых систем дополнительной тяги используются отдельные стартовые ускорители и система форсажа основного двигателя. Используют также комбинации этих систем ускорения.

Вывод суперкавитирующего аппарата (сокращенно СК-аппарата или СКА) на маршевый режим по подводной траектории представляет собой сложную задачу, поскольку суперкаверна на корпусе развивается по мере увеличения скорости и в зависимости от величины поддува газа в каверну. Наличие взаимосвязанных процессов развития суперкаверны и сокращения замытой площади аппарата обуславливают появление "горба сопротивления" на участке разгона, преодолеть который с помощью тяги, рассчитанной для маршевого режима с максимальной дальностью, невозможно. Это было показано при компьютерном моделировании стационарного движения СКА в наших предыду-

щих работах [2, 3].

Целью данной работы является анализ пути решения проблемы разгона СКА с помощью одновременного использования дополнительного стартового движителя (ускорителя), который выдает очень большую тягу F_{st} в течение короткого промежутка времени T_{st} , и интенсивного вдува газа в частичную каверну с целью ускорения ее развития.

Метод исследования — компьютерное моделирование динамики СКА с использованием аппроксимационной модели нестационарной суперкаверны, основанной на принципе независимости расширения сечений суперкаверны Г.В.Логвиновича [4].

1. УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ СК-АППАРАТА НА РАЗГОННОМ УЧАСТКЕ

При постановке задачи расчета динамики самодвижущегося СКА на разгонном участке примем следующие упрощающие допущения:

- 1) на разгонном участке аппарат движется прямолинейно;
- 2) форма нестационарной каверны в любой момент времени осесимметрична;
- 3) масса модели m и сила тяги стартового движителя F_{st} постоянны;
- 4) зависимость всех действующих сил от времени квазистационарна.

Уравнение прямолинейного движения аппарата на разгонном участке примем в виде:

$$(m + m^*) \frac{dV}{dt} = F_{cr} + F_{st} - F_{nx} - F_{bx}, \quad (1)$$

где m^* — присоединенная масса кавитатора; F_{nx} — кавитационное сопротивление; F_{bx} — сопротивление трения замкнутой части корпуса модели при частичной кавитации. Составляющие силы сопротивления в каждый момент времени вычисляются по формулам:

$$F_{nx} = \frac{\rho V^2}{2} \frac{\pi D_n^2}{4} 0.82(1 + \sigma), \quad \sigma = \frac{2(p_\infty - p_c)}{\rho V^2}, \quad (2)$$

$$F_{bx} = \frac{\rho V^2}{2} S_w c_f(\mathbf{Re}), \quad \mathbf{Re} = \frac{VL_w}{\nu}, \quad (3)$$

где σ — число кавитации; L_w, S_w — длина и площадь замкнутой части корпуса; c_f — коэффициент вязкостного сопротивления при турбулентном обтекании [5].

Следует заметить, что на практике рассматриваемый процесс может оказаться более сложным,

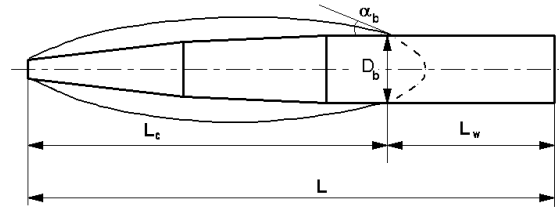


Рис. 1. Схема определения длины каверны при частичной кавитации СКА

чем это описывает модельное уравнение (1). Действительно, в начальные моменты времени, когда каверна замыкается на передней конической части корпуса модели, должно возникать дополнительное сопротивление, вызванное областью повышенного давления на корпусе за точкой замыкания каверны. Еще одним источником дополнительного сопротивления является кормовой срез корпуса, за которым образуется зона пониженного давления и затем — донная каверна. При этом необходимо также учитывать наличие реактивной струи движителя. В то же время, в случае вентиляции растущей частичной каверны замыкая часть корпуса модели будет обтекаться не водой, а газо-водяной смесью, что должно приводить к снижению сопротивления трения F_{bx} и повышению давления в донной каверне. Как представляется, все эти эффекты носят характер поправок и в рамках данной статьи не учитываются.

Уравнение (1) интегрируется численно совместно с уравнением расширения сечений каверны [6, 7]:

$$\frac{\partial^2 S_c(\tau, t)}{\partial t^2} = -\frac{k_1}{2} V^2(\tau) \sigma(\tau, t), \quad (4)$$

где S_c — площадь сечения каверны; $\tau \leq t$ — момент образования сечения; k_1 — константа [7]. Длина каверны L_c при частичной кавитации определяется в каждый момент времени геометрическим путем (см. рис. 1).

Для достижения необходимого малого значения числа кавитации σ при заданных глубине и маршевой скорости движения СКА обычно необходимо обеспечить давление в каверне $p_c > p_v$, где $p_v = 2.35$ кПа — давление насыщенных паров воды, т.е. каверна должна быть вентилируемой.

Для моделирования нестационарного поведения вентилируемых суперкаверн к уравнениям (1), (4) следует добавить уравнение изотермического расширения газа в каверне [7]:

$$\frac{d[p_c(t)Q_g(t)]}{dt} = p_\infty [\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}(t)], \quad (5)$$

где $Q_g = Q_c - Q_b$ — объем газа в каверне; $Q_c(t)$ —

Табл. 1. Параметры движения модели СКА на маршевом режиме

H , м	V_{cr} , м/с	p_c , КПа	σ	Fr	β	L_c , м	D_c , мм	F_{cr} , КН
5.0	120.0	3.075	0.02	144.8	1.005	6.60	469.8	23.39

объем каверны; $Q_b(t)$ – объем тела в каверне; \dot{Q}_{in} и \dot{Q}_{out} – объемные расходы поддува газа в каверну и уноса из каверны при давлении p_∞ .

Для расхода газа при замыкании каверны на теле вращения в расчетах используется полуэмпирическая формула [7]:

$$\dot{Q}_{out} = C'_e V_\infty \pi D_b^2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_b}{2}, \quad (6)$$

где α_b – угол смыкания каверны на теле (см. рис. 1); $C'_e = (0.28 \div 0.29) \cdot 10^2$ – эмпирический коэффициент, слабо зависящий от σ и формы модели.

В случае свободного замыкания каверны используется универсальная степенная зависимость для расхода газа из каверны [8]:

$$\dot{Q}_{out} = C V_\infty D_n^2 \sigma^\eta, \quad \eta < 0, \quad (7)$$

где C – безразмерный коэффициент, который может зависеть от σ , Fr , β и других параметров.

В качестве расчетной модели СКА используем здесь “стандартную модель” М1, описанную в [9]. Ее основные параметры: длина $L = 5$ м; диаметр цилиндрической части $D_b = 340$ мм; диаметр кавитатора $D_n = 70$ мм; масса $m = 600$ кг. На маршевом участке модель движется с постоянной скоростью V_{cr} под действием тяги маршевого движителя F_{cr} , равной гидродинамическому сопротивлению F_x , в режиме полностью развитой кавитации. Параметры движения модели на маршевом режиме приведены в таблице 1, в которой введены обозначения: H – глубина движения; $Fr = V_{cr}/\sqrt{gD_n}$ – число Фруда; $\beta = \sigma_v/\sigma \geq 1$ – параметр подобия вентилируемых каверн [7]; σ_v – паровое число кавитации; D_c – максимальный диаметр каверны.

В качестве начальных во всех расчетах были приняты следующие значения параметров: $V_0 = 10$ м/с, $p_c(0) = 3.075$ кПа. При этом $\sigma_0 = 2.88$, $L_c(0) = 0.175$ м.

2. ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ПОДДУВА ГАЗА В КАВЕРНУ НА УЧАСТКЕ РАЗГОНА

Во время разгона СКА расход поддуваемого газа должен обеспечивать развитие искусственной

суперкаверны до ее полных размеров L_{cr} и D_{cr} , соответствующих маршевому режиму движения со скоростью V_{cr} .

Однако следует учитывать, что скорость увеличения длины каверны L_c ограничена и, согласно принципу независимости расширения сечений суперкаверны [4], не может превосходить скорость движения аппарата V_{cr} .

Также будет справедливым вывод, что полное время развития суперкаверны не может быть меньше, чем сумма двух составляющих: t_a – времени действия формального ускорения до достижения маршевой скорости V_{cr} и t_{cr} – времени распространения сечения суперкаверны, сформированного кавитатором, при $V = V_{cr}$ в конец суперкаверны:

$$t_{st} \geq t_a + t_{cr}, \quad (8)$$

где $t_{cr} = L_{cr}/V_{cr}$. Представляющие практический интерес оценки минимального времени развития искусственной суперкаверны и необходимого расхода газа на поддув были сделаны в работе [10] для случая формирования свободной каверны.

Если предположить, что тяга F_{st} и ускорение a_{st} на участке разгона постоянны, то несложно получить оценки требуемого поддува \dot{Q}_{st} , времени разгона t_{st} и длины S_{st} участка разгона:

$$t_{st} = t_a + t_{cr} = \frac{V_{cr}}{a_{st}} + \frac{L_{cr}}{V_{cr}}, \quad (9)$$

$$S_{st} = \frac{V_{cr}^2}{2a_{st}} + L_{cr}. \quad (10)$$

Максимальный объемный расход газа, необходимый при развитии суперкаверны по оценке [10] будет

$$\dot{Q}_{in}^{max} = \dot{Q}_{st} = \pi(R_c^2 - R_b^2)V_{cr}, \quad (11)$$

где $R_c = R_n \sqrt{c_x/\sigma}$ – максимальный радиус каверны на маршевом режиме; R_b – максимальный радиус корпуса аппарата. Тогда объем газа, расходуемый при разгоне, будет

$$Q_{st} = \dot{Q}_{st} \cdot t_{st}. \quad (12)$$

Для данных табл. 1 получаем $\dot{Q}_{in}^{max} = 8.417$ м³/с.

К расходу газа, необходимому для заполнения развивающейся каверны, следует добавить расход газа \dot{Q}_{out} , уносимого из каверны. Время разгона

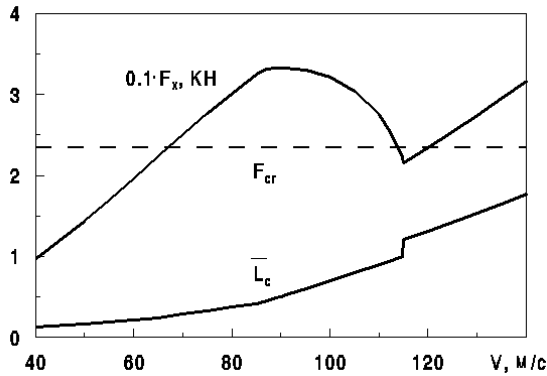


Рис. 2. Зависимость полного сопротивления СКА и длины каверны от скорости

t_{st} зависит от ускорения аппарата, которое обеспечивается тягой движителя. При невозможности обеспечить достаточно большое ускорение a_{st} развитие каверны замедлится и будет сопровождаться уносом газа из каверны, который необходимо компенсировать повышением поддува \dot{Q}_{in} .

На практике после схода с корпуса аппарата каверна замыкается не свободно, а на газовую струю движителя, которая эжектирует газ из каверны. В результате каверна не может увеличить свою длину при повышении поддува газа, а совершает установившиеся колебания около значения $L_c = L$.

Для объемного расхода газа в случае замыкания каверны на цилиндрическом теле нами была предложена полуэмпирическая формула:

$$\dot{Q}_{out} = C_b V_{\infty} D_c L_c \left(1 - \frac{D_b^2}{D_c^2}\right), \quad L_c < L, \quad (13)$$

где C_b – эмпирический коэффициент, слабо зависящий от σ . Тогда минимальный требуемый расход газа на поддув каверны на маршевом режиме можно оценить, полагая в (13) $L_c = L$. Для данных табл. 1 и $C_b = 0.0018$ получаем $\dot{Q}_{in}^{min} = 0.280 \text{ м}^3/\text{с}$.

3. РАЗГОН СК-АППАРАТА МАРШЕВЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ

На рис. 2 приведены графики зависимости полного гидродинамического сопротивления $F_x = F_{nx} + F_{bx}$ и относительной длины каверны $\bar{L}_c = L_c/L$ от скорости данной модели V при стационарном обтекании. Как видно, при $V = 90 \text{ м/с}$ сопротивление модели имеет максимум $F_x = 33.28 \text{ КН}$ (“горб сопротивления”), который значительно превышает ее сопротивление на маршевом режиме

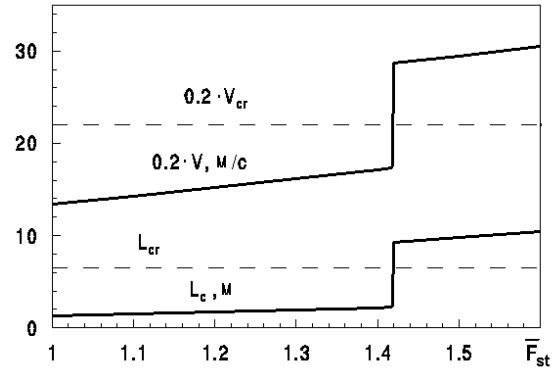


Рис. 3. Зависимость достигнутой скорости СКА и длины каверны от относительной тяги

$F_{cr} = 23.39 \text{ КН}$ (штрих-пунктирная линия).

При $V = 114.9 \text{ м/с}$ сопротивление имеет минимум $F_{min} = 21.51 \text{ КН}$, соответствующий переходу от частичной кавитации к суперкавитации. При этом длина каверны из-за наличия кормового среза модели увеличивается скачком. Значение маршевой скорости $V_{cr} = 120 \text{ м/с}$ выбирается несколько большим для обеспечения необходимой величины зазоров в сечении кормового среза модели.

В качестве маршевого движителя СКА можно использовать твердотопливный ракетный двигатель (ТРД) с удельным импульсом $I_{cr} \approx 1000 \div 2800 \text{ Н}\cdot\text{с/кг}$ или прямоточный гидрореактивный двигатель (ПГРД), использующий гидрореагирующее топливо и забортную воду в качестве окислителя (удельный импульс $I_{cr} = 4500 \div 5000 \text{ Н}\cdot\text{с/кг}$) [11, 12].

Расчет по формулам (1), (4), (5) показал, что в этом случае скорость модели и длина каверны асимптотически приближаются к значениям $L_c = 1.304 \text{ м}$ и $V = 66.825 \text{ м/с}$, соответствующим режиму частичной кавитации.

4. РАЗГОН СК-АППАРАТА СТАРТОВЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ

В качестве стартового движителя СКА можно использовать ТРД с удельным импульсом $I_{st} \approx 2000 \text{ Н}\cdot\text{с/кг}$. В этом случае большая тяга $F_{st} \gg F_{cr}$ достигается за счет короткого времени сгорания топлива T_{st} [11]:

$$F_{st} = \frac{m_{st} I_{st}}{T_{st}}, \quad (14)$$

где m_{st} – масса топлива стартового движителя.

На рис. 3 представлены результаты расчета скорости аппарата и длины каверны в конце разгон-

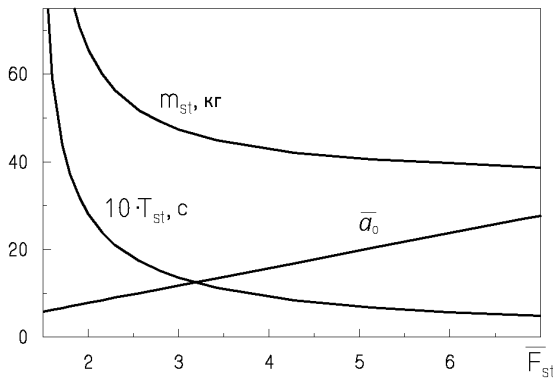


Рис. 4. Время работы стартового двигателя, начальная перегрузка и расход топлива в зависимости от тяги

ного участка в зависимости от относительной величины тяги стартового двигателя $\bar{F}_{st} = F_{st}/F_{cr}$. Как видно, переход от режима частичной кавитации к суперкавитации происходит скачком при $F_{st} \approx 33.2$ кН. При $F_{st} > 33.2$ кН аппарат выходит на неэкономичные режимы обтекания $L_c > L_{cr}$, $V > V_{cr}$. На практике после отработки стартового двигателя в момент T_{st} запускается маршевый двигатель, имеющий тягу $F_{cr} \ll F_{st}$, и далее модель движется, приближаясь к маршевому режиму V_{cr} , L_{cr} .

Таким образом, минимальная тяга стартового двигателя для данной модели $F_{st}^{min} = 33.2$ кН. Однако в этом случае разгон занимает неприемлемо большое время $T_{st} = 170$ с. На практике критическим параметром для СКА является масса топлива на борту m_{st} , которая пропорциональна времени работы двигателя (14). Возникает задача нахождения оптимального значения тяги F_{st} с целью минимизации расхода топлива при допустимом уровне перегрузки $\bar{a}_0 = a_0/g$. На практике время разгона СКА должно составлять $0.5 \div 1$ с.

На рис. 4 представлены графики зависимости необходимого времени работы стартового двигателя данной модели T_{st} и начальной (максимальной) перегрузки $\bar{a}_0 = a_0/g$ в зависимости от относительной тяги \bar{F}_{st} . Там же нанесен график расхода топлива стартового двигателя m_{st} , вычисленного по формуле (14).

5. РАЗГОН СК-АППАРАТА ПРИ ПОВЫШЕННОМ ПОДДУВЕ КАВЕРНЫ

Развитие каверны при разгоне СКА можно ускорить, увеличивая расход газа на поддув ка-

верны \dot{Q}_{in} сверх необходимого (см. раздел 3). При этом увеличивается давление в каверне p_c , уменьшается число кавитации σ и, следовательно, растет значение параметра $\beta > 1$. В результате на развитие каверны будут все большее влияние оказывать динамические свойства газонаполненных каверн. Как показано в [13, 14], при превышении некоторого критического значения параметра β каверна теряет устойчивость и начинает пульсировать. При этом расход газа из каверны возрастает, что препятствует дальнейшему росту средней длины каверны.

1) Выясним сначала, возможен ли разгон СКА с помощью маршевого двигателя при повышенном поддуве каверны. Расчеты показали, что для данной модели СКА “горб сопротивления” удается преодолеть при достаточно больших поддувах $\dot{q}_{in} \geq 4.3$. Время развития суперкаверны при $\dot{q}_{in} = 4.3$ равно ≈ 15 с.

На рис. 5, а, б представлены результаты расчета возрастания относительной скорости данной модели $\bar{V} = V/V_{cr}$ и относительной длины каверны \bar{L}_c под действием постоянной тяги маршевого двигателя F_{cr} для ряда значений коэффициента объемного расхода газа в каверну:

$$\dot{q}_{in} = \frac{\dot{Q}_{in}}{V_0 D_n^2}$$

Очевидно, что на практике такой способ разгона СКА применять нецелесообразно по следующим причинам:

- недопустимо большое время разгона до маршевой скорости $\bar{V} = 1.0$;
- потеря устойчивости и возникновение пульсаций каверн при больших расходах на поддув.

2) Оценим теперь эффективность применения повышенного поддува при разгоне СКА стартовым двигателем. На рис. 6 представлены графики зависимости времени развития суперкаверны T_{st} от коэффициента поддува газа \dot{q}_{in} для ряда значений \bar{F}_{st} . Видно, что время развития суперкаверны при повышении поддува уменьшается сравнительно слабо, причем тем слабее, чем выше тяга стартового двигателя. То же самое справедливо для изменения расхода топлива на разгонном участке m_{st} (14). В табл. 2 приведены значения выигрыша в расходе топлива Δm_{st} при увеличении коэффициента поддува \dot{q}_{in} от 0.4629 до 10.0.

Таким образом, можно сказать, что эффективность применения повышенного поддува при подводном разгоне СКА невелика и снижается при увеличении тяги стартового двигателя.

Расчеты показали также, что увеличение поддува приводит к возникновению пульсаций разви-

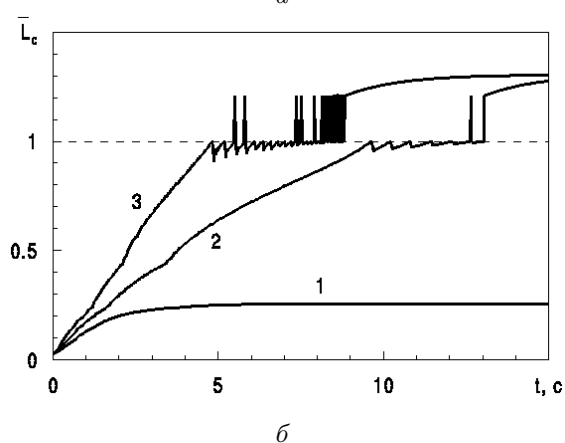
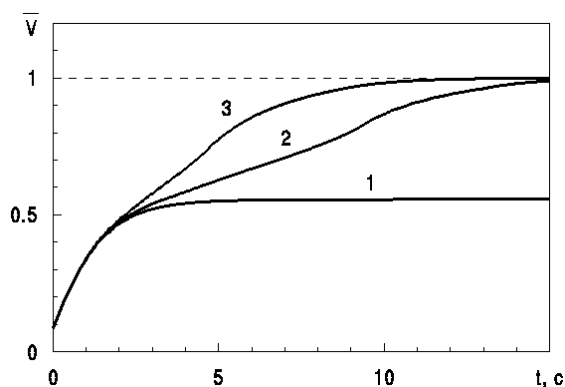


Рис. 5. Возрастание скорости (а) и длины каверны (б) при разгоне СКА маршевым двигателем: 1 – $q_{in} = 0.4629$; 2 – $q_{in} = 4.3$; 3 – $q_{in} = 10.0$

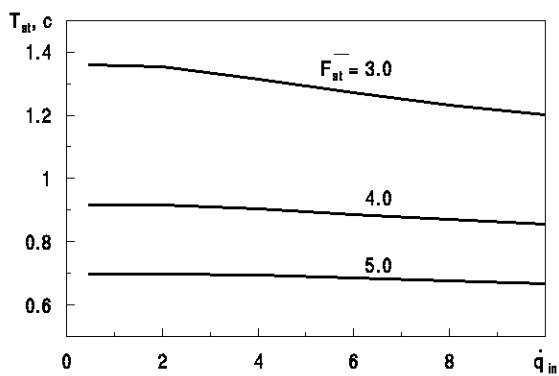


Рис. 6. Время развития суперкаверны в зависимости от величины поддува

вающейся каверны, при этом рост средней длины каверны замедляется, а время разгона СКА и расход топлива на разгон увеличиваются.

Табл. 2. Уменьшение расхода топлива на разгон СКА при увеличении поддува каверны

\bar{F}_{st}	3.0	4.0	5.0
$\Delta m_{st}, \%$	11.67	6.56	4.36

6. ВЫВОДЫ

Подводный разгон СКА до маршевого режима с помощью маршевого двигателя при повышенном поддуве газа в каверну теоретически возможен, однако на практике такой способ оказывается неприемлемым из-за недопустимо большого времени разгона.

На практике для подводного разгона СКА в течение $0.5 \div 1$ с необходим стартовый двигатель с тягой, в $4 \div 5$ раз превышающей тягу маршевого двигателя.

При этом увеличение скорости развития суперкаверны за счет повышенного поддува слабо влияет на время разгона СКА. При больших расходах газа в каверну могут возникнуть дополнительные проблемы, связанные с пульсациями вентилируемых каверн.

Проведенный анализ позволяет сделать общий вывод, что с точки зрения уменьшения времени разгона СКА и расхода топлива на разгон более эффективным является увеличение тяги стартового двигателя СКА, чем повышение поддува газа в каверну сверх необходимого.

1. Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов.– Л.: Судостроение, 1988.– 288 с.
2. Semenenko V.N. Some problems of supercavitating vehicle designing. Proc. International Conference on superfast marine vehicles moving above, under and in water surface (SuperFAST'2008).St. Petersburg, Russia.–2008.
3. Семенов В.Н., Наумова Е.И. Динамика суперкавитирующих тел // В сб.: Суперкавитация: достижения и перспективы.– Київ: Інститут гідромеханіки НАН України.– 2010.– С. 99-113.
4. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами.– К.: Наук. думка, 1969.– 208 с.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.– М.: Наука, 1974.– 711 с.
6. Логвинович Г.В., Серебряков В.В. О методах расчета формы тонких осесимметричных каверн // Гидромеханика.– 1975.– Вып. 32.– С. 47-54.
7. Semenenko V.N. Artificial cavitation. Physics and calculations. RTO-AVT/VKI Special Course on Supercavitating Flows. VKI, Brussels, Belgium.– 2001.

8. Семененко В.Н. Пульсации вентилируемых каверн при различных условиях замыкания // Прикладна гідромеханіка.– 2011.– Т. 13, N 4.– С. 62-67.
9. 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.
10. Савченко Ю.Н., Савченко Г.Ю. Течение газа внутри искусственных суперкаверн // Суперкавитация: достижения и перспективы.– Киев: Институт гидромеханики НАНУ.– 2010.– С. 81-87.
11. Грейнер Л. Гидродинамика и энергетика подводных аппаратов.– Л.: Судостроение, 1978.– 384 с.
12. Savchenko V.N. Supercavitating object propulsion RTO-AVT/VKI Special Course on Supercavitating Flows. VKI, Brussels, Belgium.–2001.
13. Парышев Э.В. Теоретическое исследование устойчивости и пульсаций осесимметричных каверн // Тр. ЦАГИ.– 1978.– Вып. 1907.– С. 17-40.
14. Семененко В.Н. Неустойчивость вентилируемой каверны при замыкании на теле // Прикладна гідромеханіка.– 2011.– Т. 13, N 3.– С. 76-81.