

УДК 621.452.52

Влияние внешних гидродинамических параметров высокоскоростных подводных аппаратов на их тактико-технические характеристики

А.А. Москаленко

*Студент, кафедра «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия*

*Научный руководитель: Полянский А.Р., к.т.н., доцент кафедры «Ракетные
двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
baumanets2007@mail.ru

Одним из наиболее эффективных средств борьбы с надводными кораблями и подводными лодками является подводное оружие, прежде всего – торпеды. Совершенство скоростных подводных аппаратов, их характеристик даёт значительное преимущество в условиях подводной и противолодочной борьбы между подводными лодками, эсминцами и более крупными кораблями, а также использования средств авиации флота. Эффективным средством ведения боя являются ракеты-торпеды, способные двигаться под водой с большими скоростями, чем обычные тепловые или электрические торпеды. Большую роль при создании подводного аппарата играет гидродинамика корпуса. Благодаря «газовому кокону» - каверне, в которой двигается ракета, достигаются большие скорости [2]. Пройдя большой этап развития торпедного ракетного вооружения высокоскоростные подводные аппараты (ВПА) стали грозным оружием. Их совершенствование включает модернизацию и проработку двигательной установки, внешней и внутренней гидродинамики, а также системы управления и др. В данной статье рассмотрено влияние внешней баллистики на тактические

характеристики ВПА, а также приводится сравнение глубинных характеристик при различных параметрах.

Основной схемой ВПА является прямоточный гидрореактивный двигатель (ПГРД), (Рис. 1). В рассматриваемом двигателе в качестве горючего используется гидрореагирующее топливо, а в качестве окислителя забортная вода, за счет чего удельная тяга составляет порядка 4500-5000 м/с. Особенности конструкции являются постоянно перемещающийся заряд, для обеспечения постоянства объема камеры сгорания (КС). За счет размещения дополнительного заряда унитарного твердого топлива двигательная установка (ДУ) работает на двух режимах, разгонном (без забора воды) и маршевом (горение гидрогеагирующего заряда). Водозаборник расположен в носовой части и забортная вода поступает в КС только за счет скоростного напора. Конструктивно схема такого ПГРД проста, но в тактическом плане она имеет существенный недостаток – ограниченный глубинный диапазон использования ракеты, обусловленный низким давлением в КС из-за низкой пропускной способности гидромагистрали, обеспечивающей значение K_m до 4-4,5.

Другим вариантом данного типа двигателя является гидрореактивный двигатель с подкачивающим турбонасосным агрегатом (ГРД с ТНА), представленный на рис. 2. Данная схема является развитием схемы ПГРД. Принципиальное отличием схемы является ТНА, который позволяет повысить давление в камере сгорания. Повышение давления в КС несколько увеличивает эффективную тягу и, главное, существенно расширяет глубинный диапазон использования ВПА. Кроме того, появляется возможность использовать газ, сработавший на лопатках турбины ТНА для организации поддува каверны. В [3] проведено исследование гидродинамической кавитации многофазного потока с искусственным управлением размерами суперкаверны при помощи многофазного потока с искусственным управлением размерами суперкаверны при помощи искусственной вентиляции. С помощью насоса можно повысить K_m до 7,5, что обеспечивает наивысший удельный импульс. Основные трудности реализации схемы является проблема сепарации рабочего тела, содержащего большое количество К-фазы перед его поступлением на лопатки турбины ТНА, высокая сложность.

Практически все современные схемы ДУ ВПА являются усовершенствованными ПГРД. Экономичность таких двигателей (удельный импульс) следует оценивать лишь по расходу топлива, транспортируемого подводным аппаратом. Сравнение различных топлив правильнее проводить по объемному удельному импульсу. Дело в том, что сопротивление

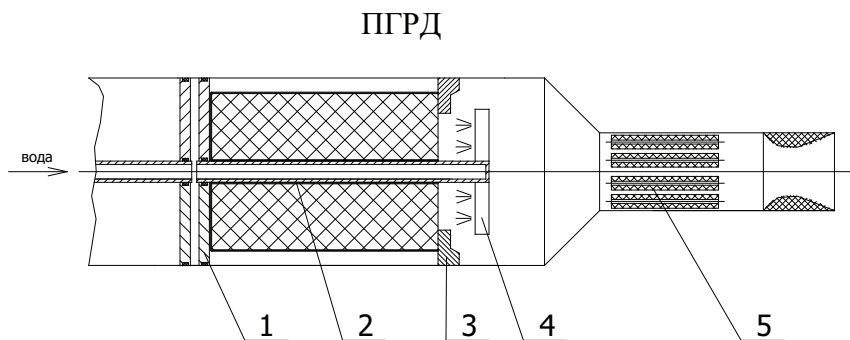


Рис. 1
1-поршень, 2-водовод, 3-ножи для среза бронировки, 4-форсуночная головка, 5-пороховой заряд

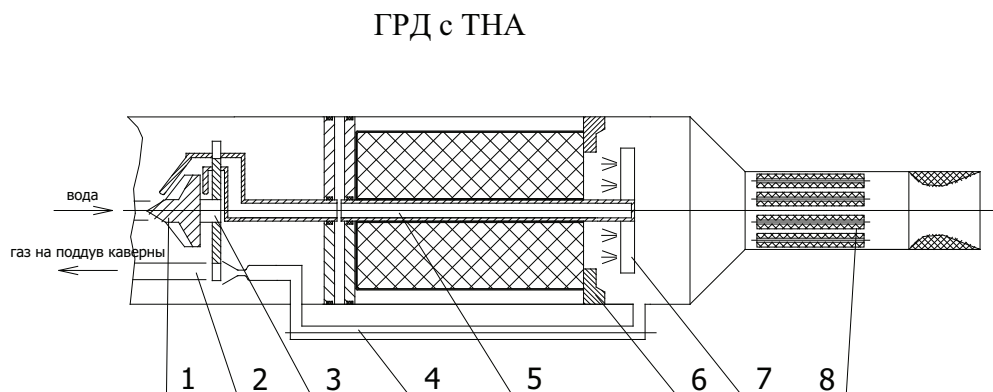


Рис. 2
1-насос, 2-затурбинный патрубок, 3-турбина, 4-газоход, 5-водовод, 6-ножи для среза бронировки, 7-форсуночная головка, 8-пороховой заряд

подводного аппарата, преодолеваемое за счет тяги двигателя, зависит от лобовой площади и внешней формы, а не от веса, который компенсируется подъемной (выталкивающей) силой. Это накладывает ограничения на объем, а не на вес, хранимого на аппарате топлива. К тому же доля веса топлива в подводных аппаратах значительно меньше, чем в ракетах (обычно менее 50%). Двигательные устройства на ГРТ позволяют существенно увеличить удельный импульс из-за использования забортной воды в качестве окислителя.

Для анализа была рассмотрена модель равномерного прямолинейного движения аппарата под водой при воздействии на него только силы тяги и силы гидродинамического сопротивления воды. Двигательная установка – ГРД с ТНА, $K_m = 7,5$. Топливо - стандартное гидрореагирующее твёрдое топливо (ГРТТ). В работах [5], [6] более подробно рассмотрено продольное движение аппаратов в суперкаверне при воздействии всех сил, а также их манёвренность.

На установившемся режиме движения можно записать:

$$P_{эф} = X$$

где $P_{эф}$ - эффективная тяга двигателя, X – эквивалентное гидродинамическое сопротивление.

Основные допущения при расчёте:

1. ВПА движется прямолинейно по траектории.
2. Все внутрикамерные параметры не меняются во время движения, переходные процессы отсутствуют.
3. Влияние внешнего давления на потери в затурбинном патрубке отсутствуют.
4. Масса подводного аппарата не влияет на его характеристики.

Для силы сопротивления можно записать [5]:

$$X = C_x F_M \frac{\rho V_0^2}{2},$$

где F_M - площадь миделя, m^2 ;

ρ - плотность воды, $кг/м^3$;

C_x – коэффициент гидродинамического сопротивления.

$$F_M = \frac{\pi d_{кав}^2}{4}$$

$d_{кав}$ - диаметр кавитатора, м.

Зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления от скорости и глубины при движении в каверне описывается следующей формулой:

$$C_x = 0,82 \left[1 + \frac{2gh}{\frac{V_0^2}{2}} \right]$$

Здесь 0,82 – безразмерный коэффициент для круглого диска (кавитатора);

h – глубина хода, м;

g – ускорение свободного падения, $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$;

V_0 – скорость движения подводного аппарата, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$;

В данном случае рассматриваем глубину не более 50 м, так как выше 50 м усложняется движение ВПА под водой в связи с тем, что каверна схлопывается и для её поддержания на такой глубине не хватает достаточного количества топлива газа, сработавшего на турбине. На глубине 50 м на высоких скоростях коэффициент практически не увеличивается и составляет примерно 0,85, в то же время на малых скоростях (50-100 м/с) разброс усиливается (0,85-1,2).

Запишем уравнение тяги ракетного двигателя [1]:

$$P = \dot{m}W_a + (p_a - p_h)F_a$$

\dot{m} – расход топлива, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

W_a – скорость истечения газов на срезе сопла, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$;

F_a – площадь выходного сечения сопла, м^2 ;

p_h – давление среды, Па;

p_a – давление в выходном сечении сопла, Па;

Для гидрореактивного двигателя основные уравнения для силы тяги и удельного импульса на расчётном режиме ($p_a = p_h$) будут выглядеть следующим образом:

$$P_{\text{эф}} = \dot{m}I_{\text{у.эф.}} = \frac{m_{\text{T}}I_{\text{у.эф.}}}{\tau} = \frac{m_{\text{T}}V_0I_{\text{у.эф.}}}{L}$$

$$\text{где } I_{\text{у.эф.}} = I_{\text{у.з.}} - \frac{\dot{m}_{\text{в}} + \Delta\dot{m}_{\text{в}}}{\dot{m}} V_0 = I_{\text{у.з.}} - (K_m + \Delta K_m)V_0$$

\dot{m} – расход гидрореагирующего топлива, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

$I_{\text{у.эф.}}$ – удельный импульс;

$I_{\text{у.з.}}$ – удельная земная тяга;

m_{T} – масса топлива ГРТТ, кг;

$\Delta\dot{m}_{\text{в}}$ – дополнительный расход воды на вспомогательные нужды, кг;

τ – время работы двигателя, с;

L – дальность хода аппарата, м.

По результатам обработки экспериментальных данных стендовая (земная) удельная тяга ПГРД на ГРТТ аппроксимирована зависимостью:

$$I_{y.z.} = aK_m^n p_k^m$$

где p_k – давление в камере сгорания, Па;

$$n \cong 0,17; m \cong 0,11.$$

Возможное давление в КС ГРД с ТНА может быть определено по формуле:

$$p_k \cong \frac{\rho V_0^2}{2} (1 - \xi) + p_h + \Delta p_{\text{под}} - \Delta p_2$$

$p_h = \rho gh$ – давление на глубине h , Па;

Δp_2 – гидравлические потери в магистрали, Па;

$\Delta p_{\text{под}}$ – давление, создаваемое ТНА, Па;

ξ – коэффициент гидравлических потерь на входе.

Получаем:

$$I_{y.z.} = cK_m^n V_0^{2m},$$

где $c = a \left[\frac{\rho}{2} (1 - \xi) + \frac{1}{V_0^2} (p_h + \Delta p_{\text{под}} - \Delta p_2) \right]^m \cong \text{const}$

После преобразований формула для дальности движения принимает вид:

$$L = \frac{2m_T}{C_x F_M \rho} \left[\frac{cK_m^n}{V_0^{1-2m}} - (K_m + \Delta K_m) V_0 \right]$$

Введем безразмерные переменные:

$$\bar{P} = \frac{P_{\text{эф}}}{P_0}, \bar{X} = \frac{X}{X_0}, \bar{L} = \frac{L}{L_0}$$

Здесь P_0, L_0, X_0 – стандартные величины эффективной тяги, силы сопротивления и дальности хода современных скоростных подводных ракет.

Рассмотрим силу сопротивления при движении ВПА под водой при различных диаметрах кавитатора. Как видно, при увеличении глубины она не сильно увеличивается, в то же время при увеличении скорости её прирост значителен и ограничивает скоростные возможности торпеды. Однако если рассмотреть формулу для тяги ВПА, то можно обнаружить что влияние глубины сильно сказывается, так как ограничивается скорость

истечения газов, уменьшается степень расширения сопла, мощность на турбине (давление в выхлопном патрубке увеличивается). При уменьшении диаметра кавитатора необходимо учитывать саму форму каверны, чтобы она схлопывалась уже за ВПА. Диаметры кавитатора: 7 и 14 см соответственно.

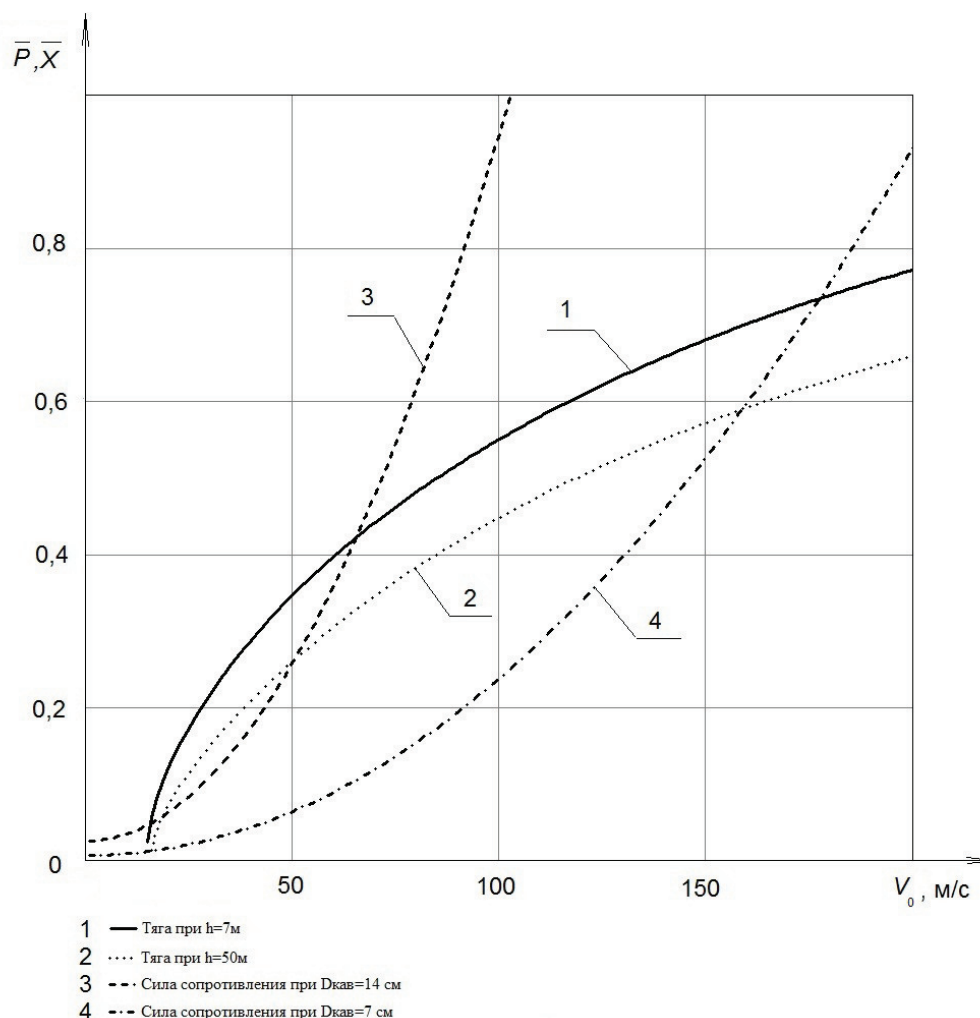


Рис.3. Зависимость эффективной тяги и силы сопротивления от скорости при различных глубинах и диаметрах кавитатора

В работе [3] проведены расчёты длины суперкаверны, возникающей с помощью конического кавитатора при различных параметрах воды, в [7], [8] – неустойчивость и пульсации каверны при её замыкании на подводном аппарате. Как правило, чем больше кавитатор, тем больший диаметр каверны он обеспечивает, но на высоких скоростях (больше 150 м/с) это преимущество теряется, требуется увеличение потребной тяги и расхода топлива (рис. 3).

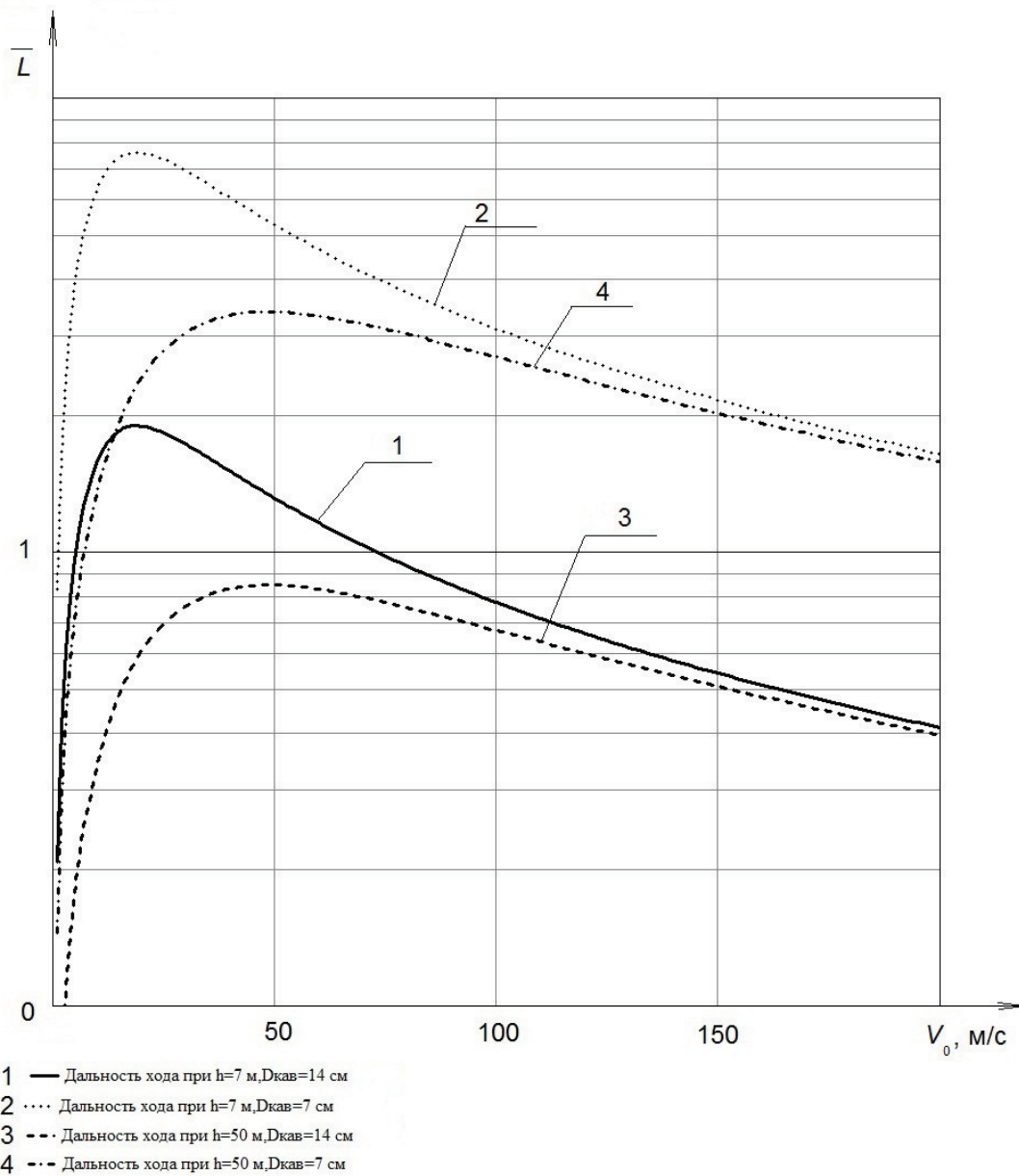


Рис.4. Зависимость дальности хода от скорости при различных глубинах и диаметрах кавитатора

При анализе дальности стоит учесть, что при низких скоростях наибольшая дальность не будет обеспечиваться для ВПА, так как каверна будет схлопываться уже на самом корпусе, что приведёт к дополнительному трению, и, следовательно, стандартные формулы применять нельзя. Как видно из полученных результатов, на скорости 100 м/с при высоком

давлении в камере сгорания возможно достичь более высоких показателей по дальности хода (рис. 4).

Выводы:

1. В результате проведённых расчетов было установлено, что с увеличением глубины эффективная тяга подводного аппарата падает, в то время как оптимизация диаметра кавитатора приводит к росту скорости и увеличению тяги.
2. Было установлено, что выбор оптимального диаметра кавитатора приводит к повышению дальности хода на 30-40%.

Список литературы

1. Дорофеев А.А. Основы теории тепловых ракетных двигателей: Учеб. пособие для вузов. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. – 463 с.
2. Кузнецов К.А. Реактивное оружие второй мировой. М.: Яуза, Эксмо, 2010. – 480 с.
3. Likhachev D.S. CFD of Stationary Supercavitating Evaporator with Steam Extraction in Constrained Stream // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 5. – 2011. - № 4. – С. 474-488.
4. Leonov V.V., Ostashko E.A., Tkachenko I.V., Starostin S.N. Separation of ship bilge water on the basis of supercavitation process // Научный вестник ХГМУ. – 2011. - № 2(5). – С. 31-40.
5. Семененко В.Н. Моделирование продольного движения подводных суперкавитирующих аппаратов // Прикладная гидромеханика. – 2010. - Т.12, № 4. – С. 81-88.
6. Савченко Ю.Н., Семененко В.Н. О манёвренности по курсу подводных суперкавитирующих аппаратов // Прикладная гидромеханика. – 2011. - Т.13, № 1. – С. 43-50.
7. Семененко В.Н. Неустойчивость вентилируемой каверны при замыкании на теле // Прикладная гидромеханика. – 2011. - Т.13, № 3. – С. 76-81.
8. Семененко В.Н. Пульсации вентилируемых каверн при различных условиях замыкания // Прикладная гидромеханика. – 2011. - Т.13, № 4. – С. 62-67.