

УДК 662.3 532.5 536.4

Савченко Г.Ю., к.т.н., н.с.

Институт Гидромеханики НАН Украины, Киев, Украина

## ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОРЕАГИРУЮЩЕГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТОПЛИВА ДЛЯ СУПЕРКАВИТИРУЮЩИХ АППАРАТОВ

Savchenko G.

Institute of Hydromechanics of National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine ([george\\_voliacable.com](mailto:george_voliacable.com))

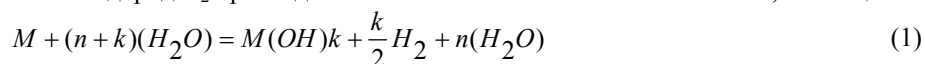
### ESTIMATION OF APPLICATION OF HYDRORACTING METALLIC FUEL FOR SUPERCAVITATING VEHICLES

*Рассматривается ряд гидрореагирующих металлов: литий Li, натрий Na, магний Mg, алюминий Al, цирконий Zr с возрастающим атомным весом и плотностью применительно к двигателям суперкавитирующих аппаратов. Анализируются параметры термохимической реакции металлов с водой. Приводятся зависимости удельного импульса и термического КПД смеси газов, истекающих из сопла гибридного реактивного двигателя в зависимости от количества избыточной воды. Показано, что с возрастанием атомного веса металлического топлива в 13 раз при переходе с лития Li на цирконий Zr дальность хода возрастает в 9 раз при соответствующем росте объемного удельного импульса и постоянных конструктивных и динамических параметрах: скорости, числа кавитации, габаритах и объеме топлива. Определены оптимальные значения избыточной воды для получения максимального удельного импульса I [КН сек/кг].*

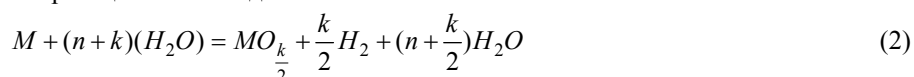
*Ключевые слова:* гидрореагирующее топливо, горение металлов, металлическое топливо, суперкавитация, горение в паре, гибридный реактивный двигатель, твердое реактивное топливо.

#### Введение

В семействе гидрореагирующих металлов некоторые металлы по своим свойствам могут рассматриваться как топливо для двигателей подводных аппаратов [1, 2, 3, 6]. Это литий – Li, натрий – Na, магний – Mg, алюминий – Al, цирконий – Zr. Эти металлы (M) имеют подобный тип реакции с водой  $\kappa(H_2O)$ , образуя гидроксид  $M(OH)_k$  и вытесняя водород  $H_2$  при выделении большого количества тепла –  $\Delta H$ , Таблица 1.



В высокотемпературном водном паре  $T > 473^\circ K$  гидроксид металла разлагается на оксид металла  $MO_k$  и воду  $H_2O$ . В этом случае химическая реакция имеет вид



где  $k = 1 \div 4$ ;  $n = 0 \div 13$ .

Обращает внимание большое потребление воды реакцией, которое возрастает с ростом валентности используемого металла. Так при использовании циркония потребление воды может более чем в 10 раз превзойти расход металла. Металлическое топливо особенно привлекательно для использования в двигателях гибридного типа, где в качестве окислителя используется заборная вода. В этом случае они работают по схеме подобной авиационным воздушно-реактивным двигателям (ВРД) [1] и получают возможность развивать чрезвычайно высокий удельный импульс  $I > 6000$  [Н сек/кг] [1,7].

В опубликованных материалах [1,2,3] особое внимание уделено легким металлам Li, Na, Mg. При этом отсутствуют зависимости удельного импульса и термического КПД от потребления избыточной воды для перспективных металлов - магний Mg и алюминий Al.

Однако среди рассматриваемых металлов наиболее привлекательными для использования в качестве топлива считаются магний Mg и алюминий Al по причине их низкой стоимости и относительной безопасности.

#### Цель статьи

Целью статьи является оценка эффективности применения металлического гидрореагирующего топлива различной плотности в условиях ограничений свойственных суперкавитационному режиму обтекания скоростных подводных аппаратов. Необходимо также детально рассмотреть реакции магния Mg и алюминия Al в условиях избыточной воды с учетом импульса, температуры и термического КПД для оптимизации режима работы двигателя.

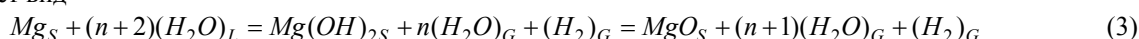
Таблиця 1

## Сравнительные параметры металлов и результатов реакций их окисления

Металл	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Ма.е.м	$T_{пл}$ , °C	$T_b$ , °C	Реакция	$M_m$	$U_i$ , м/с	$I$ , сек
Li	0.534	6.94	179	1372	$Li + H_2O = Li OH + 1/2H_2$	49.88	6700	683
Na	0.97	22.99	99.7	883	$Na + H_2O = Na OH + 1/2H_2$	81.98	3030	309
Mg	1.74	24.32	657	1102	$Mg + 2H_2O = Mg(OH)_2 + H_2$	60.32	5640	575
Al	2.7	26.9	658	2500	$Al + 3H_2O = Al(OH)_3 + 1.5H_2$	81.03	5900	601
Zr	6.4	91.22	1862	3580	$Zr + 4H_2O = Zr(OH)_4 + 2H_2$	163.3	4700	486

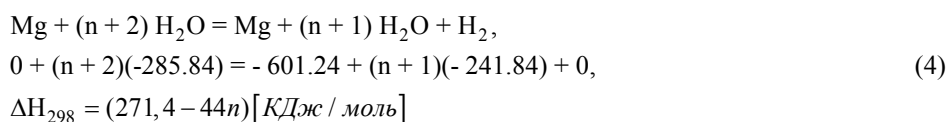
Термическая Реакция Mg + H<sub>2</sub>O

Магний имеет молекулярную массу  $M = 24.3$ , плотность  $\rho = 1760$  кг/м<sup>3</sup>, температуру плавления  $T_{пл} = 923^\circ\text{K}$ , температуру кипения  $T_b = 1393^\circ\text{K}$ . Магний не реагирует с холодной водой  $T < 298^\circ\text{K}$  и активно реагирует с горячей  $T > 373^\circ\text{K}$  вытесняя водород H<sub>2</sub> и выделяя тепло. Реакция с высокотемпературным паром  $T > 473^\circ\text{K}$  имеет вид



где  $n$  – число молей избыточной воды;  $S, L, G$  – индексы обозначающие состояние веществ: твердое, жидкое, газоподобное.

Тепловой эффект реакции  $\Delta H_{298}$  определяет энергию образования вещества при температуре  $25^\circ\text{C} = 298^\circ\text{K}$ .



Уравнение (4) показывает, что переход воды в пар отбирает энергию и при количестве избыточной воды  $n = 6.168$  выделение энергии прекращается  $\Delta H_{298}|_{n=6.118} = 0$ .

Расчеты показывают [4], что для испарения 1 кг магния требуется обеспечить подвод энергии  $E_S \geq 7$  [МДж].

Согласно уравнению баланса энергии (4) показано, что такой подвод энергии в зону реакции возможен при ограничении поступления избыточной воды  $n < 3$ .

Согласно химической реакции (3) даже при ограничении поступления избыточной воды  $n < 3$  в двигатель должно будет поступать в 3.7 больший массовый расход воды, чем магния.

При таком режиме работы двигатель будет представлять собой генератор перегретого водяного пара, поскольку пар будет преимущественно составлять рабочую смесь, которую можно направить в реактивное сопло для создания тяги.

## Термодинамический расчет удельного импульса

Тяга ракетного двигателя находится по формуле [2]

$$P = \dot{m}U_i / g = \dot{m}Q_p, [H] \quad (5)$$

где  $U_i$  – теоретическая (идеальная) скорость истечения из сопла при полном расширении газа.

В термодинамике [5] скорость  $U_i$  определяется по формуле

$$U_i = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} R T_k \left[ 1 - \left( \frac{P_c}{P_k} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (6)$$

где  $R = 0.848$  [кгс м/(моль к)] – газовая постоянная продуктов сгорания;  $T_k$  – температура газов в камере сгорания;  $P_k$  – давление в камере сгорания;  $P_c$  – давление в окружающей среде;  $k$  – показатель адиабаты расширения газов в сопле.

Используя соотношения термодинамики формулу (6) для  $U_i$  можно записать в виде

$$U_i = \sqrt{2\Delta H \eta_T} \quad (7)$$

где  $\Delta H = \frac{k-1}{k} R T_k$  – тепловой эффект реакции топлива (4);  $\eta_T = 1 - \left( \frac{P_c}{P_k} \right)^{\frac{k-1}{k}} =$  – термический КПД идеального цикла расширения газов.

Коэффициент адиабаты  $\bar{k}$  для смешивания продуктов реакции ( $k(H_2)_G = 1.41$ ;  $k(H_2O)_G = 1.32$ ;  $k(MgO)_S = 1$ ) будет определяться как осредненное по массе значение, зависящее от избыточной воды -  $n$ .

$$\bar{k} = 1.2 \frac{1 + 0.336n}{1 + 0.3n} \quad (8)$$

Термический КПД -  $\eta$  с учетом (8) будет находиться по формуле

$$\eta_T = 1 - \left( \frac{P_c}{P_k} \right)^{0.166 \frac{1+0.518n}{1+0.336n}} \quad (9)$$

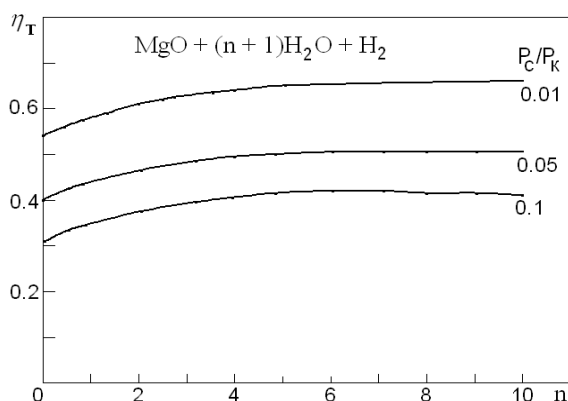


Рис. 1. Термический КПД  $\eta_T$  в зависимости от избыточной воды  $n$  и отношения давлений  $P_c/P_k = 0.01; 0.05; 0.1$

На рис. 1 показаны графики  $\eta_T(n)$  для  $P_c/P_k = 0.1; 0.05; 0.01$ , соответствующие формуле (9)

Идеальная скорость  $U_i$  истечения газов (6) с учетом (8) и (9) будет функцией только двух величин: избыточной воды  $u$  и расширения газов в сопле  $P_c/P_k$

$$U_i = \sqrt{2 \cdot 4500 \cdot \frac{1 - 0.1621 \cdot u}{1 + 0.3 \cdot n} \left[ 1 - \left( \frac{P_c}{P_k} \right)^{0.166 \frac{1+0.518n}{1+0.336n}} \right]} \quad (10)$$

Если определять тягу в Ньютонах, то удельный импульс  $I$  [Н сек / кг] будет определяться тем же выражением, что и идеальная скорость  $U_i$  [м/сек]

$$I = U_i = \sqrt{2\Delta H \eta_T} \quad (11)$$

В нашем случае, когда вода забирается за бортом, а полезный объем используется только для магния, удельный импульс следует увеличить на коэффициент обратный для магния  $1/k_{Mg}$  в исходной массе веществ реакции

$$k_{Mg} = \frac{m(Mg)}{m(Mg) + m2(H_2O) + mn(H_2O)} = \frac{1}{2.48 + n0.74} \quad (12)$$

С учетом соотношений (11), (12) получим выражение для удельного импульса

$$I = \sqrt{2\Delta H \eta_T} k_{Mg}^{-1} \text{ [Н·сек / кг]} \quad (13)$$

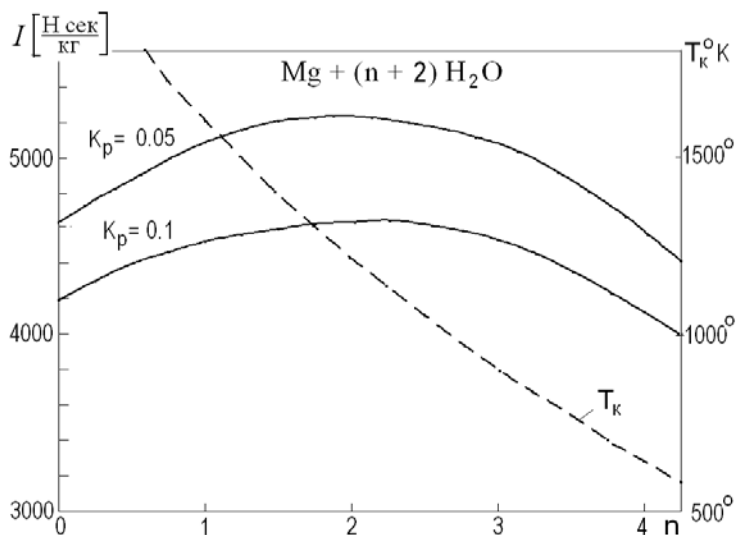
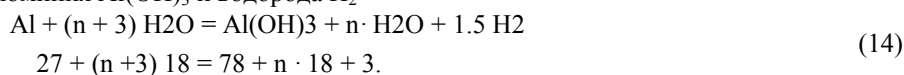


Рис. 2. Удельный импульс  $I$  [Н сек/кг] магния при реакции с водой  $Mg + (n+2)H_2O$  в зависимости от избыточной воды  $n$  и отношения давлений  $K_p = P_c/P_k = 0.1; 0.05$ . Пунктиром – показана температура в камере сгорания –  $T_k$  °K

На рис. 2 показаны зависимости удельного импульса  $I$  от избыточной воды  $n$  для отношения давлений  $P_c/P_k = 0.1; 0.05$  (13). Пунктиром показана зависимость температуры в камере сгорания  $T_k$  °K.

#### Термическая реакция $Al + H_2O$

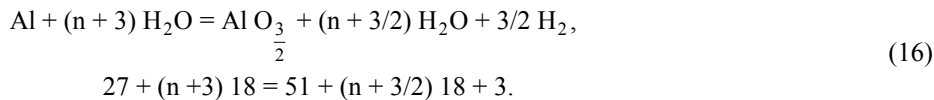
Алюминий имеет молекулярную массу  $M = 26,9$  относительную плотность  $\rho = 2,7$ , температуру плавления  $T_m = 933^\circ K$  и температуру кипения  $T_b = 2759^\circ K$ . Алюминий реагирует с водой по типу реакции "А" (1) с образованием гидроксида алюминия  $Al(OH)_3$  и водорода  $H_2$



Молекулярная масса продуктов реакции составит

$$M_m = 81 + n(18). \tag{15}$$

В водяном паре при  $T > 473^\circ \text{ К}$  гидроксид алюминия разлагается на оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и воду  $\text{H}_2\text{O}$  (тип реакции "B" (2))



Тепловой эффект реакции алюминия с водой может находиться между двумя типами реакции "A"(15) и "B" (16)

$$\begin{array}{l} \text{Al} + (n + 3)\text{H}_2\text{O} \\ 0 + (n + 3)(-285.84) \end{array} = \begin{array}{l} \text{"A"} \\ \text{"B"} \end{array} \left| \begin{array}{l} \text{Al(OH)}_3 + n \cdot \text{H}_2\text{O} + 1.5\text{H}_2 \\ (-1315) + n(-241.84) + 0 \\ 0.5\text{Al}_2\text{O}_3 + (n + 1.5)\text{H}_2\text{O} + 1.5\text{H}_2 \\ 0.5(-1669.8) + (n + 1.5) \cdot 241.84 + 0 \end{array} \right. \tag{17}$$

$$\Delta H(A) = 457.48 - n(44) \quad [\text{КДД} / \text{моль}] \tag{18}$$

$$\Delta H(B) = 340.14 - n(44) \quad [\text{КДД} / \text{моль}] \tag{19}$$

Уравнения теплового баланса реакций "A" и "B" (18), (19) указывают на максимальные количества избыточной воды при  $\Delta H = 0$

$$n_{\max}(A) = 10.3; \quad n_{\max}(B) = 7.7 \tag{20}$$

На рис. 3 показаны графики зависимостей термического КПД  $\eta_T$  в зависимости от избыточной воды  $n$  для реакции алюминия с водой по типу "A" и "B" при  $P_c / P_k = 0.033$

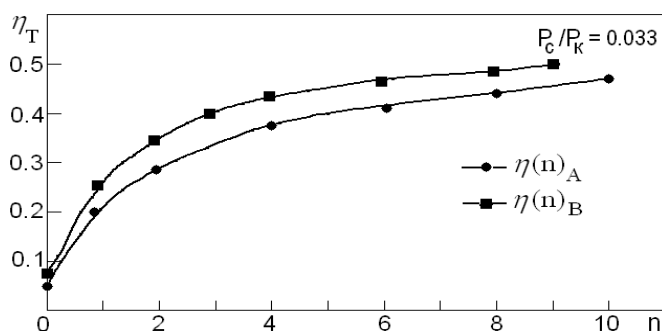


Рис. 3. Термический КПД  $\eta_T$  для реакции алюминия с водой в зависимости от избыточной воды  $n$  для отношения давлений  $P_c / P_k = 0.033$

$$\eta_T(A) = 1 - \left(\frac{P_c}{P_k}\right)^{0.0148 \frac{1+4.66n}{1+0.29n}}; \quad \eta_T(B) = 1 - \left(\frac{P_c}{P_k}\right)^{0.107 \frac{1+0.58n}{1+0.26n}} \tag{21}$$

На рис. 4 показаны зависимости удельного импульса  $I$  от избыточной воды  $n$ .

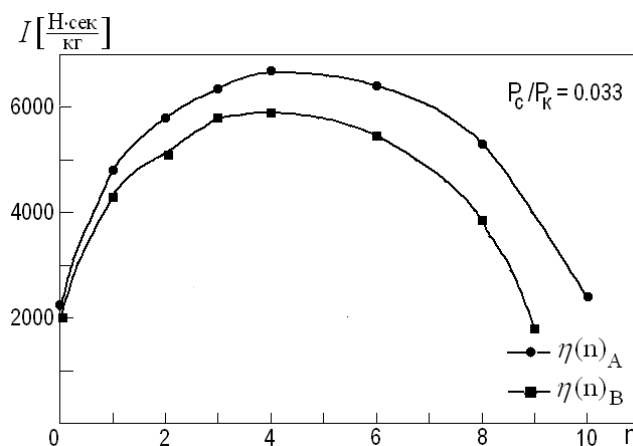


Рис. 4. Значения удельного импульса  $I$  для реакции алюминия с водой при  $P_c / P_k = 0.033$

Графики показывают, что максимальные значения импульса достигаются при определенных значениях избыточной воды  $n$

$$I(A)|_{n=4} = 6650 \left[ \frac{H \cdot \text{сек}}{\text{кг}} \right]; \quad I(B)|_{n=4} = 5890 \left[ \frac{H \cdot \text{сек}}{\text{кг}} \right].$$

$$I = \sqrt{(\Delta H|_{n=0} - n \cdot 44) 2\eta_T(n) M_m^{-1} \cdot 10^6 \left[ \frac{\text{м}^2}{\text{сек}^2} \right] \cdot k_{Al}^{-1} \left[ \frac{H \cdot \text{сек}}{\text{кг}} \right]} \quad (22)$$

где  $k_{Al}^{-1} = 3 + n \cdot 6.7$  – вес продуктов реакции в долях алюминия.

Эффективность применения металлического топлива на суперкавитирующих объектах можно оценить путем подстановки характеристик топлива –  $\rho_p$ ;  $I_p$ ;  $M_p$  в гидродинамические соотношения суперкавитационного движения [3, 4].

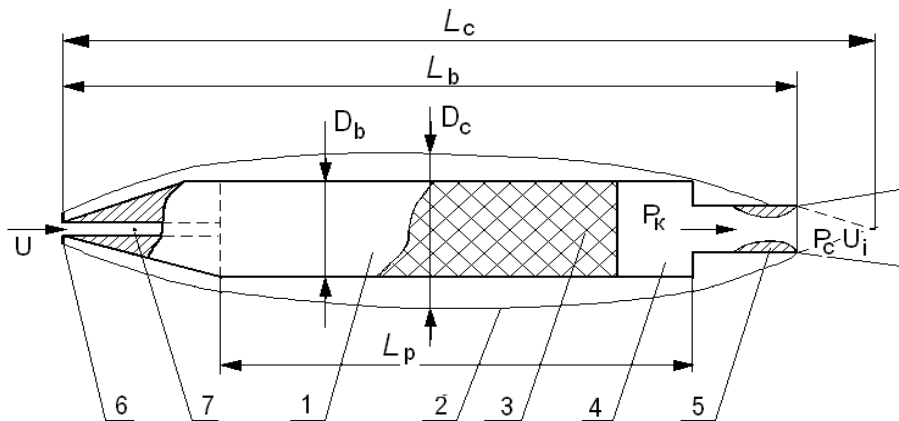
При постоянной скорости  $U = \text{const}$  дисковый кавитатор диаметра  $D_n = 2R_n$  образует суперкаверну в форме эллипсоида с полуосями  $R_c$ ;  $L_c/2$  (индекс происходит от латинского слова cavity – полость, каверна), в которой размещается корпус суперкавитирующего объекта рис. 5. Если корпус целиком размещается в каверне без замыва поверхности, то его сопротивление  $X$  будет определяться только сопротивлением кавитатора  $X_c$  и должно уравниваться тягой двигателя  $T$

$$X_c = C_x \frac{\rho U^2}{2} \pi R_n^2 = \sigma \frac{\rho U^2}{2} \pi R_c^2 = T \quad (23)$$

где  $C_x = 0.82(I + \sigma)$  – коэффициент сопротивления диска при суперкавитационном обтекании,  $S_n = \pi R_n^2$  – площадь поверхности кавитатора;  $\sigma = (P_0 - P_c) / (\rho U^2/2)$  – число кавитации;  $P_c$  – давление в каверне;  $S_c = \pi R_c^2$  – площадь миделя суперкаверны.

Использование суперкавитационной схемы обтекания рис. 5 накладывает формальные ограничения на размеры корпуса  $R_b$ ;  $L_b$  и его объем  $V_b$ , которые не могут превышать размеры  $R_c$ ;  $L_c$  и объем  $V_c$  используемой суперкаверны

$$R_b \leq R_c; \quad L_b \leq L_c; \quad V_b \leq V_c = \frac{2\pi}{3} L_c R_c^2 \quad (24)$$



**Рис. 5.** Схема суперкавитирующего аппарата с двигателем на гидрореагирующем металлическом топливе (ГРМТ):  
 1 – корпус аппарата; 2 – граница суперкаверны; 3 – металлическое топливо; 4 – камера сгорания; 5 – сопло; 6 – кавитатор; 7 – водозаборник для гидрореагирующего топлива

Следовательно подобные ограничения должны быть введены для объема используемого топлива  $V_p$

$$V_p = K_p V_c = K_p \frac{2}{3} \pi L_c R_c^2 \quad (25)$$

где  $K_p = V_p/V_c < 1$  – коэффициент использованного объема суперкаверны для топлива. Расчеты показывают, что для заряда цилиндрической круговой формы  $K_p \leq 0.58$  [3].

С учетом (23), (25) можно записать соотношение для оценки дальности хода  $S$

$$S = Ut = U \rho_p I_p \frac{V_p}{T} = \frac{4}{3} L_c \frac{I_p \rho_p K_p}{U \rho \sigma} \quad (26)$$

где  $I_p$  [Н·сек/кг] – удельный импульс топлива;  $\rho_p$  – плотность топлива;  $t = I_p V_p \rho_p / T$  – время работы двигателя.

Интересно отметить, что дальность движения зависит от трех безразмерных параметров, числители которых являются параметрами топлива, а знаменатели представлены гидродинамическими параметрами: скорость, плотность и число кавитации.

На рис. 6 для ряда гидрореагирующих металлов (ГРМ) Li, Mg, Al, Zr представлены максимальные значения достижимых параметров дальности  $S$  км, импульса  $I$  [КН·сек·дм<sup>-3</sup>] и потребления воды  $n$  [моль] при значениях установочных параметров:  $K_p = 0.5$ ;  $L_c = 9$ [м];  $\sigma = 0.02$ ;  $U = 100$  [м/сек]. В расчетах использованы формулы (26),(22),(20), Табл.1.

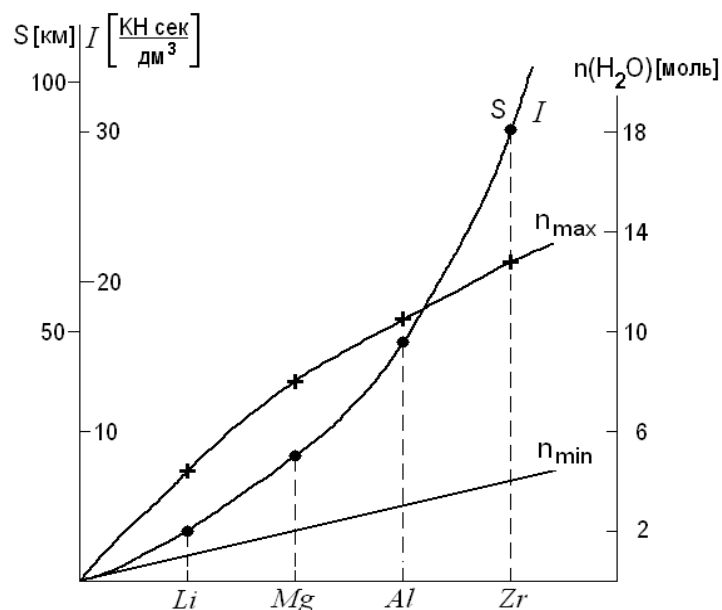


Рис. 6. Зависимости дальности  $S$  [км] удельного импульса  $I$  [КН·сек·дм<sup>3</sup>] и потребления воды для ряда ГРМТ при  $L_c = 9$  [м],  $K_p = 0.5$ ,  $U = 100$  [м/сек],  $\sigma = 0.02$ .  $n_{max}$  – число молей избыточной воды на 1 моль металлического топлива.  $n_{min}$  – стехиометрическое количество воды

## Выводы

1. Использование гидрореагирующего металла с большим атомным весом обеспечивает более высокие значения объемного удельного импульса и дальности хода для суперкавитирующих подводных аппаратов рис. 6. Так при переходе от лития Li с атомным весом 7 к цирконию Zr с атомным весом 91 дальность возросла в 9 раз от 10 км до 90 км при соответствующем возрастании объемного удельного импульса от 3.3 [КН·сек·литр<sup>-1</sup>] до 30 [КН·сек·литр<sup>-1</sup>].
2. Выполнены термохимические расчеты удельного импульса и термического КПД для различных количеств  $n$  избыточной воды при  $P_c/P_k = 0.01 \div 0.1$ .
3. Для алюминия Al и магния Mg определены оптимальные значения избыточной воды, при которых удельный импульс достигает максимального значения рис. 2; рис. 4.

**Анотація.** Розглядається ряд гідрореагуючих металів: літій Li, натрій Na, магній Mg, алюміній Al, цирконій Zr із зростаючою атомною вагою і щільністю стосовно двигунів суперкавітуючих апаратів. Аналізуються параметри термохімічної реакції металів з водою. Приводяться залежності питомого імпульсу і термічного ККД суміші газів, що витікають з сопла гібридного реактивного двигуна залежно від кількості надлишкової води. Показано, що із зростанням атомної ваги металевого палива в 13 разів при переході з літію Li на цирконій Zr дальність ходу зростає в 9 разів при відповідному зростанні об'ємного питомого імпульсу і сталих конструктивних і динамічних параметрах: швидкості, числі кавітації, габаритах і об'ємі палива. Визначені оптимальні значення надлишкової води для отримання максимального питомого імпульсу  $I$  [КН·сек/кг].

**Ключові слова:** гідрореагуюче паливо, горіння металів, суперкавітація, горіння у парі, гібридний реактивний двигун, металічне паливо.

**Abstract.** A number of hydroreactive metals, such as lithium Li, natrium Na, magnesium Mg, aluminum Al, zirconium Zr, with increasing atomic weight and density conformably to engines of supercavitating vehicles is considered. Parameters of a thermal-chemical reaction of the metals with water are analyzed. Dependencies of the specific impulse and thermal efficiency of a mixture of gases outflowing from a nozzle of a hybrid jet engine in dependence on water quantity are given. It is shown that with increasing the atomic weight of the metallic fuel in 13 times and changing the lithium Li onto zirconium Zr a range of motion is increased in 9 times with respective increasing the volumetric specific impulse and constant construction and dynamic parameters: velocity, cavitation numbers, fuel dimensions and its volume. Optimal values of excess water for obtaining the maximal specific impulse  $I$  [KN·sec/kg] are determined.

**Keywords:** hydroreactive metals, metal burning, supercavity, burning in vapor, hybrid ram jet, metal fuel.

### Бібліографічний список використаної літератури

1. Leonard Grainer. Underwater Missile Propulsion. Compass Publ. Inc. VA. 1967 - 280 с.
2. Івченко В.И., Григорьев В.А., Приходько Н.А. Оптимальные гидрореактивные системы. Красноярский Университет. Красноярск. 1985 – 218 с.
3. Savchenko Yu. N. Supercavitating object propulsion. RTO AVT/VKI. Special courses no Supercavitating Flows. Brussels. - 2001. - С. 6.1 - 6.25
4. Савченко Ю.Н. Исследование суперкавитирующих течений. Прикладная гидромеханика. Т. 9, № 2 – 3. – 2007 С. 150 - 158
5. Гороновский И.Т. Краткий справочник по химии. Киев. Наукова думка. -1974 - 991 с.
6. Jianxim Hu, Chao Han at all Experimental Investigation on combustion of high-metal magnesium based hydroreactive fuels., AIAA, Journal of Propulsion and Powers, Том 29. №3, Май-Июнь 2013, с. 692-698.
7. Alexander D. Lewis. Gas Power Dynamics.– D. Yan Nostrand Company Inc. - Princeton: New Jersey, - 1962 - 535 с.

### References

1. Grainer Leonard (1967), *Underwater Missile Propulsion*. Arlington, VA. Compass Publications.
2. Ivchenko, V.I., Grigor'ev, V.A. and Prihod'ko, N.A. (1985), *Optimal'nye gidroreaktivnye sistemy*, Krasnojarskij Universitet, Krasnojarsk, Russia.
3. Savchenko, Yu. N. (2001), *Supercavitating object propulsion*. Brussels, RTO AVT/VKI. Special courses on Supercavitating Flows, pp.6.1 - 6.25
4. Savchenko, Yu.N. (2007), 'Issledovanie superkavitirujushih techenij'. *Prikladnaja gidromehaniка*. vol. 9, no. 2-3, Naukova dumka, Kiev, Ukraine, pp. 150 – 158
5. Goronovskij, I.T., Nazarenko, Ju.P. and Nekrjach, E.F. (1974), *Kratkij spravochnik po himii*, Naukova dumka. Kiev, Ukraine.
6. Jianxim, Hu, Chao, Han (2013), Experimental Investigation on combustion of high-metal magnesium based hydroreactive fuels, AIAA, *Journal of Propulsion and Powers*, vol. 29. No 3, pp. 692-698
7. Alexander, D. Lewis (1962), *Gas Power Dynamics*, D. Yan Nostrand Company Inc., Princeton, New Jersey

Подана до редакції 23.03.2015