

УДК 621.54:629.12.03

Просьянок В.В.  
АМИ ОНМА

## **ПНЕВМАТИЧЕСКОЕ АККУМУЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ГИДРОРЕАКТИВНОГО ЭЖЕКЦИОННОГО ДВИЖИТЕЛЯ**

Международное судоходство является причиной около 3 % мировых объёмов выбросов парниковых газов, и, по данным ИМО, эта доля может увеличиться до 18 % к 2050 году. Евросоюз ради предотвращения климатических изменений намерен предложить мировому сообществу сократить к 2020 году на 10 % (к уровню 2005 года) выброс углекислого газа самолётами авиакомпаний и на 20 % – морским транспортом [1].

Как и другие технологии, не использующие сжигание топлива, использование транспортных средств на сжатом воздухе позволяет уменьшить выбросы через выхлопные трубы, или переместить их на централизованные электростанции или на ветроэлектростанции [2], что значительно уменьшает и облегчает процесс утилизации этих выбросов. Несмотря на то, что первые попытки оснастить морской транспорт двигателем, работающим на сжатом воздухе, предпринимались ещё в начале позапрошлого века, дальше нескольких прототипов дело до сих пор не заходило. Задача уменьшения выбросов углекислого газа в судоходстве применением энергии сжатого воздуха актуальна, в связи с этим нами было предложено продолжить исследование по данному направлению.

Цель работы – оценка возможности применения гидрореактивного эжекционного движителя (ГЭД) для плавсредств работающих на использовании энергии пневматического аккумулирования, определение расхода сжатого воздуха и показателей энергоэффективности.

Первым морским транспортом на сжатом воздухе была военная субмарина. В апреле 1863 года была спущена на воду французская подводная лодка «Plongeur» [3]. Это была первая в мире субмарина, которая имела механический привод гребного винта, мощностью 60 кВт и автономностью плавания 9 км. Преобразование энергии сжатого воздуха накопленной в баллоне высокого давления в механическую энергию вращения винта происходило в поршневой машине. Использование пневматического аккумулирования возможно также в воздушных турбинных установках [4]. Применение пневматического аккумулирования в судоходстве позволяет исключить применение

главного двигателя сжигающего топливо и соответственно снизить до 70 % выбросов газов в атмосферу. В перспективе возможно применение плавсредств с установками, работающими на сжатом воздухе и оснащёнными солнечными батареями, которые вообще не производят выбросы и не используют при этом ядерного топлива.

Известно применение гидрореактивных движителей, работающих на принципе использования энергии сжатого газа. Еще с прошлого века исследовалось использование сжатого воздуха или другого газа для ускорения потока воды. Предложено много конструктивных разновидностей гидрореактивных движителей, однако большинство из них находилось в стадии лабораторных исследований. В гидрореактивных двигателях ускорение потока и, следовательно, реактивная тяга создаются в результате подачи в поток воды (внутри движителя) сжатого холодного газа или вследствие подвода тепла с образованием парогазоводяной смеси [5]. Характерная и положительная особенность гидрореактивных движителей – отсутствие валопровода и механического рабочего устройства. Наиболее перспективным направлением считается применение прямоточного движителя, исследованием которого были заняты многие специалисты [6]. Показано, что внутренний КПД прямоточных газоводометных движителей уже при скоростях судна 30÷40 узлов может достигать – 0,5. Однако при меньших скоростях вследствие тепловых потерь, возникающих при подаче газа в воду, и внешнего сопротивления трубы этот коэффициент не превышает 0,3. Кроме того, недостатком прямоточных движителей является то, что они создают приращение количества движения (упор) лишь в движущемся потоке воды, когда судно уже имеет ход, сообщаемый ему стартовым двигателем.

В данной статье производится оценка возможности применения гидрореактивного эжекционного движителя работающего на использовании пневматического аккумулирования.

Для использования преимуществ пневматического аккумулирования необходимо решить ряд технических трудностей. Системы пневматического аккумулирования для водных транспортных средств ограничиваются применением короткого времени транспортировки и очень высокой мощностью разряда. Кроме того, при расширении воздуха в ГЭД с давления аккумулирования до атмосферного, возможно выпадение влаги и даже обмерзание воздуховодов.

Для повышения удельной мощности установки и предотвращения выпадения влаги необходимо подогреть воздух перед ГЭД. Осуществить это можно несколькими способами:

- подогрев на береговой компрессорно-заправочной станции с последующим хранением в теплоизолированных баках;
- подогрев за счёт утилизации теплоты, например выхлопными газами вспомогательного ДВС;
- подогрев за счёт теплоты окружающего воздуха или забортной воды.

На рис. 1 представлен термодинамический цикл с «горячим» запасом и подогревом выхлопными газами дизель-генератора. Применение «горячего» запаса и подогрева позволяет повысить температуру воздуха перед ГЭД в пределах необходимых для обеспечения в конце процесса температуры близкой к температуре забортной воды и обеспечить минимальные потери.

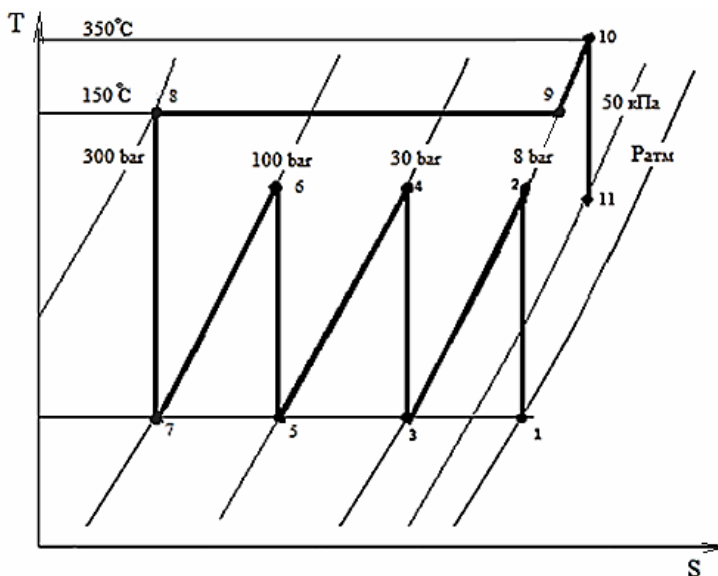


Рис. 1. Цикл в T-S диаграмме установки с ГЭД:

процесс 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8 – сжатие воздуха в ступенях компрессора; 2-3, 3-4, 4-5, 5-6 – промежуточное охлаждение; 8-9 – дросселирование; 9-10 – подогрев; 10-11 – расширение воздуха.

С целью использования пневматического аккумулирования для гидрореактивных движителей разработана упрощённая структурная схема (рис. 2) судовой энергетической установки (СЭУ) с ГЭД.

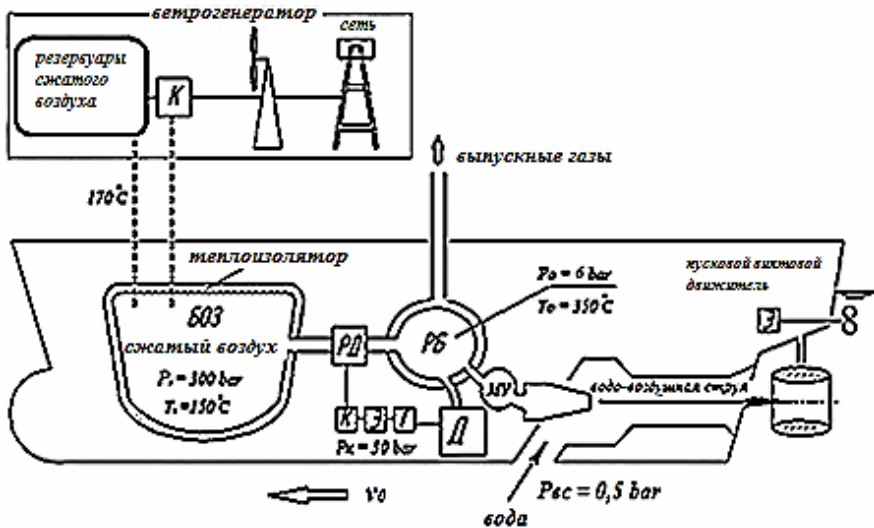


Рис. 2. Структурная схема СЭУ с ГЭД.

СЭУ с ГЭД работает следующим образом. С компрессорной станции закачивается горячий сжатый воздух в баллон основного запаса (БОЗ). Для уменьшения потерь тепла БОЗ теплоизолирован. Далее воздух поступает через редуктор давления (РД) где уменьшается давление до необходимого значения в расходный баллон (РБ). В расходном баллоне происходит подогрев воздуха выпускными газами от работающего дизеля (Д) с генератором (Г). Далее воздух поступает в маневровое устройство (МУ) которое регулирует расход сжатого воздуха. Преобразование потенциальной энергии сжатого воздуха в кинетическую энергию производится в специальном сопле. В результате в движитель выбрасывается сильная струя сжатого воздуха, которая засасывает воду и выбрасывается через конфузур с большей скоростью, создавая упор в сторону обратную хода судна. Для набора скорости и в случае аварийного выхода из строя ГЭД используется винтовой движитель с приводным электродвигателем (Э) питаемым от дизель-генератора.

В СЭУ с ГЭД возможно пополнение сжатого воздуха компрессором (К) с давлением и расходом достаточным для минимальной скорости судна.

Для определения целесообразности применения ГЭД необходимо определить возможную мощность установки, удельный расход рабочего воздуха и размеры БОЗ и КПД СЭУ.

Судовой движитель получает энергию от струи сжатого воздуха, которая выбрасывает массу воды с высокой скоростью и может определяться произведением [7]:

$$N_e = P_e \cdot v_0, \text{Вт} \quad (1)$$

где  $v_0$  – скорость движения судна относительно воды, м/с (принимаем 12миль/ч (5,36м/с));  $P_e$  – полезная тяга комплекса движитель-корпус [5]:

$$P_e = \frac{Q}{g}(v_2 - v_0), \text{Н} \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $v_2$  – скорость истечения струи можно принять критической [8]:

$$v_2 = 1,08\sqrt{R \cdot T}, \text{м/с} \quad (3)$$

где  $R$  – удельная газовая постоянная воздуха (287), Дж/кг.К;  $T$  – температура (623), К.

Расход жидкости в движителе можно определить по уравнению постоянства массового расхода вдоль канала [5]:

$$Q = \rho \cdot F_p \cdot v_c, \text{кг/с} \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность забортной воды (1025кг/м<sup>3</sup>);  $F_p$  – площадь диска движителя, м<sup>2</sup> (принимаем 0,05м<sup>2</sup>);  $v_c$  – средняя скорость выталкиваемой воды в движителе, которую можно определить как скорость низконапорного потока в эжекторе [8]:

$$v_c = \sqrt{2(i_{10} - i_{11})}, \text{м/с} \quad (5)$$

где  $i_{10}$  – энтальпия начала расширения воздуха, кДж/кг (рис. 3);  $i_{11}$  – энтальпия конца расширения воздуха.

Для уменьшения потерь на гидравлическое сопротивление внешнего прямооточной насадки применяем в СЭУ гидрореактивный движитель эжекционного типа (рис. 3). Данный движитель работает на принципе засасывания воды с выходным диффузором для снижения скорости с целью повышения КПД [5].

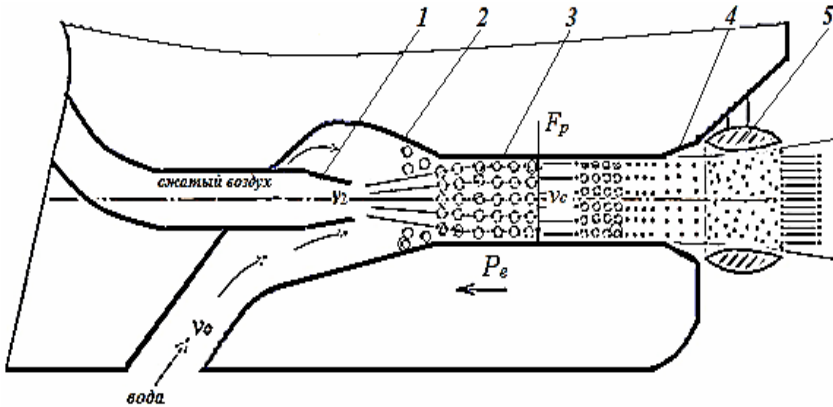


Рис. 3. Гидрореактивный эжекционный движитель:

1 – сопло; 2 – камера всасывания; 3 – камера смешения двух потоков; 4 – выходной диффузор; 5 – рулевая насадка.

Энтальпию воздуха в начале и в конце расширения можно определить по известной методике [9]:

$$J = 1,006 \cdot t + (2500,64 + 1,86 \cdot t) \frac{d}{1000}, \text{кДж/кг} \quad (6),$$

где  $t$  – температура воздуха, °С (для  $i_{10} = 350$ ,  $i_{11} = 200$ );  $d$  – влаго-содержание воздуха, г/кг (для  $i_{10} = 100$ ,  $i_{11} = 15$ ).

Согласно расчёта мощность ГЭД с принятой площадью диска движителя  $F_p = 0,05 \text{ м}^2$ , составляет 442 кВт.

Расход рабочего воздуха для получения данной мощности можно определить как [8]:

$$M = 0,687 F \sqrt{\frac{P_1}{v_1}}, \text{кг/с} \quad (7)$$

где  $P_1$  – давление перед соплом, (600000Па);  $v_1$  – удельный объем, который можно определить:

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{P_1}, \text{м}^3/\text{кг} \quad (8)$$

где  $T_1 = 623\text{К}$ ;

Площадь отверстия истечения равна:

$$F = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4}, \text{м}^2 \quad (9)$$

где диаметр сопла [10]:

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot Q / u}{\rho \cdot \pi \cdot \varphi_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p_p / \rho_e}}}, \text{ м} \quad (10)$$

где  $\varphi_1$  – коэффициент скорости принимаем 0,95; коэффициент эжекции принимаем  $u = 8$  [11];  $\Delta p_p$  – перепад давления в сопле, (550000Па);  $\rho_e$  – плотность воздуха,  $1,1 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Согласно расчёту расход рабочего воздуха данного ГЭД при диаметре сопла – 0,03м, будет равен 0,68 кг/с. Часовой расход сжатого воздуха  $b_e = 2448 \text{ кг/ч}$ .

Масса газа, расходуемая для перемещения плавсредства на расстояние  $L$  (10миль) и со скоростью  $v_0$  (12миль/ч), можно определить по формуле:

$$M = \frac{b_e \cdot L}{v_0}, \text{ кг} \quad (11)$$

Подставляем исходные данные, получаем расходуемую при переходе массу сжатого воздуха – 2040 кг.

Зная массу можно определить объём расходуемого воздуха исходя из предположения, что плотность газа в конце струи приблизится к атмосферному давлению при температуре  $20^\circ\text{C}$  ( $1,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ ). Принимая значения давления и температур в БОЗ и РБ, можем определить объём баллонов основного запаса при объёме РБ:

$$V_0 = \frac{P \cdot V \cdot T_0}{P_0 \cdot T}, \text{ м}^3 \quad (12)$$

где  $P = 300 \text{ бар}$ ;  $T_0 = 423 \text{ К}$ ,  $V = 0,5 \text{ м}^3$ .

Объём БОЗ необходимый для перехода судна с мощностью ГЭД  $N = 442 \text{ кВт}$  на расстояние 10миль составит  $33,24 \text{ м}^3$ . Например, это резервуар диаметром 2 м и длиной 10,6 м. Применение большей мощности ГЭД потребует увеличение размеров БОЗ, что связано с технологическими трудностями изготовления габаритных баллонов высокого давления.

Коэффициент полезного действия гидрореактивного эжекционного движителя в основном зависит от КПД струи [5]:

$$\eta_o = \frac{P_e \cdot v_0}{\rho \cdot Q \cdot g \cdot H} \quad (13)$$

где  $H$  – напор, м ( $0,5 \text{ м}$ );  $\rho$  – плотность забортной воды смешанной с воздухом ( $125 \text{ кг/м}^3$ ).

Согласно расчета КПД ГЭД равен 0,4. С учётом потерь реальный КПД для расчёта эффективности СЭУ с ГЭД принимаем равным 0,37. Из формулы видно, что  $\eta_\delta$  возрастает с увеличением скорости судна, однако это потребует увеличение количества прокачиваемой воды, что влечет за собой возрастание расхода рабочего воздуха.

КПД СЭУ с ГЭД при многоступенчатом сжатии и одноступенчатым расширением с учётом КПД двигателя  $\eta_\delta$  и КПД ступеней сжатия компрессора  $\eta_k$  можно определить, как отношение работ, по формуле:

$$\eta_{ГЭД} = \frac{\eta_\delta \cdot m_{рас} \cdot R \cdot T_{1p} \left[ 1 - \pi_{рас}^{-m_{рас}} \right]}{\sum_1^n m_{сж} \cdot R \cdot T_{1с} \left[ \pi_{сж}^{m_{сж}} - 1 \right]} \cdot \frac{1}{\eta_k} \quad (14)$$

Значение КПД при 4-х ступенчатом сжатии с  $\pi_{сж}=4,2$ ;  $m_{сж}=0,285$ ;  $m_{рас}=0,285$ ;  $\pi_{рас}=12$ ;  $\eta_\delta=0,37$ ;  $\eta_k=0,7$   $T_{1сж}=293\text{К}$ ;  $T_{1p}=623\text{К}$  имеет довольно низкую величину – 0,137. На рис. 4 показаны зависимость КПД ГЭД от температуры и степени расширения воздуха.

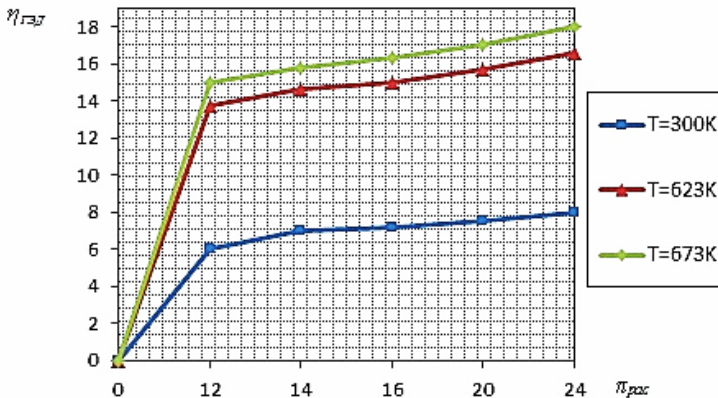


Рис. 4. График КПД СЭУ с ГЭД.

Анализ графика показывает, что для повышения КПД СЭУ с ГЭД необходимо увеличивать температуру воздуха перед соплом и степень расширения  $\pi_{рас}$ . Учитывая такой низкий КПД производить сжатый воздух на плавсредстве нецелесообразно. Однако следует заметить, что в данной энергетической установке используется пневматическое аккумулирование, т.е. затраты энергии на сжатие и охлаждение вынесены за пределы судна. На стационарной компрес-



сорной станции есть возможность использовать альтернативные источники энергии, тепловое аккумулирование и другие способы уменьшения потерь.

#### *Выводы*

1. При определённых условиях СЭУ с ГЭД может быть конкурентной двигательной установкой малых плавсредств (дедвейт не более 1000 т.) с невысокой автономностью плавания (менее 50 миль), позволяющая на 70÷80 % снизить выбросы CO<sub>2</sub> по сравнению с традиционными двигателями.
2. Низкая эффективность СЭУ связана с большими затратами энергии при сжатии, нагреве рабочего тела, тепловых потерь, возникающих при подаче газа в воду.
3. Повышение КПД СЭУ с ГЭД до 30 % может быть достигнуто путём использования с аккумулированной в процессе сжатия теплоты и нагрева рабочего тела забортной водой.
4. Диапазон применения СЭУ с ГЭД использующую пневматическое аккумулирование ограничен малой автономностью плавания и небольшими мощностями установки. Тем не менее, это плавсредства, которые могут работать в портовых акваториях, на реках, каналах, где существуют повышенные требования к выбросам. Например, это паромные катера, рейдовые катера, речные трамваи, суда экологического направления, бункеровщики, сборщики, плавучие краны.

#### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. DPD запускает программу по сокращению выбросов углекислого газа.- Режим доступа: <http://www.trans-port.com.ua/index.php?newsid=37082>.\_ Загл. с экрана.
2. Мокін Б.І. Екологічні та економічні аспекти створення повітряних акумулюючих електростанцій / Б.І.Мокін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – №5. – С.95 – 103.
3. «Plongeur» французская подводная лодка // Википедия.- Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Plongeur>.\_ Загл. с экрана.
4. Просянок В.В. Оценка эффективности применения пневматического аккумулирования в качестве рабочего тела судовых турбоагрегатов / В.В. Просянок, В.М. Житаренко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – Херсон: ХДМА, 2013. – № 1(8). – С. 54 – 61.

5. Куликов С.В. Водомётные движители (теория и расчёт) / С.В. Куликов, М.Ф. Храмкин. – 3е изд. перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1980. – 312 с.
6. Движители быстроходных судов / М.А. Мавлюдов, А.А. Руседский, Ю.М. Садовников, Э.А. Фишер. – 2е изд. перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1982. – 280 с.
7. Папир А.Н. Водомётные движители морских судов / А.Н. Папир – Л.: Судостроение, 1970. – 256 с.
8. Ханик Я.М. Энергозбереження. Ч.1. Темодинаміка: Навчальний посібник / Я.М. Ханик, Я.М. Гнатишин Я.М. – Львів: Афiша, 2004. – 205 с.
9. Бурцев С.И. Влажный воздух. Состав и свойства: учебное пособие / С.И. Бурцев, Ю.Н. Цветков. – СПб.: ГАХПТ, 1998. – 146 с.
10. Лямаев Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б.Ф. Лямаев. – Л.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
11. Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов. – 3е изд. перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.