

являться самостоятельной перспективной научной и практической задачей. В рамках данной статьи подобная методика не рассматривалась.

В результате проделанной работы автором предложена и подробно описана методика прогнозирования долговечности судового гребного вала. Данная методика позволяет определить продолжительность начальной стадии его усталостного разрушения (до возникновения макротрещины) в зависимости от условий эксплуатации. При конкретизации параметров нагружения и режимов работы, методика позволит оценить наработку гребного вала судна в целях обеспечения безопасности мореплавания.

#### Литература

1. Чура М.Н. К оценке усталостной прочности материалов судовых валопроводов // Эксплуатация морского транспорта – 2019. – № 4 (93). с. 115 – 122.
2. Чура М.Н., Файвисович А.В. К оценке эксплуатационного ресурса судовых гребных валов // Эксплуатация морского транспорта – 2020. – № 3 (96). с. 123 – 127.
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир. – 1979. – 390 с., ил.
4. Победра Б.Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Изд-во МГУ. – 1995. – 366 с.
5. Яценко В.С. Эксплуатация судовых валопроводов. – М.: Транспорт – 1968. – 171 с.
6. Файвисович А.В. Прогнозирование усталостного разрушения конструкционных элементов. Диссертация доктора техн. наук. – Новороссийск, 1996. – 346 с.

7. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4 т. / Под общей ред. Панасюка В.В. Т. 3: Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения / Ковчик С.Е., Морозов Е.М. – Киев: Наук. думка, 1988. – 436 с.

#### Литература

1. Чура М.Н. К оценке усталостной прочности материалов судовых валопроводов // Эксплуатация морского транспорта – 2019. – № 4 (93). с. 115 – 122.
2. Чура М.Н., Файвисович А.В. К оценке эксплуатационного ресурса судовых гребных валов // Эксплуатация морского транспорта – 2020. – № 3 (96). с. 123 – 127.
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир. – 1979. – 390 с., ил.
4. Победра Б.Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Изд-во МГУ. – 1995. – 366 с.
5. Яценко В.С. Эксплуатация судовых валопроводов. – М.: Транспорт – 1968. – 171 с.
6. Файвисович А.В. Прогнозирование усталостного разрушения конструкционных элементов. Диссертация доктора техн. наук. – Новороссийск, 1996. – 346 с.
7. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4 т. / Под общей ред. Панасюка В.В. Т. 3: Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения / Ковчик С.Е., Морозов Е.М. – Киев: Наук. думка, 1988. – 436 с.

УДК 629.5.017

DOI: 10.34046/aumsuomt98/13

## ПОВЫШЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРА РУЛЯ СУДНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ

*Д.И. Осовский, кандидат технических наук, доцент,  
А.С. Шаратов, кандидат технических наук, доцент  
А.Н. Горбенко, кандидат технических наук, доцент  
С.Х. Шмелев, кандидат технических наук, доцент*

Проблема снижения маневренности при понижении скорости хода является актуальной для современных транспортных судов. Необходимость маневра при малой скорости хода, характеризующейся пониженной боковой силой пера руля требует достижения предельных углов отклонения рулевой поверхности, что в свою очередь приводит к срыву потока и относительному уменьшению поворачивающего момента. Известны различные методы повышения подъемной силы на пера руля, одним из которых является метод управления пограничным слоем, хорошо зарекомендовавший себя в авиации, и предназначенный для ускорения и плавного обтекания засасывающей поверхности пера руля. В системах управления пограничным слоем, основной эффект образуется за счет обеспечения плавного ускоренного течения жидкости на руле, без отрыва потока, что определяется максимумом эффективности вылива жидкости, необходимой для создания плавного обтекания, а также повышения циркуляции скоро-

сти вокруг пера руля. В работе выполнено численное моделирование и расчет гидродинамических характеристик пера руля транспортного судна дедвейтом 65 тысяч тонн с управлением пограничным слоем и циркуляцией скорости относительно пера руля. Выполнено численное моделирование и расчетное определение гидродинамических характеристик пера руля при различных вариантах размещения целевой насадки и параметрах дополнительно подаваемой воды. Проанализирована эффективность использования рулевой поверхности в эксплуатационном диапазоне отклонения пера руля с выливом струй на засасывающую поверхность профиля, а также выливом струй жидкости с задней кромки руля под некоторым углом к хорде профиля. Определены дальнейшие направления и диапазоны возможного изменения параметров при применении систем активного управления обтеканием руля. Повышение гидродинамических характеристик пера руля судна способствует повышению его эффективности, как на малых скоростях движения судна, так и на проектных режимах движения судна.

**Ключевые слова:** пограничный слой, безотрывное обтекание, эффект суперциркуляции, система управления циркуляцией, система управления пограничным слоем, обтекание руля, гидродинамические характеристики.

## INCREASING OF HYDRODYNAMIC DESCRIPTIONS OF SHIP'S RUDDER WITH THE USE OF BOUNDARY LAYER CONTROL SYSTEM

*D.I. Osovskii, A.S. Sharatov, A.N. Gorbenko, S.K. Shmelev*

The problem of reducing maneuverability with a reduced speed is relevant for modern transport vessels. The need to maneuver at a low speed, characterized by a reduced lateral force of the rudder blade, requires reaching the limiting angles of deflection of the steering surface. Thereby it leads to a flow separation and a relative decrease in the turning moment. There are various methods of increasing the lift force on the rudder, one of which is the boundary layer control method. It has proven itself in aviation and is designed to accelerate and ensure smoothly flow around the suction surface of the rudder blade. In boundary layer control systems, the main effect is formed by ensuring a smooth accelerated flow of fluid on the rudder, without separation of the flow. It is determined by the maximum efflux efficiency required to create a smooth flow around, as well as increase the circulation of speed around the rudder blade. In the article, numerical modeling and calculation of the hydrodynamic characteristics of the rudder blade of a transport vessel with deadweight of 65 thousand tons with boundary layer control and velocity circulation relative to the rudder blade have been performed. Numerical modeling and computational determination of the hydrodynamic characteristics of the rudder blade were carried out for various options for the placement of the narrow nozzle and the parameters of the additional inlet water. The efficiency of using the steering surface in the operating range of the rudder blade deflection with the outflow of jets onto the suction surface of the airfoil, as well as the outflow of liquid jets from the trailing edge of the control surface at a certain angle to the airfoil chord is analyzed. Further directions and ranges of possible changes in parameters when using active control systems for the rudder flow have been determined. An increase in the hydrodynamic characteristics of a vessel's rudder blade contributes to an increase in its efficiency, both at low speeds and at the design modes of the vessel's movement.

**Key words:** boundary layer, continuous flow, supercirculation effect, jet pulse coefficient, circulation control system, boundary-layer control system, rudder flow, rudder efficiency, hydrodynamic characteristics.

### Введение

Возможность реализации задач, поставленных перед транспортной отраслью стратегией развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года, существенно зависит от конкурентоспособности морского транспорта. Задача повышения эффективности эксплуатации судна, в рамках данной стратегии, может быть решена путем совершенствования мореходных качеств, в первую очередь их динамической части: управляемости и ходкости. На данные показатели существенное влияние оказывает тип и конструкция рулевого устройства, взаимодействующего со струей, отбрасываемой гребным винтом и существенно влияющим на такие показатели, как маневренность судна и устойчивость на курсе [1]. Современные судовые системы управления курсом работают, как правило, в зависимости от отклонения руля направления, что вызывает большие отклоняющие моменты и увеличение рыскания по курсу судна. Для поддержания движения судна на курсе необходимо осуществлять частые

перекладки руля. Даже если судно устойчиво на курсе, то при малейших возмущающих воздействиях необходимо осуществлять перекладки руля на малые углы для стабилизации движения. Кроме того, на малых скоростях маневрирования судна эффективность работы руля понижена. Все это приводит снижению эффективности эксплуатации судна, которая выражается в увеличении расхода топлива на милю пройденного пути для главных двигателей и к дополнительному расходу электроэнергии на привод насосов рулевой машины. В свою очередь, расход электроэнергии влечет за собой увеличение расхода топлива на работу дизель-генераторов.

В акватории порта, при прохождении узостей судну необходима повышенная маневренность. Иногда необходимо осуществлять маневрирование даже при нулевой скорости хода.

На рисунке 1,а показана наиболее распространенная компоновка винто – рулевого комплекса судна, где в качестве пера руля применяется симметричный аэродинамический профиль,

имеющий одинаковые гидродинамические показатели при положительных и отрицательных углах атаки. За счет симметричности конструкции

рулевой поверхности достигается удобство проектирования и «равенство» управления (левый – правый борт) [2].

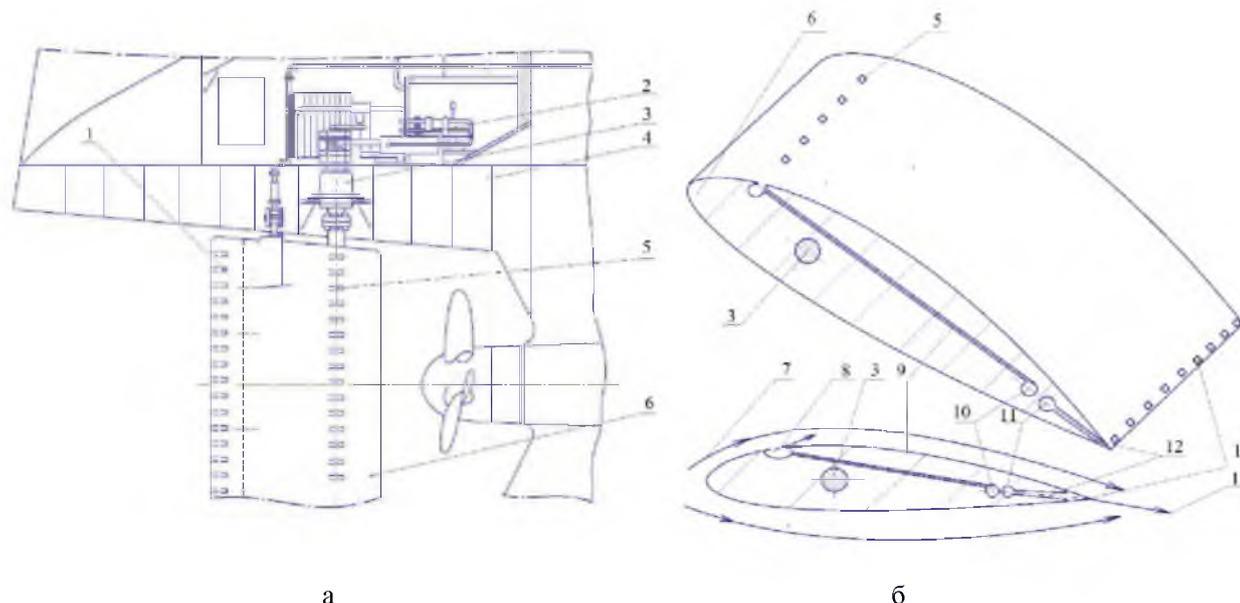


Рисунок 1 – Схема винто-рулевого комплекса судна (а) и элементы системы управления пограничным слоем пера руля (б): 1 – сопла подачи струи воды с задней кромки; 2 – рулевая машина; 3 – баллер руля; 4 – корпус судна; 5 – сопла подачи струи на засасывающую поверхность профиля; 6 – перо руля; 7 – поток обтекающий перо руля; 8 – дополнительный поток воды, подаваемый на боковую поверхность пера руля; 9, 12 – каналы подвода дополнительной воды к соплам; 10, 11 – поперечные коллекторы дополнительной воды; 13 – дополнительный поток воды, подаваемый с концевой кромки профиля пера

В научных публикациях [3-7] исследованы технические решения и методы, позволяющие повысить эффективность использования рулевой поверхности в задачах устойчивости на курсе и повышения маневренности. Основным недостатком предлагаемых вариантов [4– 7] является необратимый характер воздействия на поток при изменении режимов работы судна и свойств набегающего потока. Устройства не способны адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации. При этом недостаточное внимание уделяется возможности целенаправленного создания дополнительной подъемной силы, нашедшей применение в смежных областях аэродинамики и гидродинамики [8].

Системы управления пограничным слоем в аэродинамике [9-12], основанные на применении отсоса пограничного слоя и его сдува, обеспечивают безотрывное обтекание профиля при больших углах атаки крыла и больших углах отклонения закрылков без существенных затрат энергии. Струйный закрылок увеличивает подъемную силу крыла главным образом за счёт эффекта суперциркуляции и вертикальной составляющей реакции струи [13].

Цель работы – выполнить анализ эффективности применения систем управления погра-

ничным слоем для повышения гидродинамических характеристик пера руля с целью совершенствования маневровых качеств судна.

### 1. Физический эффект систем управления пограничным слоем

Система управления пограничным слоем (УПС) предназначена для ускорения и плавного обтекания жидкостью руля за счет дополнительного ускорения потока жидкости.

Подача струй жидкости производится из плоских разрезных отверстий (сопел) вдоль профиля руля с увеличенной скоростью [14], обеспечивающей плавное обтекание. Жидкость, т. е. забортная вода или пресная, подается насосами.

При выливе жидкости на засасывающую поверхность отклоненного на определенный угол руля (рис. 1, поз. 5) улучшается безотрывное обтекание его поверхности, в том числе и на предельных отклонениях. За счет интенсивного вылива жидкости из задней кромки (рис. 1, поз. 1) улучшение гидродинамических характеристик пера (увеличение коэффициента максимальной подъемной силы и критического угла отклонения руля) [8].

На рисунке 2 показаны зоны расположения щелевой насадки для подачи дополнительной струи воды на перо руля при реализации системы УПС и система управления циркуляцией.

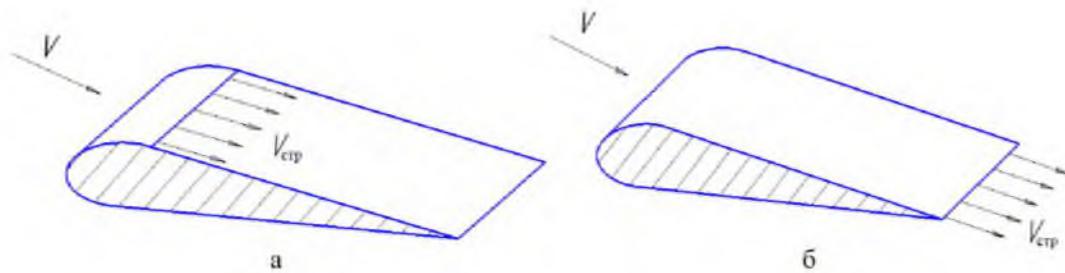


Рисунок 2 – Расположение целевой насадки, обеспечивающие вылив жидкости со скоростью при реализации системы управления пограничным слоем на засасывающей поверхности руля (а) и системы управления циркуляцией на задней кромке профиля (б):  $V$  – скорость потока, набегающего на перо руля;  $V_{стр}$  – скорость дополнительной струи воды, подаваемой через целевую насадку

При реализации системы УПС (рис. 2, а) основной эффект [13] образуется за счет обеспечения плавного ускоренного течения на руле, что определяется максимумом интенсивности вылива жидкости, необходимого для создания плавного обтекания при высоких скоростях. Система управления циркуляцией (рис. 2, б) создает приращение подъемной силы за счет создания более плавного обтекания руля, при ускоренном подаче выливаемой струи жидкости [15]. За счет дополнительной скорости обтекания возрастает дополнительная циркуляция скорости, что дает увеличение гидродинамической нагрузки на руле по сравнению с обычным обтеканием [8]. Максимальная боковая сила от руля судна достигается при максимальной разнице в давлениях на засасывающей и нагнетающей поверхностях профиля [15]. При этом, достижение больших значений боковой силы руля при изменении обычных геометрических параметров руля достичь очень трудно, даже при плавном обтекании руля. Наиболее важным фактором, ограничивающим достижение предельных значений подъемной силы, является вязкость потока.

## 2. Показатели работы пера руля судна в системе сил и моментов, обеспечивающих управляемость судном

Одним из основных показателей эффективности рулевого устройства судна является момент, создаваемый в результате перекадки руля на баллере  $M_б$  и поворачивающим момент относительно центра тяжести судна:

$$M_c = N \cdot a, \quad (1)$$

где  $N$  – поперечная гидродинамическая сила, действующая на перо руля, кН;

$a$  – плечо между центром тяжести судна и точкой приложения поперечной гидродинамической силы, м.

На рисунке 3 показана схема сил и моментов, действующая на корпус одновинтового судна

при отклонении пера руля от диаметральной плоскости.

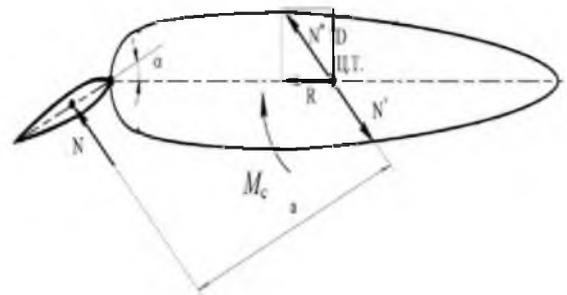


Рисунок 3 – Схема сил и моментов, действующих на прямолинейно движущееся судно при отклонении пера руля ( $\alpha$ ):  $N''$  и  $N'$  – пара сил эквивалентных равнодействующей сил гидродинамического давления  $N$  на перо руля;  $D$  – сила дрейфа;  $R$  – сила сопротивления движению судна;  $M_c$  – поворачивающий момент

Расчетное значение равнодействующей гидродинамических сил, действующих на перо руля может быть предварительно оценено с помощью зависимости [16]:

$$N = k \cdot F \cdot V_c^2 \cdot \frac{\sin \alpha}{0,195 + 0,605 \cdot \sin \alpha}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий количество гребных винтов;

$F$  – площадь пера руля,  $m^2$ ;

$V_c$  – начальная скорость судна на прямом курсе перед совершением маневра, м/с;

$\alpha$  – угол перекадки руля относительно диаметральной плоскости судна.

Гидродинамическая сила, действующая на крыло (перо руля) в потоке определяется в соответствии с формулой И. Е. Жуковского [3]:

$$P = \rho \cdot \Gamma \cdot V \cdot L, \quad (3)$$

где  $\Gamma$  – циркуляция скорости по контуру обтекаемого профиля.

$V$  – скорость набегающего потока;

$\rho$  – плотность потока;

$L$  – протяженность обтекаемой поверхности поперек потока.

Зависимость (2) при численном методе моделирования, в соответствие с формулой Жуковского может быть представлена в виде [2]:

$$N=0,5 \cdot \rho \cdot P \cdot V^2 \cdot C_y \cdot S, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность потока;

$P$  и  $V$  – давление и скорость потока [6];

$S$  – поверхность руля;

$C_y$  – коэффициент подъемной силы профиля.

На рисунке 4 показана схема сил, действующих на профиль пера руля с управлением обтеканием профиля.

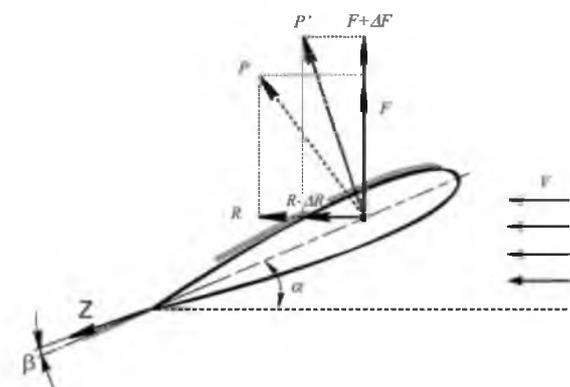


Рисунок 4 – Силы, действующие на перо руля при реализации систем управления пограничным слоем и циркуляцией потока:  $P$  – поперечная гидродинамическая сила профиля пера;  $P'$  – суммарная поперечная гидродинамическая сила профиля и струи;  $F$  – подъемная сила профиля;  $R$  – сила профильного сопротивления;  $\Delta F$  – прирост подъемной силы профиля за счет дополнительного перепада давления на струе;  $\Delta R$  – относительное снижение профильного сопротивления пера руля;  $Z$  – вектор скорости струйного закрылка;  $V$  – скорость набегающего потока;  $\alpha$  – угол атаки профиля;  $\beta$  – угол подачи воды из струйного закрылка

За счет вылива струй воды из передней части пера руля по касательной к засасывающей поверхности увеличивается циркуляция скорости  $\Gamma$ , растет гидродинамическая сила  $P$  и становится равной  $P'$ . Создаваемый дополнительный перепад давления на струе создает дополнительную боковую силу  $\Delta P$ , увеличивающую, в соответствии с формулами (1) – (4) поворачивающий момент  $M_c$  судна относительно вертикальной оси. За счет вылива струй воды из задней кромки пера руля наблюдается увеличение эффективной площади руля, что также приводит к росту боковой силы, но при этом также растет и сила сопротивления движению судна.

### 3. Численное моделирование гидродинамических характеристик пера руля танкера в программном комплексе FlowVision

В качестве объекта исследования возможностей совершенствования маневренных качеств судна путем повышения гидродинамических характеристик пера руля выбран танкер дейдвейтом 65 тыс. тонн. На основании технических данных ходовых испытаний танкера, данных математической модели тренажера TRANSAS ERS-5000 и результатов численного моделирования в программном комплексе FlowVision проанализированы параметры работы пера руля на угле поворота  $35^\circ$  и подготовлены рекомендации по возможности повышения гидродинамических качеств пера руля за счет управления пограничным слоем жидкости, обтекающей профиль.

Исследования проведены для судна, оснащенного главным двигателем 6S60MC работающим через прямую передачу на винт фиксированного шага. Скорость судна при прямолинейном движении судна перед маневром 10 узлов, при установившейся циркуляции в балласте 6,5 узла. Судно оснащено рулевой поверхностью площадью  $51.2 \text{ м}^2$ , профиль пера руля подобен NACA-0012.

Для численного моделирования гидродинамического профиля пера руля использован программный комплекс FlowVision. Достоверность результатов численного моделирования обеспечена подбором получаемых результатов с теоретическими данными [17]. Эффективность расчетной программы также подтверждена в работах по исследованию аэродинамических профилей [18] и гребных винтов [19].

В пакете FlowVision создан проект и выполнено численное моделирование профиля NACA-0012 оснащенного сопловыми устройствами (рис. 2), работающими в несжимаемой жидкости. Параметры расчетной области и объекта моделирования учитывают особенности численного моделирования, установленные в работе [20].

В работе [15] авторами показана положительные свойства профиля при подаче дополнительного потока на боковую поверхность. Задача подачи жидкости с концевой кромки рассматривалась в работе [21]. Отличительной особенностью проводимых ранее исследований является их ограниченность малыми углами  $\alpha$  для набегающего потока, соответствующих максимуму подъемной силы при относительно малом профильном сопротивлении.

В гидродинамике для рулевой поверхности является актуальной задача повышения эффективности пера руля при углах  $\alpha = 30 - 45^\circ$ , характеризующихся вторым максимумом подъемной силы профиля при относительно большом гидродинамическом сопротивлении.

Исследование системы управления пограничным слоем за счет подачи дополнительной струи с концевой кромки лопасти выполнено при малых скоростях потока, соответствующих числу Рейнольдса  $Re < 1 \cdot 10^5$ . Скорость набегающего потока ( $V$ ) изменялась в диапазоне 0 - 5 м/с. Скорость дополнительного потока, подаваемого из сопла ( $V_{стр}$ ) соответствовала 0 - 25 м/с. Угол подачи струи  $\beta$  системы управления циркуляцией моделировался в

диапазоне 30–45°. Набегающий поток характеризуется коэффициентом пульсации потока 0,03 и масштабом турбулентности 0,1.

На рисунке 5 показаны результаты численного моделирования, позволяющие предварительно оценить влияние системы управления циркуляцией на поток жидкости, обтекающей профиль руля, находящейся под углом  $\alpha = 35^\circ$ .

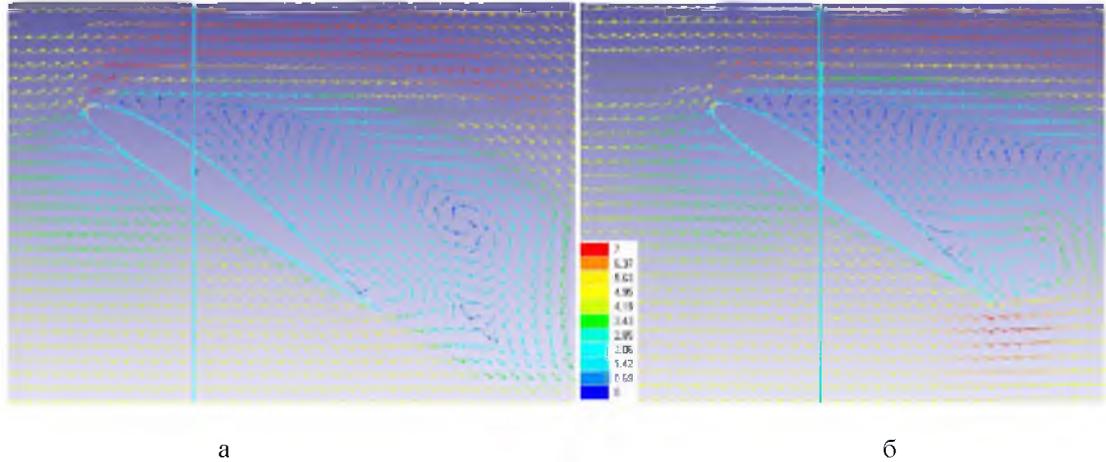


Рисунок 5 – Векторное поле скорости воды (м/с), взаимодействующей с рулевой поверхностью при угле отклонения  $35^\circ$  от диаметральной плоскости судна в зависимости от угла подачи струи ( $\beta = 35^\circ$ ) и относительного изменения скорости струи ( $V_{стр}/V$ ): а - соотношение  $V_{стр}/V = 0$ ; б - соотношение  $V_{стр}/V = 4$

Анализ векторных полей, показанных на рисунке 5 позволяет утверждать, что при увеличении интенсивности струйного закрылка при  $\beta = 35^\circ$  наблюдается изменение циркуляции скорости воды по замкнутому контуру относительно пера руля.

На рисунке 6 показаны результаты численного моделирования, позволяющие предварительно оценить влияние системы управления циркуляцией на поток жидкости, обтекающей профиль руля, находящейся под углом  $\alpha = 35^\circ$ .

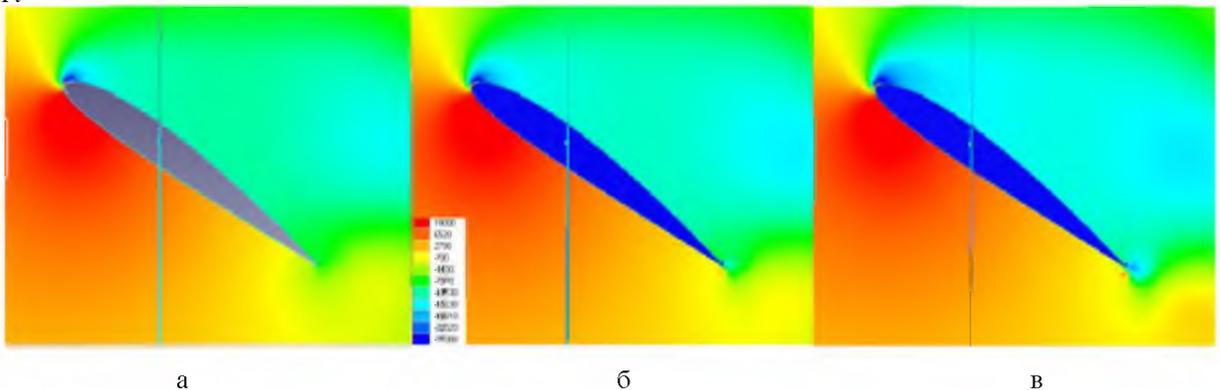


Рисунок 6 – Поле давлений потока жидкости (Па), взаимодействующей с рулевой поверхностью при угле отклонения  $35^\circ$  от диаметральной плоскости судна в зависимости от угла подачи струи ( $\beta = 65^\circ$ ) и относительного изменения скорости струи ( $V_{стр}/V$ ): а - соотношение  $V_{стр}/V = 0$ ; б - соотношение  $V_{стр}/V = 4$ ; в - соотношение  $V_{стр}/V = 8$

Анализ перепада давления на пере руля, представленный на рисунке 6, позволяет утверждать, что увеличение интенсивности системы управления циркуляцией скорости потока приводит к выравниванию давления на нагнетательной поверхности и увеличению перепада сил давления

на пере руля.

На рисунке 7 показаны результаты численного моделирования, позволяющие предварительно оценить влияние системы управления пограничным слоем на поток жидкости, обтекающей профиль руля, находящейся под углом  $35^\circ$ .

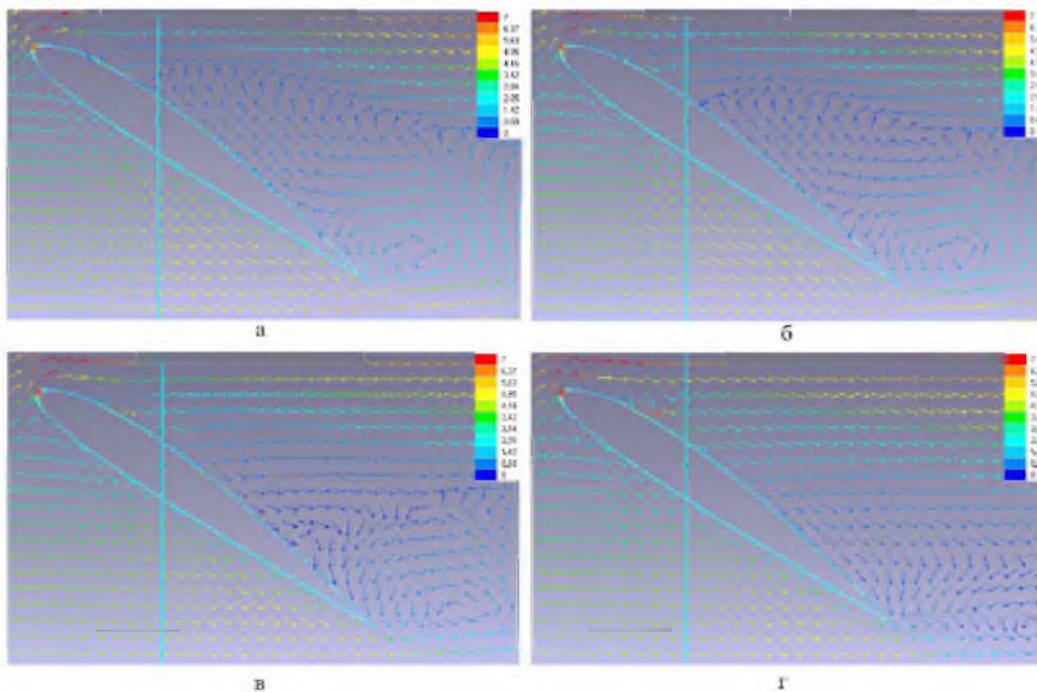


Рисунок 7 – Векторное поле скорости воды (м/с), взаимодействующей с рулевой поверхностью при угле отклонения  $35^\circ$  от диаметральной плоскости судна в зависимости от относительного изменения скорости струи ( $V_{стр}/V$ ): а - соотношение  $V_{стр}/V = 0$ ; б - соотношение  $V_{стр}/V = 2$ ; в - соотношение  $V_{стр}/V = 6$ ; г - соотношение  $V_{стр}/V = 8$

Анализ векторных полей, показанных на рисунке 7, позволяет утверждать, что при увеличении интенсивности системы управления пограничным слоем приводит к снижению отрыва потока на засасывающей поверхности пера руля, что в свою оче-

редь позволяет значительно повысить коэффициент подъемной силы  $C_y$

На рисунке 8 показана гидродинамические характеристики потока обтекающего профиль пера руля с комбинированной системой управления пограничным слоем и циркуляцией скорости.

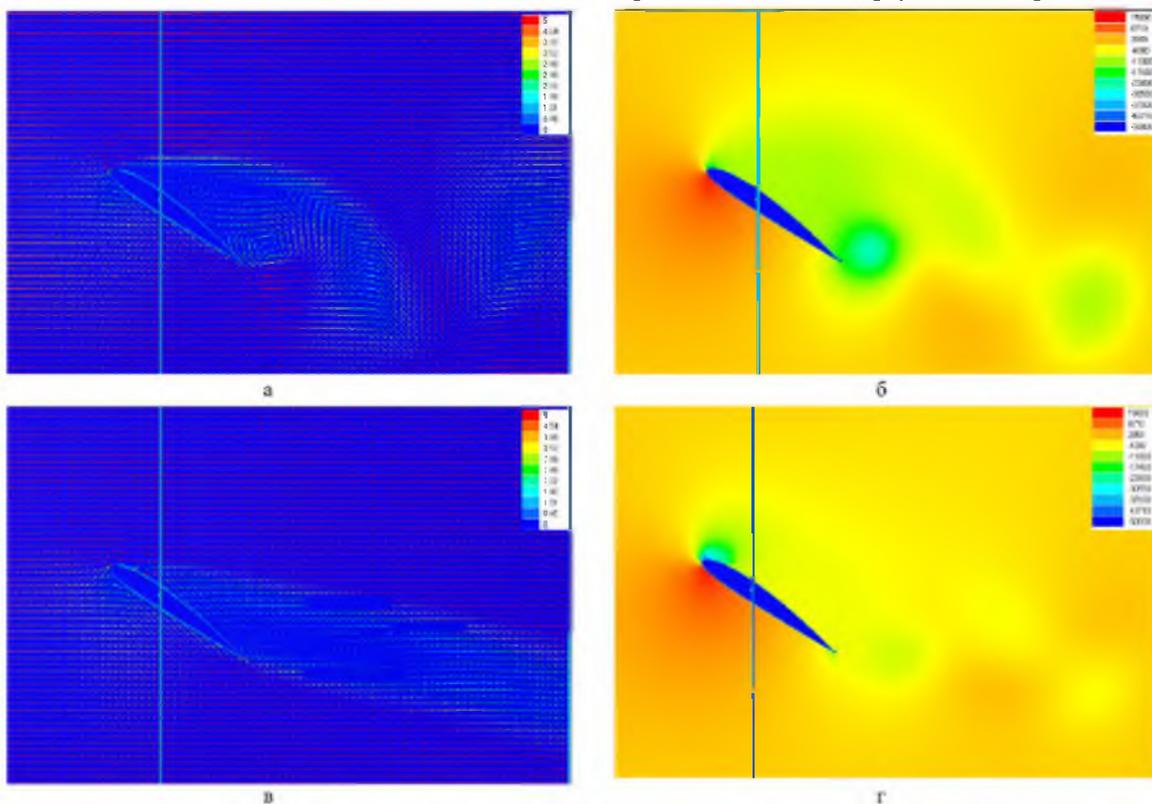


Рисунок 8 – Поле абсолютных скоростей (а, в) и поле давлений жидкости (б, г) профиля пера руля  $\alpha = 35^\circ$  при совместном управлении пограничным слоем и циркуляцией потока: а и б - при нулевой подаче дополнительной воды, в и г – при подаче дополнительной воды в соотношении  $V_{стр}/V_{пот} = 8$ ,  $\beta = 65^\circ$

В соответствии с рисунком 8, подобие физических явлений при обтекании моделируемых профилей позволяет утверждать о возможности снижения концевых потерь и снижения вихреобразования. Вылив струи ослабляет отрыв потока, повышает разрежение на засасывающей поверхности руля и полностью восстанавливает давление на

нагнетающей части.

На рисунке 9 обобщены результаты численного моделирования, позволяющие оценить влияние скорости дополнительно подаваемой на профиль воды на относительный прирост подъемной силы профиля пера, находящейся под углом  $\alpha = 35^\circ$  к набегающему потоку.

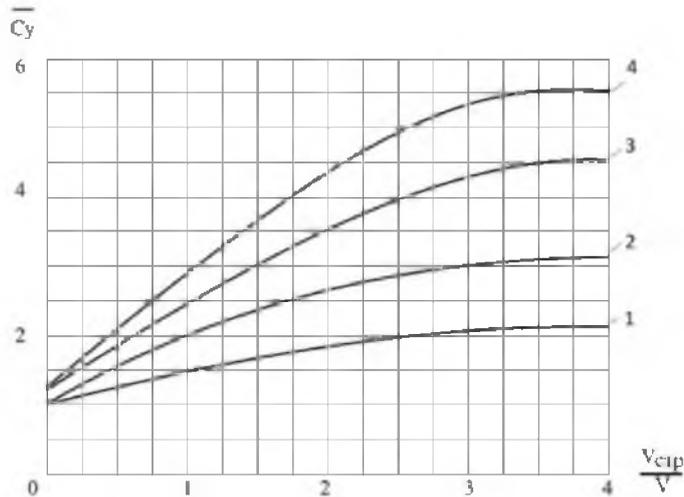


Рисунок 9 – Коэффициент подъемной силы пера руля при отклонении  $\alpha = 35^\circ$  в зависимости от относительной скорости дополнительно подаваемой воды ( $V_{стр}/V$ ) при различных методах управления обтеканием: 1 – управление циркуляцией скорости потока при  $\beta = 35^\circ$ ; 2 – управление циркуляцией скорости потока при  $\beta = 65^\circ$ ; 3 – управление пограничным слоем; 4 – комбинированный метод управления циркуляцией скорости потока при  $\beta = 65^\circ$  и пограничным слоем пера руля

На рисунке 10 показаны показатели относительного изменения поворачивающего момента судна полученные путем численного моделирования натурного пера руля и его профиля (модели) при различных методах реализации систем управления пограничным слоем и циркуляцией скорости потока. Для накопления значительного объема результатов численного моделирования профиля решалась двумерная задача с использованием расчетной сетки с ограниченно малым числом ячеек (до 15 тыс.).

Получение дополнительной боковой силы руля за счет изменения кривизны поверхности и изменение отклонения руля на большие углы ограничены, поэтому применение энергетических методов на руле судна обосновано. Применение энергетических методов повышения боковой силы руля за счет вылива жидкости дает возможность значительно превысить значения боковой силы руля по сравнению с обычными методами.

Повышение эффективности пера руля для исследуемого судна выражается в возможности снижения угла перекаладки пера руля на  $3^\circ$  для достижения требуемого уровня маневренности, что приводит к снижению потери скорости судна в режиме установившейся циркуляции.

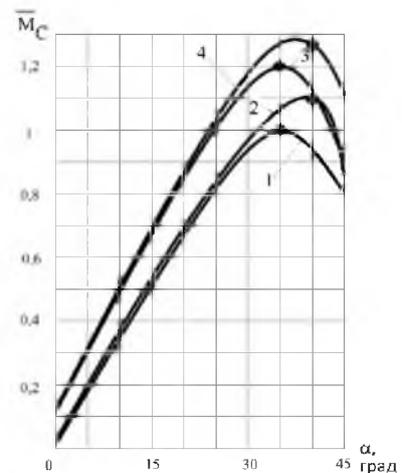


Рисунок 10 – Суммарный поворачивающий момент судна при реализации различных методов подачи воды на перо руля: точки – данные по натурному численному моделированию, линий – данные, полученные расчетным путем на моделях с учетом подобия: 1 – без подачи воды; 2 – при подаче воды с концевой кромки лопасти под углом  $\beta = 65^\circ$ ; 3 – с подачей воды на засасывающую поверхность пера руля; 4 – при комбинировании двух методов подачи дополнительной воды в соотношении  $V_{стр}/V_{пот} = 8$

### Закключение

В результате проведенного численного моделирования и расчетного исследования установ-

лена возможность улучшения гидродинамических характеристик пера руля за счет систем управления пограничным слоем. Исследование выполнено на примере пера руля судна дедвейтом 65 тыс. тонн, имеющего профиль рулевой плоскости аналогичный NASA-0012. Установлено, что подача струй дополнительной воды на боковую кромку профиля и вылив воды с концевой кромки, способствует повышению поперечной гидродинамической силы профиля и относительному снижению профильного сопротивления. Это позволяет создать условия для повышения эффективности профиля при больших углах атаки.

Расчетные и экспериментальные исследования показали, что приращение подъемной силы профиля пера руля с управлением циркуляцией скорости жидкости существенно зависит от ряда факторов: от формы профиля руля, его удлинения, относительной хорды и др., что подтверждается результатами исследования других авторов [9-14].

При комбинировании двух методов подачи дополнительной воды на перо руля для объекта исследования получено 20% увеличение поворачивающего момента. Это в свою очередь позволяет при совершении маневра уменьшить угол отклонения рулевой поверхности с 35° до 25°, и тем самым, предотвратить снижение скорости судна на 0,8 узла, понизив на 600 кВт величину затрачиваемой мощности главного двигателя 6S60MC. Снижение затрат мощности, необходимых для совершения маневра с требуемой скоростью и диаметром циркуляции судна, способствует понижению тепловой и механической напряженности главного двигателя.

Применение струйных закрылков с целью управления циркуляцией скорости жидкости может заметно повысить эффективность работы судового винто-рулевого комплекса, однако в настоящее время отсутствует полноценная методика расчета эффективности подобных профилей, в связи с чем работы в этом направлении являются актуальными.

Для уточнения возможности повышения маневренных характеристик судна необходимо провести комплексный анализ изменения параметров обтекания корпуса судна, гребного винта и пера руля с учетом взаимодействия элементов пропульсивного комплекса. В дальнейшем планируется проанализировать влияние предлагаемого решения на максимальную скорость циркуляции судна, эффективные углы поворота пера руля и ограничение малых переключков руля для текущей

коррекции курса. Представляет также интерес режим работы главного двигателя на установившемся режиме циркуляции судна при малых и значительных углах отклонения рулевой плоскости.

#### Литература

1. Basic Principles of Ship Propulsion. Url: <https://marine.man-es.com/propeller-aft-ship//>. (дата обращения 01.12.2020).
2. Антоненко, С. В. Судовые движители: учеб. пособие / С. В. Антоненко. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. — 126 с.
3. Sasaki, N., Kuribayashi, S., & Atlar, M. (2018, April). *Gate Rudder®*. In Proceedings of the 3rd International Symposium on Naval Architecture and Maritime (INT-NAM), Istanbul, Turkey. Pp. 24-25.
4. Park S., Oh G. H., Rhee S. H., Koo B. Y., Lee H. Full scale wake prediction of an energy saving device by using computational fluid dynamics. *Ocean Engineering*. 2015. № 101. Pp. 254–263.
5. Kim J. H., Choi J. E., Choi B. J., Chung S. H., Seo H. W. Development of energy-saving devices for a full slow-speed ship through improving propulsion performance *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2015. № 7. Issue 2. Pp. 390–398.
6. Shen Y. T., Jiang Ch. W., Kenneth R. D. *Twisted Rudder for Reduced Cavitation*. *J Ship Res*. 1997. Vol. 44. Pp. 260–272.
7. Jialun L., Quadvlieg F., Hekkenberg, R. Impacts of the rudder profile on manoeuvring performance of ships. 2016. Vol. 124. – Pp. 226-240.
8. Ибрагимов О. Э., Применение струйной механизации для повышения маневренности судов / О.Э. Ибрагимов, Д. И. Осовский // Рыбное хозяйство Украины. – 2011. – № 5. С. 45-47.
9. Петров, А. В. Расчет гидродинамических характеристик крыльев со струйной механизацией / А. В. Петров // Тр. ЦАГИ. – 1984, вып. 2235.
10. Петров, А. В. Метод расчета коэффициента импульса струи, потребного для ликвидации отрыва потока на профиле крыла // А.В. Петров, В. В. Шеломовская // Труды ЦАГИ. – 1979. – вып. 1977.
11. Хмельков, Б. А. Расчет аэродинамических характеристик крыла с реактивным закрылком / Б. А. Хмельков // Тр. ВВМА. –1959. – №780.
12. Petrov, A. V. Separation flow over a high-lift wings and active flow control. *High-lift and separation / A. V. Petrov // CEAS European Forum. RAES Proc. London*. – 1995. – Pp. 20.1 – 20.7
13. Петров, А.В. Применение тангенциального выдува струй для снижения сопротивления сверхкритический профилей при больших дозвуковых скоростях / А.В. Петров, В.Д. Боксер, А.В. Волков // Ученые записки ЦАГИ. – 2009. – Т. XL, – № 1, – с. 8 – 16.
14. Петров, А.В. Энергетические методы увеличения подъемной силы крыла / А.В. Петров // М.:

- ФИЗМАТЛИТ. – 2011. – с. 120 – 125.
15. Шаратов, А. С. Проверка гипотезы дополнительного струйного воздействия воды, подаваемой через щелевую насадку на лопасти гребного винта / А. С. Шаратов // Эксплуатация морского транспорта. – 2019. – № 1. – С. 67–76.
  16. Черепанов Б. Е. Судовые вспомогательные и промышленные механизмы, системы и их эксплуатация / Б.Е. Черпанов // М.: Агропромиздат. – 1986. – 283 с.
  17. Сертификация Flowvision  
Url:<http://www.thesis.com.ru/software/flowvision/>  
(дата обращения 01.12.2020).
  18. Карасев, П. И. Качественное построение расчетной сетки для решения задач аэродинамики в программном комплексе FlowVision / П. И. Карасев, А. С. Шипаева, А. А. Аксенов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2012. – №47 (306). – С. 46–58.
  19. Король, Ю. М. Влияние лопастных и профильных характеристик на гидродинамическую эффективность гребных винтов / Ю. М. Король, О. Н. Корнелок // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2017. – №4(70). – С. 80–88.
  20. Осовский, Д.И. Влияние ограниченного пространства на результаты численного и экспериментального исследования гребного винта с дополнительным струйным воздействием воды на лопасти / Осовский Д.И., Шаратов А.С. // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2019. — № 58. — С. 39–53
  21. Шаратов, А. С. Анализ влияния струйного интерцептора лопасти на поток воды, взаимодействующий с гребным винтом. / А.С. Шаратов, Н.П. Клименко, В.А. Охлонин // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2020. Вып. №4. – С. 42–50.
  22. Пат. UA 58662, МПК B63H 25/00 Конструкция механизированного гребного винта / Д.И. Осовский, заяв. и патентообл. Керченский государственный морской технологический университет. – № 201009632; заявл. 02.08.2010; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8. – 2011
- REFERENCES**
1. Basic Principles of Ship Propulsion. Url: <https://marine.man-es.com/propeller-aft-ship//>, (дата обращения 01.12.2020).
  2. Antonenko, S. V. Sudovye dvizhiteli: ucheb. posobie / S. V. Antonenko. – Vladivostok: Izd-vo DVG TU, 2007. — S. 126.
  3. Sasaki, N., Kuribayashi, S., & Atlar, M. (2018, April). *Gate Rudder*®. In Proceedings of the 3rd International Symposium on Naval Architecture and Maritime (INT-NAM), Istanbul, Turkey. Pp. 24–25.
  4. Park S., Oh G. H., Rhee S. H., Koo B. Y., Lee H. Full scale wake prediction of an energy saving device by using computational fluid dynamics. Ocean Engineering. 2015. № 101. Pp. 254–263.
  5. Kim J. H., Choi J. E., Choi B. J., Chung S. H., Seo H. W. Development of energy-saving devices for a full slow-speed ship through improving propulsion performance International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2015. № 7. Issue 2. Pp. 390–398.
  6. Shen Y. T., Jiang Ch. W., Kenneth R. D. *Twisted Rudder for Reduced Cavitation*. J Ship Res. 1997. Vol. 44. Pp. 260–272.
  7. Jialun L., Quadvlieg F., Hekkenberg, R. Impacts of the rudder profile on manoeuvring performance of ships. 2016. Vol. 124. – Pp. 226–240.
  8. Ibragimov O. E., Primenenie strujnoj mekhanizacii dlya povysheniya manevrenno-sti sudov / O.E. Ibragimov, D. I. Osovskij // Rybnoe hozyajstvo Ukrainy. – 2011. – № 5. S. 45–47.
  9. Petrov, A. V. Raschet gidrodinamicheskikh karakteristik kryl'ev so strujnoj mehanizaciej / A. V. Petrov // Tr. CAGI. – 1984, Vol. 2235.
  10. Petrov, A. V. Metod rascheta koefficienta impul'sa strui, potrebnogo dlya likvi-dacii otryva potoka na profile kryla / A.V. Petrov, V. V. Shelomovskaya // Trudy CA-GI. – 1979. – Vol. 1977.
  11. Hmel'kov, B. A. Raschet aerodinamicheskikh karakteristik kryla s reaktivnym za-krylkom / B. A. Hmel'kov // Tr. VVMA. –1959. – №780. Petrov, A. V. Separation flow over a high-lift wings and active flow control. High-lift and separation / A. V. Petrov // CEAS European Forum. RAES Proc. London. – 1995. – Pp. 20.1 – 20.7
  12. Petrov, A. V. Separation flow over a high-lift wings and active flow control. High-lift and separation / A. V. Petrov // CEAS European Forum. RAES Proc. London. – 1995. – Pp. 20.1 – 20.7
  13. Petrov, A.V. Primenenie tangencial'nogo vyduva struj dlya snizheniya soprotiv-leniya sverhkriticheskij profilej pri bol'shix dozvukovyh skorostyah / A.V. Petrov, V.D. Bokser, A.V. Volkov // Uchenye zapiski CAGI. – 2009. – Т. XL, – № 1, – S. 8 – 16.
  14. Petrov, A.V. Energeticheskie metody uvelicheniya pod"emnoj sily kryla / A. V. Petrov // М.: FIZMAT-LIT. – 2011. – S. 120 – 125.
  15. Sharatov, A. S. Proverka gipotezy dopolnitel'nogo strujnogo vozdejstviya vody, podavaemoj cherez shchelevuyu nasadku na lopasti grebnogo vinta / A. S. SHaratov // Ekspluatatsiya morskogo transporta. – 2019. – № 1. – S. 67–76.
  16. CHerepanov B. E. Sudovye vspomogatel'nye i promyslovye mekhanizmy, sistemy i ih ekspluatatsiya/ B.E. CHerpanov //М.: Агропромиздат. – 1986. – 283 с.
  17. Sertifikatsiya Flowvision  
Url:<http://www.thesis.com.ru/software/flowvision/>  
(data ob-rashcheniya 01.12.2020).
  18. Karasev, P. I. Kachestvennoe postroenie raschetnoj

- setki dlya resheniya zadach aero-dinamiki v programnom komplekse FlowVision / P. I. Karasev, A. S. SHishaeva, A. A. Aksenov // Vestnik YUUrGU. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika. – 2012. – №47 (306). – S. 46-58.
19. Korol', YU. M. Vliyanie lopastnyh i profil'nyh harakteristik na gidrodinami-cheskuyu effektivnost' grebnyh vintov / YU. M. Korol', O. N. Kornelyuk // Nauka i pro-gress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo nacional'nogo universiteta zheleznodo-rozhnogo transporta. - 2017.- №4(70). - S. 80-88.
20. Osovskij, D.I. Vliyanie ogranichenogo prostranstva na rezul'taty chislemogo i eksperimental'nogo issledovaniya grebnogo vinta s dopolnitel'nym strujnym vozdejstviem vody na lopasti / Osovskij D.I., SHaratov A.S. // Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta. — 2019. — № 58. — S. 39–53
21. Sharatov, A. S. Analiz vliyaniya strujnogo interceptora lopasti na potok vody, vzaimodejstvuyushchij s grebnym vintom. / A.S. Sharatov, N.P. Klimenko, V.A. Ohlonin // Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2020. Vyp. №4. – S. 42-50.
22. Patent number: UA 58662, B63H 25/00 Design of mechanized jet rudder of ship / D. I. Osovskii, application. and patentable. Kerch State Maritime Technological University. – No. 201009632; declared on 02.08.2010; published on 26.04.2011, Byul. No. 8. – 2011.

УДК 629.5.015, УДК 629.12.001.2

DOI: 10.34046/aumsuomt98/14

## ОСНОВНЫЕ ТРЕНДЫ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В УПРАВЛЕНИИ МОРСКИМИ АВТОНОМНЫМИ НАДВОДНЫМИ СУДАМИ

*А.И. Епихин, кандидат технических наук, доцент,  
А. В. Игнатенко, начальник судомеханического факультета  
Д.Е. Студеникин, кандидат технических наук, доцент  
Е.В. Хекерт, доктор технических наук, профессор*

Современные тенденции и перспективы судовых энергетических установок и их элементов применительно к концепции автономного судна и безэкипажного (беспилотного) судовождения, а также выполнения перспективных требований международного морского законодательства по предотвращению загрязнения атмосферы с судов. Использование альтернативных топлив и переход на электроснабжение с берега при стоянке таких судов в портах, на оборудованных рейдовых стоянках, а также использование «чистой электроэнергии» для электроснабжения объектов водного транспорта и шельфовой инфраструктуры. Обеспечение удаленного управления судовыми техническими средствами автономного судна, контроль параметров процессовой оценка их технического состояния с использованием искусственных нейро-нечетких сетей. Создание цифровых двойников и прогнозирование технического состояния, моделирование сценариев в течение жизненного цикла судовых технических средств.

**Ключевые слова:** судовые энергетические установки, энергоэффективность, газообразное топливо, электронное управление, безэкипажное судовождение, интегрированные системы управления, нечетко-нейронная сеть, цифровые двойники.

## TRENDS, PROSPECTS AND TECHNOLOGIES FOR MODERN AND CUTTING-EDGE POWER PLANTS WITHIN MARITIME INDUSTRY INCORPORATING ASPECTS OF AUTONOMOUS SHIPPING

*A. I. Epikhin, A. V. Ignatenko, D. E. Studenikin, E. V. Heckert*

Modern trends and prospects of ship power plants and their elements in relation to the concept of an autonomous vessel and crewless (pilotless) navigation, incorporating meeting the potential newer requirements / restrictions of international maritime legislation regarding airborne pollutions from ships. The use of alternative fuels and the alternative to marine power technology from the shore when such vessels are moored in ports, at equipped roadsteads, as well as the use of “clean electricity” to supply power to marine transport facilities and offshore infrastructure. Remote control of ship’s main power plant and auxiliaries of an autonomous vessel, control of process parameters and assessment of their technical condition using artificial neuro-fuzzy networks. Creation of digital twins and forecasting of the technical condition, modeling of scenarios during the life cycle of ship technical equipment.

**Keywords:** marine power plants, energy-efficiency, ship’s fuels, electronic control, crewless navigation, autonomous shipping, integrated automation systems, fuzzy-neural network