

КРИТЕРИЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ РЕЙСА СУДНА НА КОРОТКИХ
МОРСКИХ ЛИНИЯХ

Эффективность коммерческой эксплуатации флота в значительной степени зависит от точности прогнозирования скорости судов при переменных условиях плавания и, в частности, при волнении моря с различными курсовыми углами встречи волн. Задача прогнозирования усложняется не только из-за широкого диапазона вероятностных характеристик волнения, но и по причине принятия субъективных решений по намеренному снижению скорости судов с целью уменьшения качки судна и предотвращения слеминга.

При решении указанной задачи удобно оперировать заданной скоростью судна $v_{\text{зад}}$ и величиной потери скорости из-за увеличения сопротивления движению судна и намеренного ее снижения. При этом в качестве критерия эффективности рекомендуются: значения пропульсивного КПД судна η_D , часового расхода топлива $B_{\text{ч}}$ и его отношения к величине скорости $B_{\text{м}} = B_{\text{ч}}/v_{\text{зад}}$.

По результатам эксплуатационных наблюдений из указанных критериев может быть выделен наиболее значимый для прогнозирования рейса судна.

Рассмотрим для примера изменение указанных критериев для режимов работы судов типа "Измаил" [1]. Как видно из рис. 1, изменение пропульсивного КПД η_D в процентном отношении незначительно по отношению к изменению режима скорости судна. Если учесть, что при его определении принимается значительное число допущений и эмпирических зависимостей, то корректное применение η_D , как критерия эффективности для режимов с переменным сопротивлением движению (от волнения на переходе), будет связано с большими погрешностями. Более предпочтительным представляется использование критериев топливной экономичности ($B_{\text{ч}}$, $B_{\text{м}}$), тем более, что расчетные их значения могут быть достаточно точно проверены экспериментом [1].

Управление главным двигателем с ВРШ и валогенератором на судах типа "Измаил" осуществляется по следящему принципу. Режим текущей нагрузки главного двигателя с ВРШ и валогенератором может быть оценен по положению рукоятки управления на мостике. При этом промежуточным его значениям соответствует определенное зна-

чение шага винта H_p или шагового отношения H_p/D_p (D_p – диаметр винта) и положение рейки топливных насосов высокого давления (ТНВД), определяемые относительной координатой "F" (рис. 2).

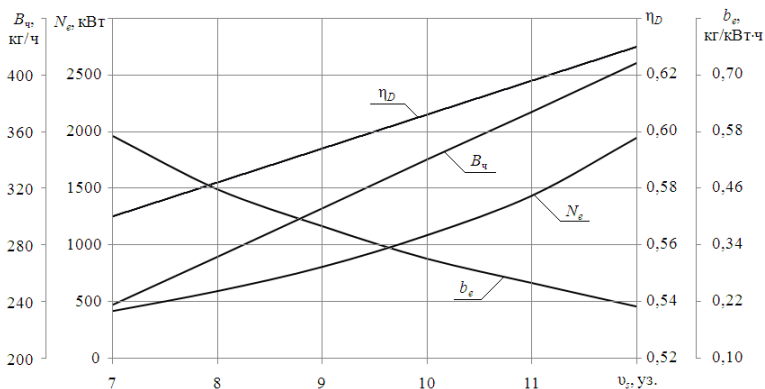


Рис. 1. Изменение $B_{ч}$, B_m , η_D и N_e в эксплуатационном диапазоне скоростей теплохода "Измаил"

В подобных установках частота вращения двигателя поддерживается постоянной на всех режимах регулятором частоты вращения (РЧВ), а нагрузка двигателя определяется действием электронного регулятора нагрузки (РН) изменением шага (или шагового отношения).

В штилевых условиях и загрузке судна на расчетную осадку скорость судна

$$\nu = c_1 \left[H_p / D_p - (H_p / D_p)_0 \right]^{1/2},$$

где c_1 – коэффициент, а зависимость мощности от относительного шагового отношения $N_e = f(\overline{H_p} / \overline{D_p})$ при работающем валогенераторе близка к линейной (рис. 3). При таком способе управления, считая, что нагрузка валогенератора постоянная, отбираемая мощность на винт (пунктирная линия в квадранте I) для обеспечения скорости будет зависеть от условий плавания; соответственно, в условиях штормового волнения возможна нагрузка двигателя с выходом на ограничительную характеристику (рис. 3, квадрант 4).

Для главных двигателей, оборудованных системами определения мощности (на теплоходе "Измаил" – система НК-5) возможно определение для каждого режима N_e и, соответственно, последующее вычисление удельного эффективного расхода топлива на всю установку $b_e = B_{ч} / N_e$, кг/кВтч (см. рис. 1).

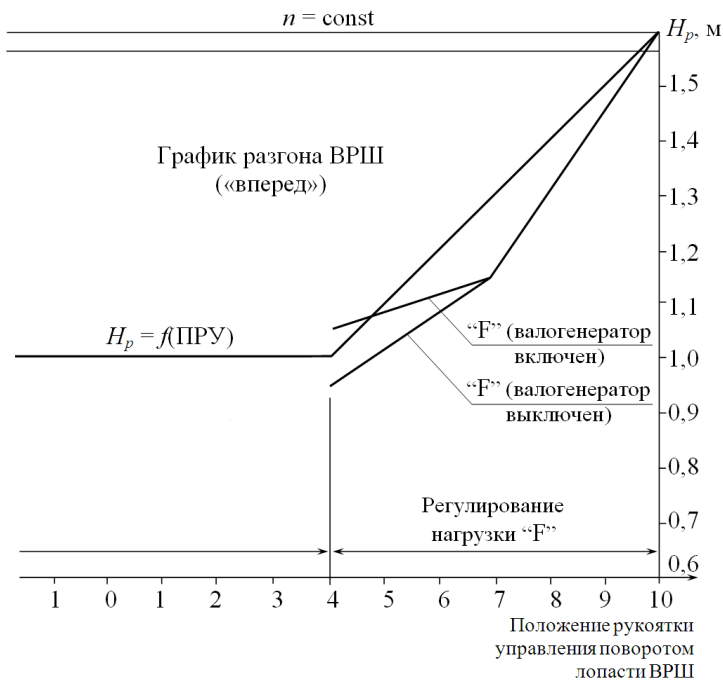


Рис. 2. Диаграмма управления ДАУ ВРШ теплохода "Измаил" при $n = \text{const}$

В условиях волнения с точки зрения исключения тепловых перегрузок дизеля наиболее рациональным признано управление по принципу поддержания цикловой подачи топлива $b_{ц}$, соответствующей заданному режиму скорости [1]; с точки зрения наилучшей экономичности изменение координаты "F" рекомендуется [2] по функционалу $F = F_{\text{зад}} + k_0 \bar{M}_p$, где $F_{\text{зад}}$ – координата F, соответствующая заданному режиму скорости; \bar{M}_p – относительное изменение момента сопротивления на валу; k_0 – коэффициент.

Назначение электронного регулятора нагрузки (РН) в установках с ВРШ (рис. 4, а) в определенной мере соответствует данному принципу, обеспечивающему работу дизеля по программе, в основу которой положена практически линейная зависимость текущей координаты топливоподачи "F" от частоты вращения гребного вала (координата "F" определяется положением рейки топливных насосов высокого давления и соответствует цикловой подаче топлива $F = \bar{b}_{ц}$).

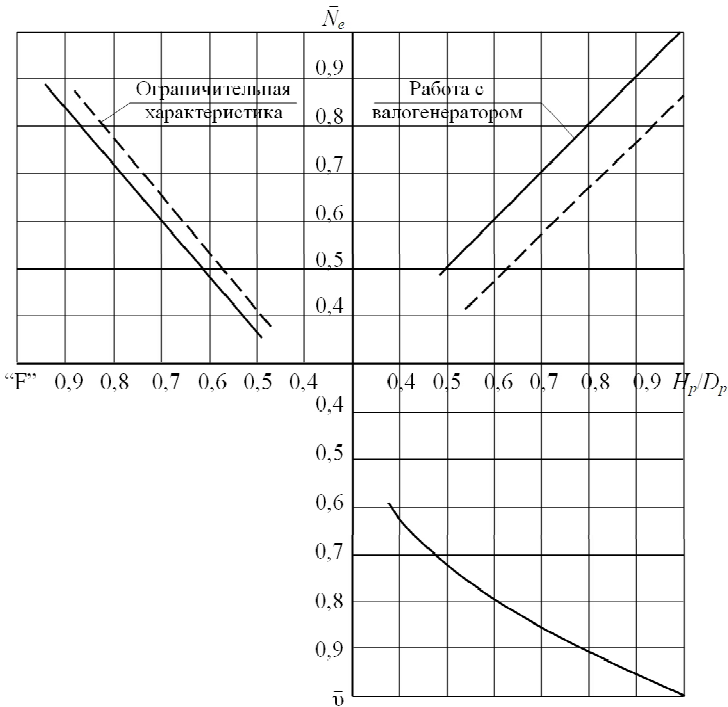


Рис. 3. Рабочие режимы главного двигателя с ВРШ

Входными сигналами для РН (рис. 4, а) являются координата "F" и текущая частота вращения двигателя n , при фиксированном значении $n_{\text{зад}}$ и имеющейся в памяти программной зависимости $F = f(n)$. Действуя совместно с РЧВ, который поддерживает величину $n_{\text{зад}}$, РН при рассогласовании действительного и программного значения "F" вырабатывает сигнал на разворачивание лопастей ВРШ так, чтобы сохранить значение "F", соответствующее $n_{\text{зад}}$, тем самым стабилизируя момент и мощность двигателя.

Эффективность действия РН зависит от характера воздействия нагрузки (степени волнения).

Выходное воздействие регулятора нагрузки представляет собой серию знакопеременных импульсов с регулируемой длительностью T_1 и интервалами между ними T_0 (рис. 4, б). Зона нечувствительности РН в стандартной схеме датчика "F" обычно устанавливается

$\pm 1,5\%$, кроме того, выбором величин $T_1 = 0,2 \dots 2,0$ с и $T_0 = 2 \dots 20$ с можно получить аналогово- ($T_1 = \infty$) или дискретно-импульсное регулирование, тем самым исключить реакцию системы ВРШ на малые отклонения нагрузки (фильтр нагрузки) двигателя.

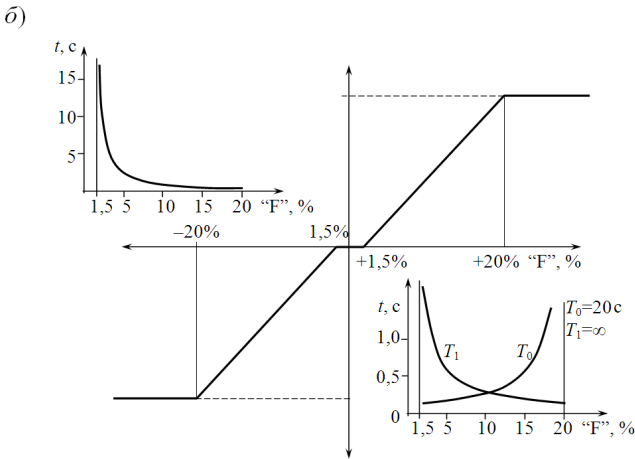
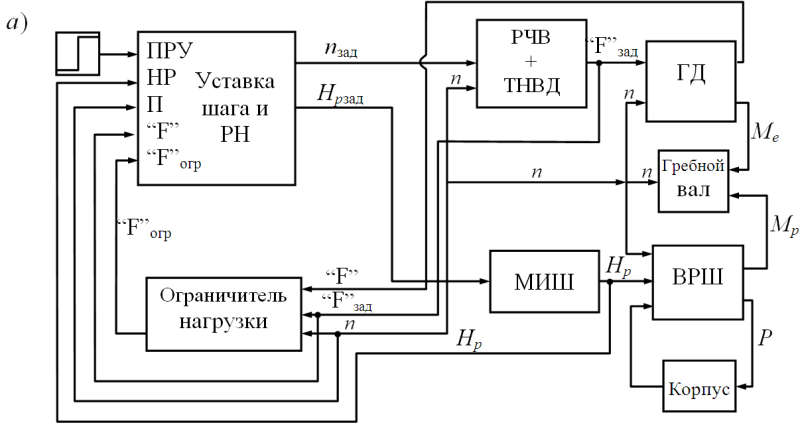


Рис. 4. Регулятор нагрузки: а – схема; б – динамические параметры настройки

Максимальное отношение нагрузки, еще допускающее стабильное воздействие РН, составляет 20 % (режим штормования судна и возможность атмосферной кавитации винта). Регулирующее воздействие

РЧВ ограничено только его зоной нечувствительности, а постоянная времени (0,5 ... 0,8 с) определяет возможность воздействия на координату "F" в соответствии с изменением нагрузки:

суммарным изменением силы сопротивления движению судна от волнения;

периодическим изменением нагрузки на гребном валу.

Вследствие суммарного воздействия волнения и увеличения силы сопротивления среднее изменение заданной скорости \bar{v} от интенсивности волнения $h_{3\%}$ при постоянном курсовом угле φ_w для стабильных коротких морских линий может быть представлено экспериментальными зависимостями [3]:

для встречного волнения

$$\bar{v} = d_1 v_{\text{зад}} \Big|_{\substack{h_{3\%} = \text{const} \\ \varphi_w = \text{const}}}$$

для попутного волнения

$$\bar{v} = d_2 v_{\text{зад}} \Big|_{\substack{h_{3\%} = \text{const} \\ \varphi_w = \text{const}}}$$

Для поддержания режима постоянной частоты вращения РЧВ переходит с цикловой подачи $F_{\text{зад}}$ на F , при этом $F > F_{\text{зад}}$. Тем самым значения $b_e = F/F_{\text{зад}} \cdot B_{\text{ч.зад}}/N_e$ будет выше для уменьшенной скорости \bar{v} . Соответственно, РН должен снизить упор ВРШ в соответствии со своей графической зависимостью до соответствия F величине $n_{\text{зад}}$.

Воздействие на гребной вал при регулярном синусоидальном волнении предопределяет собой периодическое пульсирующее колебание момента сопротивления M_p .

Учет этого фактора, а именно режимов работы дизеля с ВРШ и РН на волнении при периодическом изменении нагрузки, достаточно сложен, а выбор математического описания этой задачи зависит от цели исследования.

В данном случае целью исследования является поиск рационального режима движения судна при заданной интенсивности волнения (высоте волны $h_{3\%}$ и курсовом угле φ_w), обеспечивающего наименьшее значение расхода топлива за счет обоснованного снижения скорости судна $v_{\text{зад}}$.

При поставленной выше цели данная задача формируется на базе уравнения ходкости судна на волнении [3], причем точность оценки искомых величин зависит от формы аппроксимации упора и момента сопротивления при волнении.

Относительный движущий момент двигателя для рассматриваемой

главной силовой установки (дизель с РН и при $n = \text{const}$) может быть представлен в виде $\bar{M}_e = F$, где F – координата нагрузки, т.к. постоянная времени двигателя с РЧВ практически на порядок ниже периода волнения, при котором допускается работа РН.

Аналитический способ поиска оптимальных управлений ВРШ по топливной экономичности [2] при периодическом изменении нагрузки фактически превращается в графоаналитический, прежде всего ввиду серьезных допущений и аппроксимаций, касающихся описания поведения корпуса судна на волнении и вывода уравнения момента сопротивления винта M_p .

Наибольшее применение, как показывают исследования [1, 3], имеет представление M_p в форме В.Б. Липиса [4]:

$$\bar{M}_p = \bar{n}^2 \left[\bar{K}_2 - \bar{K}_{2a} \sin(\omega_c t + \delta_m) \right],$$

где знак "–" означает относительное, а знак "–" – среднее значение на волнении; n – частота вращения вала; ω_c – частота качки судна;

K_2 – коэффициент момента ($K_2 = \bar{K}_2 / K_{2_0}$, $\bar{K}_{2_0} = K_{2_0} / \bar{K}_{2_0}$);

$$\delta_m = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{\bar{h}_0 - 1}{\bar{h}_a};$$

\bar{h}_0 – относительное погружение на тихой воде; \bar{h}_a – амплитуда колебаний оси винта, отнесенная к радиусу винта $D_p/2$.

Применимость функции В.Б. Липиса ограничивается условиями: скорость судна постоянна, винт работает в докритической зоне по нагрузке и без атмосферной кавитации.

В реальных условиях это соответствует режиму умеренного регулярного волнения, для описания которого применима синусоидальная зависимость изменения текущей высоты волны от ее частоты.

Принимаемая постоянной величиной \bar{h}_a в действительности также является функцией, определяемой суперпозицией текущего положения оси винта от:

- вертикальной качки;
- килевой качки;
- ординат кормовой волны.

Однако в расчет принимается обычно килевая качка и так как период килевой качки судна T_w и частоту ω_c можно оценить с допустимой погрешностью, то изменения в течение периода T_w упора винта при условно регулярном волнении можно принять в виде:

$$P = P_0 + \Delta P_a \sin \omega_c t ,$$

$$M_p = M_{p_0} + \Delta M_{p_a} \sin \omega_c t ,$$

где ΔP_a и ΔM_{p_a} – амплитудные значения при качке. Амплитудную величину при качке ΔP_a можно приближенно оценить из формулы изменения упора при наклоне оси винта

$$P_e = \frac{R_0 + \Delta R_w}{\eta_D \cos \psi} ,$$

где ψ – угол наклона, состоящий из угла δ – угла постоянного дифференциала при $\upsilon = 0$ и θ – переменного угла погружения.

Тогда $\Delta R_{w_{\max}} = \nabla \cdot \rho \cdot q \cdot t \cdot \Delta \theta_{\max}$, кН, где $\Delta \theta_{\max}$ – угол максимального погружения оси винта.

Амплитудное значение колебаний момента сопротивления винта

$$\Delta M_e = \frac{K_2}{K_1} D_p \Delta P_a .$$

В общем виде изменение коэффициентов K_1 и K_2 определяются из выражений

$$K_1 = K_{1_0} \left[1 + E_{1_0} \left(\frac{n_0}{n} \cdot \frac{\upsilon}{\upsilon_0} - 1 \right) \right] \upsilon ;$$

$$K_2 = K_{2_0} \left[1 + E_{2_0} \left(\frac{n_0}{n} \cdot \frac{\upsilon}{\upsilon_0} - 1 \right) \right] ,$$

где $E_{1_0} = \frac{dK_1}{d\lambda_p} \frac{\lambda_{p_0}}{K_{1_0}}$; $E_{2_0} = \frac{dK_2}{d\lambda_p} \frac{\lambda_{p_0}}{K_{2_0}}$; $K_{1_0}, K_{2_0}, \lambda_{p_0}$ – значения для заданного режима.

За период качки $\upsilon = \bar{\upsilon} = \text{const}$, а $n = n_0 + \Delta n$, где

$$\Delta n = \frac{M_e - M_p}{T_d} T_w ;$$

T_d – постоянная времени двигателя.

Так как постоянная времени двигателя с РЧВ на порядок меньше периода качки, то изменения величин K_1 и K_2 также определяются формой синусоидальной периодической функции изменения M_p , а их отношение в период качки является постоянным. Соответственно, можно принять, что

$$\frac{\Delta M_{p_a}}{M_{p_0}} = \frac{\Delta P_a}{P_0} .$$

При волнении до 3 – 3,5 баллов (основной вид волнения при работе судов на коротких морских линиях с обеспеченностью до 40 %) можно принять амплитудное значение $\overline{M}_{pa} = 0,075 - 0,12$. Этой же величине будет соответствовать амплитудное значение мощности двигателя, пульсация которого приводит к нестабильности и падению упора.

Соответствующее падение скорости от заданной за счет данной нестабильности (пульсации) упора при встречном волнении по итогам экспериментов [1, 3] может быть оценено функционалом при курсовых углах $\pm 15\%$:

$$\Delta \overline{v} = d_1 h_{3\%} \left| \overline{M}_{pa} = 0,075 - 0,12, \right. \\ \left. \varphi_w = \pm 15\% \right.$$

где $h_{3\%}$ – высота волны 3 %-ной обеспеченности; d_1 - коэффициент.

При этом \overline{v} для данных условий обеспеченного стабильного управления (рис. 5) составляет величину, пропорциональную $\Delta \overline{M}_{pa}$.

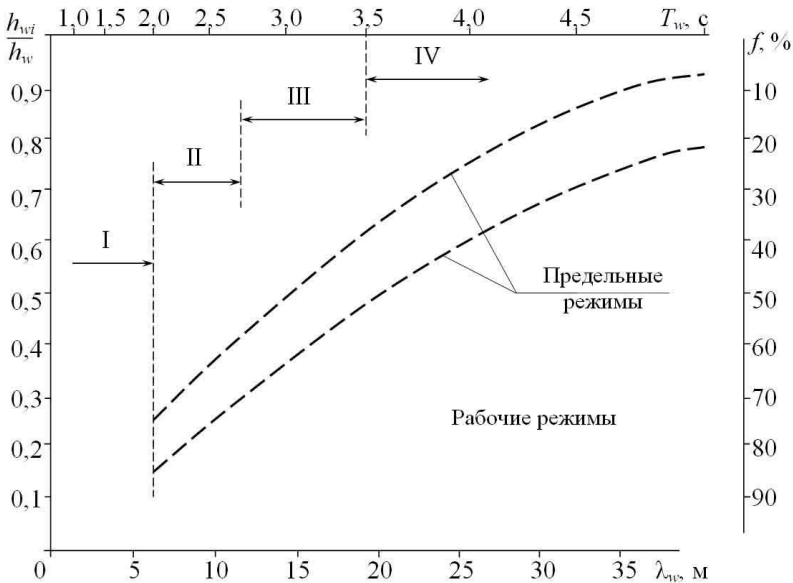


Рис. 5. Зоны режимов управления судном при волнении: I – зона устойчивого управления; II – зона перехода к штормованию; III – зона штормования (РН выключен); IV – зона режимов, требующих обхода зоны штормования; f , % – повторяемость; λ_w , T_w – длина волны и ее период; h_{wi} – кажущаяся высота волны; h_w – высота волны в спектре волнения

Изменение величины b_e общего удельного расхода на установку в пределах $\varphi_w \pm 15\%$ будет также практически линейной (даже до $\varphi_w = 60^\circ$), что является крайне важным для составления программы его прогнозирования, в основу которого положен график рис. 5.

При этом действие РН по снижению нагрузки двигателя защищает его по тепловой и механической напряженности, но уменьшает скорость; b_e при этом растет за счет пульсации топливоподачи. Если для поддержания $v_{зад}$ упор ВРШ будет увеличен, то величина b_e также будет расти (рис. 6).

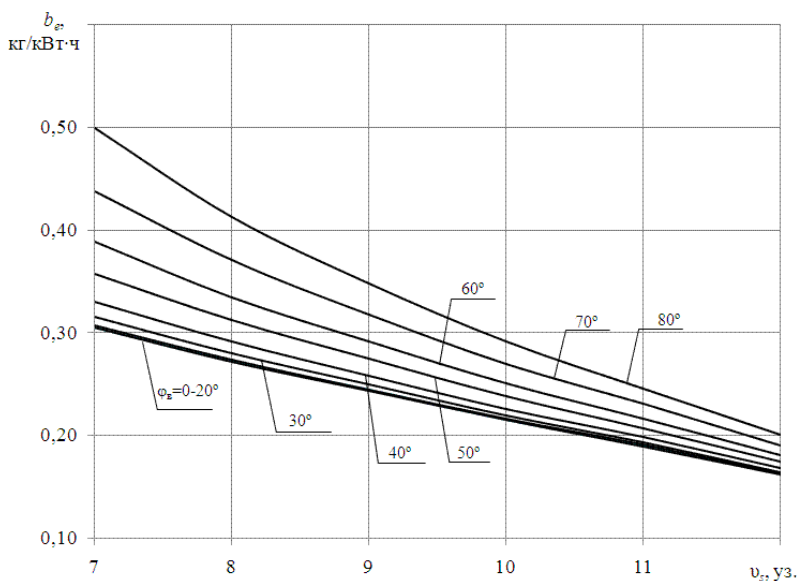


Рис. 6. Зависимость удельного эффективного расхода топлива b_e от скорости судна v для различных значений курсового угла встречи волн φ_w (волнение моря 3 балла, $h_{3\%} = 0,75$ м, ветер 4 балла, $v_{вт} = 7$ м/с)

Наличие подобных рис. 6 кривых для волнения и ветра различной интенсивности открывает возможность как оперативной, так и предварительной (с учетом сезонных особенностей региона плавания и отдельных зон движения судна в рейсе) оценки и прогнозирования экономичности рейса в системе поддержки принятия решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Прогнозирование влияния нерегулярного волнения на ходкость одновинтового судна // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – 2005. – Вып. 10. – Одесса: ОНМА. – С. 76 – 92.
2. Небеснов В.И. Оптимальные режимы работы судовых комплексов. – М.: Транспорт, 1997. – 200 с.
3. Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Домбровский В.А. Оценка расхода топлива в судовых условиях // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – 2006. – Вып. 11. – Одесса: ОНМА. – С. 78 – 87.
4. Липис В.Б. Гидродинамика гребного винта при качке судна. – Л.: Судостроение, 1975. – 264 с.