

ПРЕДЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ОГРАНИЧЕНИЯ НАГРУЗКИ ГЛАВНОГО  
ДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ВОЛНЕНИЯ

Эффективность действия регулятора нагрузки (РН) в системах управления двигателем с винтом регулируемого шага (ВРШ) даже в условиях умеренного волнения не только снижается, но и при определенных условиях его воздействие на изменение шага может дать отрицательный эффект, выражающийся в возникновении нестабильных режимов двигателя и, соответственно, резких колебаниях его мощности [1]. В условиях волнения изменение момента сопротивления на гребном валу  $M_p$  "следует" за изменением координаты оси погружения винта с частотой килевой качки судна, что в первую очередь вызывает изменение частоты вращения  $n$  и соответственно координаты топливоподачи  $F$  под действием регулятора частоты вращения (РЧВ). В основу программы работы известных структур РН заложен принцип поддержания момента сопротивления на валу разворотом лопастей ВРШ при достижении соответствия координаты топливоподачи  $F$  частоте вращения  $n$  по графику  $F = f(n)$ .

С целью минимизации "наложения" переходных процессов в контурах РЧВ и РН от действия высокочастотных колебаний  $M_p$  при умеренном волнении рекомендуется в структуру РН включать фильтр колебаний координаты  $F$  [1].

Установление же предельных режимов для развитого волнения, при котором действие РН существенно ухудшает режимы работы двигателя и не способствуют обеспечению стабильности создания упора, является также серьезной эксплуатационной задачей.

Исходными условиями постановки такой задачи будут являться: средние характеристики определенной зоны (района) волнения на курсе судна, оцениваемые частотным спектром волнения [2] или высотой волны  $h_{3\%}$  (или  $h_{1/3}$ ) и курсовым углом волны  $\beta$ ;

заданная эксплуатационная скорость на переходе зоны волнения  $v$ , узл., с учетом текущего технического состояния подводной части корпуса и величины непреднамеренного ее снижения  $\Delta v_1$  за счет сопротивления (среднего) волнения.

Наиболее предпочтительным для характеристики волнения является его представление в виде высоты  $h_i(\omega)$ , которая в свою очередь

может быть определена из частоты спектра волнения  $S(\omega)$ , например, из формы спектра Пирсона-Московица для высоты волны  $h_{1/3}$ :

$$S(\omega) = k\omega^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_{\max}}{\omega}\right)^4\right],$$

где  $k \approx 1,73h^2/T^4$ ;  $\omega_{\max}$  – частота максимума спектра;  $T$  – период волны.

Соответственно:

$$h_i(\omega) = 2\sqrt{S_i(\omega) \cdot \omega},$$

где  $S_i(\omega)$  – величина спектра для частоты  $\omega$ .

Величина непреднамеренного снижения скорости  $\Delta v_1$  за счет влияния волнения с учетом технического состояния корпуса рассчитывается по методике [3]. Например, для судов типа "Измаил" при заданной эксплуатационной скорости в грузу  $v = 9$  узл. непреднамеренное снижение скорости в условиях волнения в пределах изменения высоты волны от  $h_{3\%} \approx 0,7$  м до  $h_{3\%} \approx 2,5$  м составляет около 1,2 – 1,3 узла при встречном волнении (рис. 1), при этом наблюдается значительный дополнительный расход мощности главного двигателя (рис. 2).

Кроме того, при встречном волнении (курсовой угол встречи волн  $\beta = 0 \pm 10^\circ$ ) при  $h_{3\%} \approx 2,5$  м возникает (подтверждено экспериментально) опасный по частоте и силе ударов слеминг, что определяет этот режим управления судном как начало штормования. При этом управление судном рекомендуется осуществлять по специальным диаграммам штормования (например, диаграммам В.Б. Липиса – Д.В. Кондрикова), и действие регулятора нагрузки при этом будет помехой, т.к. штормование не допускает иного вмешательства в процесс выбора скорости и курсового угла.

Соответственно, в начале режима штормования (например,  $h_{3\%} = 2,5$  м,  $\beta = 0 \pm 10^\circ$ ) регулятор нагрузки должен быть выключен, а скорость судна, прежде всего, намеренно снижена ( $\Delta v_2$ ) с целью избежания слеминга. В данном случае эта величина составляет  $\Delta v_2 \approx 1$  узел, однако это еще не означает, что регулятор нагрузки может быть снова включен.

Известно [4], что спектр реальных колебаний координаты  $h$  погружения оси гребного винта не соответствует спектру волнения и определяется параметрами качки судна, осадки и кормовой волны. С

определенной приближенностью можно рассуждать о связи амплитуды этих колебаний с амплитудой волнения соответствующего спектра, а значит и высотой  $h_{3\%}$ .

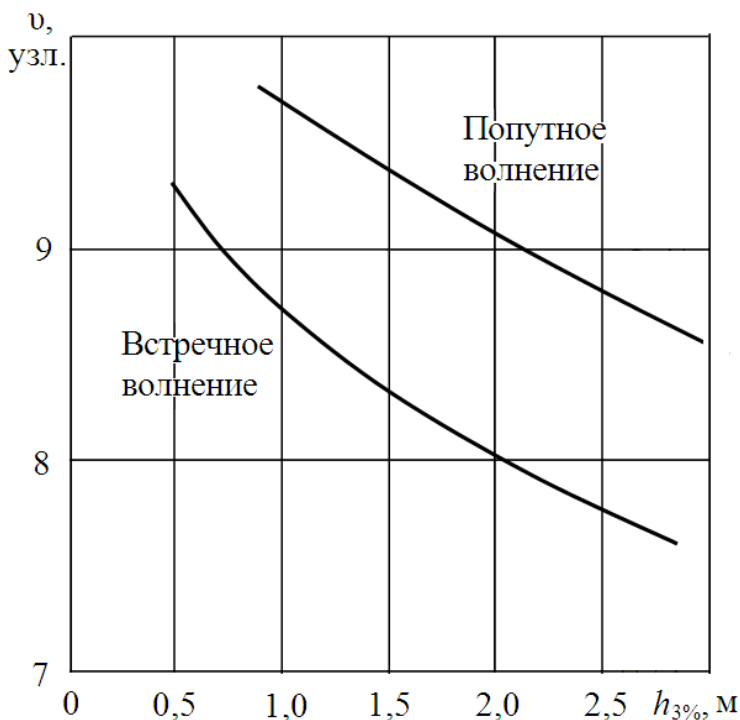


Рис. 1. Режимы непреднамеренного снижения скорости судна (типа "Измаил") в условиях волнения

Соответственно, амплитуда колебаний упора и момента сопротивления (по крайней мере амплитуды первого порядка), будет зависеть от амплитуды координаты погружения, но эта зависимость (даже линейная) теряется при достижении некоторого минимального погружения  $\bar{h}_m$ , при котором возникает явление разгона винта.

Реакция малоинерционного РЧВ фактически имеет место на каждое изменение амплитуды  $h$ , а при режиме разгона, т.е. при достижении  $\bar{h}_m$ , от РЧВ последует команда на резкое уменьшение подачи топлива в двигатель, а при обратном погружении винта — на увеличение.

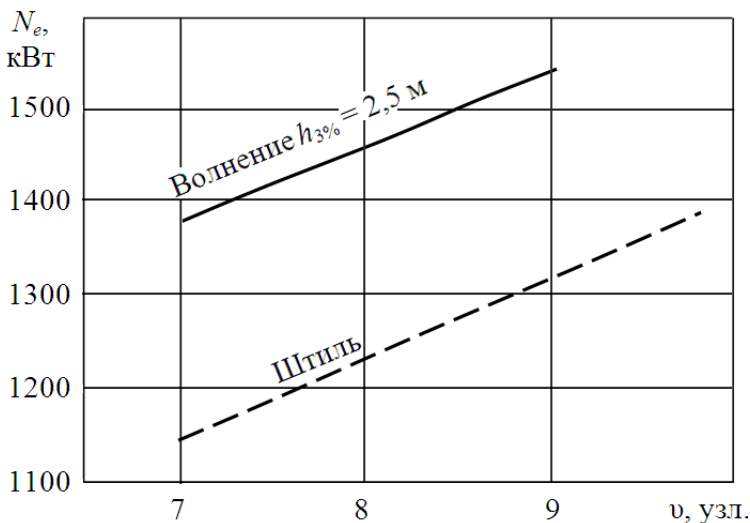


Рис. 2. Нагрузка главного двигателя в условиях штормового волнения

Тем самым, входное воздействие в РН будет иметь вид сброса-наброса нагрузки. То есть, непрерывное изменение шага в период качки, может вызывать критические значения гидродинамических сил на лопасти и срыв потока.

При длительном движении судна на развитом нерегулярном волнении постоянной интенсивности со средней скоростью  $\tilde{v}$  и средней частотой вращения гребного вала  $\tilde{n}_p$  режим работы винта оценивается [3] коэффициентом обратной нагрузки  $K_d = K_d(\lambda_p)$ , где относительная поступь винта

$$\lambda_p = \frac{\tilde{v}}{\tilde{n}_p D_p}.$$

Таким образом, предельным режимом, при котором РН еще может обеспечивать корректное управляющее воздействие, можно принять режим волнения, при котором еще не созданы условия его критического разгона (еще не возникает атмосферная кавитация винта).

В работе [4] предложен параметр, называемый вероятностной атмосферной кавитацией винта на режимах качки:

$$P_k = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{K_d - K_{d0}^*}{a \sigma_h} \right)^2 \right], \quad K_d \geq K_{d0}^*,$$

где  $K_d = f(\lambda_p)$  – коэффициент обратной нагрузки;  $K_{d0}^*$  – коэффициент обратной критической нагрузки, определяемый, например, по графику в [4];  $\bar{\sigma}_h$  – средняя дисперсия погружения оси винта.

При  $P_k = 0$  на каждом периоде колебаний погружение винта подсос винтом воздуха исключается. В данном рассматриваемом случае (для судна в грузу) это обеспечивается при волнении  $h_{3\%} = 2,4 \div 2,5$  м, но при дополнительном снижении скорости при этом до 7 узлов ( $\Delta v_2 = 1$  узел) данное ограничение можно принять за основное граничное условие, при котором действие РН еще может быть эффективным.

Режимы работы главного двигателя (ГД) с ВРШ при постоянной частоте вращения  $n = \text{const}$ , обеспечивающей параллельную с ГД работу валогенератора (ВГ) (рис. 3, квадрант I), определяются нагрузочной характеристикой  $N_e = f(\bar{H})$ , где  $\bar{H}$  – относительная координата разворота лопастей ВРШ (под координатой  $\bar{H}$  может пониматься как относительный шаг  $\bar{H}_p$ , так и шаговое отношение  $\bar{H}_p / \bar{D}_p$ ). Соответственно, измеренный средний для штилевых условий часовой расход топлива  $B_q$  (рис. 3, квадрант II, сплошная линия) учитывает величину расхода на привод валогенератора.

Для судна в балласте предельным режимом является режим волнения  $h_{3\%} = 1,7 \div 1,8$  м.

Реальные пределы изменения скорости судна в процессе эксплуатации зависят от его загрузки, технического состояния и в значительной степени – от условий волнения (рис. 3, квадрант III), а колебания мощности и соотношение  $\tilde{v} - \bar{N}_e$  естественно лежит в значительно широком диапазоне относительно штилевых условий (рис. 3, квадрант IV, сплошная линия).

Соответственно, речь должна идти о средней мощности  $\tilde{N}_e$  и средней величины расхода, при длительном движении судна на волнении постоянной интенсивности, при средней скорости  $\tilde{v}$  и частоте вращения гребного винта  $\tilde{n}_p$ .

Пределы колебаний  $\tilde{N}_e$  относительно установленной средней скорости  $\tilde{v}$  (с учетом намеренного ее снижения) в зависимости от степени волнения корректнее оценивать по данным испытаний и использованием зависимостей  $v = f(B_q)$  и  $v = f(h_{3\%})$ , полученных для условий доштормового волнения [5]. Эффективность действия РН в этих

условиях возможно оценить по расчетному критерию  $\tilde{b}_e = \tilde{B}_ч / \tilde{N}_e$  (рис. 4). Согласно экспериментальным данным [5] при волнении  $h_{3\%} \approx 3$  м расход топлива  $\tilde{B}_ч$  на 50 ... 55 % выше, чем при той же скорости, но в штилевых условиях.

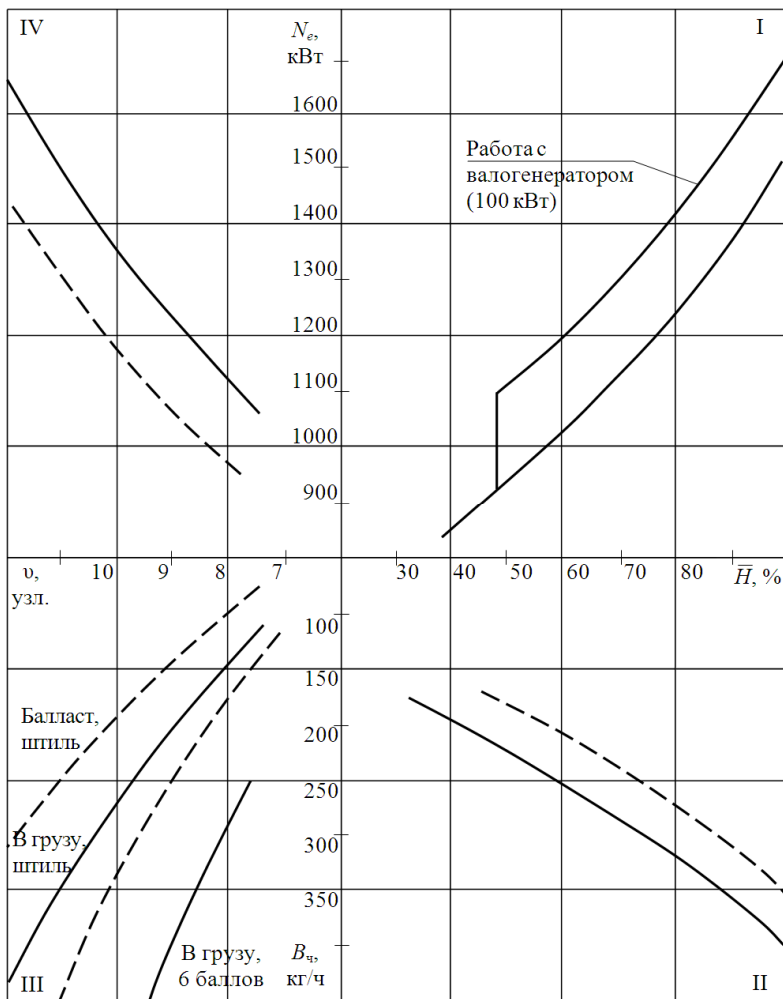


Рис. 3. Режимные характеристики главного двигателя в судовом комплексе

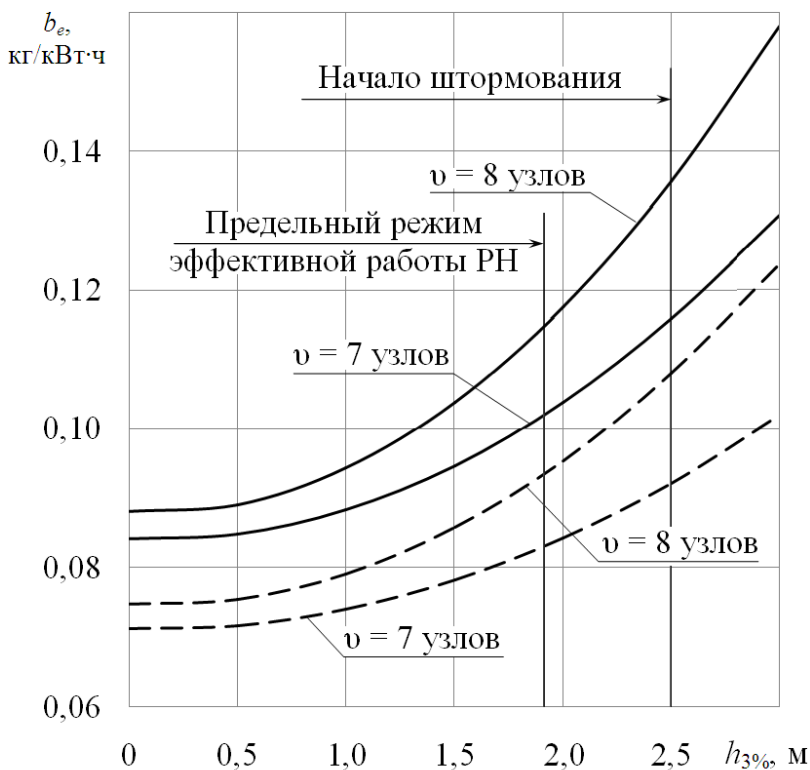


Рис. 4. Эффективность работы регулятора нагрузки в различных условиях плавания: ———— судно в грузу; - - - - судно в балласте

Примерно та же тенденция имеет место с критерием  $\tilde{b}_e$  для режима  $\tilde{v} = 8$  узлов при  $h_{3\%} = 2,5 - 3,0$  м с включенным РН (рис. 4), при которых созданы условия для разгона винта.

В пределах режимах волнения до  $h_{3\%} = 1,7 - 1,8$  м при работающем РН для судна в грузу – значение  $\tilde{b}_e$  при  $\tilde{v} = 8$  узлов на 27 % выше, чем при штилевых условиях, а при преднамеренном снижении  $\tilde{v}$  до 7 узлов значение  $\tilde{b}_e$  увеличено только на 17 %. Следовательно, наибольшая эффективность РН достигается в пределах волнения до  $h_{3\%} = 1,7 - 1,8$  м для значений скорости  $\tilde{v} = 9$  узлов при ее намеренном снижении до  $\tilde{v} = 7$  узлов.

Следует также учесть, что в этих условиях волнения при правильной настройке РЧВ главный двигатель не имеет перегрузок по тепловой и механической напряженности [6].

Выводы.

1. Предельным режимом работы регулятора нагрузки (РН) в системе управления ВРШ в условиях волнения следует принять режим начала штормования.

2. Эффективное действие РН в условиях волнения обеспечивается только для тех режимов волнения, при которых не возникает разгона и атмосферная кавитация гребного винта. Намеренное дополнительное снижение скорости судна также повышает эффективность действия РН.

3. Установление предельных режимов и величин намеренного снижения скорости судна является сложной задачей, требующей проведения специальных расчетов и натурных испытаний, но это оправдывается повышением экономических показателей работы комплекса с ВРШ и РН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Фильтрация воздействия нагрузки при управлении ВРШ на волнении // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – 2010. – Вып. 16. – Одесса: ОНМА. – С. 111 – 123.

2. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. – Л.: Судостроение, 1982. – 288 с.

3. 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.

4. Липис В.Б. Гидродинамика гребного винта при качке судна. – Л.: Судостроение, 1975. – 264 с.

5. Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Оценка расхода топлива и потери скорости в условиях штормового волнения // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – 2007. – Вып. 12. – Одесса: ОНМА. – С. 115 – 121.

6. Горб С.И. Рекомендации по настройке всережимно-предельного регулятора судового дизеля на волнении // Двигателестроение. – 1982. – № 7. – С. 32 – 34.