

ОЦЕНКА РАСХОДА ТОПЛИВА И ПОТЕРИ СКОРОСТИ В УСЛОВИЯХ ШТОРМОВОГО ВОЛНЕНИЯ

Существующие методики прогнозирования расхода топлива на переход в основном базируются на условной норме расхода, определяемой по статистическим данным работы судна в конкретных районах и в конкретном календарном периоде. В таком подходе изначально заложена ошибка на колебания путевых ветро-волновых характеристик района, техническое состояние корпуса, опыт экипажа и многие другие факторы.

При работе в штормовых условиях, особенно в осенне-зимний период, имеет место наиболее ощутимая потеря эксплуатационной скорости. В то же время, значения абсолютного расхода топлива на милю пути существенно увеличиваются по сравнению с режимом движения при отсутствии волнения – ввиду стохастического влияния факторов, прежде всего, волнения на текущий режим работы главного двигателя (ГД) (рис. 1). Это обстоятельство обычно приводит к незапланированному перерасходу топлива, непредвиденному сокращению срока между бункеровками и, соответственно, – ухудшению экономических показателей рейса.

С целью прогнозирования возможных расходов топлива при переходе в условиях штормового волнения, проверки и подтверждения теоретических расчетных значений с использованием математической модели, приведенной в [2], а также для дополнения и систематизации экспериментальных данных по ранее проведенным экспериментам на судах этой же серии [3] были произведены специальные натурные испытания ходовых параметров судна в зависимости от ветро-волнового режима. Испытания проводились во время рейсов теплоходов "Рени" и "Киля" (проект Р845, типа "Измаил") Украинского Дунайского пароходства в период с 26 ноября по 25 декабря 2005 г. по маршруту: п. Мариуполь – п. Альхесирас (Испания) – п. Кастельон (Испания) – п. Дуррес (Албания) – п. Мариуполь. ГД обоих судов (R32BC Wärtsilä Vasa, $N_e = 1985$ кВт, $n = 720$ мин⁻¹ = const) отработали приблизительно 40 – 60 % своего ресурса между моточистками, обрастание подводной части отсутствовало.

Маршруты судна за время экспериментального рейса, также, как и в предыдущем экспериментальном рейсе [3], проходили 7 зон стандартных ветро-волновых режимов.

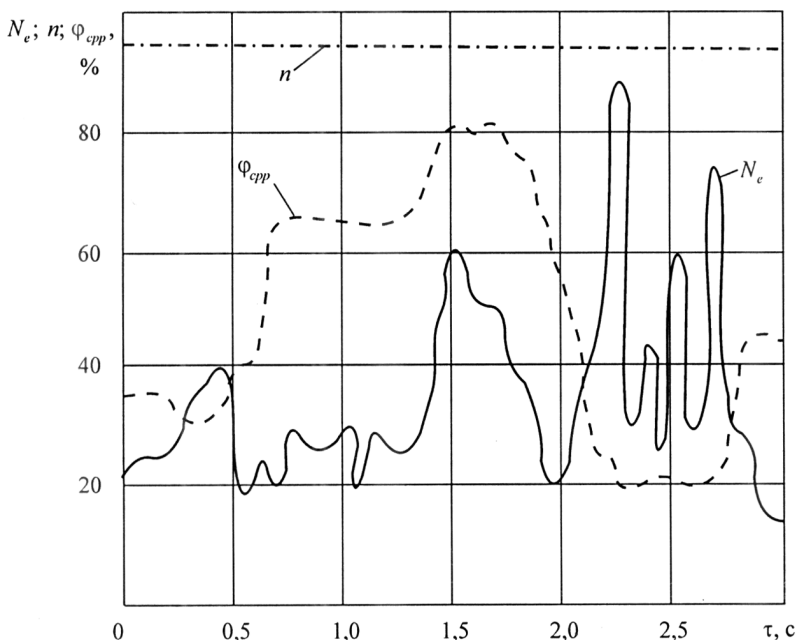


Рис. 1. Изменение мощности на валу ГД судов серии "Измаил" (Wärtsilä Vasa R32BC) и шага винта при волнении: n – частота вращения вала ($n = \text{const}$); N_e – мощность; $\phi_{срр}$ – разворот лопастей винта

Условия для проведения испытаний были установлены следующими: неизменный режим работы ГД и упор винта регулируемого шага (ВРШ); установившийся ветро-волновой режим; неизменный генеральный курс судна во время проведения наблюдения. При наличии этих условий непосредственно перед началом опыта снимались контрольные показания счетчика топлива бустерной установки, частота вращения ГД и гребного вала, нагрузка ВРШ и ГД.

Всего заполнено 43 протокола. Расход топлива измерялся по показаниям штатного расходомера Aquametro. Скорость измерялась с помощью приёмника GPS SPR-1400 фирмы SAMYUNG.

На ходовом мостике производился ряд моментных замеров периодов качки судна (бортовой и килевой), кажущихся периодов и высот волн. Одновременно через произвольные промежутки времени фиксировалась скорость судна и количество ударов волн в днище и носовой подзор. По окончании эксперимента по карте снимались итоговые показания счетчика топлива и пройденный путь.

Тем самым выполнялись стандартные условия оценки ветро-

волнового режима, принятые в практике подобных испытаний.

Контрольное время проведения наблюдений для теплохода "Рени" составляли 0,5 и 1 час, для теплохода "Килия" – 2 и 3 часа. Измерения относительных расходов топлива B_m , были выполнены при высотах волн от 0,1 до 3,5 м с различными углами набега волн и скорости ветра, при нагрузках ГД от 60 до 70 %, частоте вращения гребного вала $n_p = 218 \text{ мин}^{-1}$ и частоте вращения главного двигателя $n = 710 \dots 716 \text{ мин}^{-1}$.

Используемая на судах серии "Измаил" система программного управления [1] позволяет получить одну и ту же величину скорости судна v при различных сочетаниях частоты вращения n , шагового отношения ВРШ H/D_p , эффективной мощности двигателя N_e , а также выйти в диапазон наивыгоднейшего КПД пропульсивного комплекса η_p .

В результате произведенных наблюдений определены условия, при которых наблюдается минимальный и максимальный расход топлива:

штиль (высота волны трехпроцентной обеспеченности $h_{3\%} = 0,1 \text{ м}$), относительный расход топлива $B_m = 22,3 \text{ л/милю}$;

режим наибольшего влияния волны – встречное волнение, высота волны $h_{3\%} = 2,0 \text{ м}$, скорость встречного ветра $v_v = 10 \text{ м/с}$, относительный расход топлива $B_m = 38 \text{ л/милю}$.

Полученные данные свидетельствует о том, что определяющее влияние на расход топлива оказывает высота и кажущийся угол набега волн. Суммарно весь комплекс погодных факторов (скорость и направление ветра, кажущийся период волнения, наличие течений), а также связанных с состоянием загрузки судна (периоды качки судна, наличие бортового и/или днищевого слеминга), воздействующих на судно при высоте волны до 3,0 м, увеличивает расход топлива на $\delta B_m = 50 \dots 55 \%$ по сравнению со штилевыми условиями. При этом при курсовых углах встречи волн от 0 до 45° каждый из перечисленных факторов может вызывать увеличение расхода топлива в диапазоне от 4 до 15 % – в зависимости от величины высоты волны. Также установлено, что $h_{3\%} = 3,0 \text{ м}$ – это предельная высота волны, при которой еще возможна относительно нормальная эксплуатация судов этого типа. Более высокие значения высот волн вызывают сильное рыскание, значительный перерасход топлива, а также крайне дискомфортные условия обитаемости для экипажа.

По результатам наблюдений и с учетом предыдущих экспериментов [3] были получены зависимости, отражающие характер изменения значений расхода топлива от скорости и скорости от высоты волны.

Зависимость, приведенная на рис. 2, отражает увеличение значения расхода топлива B_m и падения скорости судна v при непрерывно возрастающей высоте волны $h_{3\%}$, т.е. $\{B_m \rightarrow \max, v \rightarrow \min\}$ при $h_{3\%} \rightarrow \max$ и постоянных $n, N_e, H/D_p, n_p$.

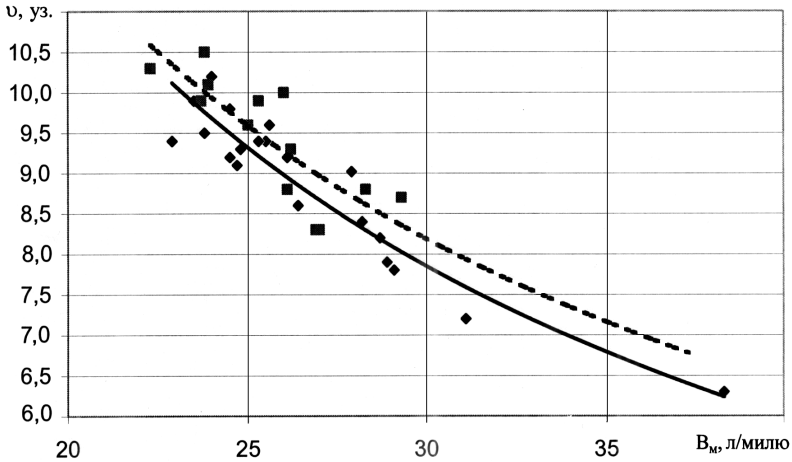


Рис. 2. Относительный расход топлива при нарастающей высоте волны и неизменном режиме работы ГД и ВРШ: ————— – встречное волнение; ————— – попутное волнение

Из рис. 3 видно, что на попутном волнении при неизменных параметрах работы пропульсивного комплекса, скорость судна v возрастает в среднем на 0,8 ... 1,0 узла, причем большее значение этого диапазона соответствует большей высоте волны.

Используя рис. 2 и 3 можно получить следующие две системы уравнений:

для встречного волнения

$$\begin{cases} v = 192,42 B_M^{-0,9} \\ v = 8,66 h_{3\%}^{-0,1}; \end{cases}$$

для попутного волнения

$$\begin{cases} v = 156,74 B_M^{-0,9} \\ v = 9,48 h_{3\%}^{-0,1}. \end{cases}$$

Путем решения этих систем уравнений относительно расхода топлива B_M , получены зависимости приближенного относительного расхода топлива:

для встречного волнения

$$B_{MB} = 26,76 h_{3\%}^{0,11}; \quad (1)$$

для попутного волнения

$$B_{МП} = 25,18h_{3\%}^{0,09} . \quad (2)$$

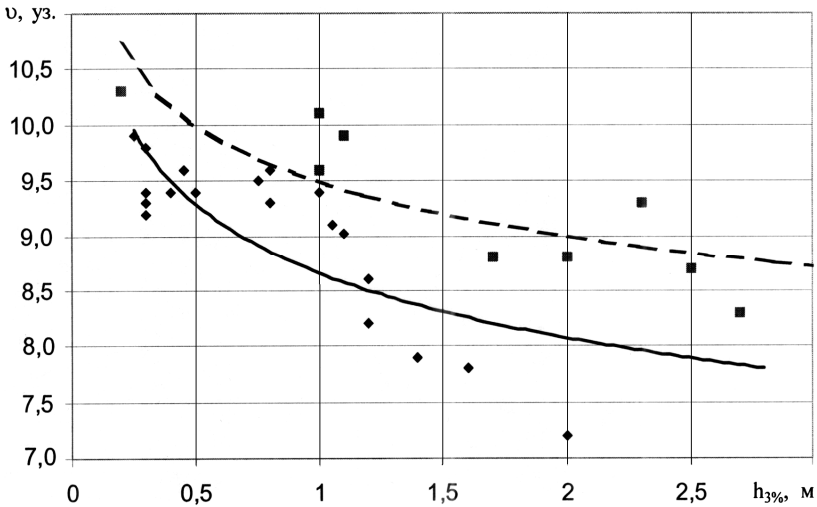


Рис. 3. Зависимость скорости от высоты волны при неизменном режиме работы ГД и ВРШ: ———— – встречное волнение; - - - - - попутное волнение

Коэффициенты достоверности аппроксимации полученных уравнений R^2 не слишком велики (для встречного волнения $R^2 = 0,60 \dots 0,90$, для попутного волнения $R^2 = 0,65 \dots 0,66$). Это связано с различием значений погодных факторов, влияющих на расход топлива. Количество проведенных опытов (в первом экспериментальном рейсе [3] получено 45 протоколов, во втором экспериментальном рейсе – 42 протокола) все же не позволяет выявить числовые значения влияния каждого конкретного фактора, поэтому в формулы (1) и (2) введен специальный поправочный коэффициент k_i , учитывающий множество значений факторов, а также разницу между разбегом фактических и расчетных значений B_M .

Значения поправочного коэффициента: для встречного волнения $k_e = 0,96 \dots 1,02$; для попутного волнения $k_n = 0,95 \dots 1,01$. Доверительные диапазоны значений коэффициента k_i рассчитаны с использованием статистического критерия распределения Стьюдента с надежностью 0,95.

Таким образом, зависимости (1) и (2) окончательно примут вид:

для встречного волнения

$$B_{MB} = 26,76h_{3\%}^{0,11} \cdot k_B ; \quad (3)$$

для попутного волнения

$$B_{мД} = 25,18h_{3\%}^{0,09} \cdot k_{Д} \cdot \quad (4)$$

Зависимости (3) и (4) позволяют достаточно быстро и легко определить диапазон возможных расходов топлива судов типа "Измаил" при высотах волн от $h_{3\%} = 1 \dots 3,5$ м. Они дают хорошие результаты в пределах эксплуатационных водоизмещений судна от 3000 до 5740 т и отработанного ресурса ГД до 75 %. В табл. 1 приведены величины расхода топлива для судна в полном грузу при разных значениях высоты волны $h_{3\%}$ и курсовых углах встречи волн, рассчитанные по формулам (3) и (4) – $B_{мрасч.}$, и полученные в результате измерений во время экспериментальных рейсов – $B_{мэксп.}$

Таблица 1

Сравнение величин расхода топлива

Условия плавания		$B_{мрасч.}$, л/миля	$B_{мэксп.}$, л/миля
Встречное волнение	$h_{3\%} = 1$ м	27,29	26,05
	$h_{3\%} = 1,5$ м	28,54	28,63
	$h_{3\%} = 2$ м	29,45	30,28
	$h_{3\%} = 2,5$ м	30,18	31,36
	$h_{3\%} = 3$ м	30,80	33,50
Попутное волнение	$h_{3\%} = 1$ м	24,67	24,02
	$h_{3\%} = 1,5$ м	25,59	25,69
	$h_{3\%} = 2$ м	26,26	26,63
	$h_{3\%} = 2,5$ м	26,79	27,25
	$h_{3\%} = 3$ м	27,24	29,65

В табл. 2 сравнены данные по результатам измерений скорости хода судна при постоянной нагрузке ГД (60 – 70 % от максимальной мощности) в экспериментальных рейсах ($v_{эксп.}$) и по результатам расчета с использованием теоретической модели [2] ($v_{расч.}$).

Расчетные данные приведены для нагрузки ГД 66 % от его максимальной мощности. Разница расчетных и экспериментальных значений скорости, приведенных в табл. 2 может быть объяснена несколькими факторами. Прежде всего, на практике редко встречаются случаи строго встречного и строго попутного волнения, поэтому данные приведены по курсовым углам встречи волн (0 ± 45)° и (180 ± 45)°. Кроме того, нагрузка ГД на практике варьируется от 60 до 70 % его максимальной мощности и экспериментальные данные приведены для всего диапазона без учета количества данных по тому или иному значению для каждого курсового угла встречи волн. Таким образом среди экспериментальных данных при проведенном количестве опытов не встречается строгого соот-

ветствия расчетным условиям. В целом же полученные основные критерии, являющиеся показателями эффективности рейса – потеря скорости, расход топлива на единицу пути – подтверждают достоверность модели [2] как инструмента прогнозирования ходовых характеристик судна в реальных условиях эксплуатации.

Таблица 2

Сравнение скоростей хода судна при постоянной нагрузке ГД

Условия плавания		$v_{\text{эксп.}} \text{ уз.}$	$v_{\text{расч.}} \text{ уз.}$
Встречное волнение	$h_{3\%} = 1 \text{ м}$	9,14	8,00
	$h_{3\%} = 1,5 \text{ м}$	8,12	7,90
	$h_{3\%} = 2 \text{ м}$	7,56	7,80
	$h_{3\%} = 2,5 \text{ м}$	6,91	7,70
	$h_{3\%} = 3 \text{ м}$	6,70	7,60
Попутное волнение	$h_{3\%} = 1 \text{ м}$	9,73	9,20
	$h_{3\%} = 1,5 \text{ м}$	9,47	9,25
	$h_{3\%} = 2 \text{ м}$	9,29	9,30
	$h_{3\%} = 2,5 \text{ м}$	9,64	9,35
	$h_{3\%} = 3 \text{ м}$	9,28	9,40

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суворов П.С. Динамика двигателя в судовом пропульсивном комплексе. – Одесса: ОНМА, 2004. – 304 с.
2. 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.
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.