

DOI 10.15589/jnn20160204
УДК 621.182.3: 629.5.031.32
Ш79

THE TOTAL FUEL CONSUMPTION VESSEL WITH LOW-SPEED ENGINE AND KITE

СУММАРНЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА МАЛОБОРОТНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ СУДНА С КАЙТОМ

Vladimir P. Shostak

volodymyr.shostak@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-4745-4734

Alena I. Kisarova

niilito4ka@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0414-2287

В. П. Шостак

канд. техн. наук, проф.

А. И. Кисарова

ассист.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The calculation method for determination of fuel consumption for main engine for a life cycle of a transport ship with a kite — in the deterministic setting — has been considered. This fuel consumption — the amount of consumptions in certain sector on regular ship line with conditionally constant weather; in some sectors with a favorable wind, the kite starts work, reducing the load and fuel consumption of the main engine. Conditionally constant weather predetermines a constant load on the main engine and therefore constant fuel consumption. Such weather can last a different time, which is on stochastic depending on wind speed and World ocean areas. As the weather is changeable, so the calculation is performed on all voyages over the ship's life cycle. The fuel consumption estimated data for the low-speed engine 6S50ME applied to the tanker «Dmitry Medvedev» type with a kite on a sector of regular ship line in the North Atlantic are consider. Paid attention that the fuel consumption for the ship's life cycle stipulates use the method of statistical modeling.

Keywords: marine power plant, fuel consumption of low-speed engine, shuttle line, the kite, the ship's life cycle.

Аннотация. Представлена методика расчета расхода топлива на главный двигатель транспортного судна с кайтом. Этот расход — сумма расходов на участках рейсовой линии с условно постоянной погодой; при благоприятном ветре в работу включается кайт, снижая нагрузку и расход топлива. Поскольку погода изменчива, то расчет производится по всем рейсам за жизненный цикл судна. Приведены расчетные данные расхода топлива для двигателя 6S50ME применительно к танкеру типа «Дмитрий Медведев» с кайтом на участке рейса в Атлантике.

Ключевые слова: судовая дизельная установка, расход топлива малооборотным двигателем, рейсовая линия, кайт, жизненный цикл судна.

Анотація. Представлена методика розрахунку витрати палива на головний двигун транспортного судна з кайтом. Ця витрата — сума витрат на ділянках рейсової лінії з умовно сталою погодою; при сприятливому вітрі в роботу включаться кайт, знижуючи навантаження і витрату палива. Оскільки погода мінлива, то розрахунок проводиться по всіх рейсах за життєвий цикл судна. Наведено розрахункові дані витрати палива для двигуна 6S50ME стосовно до танкера типу «Дмитрий Медведев» з кайтом на ділянці рейсу в Атлантиці.

Ключові слова: суднова дизельна установка; витрата палива малооборотним двигуном; рейсова лінія; кайт; життєвий цикл судна.

REFERENCES

- [1] *Veter i volny v okeanakh i moryakh* [Wind and waves in the oceans and at seas]. *Spravochnye dannye / Registr SSSR*. [Reference Data / register USSR]. Moscow, Transport Publ., 1974. 359 p.
- [2] *Programma OpenCPN dlya organizatsii morskoy navigatsii sudov razlichnykh tipov i razmerov* [OpenCPN program for the organization of maritime navigation for different types and sizes of vessels]. Available at: <http://opencpn.org/ocpn/>.
- [3] *RPZ 15966-020-004. Raschet buksirovochnogo soprotivleniya, elementov vinta i khodovykh kachestv sudna* [SEN 15966-020-004. Calculation of the towing resistance screw and the ship propulsion system elements]. *TsKB «Izumrud» — SDB «Izumrud»*. Kherson, 1982.

- [4] Voytkunskiy Ya. V. *Spravochnik po teorii korablya, tom 1* [Reference book on the ship theory, vol. 1]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1986. 768 p.
- [5] Shostak V. P., Gershanik V. I. *Imitatsionnoe modelirovanie sudovykh energeticheskikh ustanovok* [Marine power plant simulation]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1988, 256 p.
- [6] Shostak V. P., Manzyuk A. Yu. *Opir dokillia rukhu transportnoho sudna* [Resistance to the environment movement transport vessel]. Mykolaiv, NUOS Publ., 2012. 181 p.
- [7] Shostak V. P., Kisarova A. I. *Raskhod topliva i ekologichnost sudovoy propulsivnoy ustanovki s kaytom* [Fuel consumption and environmentally ship propulsion plant with a kite]. *Elektronne vydannia «Visnyk Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia» — Bulletin of NUS. Electronic Edition*, 2013, no. 3. Available at: <http://evn.nuos.edu.ua/article/view/23360/20846>.
- [8] Shostak V. P., Kisarova A. I. *Ukrupnennaya matematicheskaya model dlya opredeleniya parametrov adaptatsii MOD* [The integrated mathematical model to determine the adaptation LSE parameters]. *Materiali VII Mizhnarodnoi nauково-tekhnichnoi konferentsii «Sudnova energetika: stan ta problemy»*. [Proceedings of the 7th International scientific conference «Ship Power: Status and Problems»]. Mykolaiv, NUOS Publ., 2013.
- [9] Aschenbeck St., Elsner R., Lenger T., Szczesny W., Emden R. Kreutzer, Schlaak M. Einsatz des SkySails Systems auf der MS «Beaufort»: *Institut für Angewandte Wirtschaftsforschung und Regionalanalyse ANWI; Institut für Seefahrt Leer*, 2007. 5 p.
- [10] Elsner R., Schlaak M., Kreutzer R. Simulating possible Savings of the SkySails-System on International Merchant Ship Fleets. In: *Journal of Marine Engineering and Technology*, 2010.
- [11] *MAN Diesel & Turbo*. Available at: <http://www.mandieselturbo.com>.
- [12] Schnackenberg T. Sky sails — Vessel Propulsion using Kites. *20-th International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction. Amsterdam RAI Convention Centre*, 17 November 2008. 11 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время на морских транспортных судах доминируют дизельные энергетические установки (ДЭУ), в которых в качестве главного двигателя (ГД) используются малооборотные двигатели (МОД). Одним из путей повышения энергоэффективности пропульсивной установки является оптимизация параметра согласования МОД исходя из предстоящих условий эксплуатации, рациональное значение которого соответствовало бы минимуму расхода топлива ГД за срок службы судна. Согласование заключается в установлении соответствия характеристик собственно двигателя внутреннего сгорания (ДВС) характеристикам турбокомпрессора (ТК), исходя их всего спектра нагрузок на ГД в режиме полного хода.

В качестве параметра согласования выступает положение точки согласования — matching point (также называемой точкой настройки или точкой оптимизации) на поле выбора рабочих параметров МОД в координатах «мощность-частота» или значение доминирующей нагрузки МОД.

Значение параметра согласования предопределяет ту или иную зависимость удельного расхода топлива МОД от его нагрузки. На рис. 1 представлены такие зависимости, рассчитанные для двигателя 6S50ME-C со спецификационной мощностью 9006 кВт. Как видно, экстремальные значения удельного расхода топлива при практически граничных положениях точки согласования изменяются в диапазоне 9 г/(кВт · ч), а при нагрузке ~70% — в два раза больше. Это указывает на важность значения доминирующей нагрузки

МОД, выбор которой на стадии проектирования ДЭУ предопределяет последующие эксплуатационные расходы на топливо.

Поскольку для традиционных пропульсивных установок, когда колебания нагрузки ГД в режиме полного хода судна сравнительно невелико, то рациональному согласованию характеристик ДВС и ТК соответствует мощность, близкая к спецификационной, на что имеются соответствующие рекомендации [11 и др.]. Но с появлением добавочной пропульсивной тяги за счет управляемого воздушного змея — кайта (kite) [7, 9, 10, 12] существенно расширяется диапазон нагрузки МОД, что оказывает влияние на расход топлива ГД. Для этого случая в литературе не обнаружено ни практических рекомендаций, ни теоретических решений. Поэтому актуальным становится решение задачи по определению значения рационального параметра согласования МОД для судна с кайтом. В качестве критерия сравнительной эффективности различных значений параметра согласования может выступать, естественно, расход топлива ГД за весь период эксплуатации судна, в течение которого периодически используется кайт — при возникновении благоприятных гидрометеорологических условий. Определение расхода топлива расчетным путем в такой постановке в литературе нами не обнаружено. На ликвидацию этого пробела и направлена данная статья.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В последние годы ведутся разработки различных вариантов судовых пропульсивных установок (ПУ),

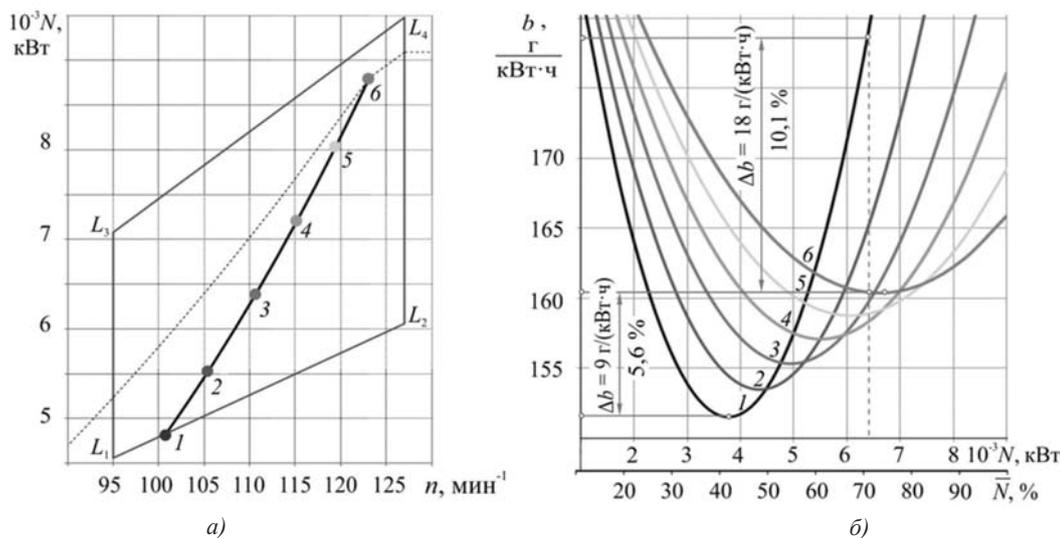


Рис. 1. Поле $L_1-L_2-L_3-L_4$ для выбора рабочих параметров в координатах «мощность N — частота n », точки согласования на штормовой винтовой характеристике двигателя 6S50ME-C (а) и соответствующие зависимости удельного расхода топлива b от его нагрузки N (б)

в которых в дополнение к ГД, работающему на гребной винт (ГВ), подключается ветроэнергетическая вспомогательная установка. Одним из вариантов выступает ПУ «МОД — ГВ — воздушный буксирующий змей (кайт)». Эксплуатация отдельных судов с применением кайтов (например, т/х «Beluga», т/х «MS Beafort», т/х «Michael A», т/х «Aghia Marina» и др. [9, 10, 12]), показала высокую эффективность использования ветродвижения на маршрутах с достаточно высокой энергией ветра. С учетом возможности создания все более крупных кайтов (600 м² и более [9, 10, 12]) и понижения с их применением на судах неблагоприятного экологического воздействия ЭУ на окружающую среду, появление серийных транспортных судов с кайтами предоставляется весьма вероятным. В этой ситуации адекватный расчет расхода топлива МОД за срок службы судна на стадии принятия проектных решений позволит корректно определить рациональное значение точки согласо-

вания — matching point и значение его доминирующей нагрузки. Однако в литературе отсутствуют сведения о подобных расчетах.

ЦЕЛЮЮ СТАТЬИ является построение укрупненной методики, позволяющей в детерминированной постановке рассчитывать на стадии проектирования СЭУ расход топлива, затрачиваемого на движение судна с кайтом в предстоящей эксплуатации.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Рейсовый расход топлива ГД зависит от характеристик судна, технического состояния его внешней подводной части, контрактной скорости хода v_s , также от гидрометеорологических параметров, собственных метеорологическим районам определенной части Мирового океана.

На рис. 2 представлен круговой маршрут четырех рейсовых линий в Северной Атлантике с указанием 11 метеорологических районов — с 7 по 17-й. Для

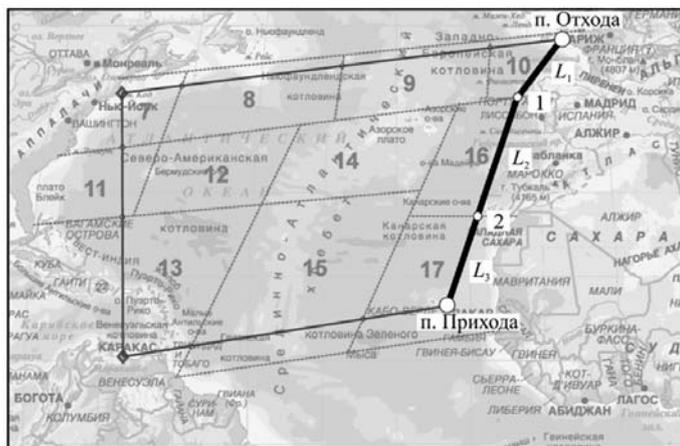


Рис. 2. Рейсовые линии на карте с метеорологическими районами в Северной Атлантике

таких районов Мирового океана известны интенсивность волнения, сила ветра, их направления, представляемые в виде частотных таблиц высоты волн 3%-й обеспеченности, скорости ветра и пр. [1].

На рис. 3 изображена схема рейсовой линии — (по рекомендуемому маршруту) между портами «Отхода» и «Прихода», географические координаты которых (долгота и широта) φ_0, λ_0 и φ_n, λ_n . Точки 1 и 2 на этом рисунке определяют пересечения рейсовой линии с границами метеорологических районов, координаты которых φ_1, λ_1 и φ_2, λ_2 , что разделяет линию на три перехода с протяженностями L_1, L_2 и L_3 . Значения L_1, L_2 и L_3 , как правило в милях, могут быть определены по соответствующим приведенным координатам с помощью, например, программы OpenCPN [2]. На переходе может быть несколько участков с так называемыми условно постоянными погодами, когда при $v_s = \text{const}$ нагрузка на ГД на каждом из этих участков остается неизменной, но разной по величине.

На рис. 4 для перехода с L_1 показан первый участок постоянной погоды № 1.1, например, со скоростью ветра $V_{1.1} = 1$ м/с, протяженностью $l_{1.1}$, мили, которая определяется продолжительностью постоянной погоды $t_{1.1}$, часы, и скоростью v_s , уз.:

$$l_{1.1} = v_s t_{1.1}$$

Продолжительность постоянной погоды t — случайная величина, в значительной степени зависящая от скорости истинного ветра V_n и района Мирового океана. На рис. 5 приведена стохастическая зависимость $t = f(V_n)$, полученная по результатам обобщения многолетних наблюдений метеорологической обстановки в умеренных и тропических районах Северной Атлантики. В единичном расчете принимается одно из возможных значений этой продолжительности. Например, для участка № 1.1 $t_{1.1} = 9$ ч, что выбрано из диапазона $t_{1.1}^{\min} \dots t_{1.1}^{\max}$.

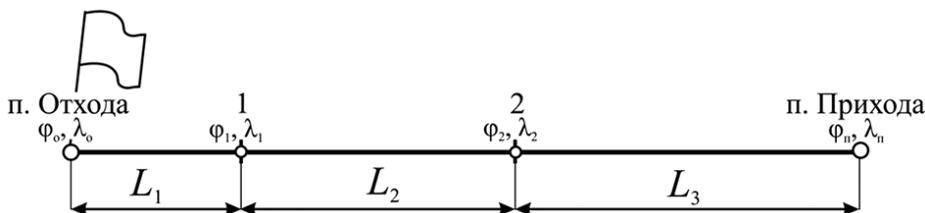


Рис. 3. Рейсовая линия с переходами протяженностью L_1, L_2 и L_3 в отдельных метеорологических районах

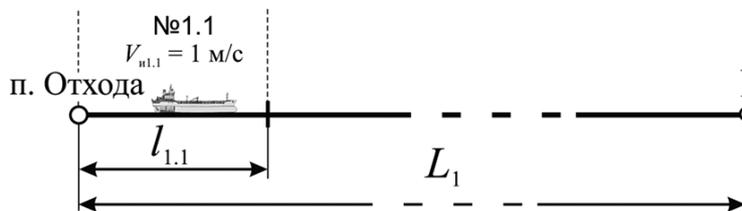


Рис. 4. Переход протяженностью L_1 с указанным участком постоянной погоды № 1.1 протяженностью $l_{1.1}$

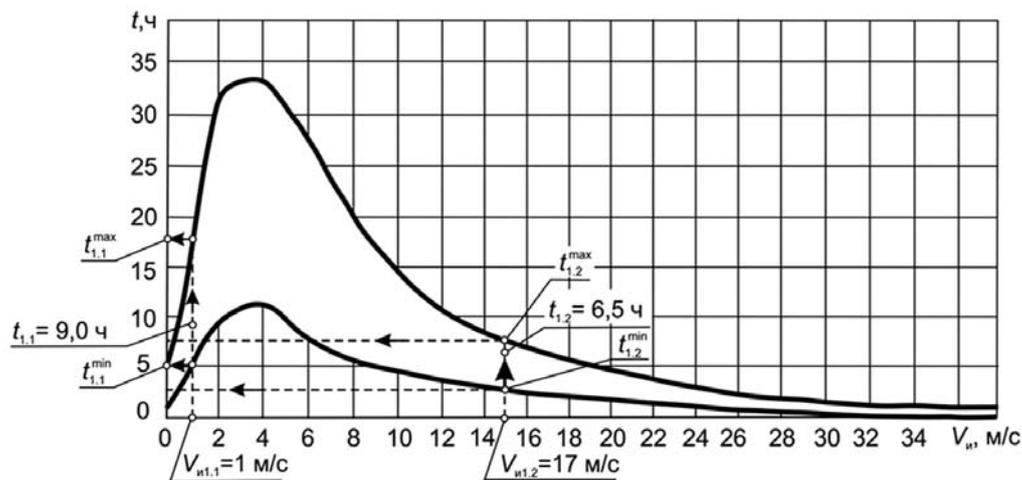


Рис. 5. Стохастическая зависимость продолжительности постоянной погоды от скорости ветра

Если для участка № 1.1 $V_{н1.1} = 1$ м/с, то работа кайта невозможна, движение судна осуществляется за счет работы ГД, и расход топлива ГД, т, на этом участке определится как

$$B_{1.1} = 10^{-6} N_{1.1} b_{1.1} t_{1.1}, \quad (1)$$

где $N_{1.1}$ — мощность ГД, развиваемая на участке № 1.1, кВт; $b_{1.1}$ — удельный расход топлива, соответствующий $N_{1.1}$, г/(кВт·ч).

Мощность, развиваемая ГД, N (кВт) может быть определена, например, по следующей формуле [3, 4]:

$$N = D^5 \rho K_2 n^3 \frac{1}{\eta}, \quad (2)$$

где D — диаметр гребного винта (ГВ), м; ρ — плотность забортной воды, кг/м³; K_2 — коэффициент момента ГВ; n — частота вращения ГВ, с⁻¹; η — КПД валопровода.

Составляющие величины, входящие в зависимость для определения мощности ГД, могут быть найдены по-разному, в частности — по проектным данным для конкретного судна, полученным, например, в результате испытаний его модели в опытовом бассейне [3]. Обычно коэффициент момента ГВ представлен зависимостью от безразмерного коэффициента нагрузки ГВ по тяге K_{DE} , т.е. $K_2 = f(K_{DE})$. Последний определяется как

$$K_{DE} = vD \sqrt{\frac{\rho}{R}},$$

где v — скорость хода судна, м/с; R — сопротивление движению судна, кН.

Сопrotивление движению судна в общем случае представляет собой функцию многих переменных [6]

$$R = f(v_s, T_s, h_{ш}, V, q, h_{3\%}, q_B),$$

где T_s — осадка судна; $h_{ш}$ — уровень шероховатости подводной части корпуса судна; V — скорость кажущегося ветра; q — угол между направлением кажущегося ветра и курсом судна; $h_{3\%}$ — высота волн, например 3%-й обеспеченности; q_B — угол между направлением волнения и курсом судна, град (для упрощения полагая при этом, что направление истинного ветра совпадает с направлением волнения).

Чаще всего расчеты сопротивления движению сводятся [1] к характерному параметру интенсивности волнения — высоте волн 3%-й обеспеченности, которая находится в стохастической зависимости от скорости ветра $h_{3\%} = f(V_B)$. Интенсивность волнения в морях и океанах изучена, и для каждого района Мирового океана имеются частотные таблицы распределения высот волн 3%-й обеспеченности, например [1].

На уровень шероховатости подводной части корпуса судна влияют время, прошедшее после докова-

ния, соотношение ходового и стояночного времени, район плавания. Для принятого, характерного для конкретного судна, эксплуатационно-ремонтного графика (ЭРГ) и определенной рейсовой линии величина $h_{ш}$ может быть представлена в функции лишь одного параметра — возраста судна T , т.е. $h_{ш} = f(T)$.

Угол q представляет собой разность между углами курса судна и направления кажущегося ветра. Курсовой угол судна находится согласно рекомендуемому маршруту [2], а угол направления кажущегося ветра — в соответствии с частотными таблицами по направлениям ветра [1].

Частота вращения гребного винта (ГВ), необходимая для достижения задаваемой скорости хода судна, зависит от изменяющегося в эксплуатации сопротивления движению, и, согласно имеющимся в литературе сведениям [3, 4], ее определение производится в зависимости от целого ряда параметров — аргументов обобщенной функции:

$$n = f(v_s, K_{DE}, \omega, \tau, K_1),$$

где ω , τ и K_1 — коэффициенты расчетного попутного потока, засасывания и упора ГВ.

Определение коэффициентов ω и τ может быть произведено разными способами, но предпочтение следует отдавать использованию зависимостей $\omega = f_1(K_{DE})$ и $\tau = f_2(K_{DE})$, полученных по данным модельных испытаний [3, 4]. В свою очередь, коэффициент K_1 для конкретного судна изменяется согласно функциональной зависимости $K_1 = f(\omega, v_s)$ [4].

В соответствии с изложенным, для участка № 1.1, применительно к конкретному судну могут быть определены коэффициенты K_{DE1} , K_{21} , частота $n_{1.1}$ и рассчитана по уравнению (2) мощность $N_{1.1}$, развиваемая МОД на этом участке.

Удельный расход топлива МОД, установленного на судне, зависит, прежде всего, от развиваемой мощности N , а также от параметров окружающей среды, таких как температуры окружающей среды t_{oc} и забортной воды $t_{зв}$, давления атмосферного воздуха P_a и теплоты сгорания топлива Q_T , т.е. $b = f(N, t_{oc}, t_{зв}, P_a, Q_T)$. При известных значениях этих аргументов для участка № 1.1 в соответствии с рекомендациями, например компании-разработчика МОД [11], определяется удельный расход топлива $b_{1.1}$.

Таким образом, определенные значения $N_{1.1}$, $b_{1.1}$ и $t_{1.1}$ служат для расчета по уравнению (1) расхода топлива $B_{1.1}$ на участке постоянной погоды № 1.1.

На рис. 6, помимо участка № 1.1, показан следующий участок № 1.2, на котором погодные условия иные; например, скорость кажущегося ветра $V_{1.2} = 9,9$ м/с, а его угол $q_{1.2} = 163^\circ$. Для этого участка, как и для участка № 1.1, может быть одно из возможных значений продолжительности постоянной погоды $t_{1.2}$ — из диапазона $t_{1.2}^{\min} \dots t_{1.2}^{\max}$ (см. рис 5).

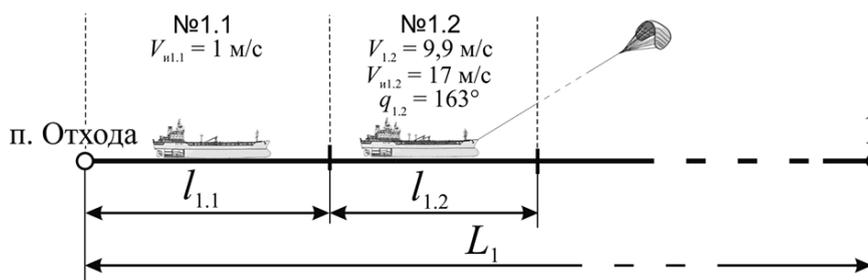


Рис. 6. Переход протяженностью L_1 с указанными на нем участками постоянной погоды № 1.1 и № 1.2 протяженностью соответственно $l_{1.1}$ и $l_{1.2}$

Протяженность второго участка, определяемая аналогично предыдущему,

$$l_{1.2} = v_s t_{1.2}$$

Указанные значения скорости ветра и его угла позволяют ввести в работу кайт и, благодаря его тяге, при $v_s = \text{const}$ уменьшить тягу гребного винта и, следовательно, мощность $N_{1.2}$, развиваемую МОД на участке № 1.2. В этом случае в уравнении для определения коэффициента K_{DE} вместо сопротивления движению судна R используется величина, определяемая как

$$R_s = R - P_{\text{кп}},$$

где $P_{\text{кп}}$ — полезная тяга кайта, которая представляется компанией-производителем кайтов SkySails [9, 10, 12] обобщенной функциональной зависимостью $P_{\text{кп}} = f(S, V, q, v_s)$, в которой S — площадь кайта.

Для участка № 1.2 коэффициенты нагрузки и момента, частоты вращения ГВ будут иными, а именно: $K_{DE_{1.2}}$, $K_{2_{1.2}}$, $n_{1.2}$. Следовательно, и мощность, развиваемая ГД, будет другой — $N_{1.2}$. Аналогично предыдущему, определяется удельный расход топлива $b_{1.2}$ при мощности $N_{1.2}$. Тогда расход топлива ГД на участке № 1.2

$$B_{1.2} = 10^{-6} N_{1.2} b_{1.2} t_{1.2}.$$

Расчетное количество участков обуславливается той или иной скоростью ветра, продолжительностью постоянной погоды и длиной перехода. На рис. 7 представлена ситуация, когда первый переход состоит из четырех участков с указанием скоростей

и углов ветра. На третьем участке, как и на втором, судно движется за счет работы ГД и кайта, а на четвертом, как и на первом, за счет лишь ГД.

На рис. 8 показаны параметры (скорости и углы, определяющие направление) истинного, курсового и кажущегося ветра для участков № 1.2 и № 1.3.

Расхода топлива ГД на первом переходе протяженностью L_1

$$B_1 = B_{1.1} + B_{1.2} + B_{1.3} + B_{1.4},$$

или в общем виде

$$B_1 = B_{1.1} + B_{1.2} + \dots + B_{1j} + \dots + B_{1U} = \sum_{j=1}^{U_1} B_{1j},$$

где B_{1j} — расход топлива ГД на j -м участке первого перехода; $j = 1, 2, \dots, U_1$; U_1 — количество участков на первом переходе.

Аналогично определяется расход топлива ГД на двух последующих переходах:

$$B_2 = \sum_{j=1}^{U_2} B_{2j}; \quad B_3 = \sum_{j=1}^{U_3} B_{3j},$$

где B_{2j} и B_{3j} — количество топлива ГД на j -х участках второго и третьего переходов; U_2, U_3 — количество участков на втором и третьем переходах.

Расход топлива ГД в рейсе, между портами «Отхода» и «Прихода»

$$B_R = B_1 + B_2 + B_3 = \sum_{j=1}^{U_1} B_{1j} + \sum_{j=1}^{U_2} B_{2j} + \sum_{j=1}^{U_3} B_{3j},$$

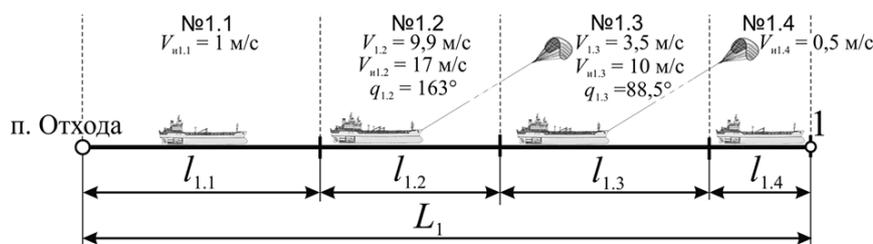


Рис. 7. Переход протяженностью L_1 с указанными участками постоянной погоды № 1.1, 1.2, 1.3 и 1.4 протяженностью соответственно $l_{1.1}$, $l_{1.2}$, $l_{1.3}$ и $l_{1.4}$

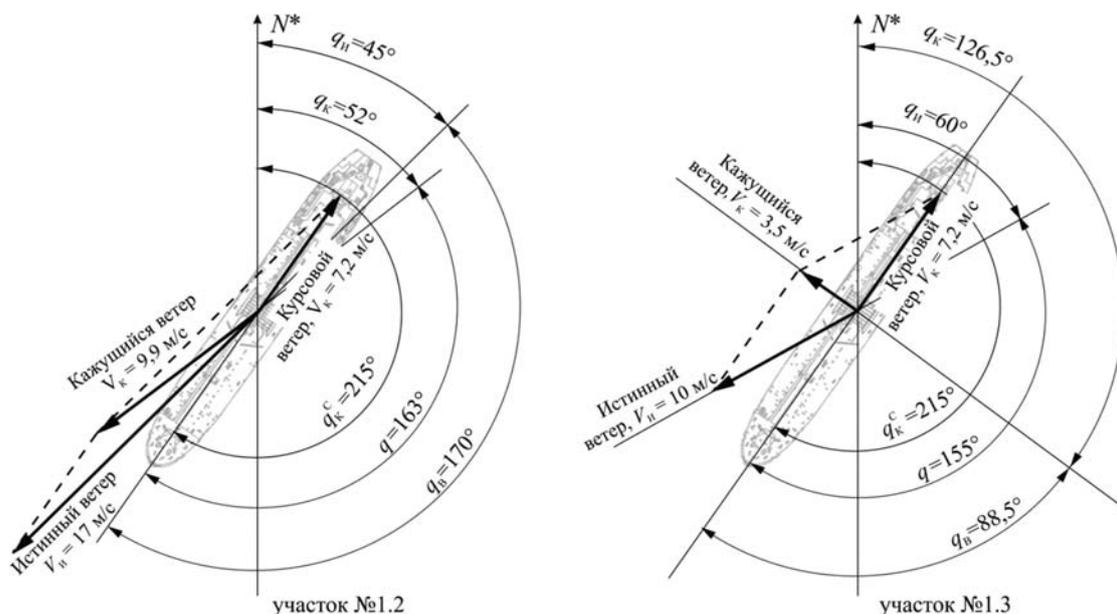


Рис. 8. Направление истинного, курсового и кажущегося ветра при скорости хода судна 14 уз и соответствующие углы: q_k^c — курсовой; q_n и q_k — истинного и кажущегося ветра; q и q_n — кажущегося ветра и направления волнения по отношению к курсу судна

или в общем виде

$$\begin{aligned}
 B_R &= B_1 + B_2 + \dots + B_i + \dots + B_P = \\
 &= \sum_{j=1}^{U_1} B_{1j} + \sum_{j=1}^{U_2} B_{2j} + \dots + \sum_{j=1}^{U_i} B_{ij} + \dots + \sum_{j=1}^{U_P} B_{Pj} = \\
 &= \sum_{i=1}^P \left(\sum_{j=1}^{U_P} B_{ij} \right) = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{U_P} B_{ij},
 \end{aligned}$$

где B_{ij} — расход топлива ГД в i -м переходе на j -м участке; $i = 1, 2, \dots, P$; $j = 1, 2, \dots, U_i$; U_i — количество участков на i -м переходе; P — количество переходов, равное количеству гидрометеорологических районов на рейсовой линии.

В общем случае расход топлива в каждом рейсе не будет одинаковым из-за различных гидрометеороусловий (ГМУ) и возраста судна, который, наряду с периодическими докованиями, определяет степень шероховатости подводной части судна. Расход топлива ГД за жизненный цикл судна (ЖЦС) представляет собой сумму расходов топлива в каждом рейсе, т.е.

$$\begin{aligned}
 B_{\text{ЖЦС}} &= B_{R1} + B_{R2} + \dots + B_{Rk} + \dots + B_{RZ} = \\
 &= \sum_{k=1}^Z B_{Rk} = \left(\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{U_P} B_{ij} \right)_1 + \left(\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{U_P} B_{ij} \right)_2 + \dots + \\
 &+ \left(\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{U_P} B_{ij} \right)_k + \dots + \left(\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{U_P} B_{ij} \right)_Z = \\
 &= \sum_{k=1}^Z \left(\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^U B_{ij} \right)_k = \sum_{k=1}^Z \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^U B_{ijk},
 \end{aligned}$$

где B_{Rk} — расход топлива ГД в k -м рейсе, $k = 1, 2, \dots, Z$; Z — количество рейсов за ЖЦС.

Для демонстрационного расчета в качестве примера был взят среднетоннажный танкер типа «Дмитрий Медведев» водоизмещением 35970 т, с установленным на нем МОД фирмы MAN Diesel & Turbo 6S50ME [11] со спецификационными мощностью 9100 кВт и частотой вращения 127 мин^{-1} , с применением кайта SKS 640 (площадью 640 м^2). Рейс в Северной Атлантике: порт отхода — п. Брест (Франция), порт прихода — п. Санта Мария (Кабо Верде). Для участка № 1.1 принято: $V_n = 12,5 \text{ м/с}$; $q_n = 150^\circ$; $h_{3\%} = 4,3 \text{ м}$; $t_{\text{ос}} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{зв}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$; $P_a = 101,2 \text{ кПа}$, $t_{1,1} = 8 \text{ ч}$. При этом контрактная скорость хода судна составляла $v_s = 14 \text{ уз}$, осадка судна — $T_s = 10,4 \text{ м}$, полезная тяга кайта — $P_{\text{кп}} = 203 \text{ кН}$, сопротивление движению судна — $R = 682 \text{ кН}$, коэффициенты расчетного попутного потока и засасывания — $\omega = 0,406$ и $t = 0,257$, частота вращения ГВ — $n = 104,7 \text{ мин}^{-1}$ и мощность, развиваемая МОД — $N = 8542 \text{ кВт}$, удельный расход топлива ГД — $b = 166 \text{ г/(кВт} \cdot \text{ч)}$. Расход топлива ГД для участка № 1.1 протяженностью $l_{1,1} = 112 \text{ миль}$:

$$B_{1,1} = 10^{-6} N_{1,1} b_{1,1} t_{1,1} = 10^{-6} \cdot 8542 \cdot 166 \cdot 8 = 11,34 \text{ т;}$$

$$b_{1,1} = 10^3 B_{1,1} / l_{1,1} = 10^3 \cdot 11,34 : 112 = 101 \text{ кг/миля.}$$

Приведенные значения ряда исходных и рассчитанных величин являются одними из возможных. Совершенно очевидно, что численные значения — это случайные величины, поскольку, например, параме-

тры ГМУ — это стохастические величины. Применение статистического моделирования [5] позволит получить массив значений расхода топлива за жизненный цикл судна и его представительное значение — математическое ожидание $M(B_{жцс})$.

ВЫВОДЫ. 1. Впервые для сравнительного анализа альтернативных судовых дизельных установок транспортных судов и принятия рациональных проектных решений представлена в детерминированной постановке укрупненная методика для расчета

расхода топлива главным двигателем судна, движение которого в рейсе обеспечивается как постоянно работающим этим двигателем, так и эпизодически включающимся в работу пропульсивным воздушным змеем — кайтом.

2. Приведены, в качестве примера, значения некоторых исходных и расчетных величин применительно к среднетоннажному танкеру типа «Дмитрий Медведев» [6] с главным двигателем 6S50ME на отдельном участке постоянной погоды на рейсовой линии «Брест-Санта Мария».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ветер и волны в океанах и морях [Текст]: справочные данные / Регистр СССР. — М.: Транспорт, 1974. — 359 с.
- [2] Программа OpenCPN для организации морской навигации судов различных типов и размеров [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://opencpn.org/oscpn/>.
- [3] РПЗ 15966-020-004. Расчет буксировочного сопротивления, элементов винта и ходовых качеств судна [Текст]: расчетно-пояснительная записка // ЦКБ «Изумруд». — Херсон. 1982.
- [4] Справочник по теории корабля. Т.1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители [Текст] / под. ред. Я. В. Войткунского // Л.: Судостроение, 1986. — 768 с.
- [5] **Шостак, В. П.** Имитационное моделирование судовых энергетических установок [Текст]: монография / В. П. Шостак, В. И. Гершаник // Л.: Судостроение, 1988. — 256 с.
- [6] **Шостак, В. П.** Опір довікля руху транспортного судна: [Текст]: навчальний наочний посібник / В. П. Шостак, А. Ю. Манзюк // Видавництво НУК. — Миколаїв, 2012. — 181 с.
- [7] **Шостак, В. П.** Расход топлива и экологичность судовой пропульсивной установки с кайтом [Текст] / В. П. Шостак, А. И. Кисарова // Вісник НУК (електронне вид.). — Миколаїв, 2013. — № 3.
- [8] **Шостак, В. П.** Укрупненная математическая модель для определения параметров адаптации МОД [Текст] / В. П. Шостак, А. И. Кисарова // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми». — Миколаїв: НУК, 2013.
- [9] Einsatz des SkySails Systems auf der MS «Beaufort» [Text]: Institut für Angewandte Wirtschaftsforschung und Regionalanalyse ANWI; Institut für Seefahrt Leer / St. Aschenbeck, R. Elsner, T. Lenger, W. Szczesny, Emden R. Kreutzer, M. Schlaak. — 2007. — 5 p.
- [10] **Elsner, R.** Simulating possible Savings of the SkySails-System on International Merchant Ship Fleets. [Text] / R. Elsner, M. Schlaak, R. Kreutzer: In: Journal of Marine Engineering and Technology, 2010.
- [11] MAN Diesel & Turbo [Electronic resource] // © MAN Diesel & Turbo 2016. — Режим доступа: <http://www.mandieselturbo.com>.
- [12] Sky sails — Vessel Propulsion using Kites [Text]: 20-th International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction. Amsterdam RAI Convention Centre / Tom Schnackenberg — 17 November 2008. — 11 p.

© В. П. Шостак, А. И. Кисарова

Надійшла до редколегії 12.04.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *Б. Г. Тимошевський*