

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-59-66
УДК 629.544

А.В. Сверчков¹ , М.В. Галушина¹, Д. Вастаручас², П. Полити²

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² Danaos Shipping Co. Ltd., Греция

МОДИФИКАЦИЯ КОРПУСОВ КОНТЕЙНЕРОВОЗОВ ПРИ СНИЖЕНИИ СКОРОСТИ ХОДА С ЦЕЛЬЮ СОКРАЩЕНИЯ ОБЪЕМА ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются два судна-контейнеровоза греческой судоходной компании Danaos Shipping Co. Ltd. контейнеровместимостью 8100 и 8500 TEU. Цель работы состоит в экспериментальной проверке модификации формы обводов носовых оконечностей контейнеровозов, направленной на уменьшение гидродинамического сопротивления при снижении эксплуатационной скорости, а также в определении влияния модификации на энергетическую эффективность судна.

Материалы и методы. Экспериментальные данные модельных испытаний, полученные в глубоководном опытовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Основные результаты. В результате исследовательских работ получены зависимости потребной мощности от скорости хода контейнеровозов с исходной и модифицированной формой обводов носовой оконечности.

Заключение. За счет перехода на более низкую скорость хода с одновременной оптимизацией и модернизацией формы обводов носовой оконечности возможно снижение потребной мощности, а соответственно, расхода топлива и объема выбросов углекислого газа, составляет примерно 40 %.

Ключевые слова: контейнеровоз, носовой бульб, модификация носовой оконечности, модельные испытания, индекс энергетической эффективности EEDI.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-59-66
UDC 629.544

A. V. Sverchkov¹ , M. V. Galushina¹, D. Vastarouchas², P. Politi²

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² Danaos Shipping Co. Ltd., Greece

MODIFICATION OF CONTAINERSHIP HULLS AT SPEEDS REDUCED FOR CUTTING DOWN GREENHOUSE GASES

Object and purpose of research. The objects of study are two containerships of 8100 and 8500 TEU capacities operated by Danaos Shipping Co. Ltd, Greece. The purpose is to experimentally verify alteration of bow shapes in the containerships designed to reduce hydrodynamic resistance at a lower operation speed, as well as to examine the impact of these alterations on energy efficiency design index (EEDI).

Materials and methods. Experimental data from model tests were obtained in a deep-water test tank of Krylov State Research Centre.

Main results. Based on the research studies the shaft power was determined versus the containership speed for the hulls with the original and modified bow shapes.

Conclusion. Switchover to lower speeds combined with optimization and modernization of bow shapes will bring a possible reduction of shaft power and, accordingly, less fuel consumption and carbon dioxide emissions by about 40 %.

Keywords: containership, bow bulb, bow modification, model tests, energy efficiency design index EEDI.

The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Сверчков А.В., Галушина М.В., Вастаручас Д., Полити П. Модификация корпусов контейнеровозов при снижении скорости хода с целью сокращения объема парниковых газов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 2(400): 59–66.

For citations: Sverchkov A.V., Galushina M.V., Vastarouchas D., Politi P. Modification of containership hulls at speeds reduced for cutting down greenhouse gases. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 2(400): 59–66 (in Russian).

Введение

Introduction

История вопроса о выбросах парниковых газов и связанных с этим последствиях насчитывает более 15 лет. Современные требования Международной морской организации (ИМО) включают в себя требования по снижению объема парниковых газов в судоходстве к 2050 г. не менее чем на 50 %. При этом главной целью становится достижение, по возможности, минимальных выбросов углекислого газа, зависящих напрямую от количества потребляемого топлива.

Введенный ИМО индекс энергетической эффективности (Energy Efficiency Design Index – EEID) определяется как отношение массы выбрасываемого углекислого газа к транспортной работе судна, определяемой мощностью энергетической установки, скоростью хода и грузоподъемностью. Возможные пути минимизации индекса энергетической эффективности включают в себя: снижение скорости, снижение потребной мощности за счет оптимизации формы обводов корпуса, установку энергосберегающих устройств, оптимизацию движительного комплекса, смену типа топлива, снижение удельного расхода топлива, увеличение вместимости при сохранении общего водоизмещения судна.

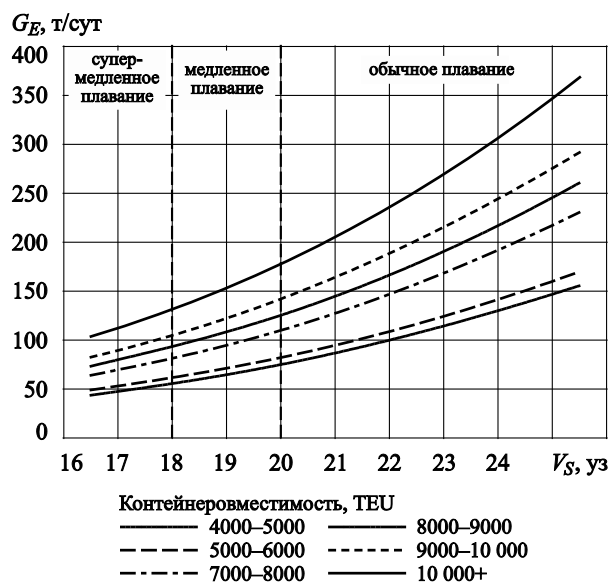


Рис. 1. График зависимости расхода топлива от скорости судна при различной контейнеровместимости

Fig. 1. Fuel consumption versus ship speed at different container capacity

Потребление топлива зависит от размеров судна и его скорости. Следует отметить, что для контейнеровозов в диапазоне от минимальных скоростей до 14 уз эта зависимость носит характер близкий к линейному, но при скоростях более 14 уз расход топлива начинает увеличиваться экспоненциально. Например, для контейнеровоза вместимостью 8000 TEU с эксплуатационной скоростью 24 уз расход тяжелого топлива составляет 225 т в сутки. При снижении скорости на 3 уз (на 12,5 %) потребление падает до 150 т в сутки (т.е. на 33 %). На рис. 1 показаны зависимости расхода топлива G_E от скорости судна V_S при различной контейнеровместимости [1].

Важнейшими параметрами, влияющими на эффективность энергопотребления судами, являются гидродинамическое сопротивление и КПД движителей. Учитывая, что каждое построенное судно на этапе проектирования проходит тщательную проработку в гидродинамических центрах, направленную на численную и экспериментальную оптимизацию формы обводов корпуса и гидродинамических характеристик движительного комплекса, снижение показателей энергоэффективности на 50 % является затруднительным [2]. Единого решения, подходящего для всех типов судов, на данный момент не существует. Каждое судно требует индивидуальной проработки. Поэтому многие судовладельцы рассматривают снижение скорости судна как наиболее простой и надежный способ минимизации выбросов. При этом одновременно встает задача оптимизации формы обводов корпуса под более низкую эксплуатационную скорость. Для крупных судовладельческих компаний эта задача сводится к оптимизации и модернизации формы обводов уже построенных и находящихся в эксплуатации судов. В частности, одна из крупнейших судоходных компаний, греческая корпорация Danaos Shipping Co. Ltd., владеющая современными контейнеровозами вместимостью от 2200 до 13 100 TEU, в 2015 г. начала работы по модернизации своего флота.

Исследуемые суда

Containerships under study

В рамках двух контрактных работ в Крыловском государственном научном центре были выполнены экспериментальные исследования возможной модификации формы обводов носовых оконечностей контейнеровозов *CSCL Europe* и *CMA CGM Attila*. Основные технические характеристики исследо-

ванных контейнеровозов приведены в табл. 1. Фотографии судов показаны на рис. 2 и 3.

Оба контейнеровоза имеют бульбообразную носовую оконечность, спроектированную и оптимизированную на проектную скорость 21 уз. При снижении эксплуатационной скорости хода судна

до 18 уз, что соответствует переходу от числа Фруда $F_n = 0,194$ к $F_n = 0,166$, картина волнообразования существенно меняется, поэтому возникает необходимость перепроектирования носового бульба, основной задачей которого является снижение волнового сопротивления.

Таблица 1. Основные технические характеристики исследованных контейнеровозов

Table 1. Main data of the containerships under study

Наименование	<i>CSCL Europe</i>	<i>CMA CGM Attila</i>	
Год постройки	2004	2011	
Судоверфь	Корея, Samsung Heavy Industries Co. Ltd	Китай, Shanghai Jiangnan Changxing Heavy Industry	
Флаг	Кипр	Мальта	
Длина наибольшая, м	333,99	321,46	
Ширина B , м	42,8	42,8	
Проектная осадка T , м	13,0	13,0	12,0
Длина по ватерлинии L_{WL} , м	316,6	317,6	314,0
Объемное водоизмещение ∇_{WL} , м ³	114 050	114 217	103 213
Площадь смоченной поверхности S , м ²	16 755	16 569	15 697
Коэффициент общей полноты C_B	0,647	0,646	0,640
L_{WL}/B	7,397	7,421	7,336
B/T	3,292	3,292	3,567
$L_{WL}/\sqrt[3]{\nabla_{WL}}$	6,528	6,546	6,694
Контейнеровместимость, EU	8100	8500	
Максимальная мощность ЭУ (MCR), кВт	68 470	68 520	
Частота вращения гребного винта, об/мин	104	104	
Максимальная скорость, уз	22	25,8	



Рис. 2. CSCL Europe

Fig. 2. CSCL Europe



Рис. 3. CMA CGM Attila

Fig. 3. CMA CGM Attila

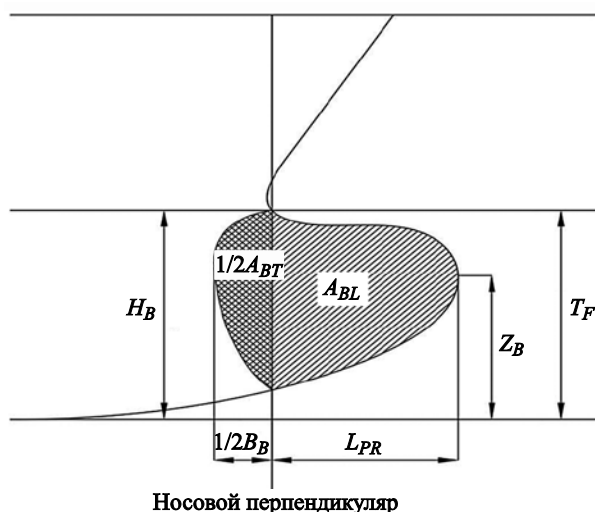


Рис. 4. Схема определения параметров бульба
Fig. 4. Scheme for defining bulb parameters

Для экспериментальной проверки гидродинамических качеств корпусов контейнеровозов с различными вариантами носового бульба были изготовлены крупномасштабные модели судов длиной около 9,0 м со съёмными носовыми оконечностями. На модели судна *CSCL Europe* были исследованы два варианта носового бульба (исходный и численно оптимизированный); на модели судна *CMA CGM Attila* экспериментально проверены три варианта (исходный и два варианта, оптимизированные по CFD разными гидродинамическими центрами).

Для описания геометрии носовых бульбов использованы параметры, предложенные в работе Альфреда Крахта [3]:

1. $C_{BB} = B_B/B_{MS}$ – максимальная ширина площади бульба на носовом перпендикуляре B_B , отнесенная к ширине судна B_{MS} ;

2. $C_{LPR} = L_{PR}/L_{PP}$ – выступающая за носовой перпендикуляр длина бульба L_{PR} , отнесенная к длине судна между перпендикулярами L_{PP} ;
3. $C_{ZB} = Z_B/T_F$ – высота самой выступающей вперед точки бульба над основной плоскостью Z_B , отнесенная к осадке;
4. $C_{ABT} = A_{BT}/A_{MS}$ – площадь носового бульба на носовом перпендикуляре, отнесенная к площади мидель-шпангоута судна A_{MS} ;
5. $C_{ABL} = A_{BL}/A_{MS}$ – площадь носового бульба в диаметральной плоскости A_{BL} , отнесенная к площади мидель-шпангоута судна A_{MS} ;
6. $C_{VPR} = \nabla_{PR}/\nabla_{WL}$ – объем бульба, выступающий за носовой перпендикуляр ∇_{PR} , отнесенный к объемному водоизмещению судна ∇_{WL} .

Схема определения параметров бульба приведена на рис. 4. В табл. 2 приведены геометрические параметры рассмотренных вариантов носового бульба. На рис. 5 и 6 (см. вклейку) приведены фотографии моделей с различными вариантами носового бульба.

Испытания в опытовом бассейне

Tests in deep-water towing tank

Буксировочные испытания моделей проводились в глубоководном опытовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в соответствии с методикой, основанной на применении широкоизвестной схемы Фруда [4] и близкой к методике, рекомендованной МКОБ [5].

Во время рабочего пробега измеряются одновременно следующие величины: скорость модели V_M , равная скорости буксировочной тележки; полное сопротивление модели R_{TM} ; динамический дифферент; динамическое всплытие/погружение.

Таблица 2. Геометрические параметры рассмотренных вариантов носового бульба

Table 2. Geometric parameters of the bow bulb options under consideration

Параметр	<i>CSCL Europe</i>		<i>CMA CGM Attila</i>		
	Исходный вариант	Оптимизированный вариант	Исходный вариант	Оптимизированный вариант № 1	Оптимизированный вариант № 2
C_{BB}	0,135	0,105	0,129	0,096	0,068
C_{LPR}	0,030	0,030	0,029	0,031	0,029
C_{ZB}	0,679	0,679	0,668	0,743	0,668
C_{ABT}	0,076	0,055	0,072	0,065	0,037
C_{ABL}	0,132	0,123	0,128	0,144	0,128
C_{VPR}	0,0025	0,0015	0,0023	0,0019	0,0010

Коэффициент полного сопротивления определяется выражением (1), в котором нижний индекс «М» означает, что данная величина соответствует модели.

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_M^2 \cdot S_M} \quad (1)$$

В выражении (1) ρ представляет собой плотность воды в опытном бассейне, S_M – площадь смоченной поверхности корпуса.

Измеренное полное сопротивление модели разделяется на две составляющие: сопротивление трения эквивалентной пластины и остаточное сопротивление. Коэффициент сопротивления трения эквивалентной гладкой пластины рассчитывается по формуле Прандтля – Шлихтинга, при этом длина эквивалентной гладкой пластины равна длине корпуса модели по ватерлинии в статическом положении

$$C_{F0} = \frac{0,455}{(\lg Rn)^{2,58}} \quad (2)$$

Число Рейнольдса определяется как

$$Rn = V_M \cdot L_{WLM} / \nu_M \quad (3)$$

В выражении (3) ν_M – кинематическая вязкость воды, которая принимается в зависимости от температуры в соответствии с рекомендациями МКОБ [6].

Коэффициент остаточного сопротивления C_R и число Фруда вычисляются для каждого рабочего пробега (для каждой скорости буксировки) с использованием следующих выражений:

$$Fn = \frac{V_M}{\sqrt{g \cdot L_{WLM}}}, \quad (4)$$

$$C_R = C_{TM} - C_{F0M} \quad (5)$$

Полученные в ходе буксировочных испытаний зависимости коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда показаны на рис. 7–9. Для модели судна *CMA CGM Attila* приведены результаты буксировочных испытаний на двух осадках.

Рис. 7. Зависимость коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда, полученная по результатам буксировочных испытаний модели контейнеровоза *CSCL Europe*

Fig. 7. Residual resistance coefficient versus Froude number obtained from the towing test data for the containership *CSCL Europe* model

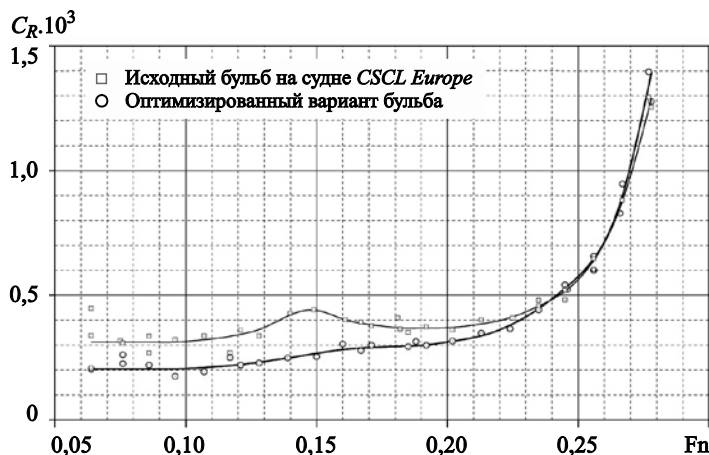
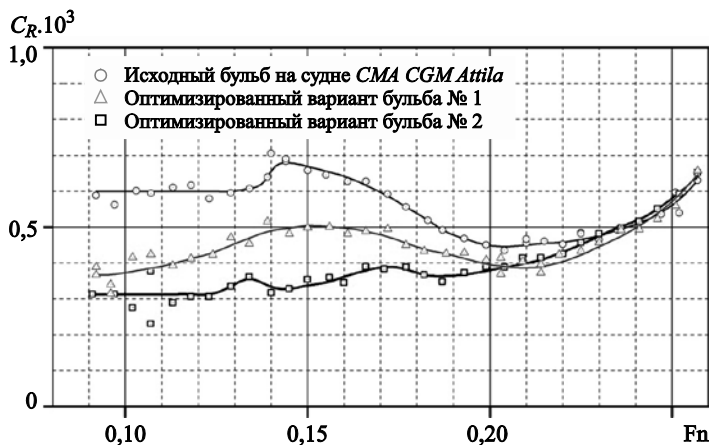


Рис. 8. Зависимость коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда, полученная по результатам буксировочных испытаний модели контейнеровоза *CMA CGM Attila* при осадке $T = 12,0$ м

Fig. 8. Residual resistance coefficient versus Froude number obtained from the towing test data for the containership *CMA CGM Attila* model at draft $T = 12.0$ m



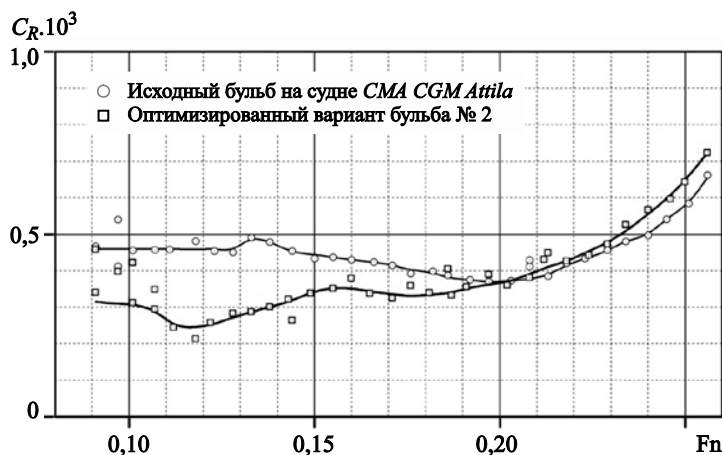


Рис. 9. Зависимость коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда, полученная по результатам буксировочных испытаний модели контейнеровоза *CMA CGM Attila* при осадке $T = 13,0$ м

Fig. 9. Residual resistance coefficient versus Froude number obtained from the towing test data for the containership *CMA CGM Attila* model at draft $T = 13.0$ m

Остаточное сопротивление включает в себя так называемое сопротивление формы и волновое сопротивление. Коэффициент сопротивления формы определяется на доволновом режиме, при значениях числа Фруда меньше 0,1. Полученные кривые коэффициента остаточного сопротивления показывают, что оптимизация носового бульба ведет к снижению и сопротивления формы, и волнового сопротивления. На обоих корпусах положительный эффект от снижения объема бульба наблюдается в широком диапазоне скоростей от малого хода до 22 уз. Из двух оптимизированных численным методом вариантов бульба на контейнеровозе *CMA CGM Attila* лучшим является вариант № 2, отличающийся меньшим объемом и меньшей площадью сечения на носовом перпендикуляре. При этом эффект снижения остаточного сопротивления за счет

оптимизации носового бульба особенно заметен на контейнеровозе *CMA CGM Attila* при осадке, равной 12,0 м, при которой исходный бульб с большим объемом и площадью сечения приближен к свободной поверхности воды.

Рис. 10 и 11 (см. вклейку) служат иллюстрацией обтекания носовой оконечности корпусов контейнеровозов при буксировке моделей со скоростью, соответствующей скорости натурного судна 18 уз. На фотографиях отчетливо видно изменение волнообразования в сторону улучшения при установке на модель носового бульба, оптимизированного под меньшую эксплуатационную скорость. Отсутствует неблагоприятная интерференция волн, вызванных корпусом и собственно бульбом, носовая волна выравнивается, уменьшается глубина волновой впадины в районе 19,5 теоретического шпангоута. За счет уменьшения объема бульба существенно снижается величина остаточного сопротивления в диапазоне чисел Фруда F_n от 0,10 до 0,18.

Циклы испытаний со сменными носовыми бульбами включали в себя, кроме буксировочных, самоходные испытания, направленные на получение коэффициентов взаимодействия гребного винта с корпусом. Самоходные испытания проводились со специально изготовленными моделями гребных винтов, геометрия которых соответствует натурным гребным винтам, установленным на судах.

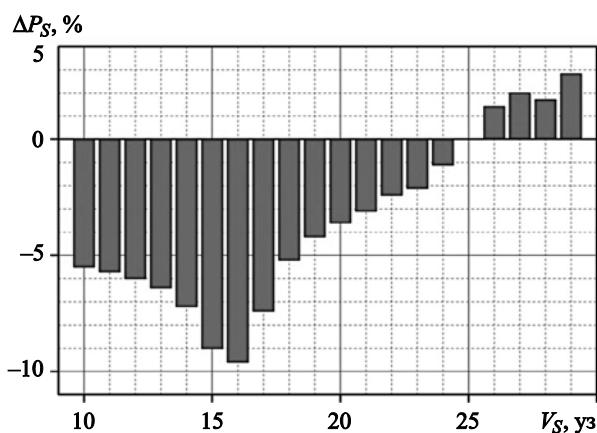


Рис. 12. Снижение потребной мощности за счет оптимизации носового бульба на контейнеровозе *CSCL Europe*

Fig. 12. Reduced shaft power s due to the bow bulb optimization of the containership *CSCL Europe*

Результаты оптимизации обводов носовой оконечности

Results of bow shape optimization

По окончании испытаний были выполнены оценки ходовых качеств контейнеровозов и получены зависимости потребной мощности от скорости хода. Диаграммы на рис. 12 и 13 иллюстрируют получен-

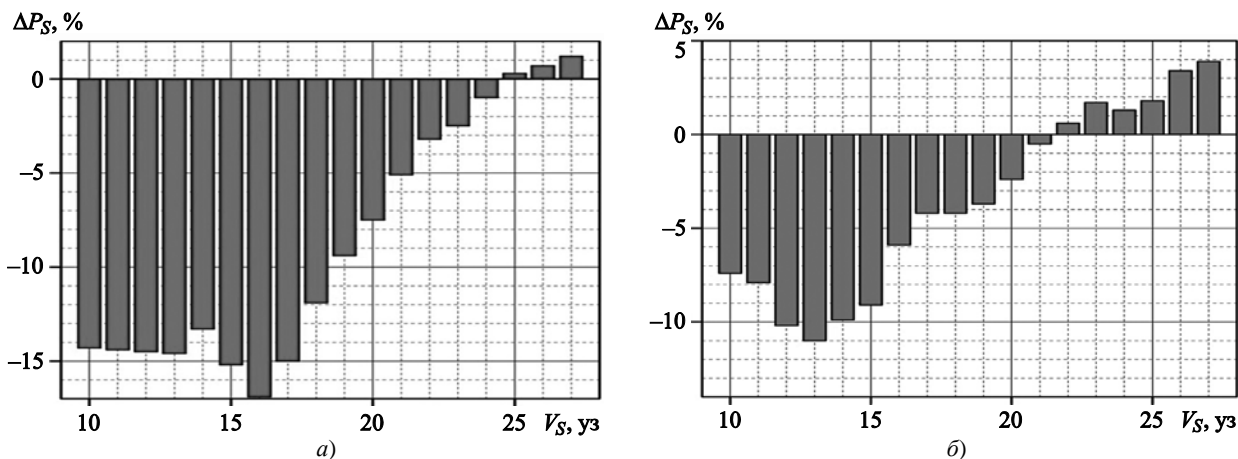


Рис. 13. Снижение потребляемой мощности за счет оптимизации носового бульба на контейнеровозе *CMA CGM Attila*: а) при осадке 12,0 м; б) при осадке 13,0 м. Сопоставления исходного варианта с оптимизированным вариантом № 2

Fig. 13. Reduced shaft power due to the bow bulb optimization of the containership *CMA CGM Attila*: а) at draft 12.0 m; б) at draft 13.0 m. Comparison of the original version with version No. 2

ное за счет оптимизации корпуса снижение потребляемой мощности, отрицательные значения соответствуют снижению потребляемой мощности, положительные – возрастанию. Максимальный положительный эффект 16,9 % достигнут при скорости 16 уз для контейнеровоза *CMA CGM Attila* при осадке, равной 12,0 м.

При скорости 18 уз снижение потребляемой мощности составило:

- 5,2 % для контейнеровоза *CSCL Europe*;
- 11,9 % для контейнеровоза *CMA CGM Attila* при осадке, равной 12,0 м;
- 4,1 % для контейнеровоза *CMA CGM Attila* при осадке, равной 13,0 м.

В табл. 3 приведены значения удельной потребляемой мощности P_S/D (отношение потребляемой мощности к весовому водоизмещению судна), полученные для всех испытанных вариантов.

Анализ полученных результатов показал, что при снижении скорости контейнеровозов с 21 до 18 уз потребляемая мощность снижается на 30–35 %, при одновременной оптимизации формы носового бульба снижение потребляемой мощности составляет 37–39 %.

Заключение

Conclusion

На сегодняшний день для судовладельцев наиболее доступным и эффективным способом выполнения требований ИМО по минимизации выбросов углекислого газа и величины индекса энергоэффективности EEDI является снижение скорости хода судна. Возникающая при этом проблема несоответствия геометрии корпуса судна новому режиму эксплуатации частично может быть реше-

Таблица 3. Удельная потребляемая мощность

Table 3. Specific shaft power

V_S , уз	P_S/D , кВт/т						
	<i>CSCL Europe</i> , $T = 13,0$ м		<i>CMA CGM Attila</i> , $T = 12,0$ м			<i>CMA CGM Attila</i> , $T = 13,0$ м	
	Исходный вариант	Оптимизированный вариант	Исходный вариант	Оптимизированный вариант № 1	Оптимизированный вариант № 2	Исходный вариант	Оптимизированный вариант № 2
18,0	0,148	0,141	0,174	0,163	0,153	0,150	0,144
21,0	0,229	0,222	0,251	0,244	0,238	0,228	0,226

на путем оптимизации формы обводов корпуса, в частности, за счет модификации носовой оконечности и выбора оптимальных параметров носового бульба. За счет перехода на более низкую скорость хода с одновременной оптимизацией и модернизацией формы обводов носовой оконечности у судовладельцев появляется возможность снизить потребную мощность, а соответственно расход топлива и объем выбросов углекислого газа, примерно на 40 %.

Список использованной литературы

1. *Notterboom T., Cariou P.* Fuel surcharge practices of container shipping lines: Is it about cost recovery or revenue-making // Proceedings of the International Association of Maritime Economists conference (IAME 2009). Basingstoke : Macmillan, 2009. P. 24–26.
2. *Пустошный А.В.* Проблемы ходкости транспортных судов. Санкт-Петербург : Крыловский государственный научный центр, 2016. 142 с.
3. *Kracht A.M.* Design of Bulbous Bows // SNAME Transactions. 1978. Vol. 86. P. 197–217.
4. Справочник по теории корабля : В 3 т. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / [Войткунский Я.И. и др.]. Ленинград : Судостроение, 1985. 764 с.
5. ITTC : Recommended Procedures and Guidelines : 7.5-02-02-01. Resistance Test : Rev. 03 / Ed. 26th ITTC Resistance Committee. [S. l.]: ITTC, 2011. 13 p.
6. ITTC : Recommended Procedures and Guidelines : 7.5-02-01-03. Fresh Water and Seawater Properties : Rev. 02 / Ed. 26th ITTC Specialist Committee on Uncertainty Analysis. [S. l.]: ITTC, 2011. 45 p.
3. *Kracht A.M.* Design of Bulbous Bows // SNAME Transactions. 1978. Vol. 86. P. 197–217.
4. Handbook of ship theory : in 3 volumes. Vol. 1. Hydro-mechanics. Ship resistance. Ship propellers / [Ya.I. Voitkunsky et al.]. Leningrad : Sudostroenie, 1985. 764 p. (in Russian).
5. ITTC : Recommended Procedures and Guidelines : 7.5-02-02-01. Resistance Test : Rev. 03 / Ed. 26th ITTC Resistance Committee. [S. l.]: ITTC, 2011. 13 p.
6. ITTC : Recommended Procedures and Guidelines : 7.5-02-01-03. Fresh Water and Seawater Properties : Rev. 02 / Ed. 26th ITTC Specialist Committee on Uncertainty Analysis. [S. l.]: ITTC, 2011. 45 p.

References

1. *Notterboom T., Cariou P.* Fuel surcharge practices of container shipping lines: Is it about cost recovery or revenue-making // Proceedings of the International Association of Maritime Economists conference (IAME 2009). Basingstoke : Macmillan, 2009. P. 24–26.
2. *Pustoshny A.V.* Problems in propulsion performance of transport vessels. St. Petersburg : Krylov Shipbuilding Research Institute, 2016. 142 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Сверчков Андрей Владимирович, к.т.н., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-26. E-mail: ksri@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9006-8812>.

Галушина Маргарита Валерьевна, старший научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: margo@smtu.ru.

Вастаручас Димитриос, заместитель начальника оперативного отдела и технический директор Danaos Shipping Co. Ltd., Греция.

Полити Параскеви, менеджер по научным исследованиям и развитию Danaos Shipping Co. Ltd., Греция.

About the authors

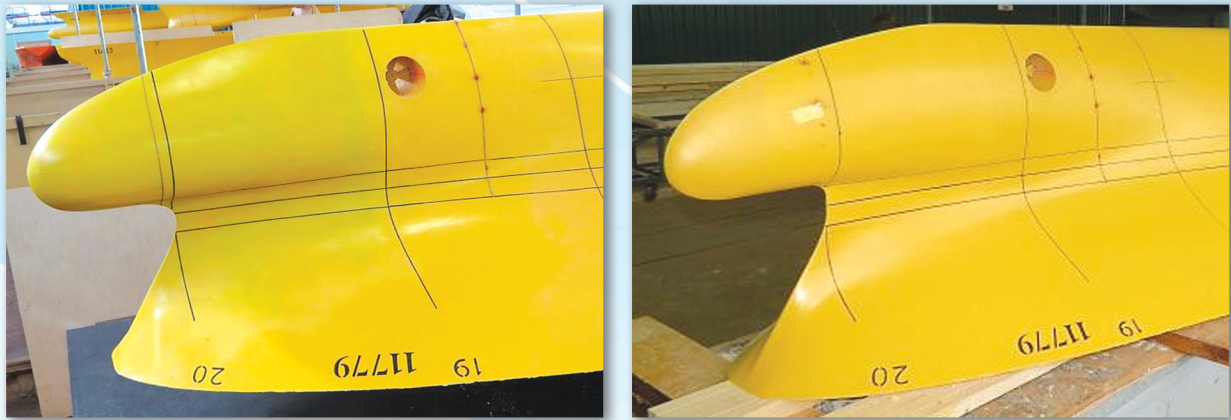
Andrey V. Sverchkov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector of Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-26. E-mail: ksri@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9006-8812>.

Margarita V. Galushina, Senior Researcher of Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: margo@smtu.ru.

Dimitrios Vastarouchas, DCOO and Technical Director of Danaos Shipping Co. Ltd., Greece.

Paraskevi Politi, R&D Manager of Danaos Shipping Co. Ltd., Greece.

Поступила / Received: 30.03.22
Принята в печать / Accepted: 04.05.22
© Коллектив авторов, 2022

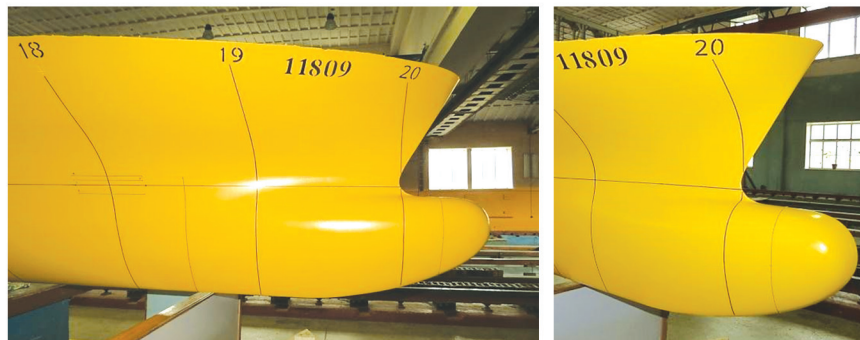


a)

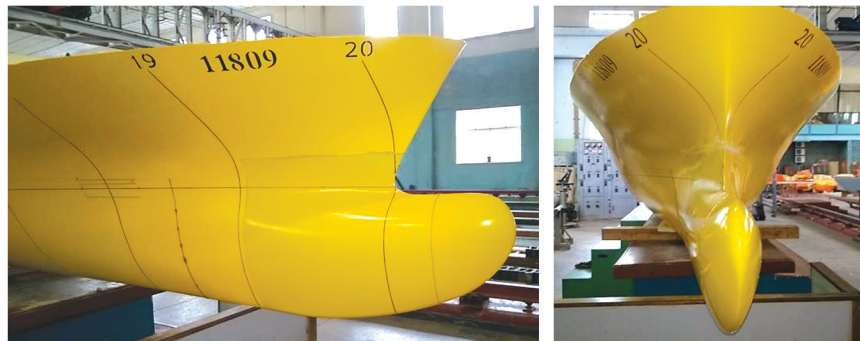
б)

Рис. 5. Модель контейнеровоза *CSCL Europe*: а) исходный вариант; б) оптимизированный вариант

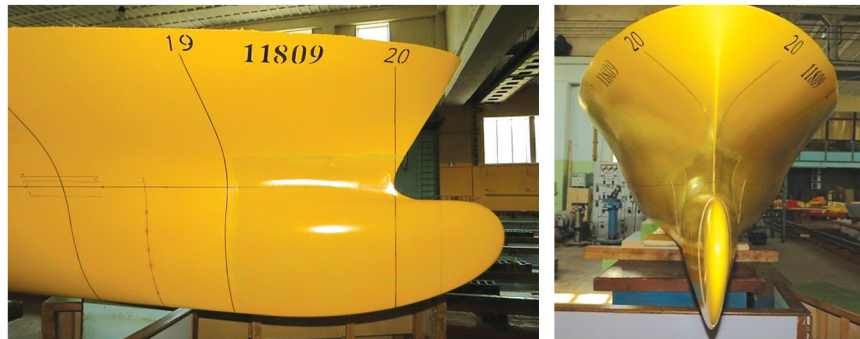
Fig. 5. Model of the containership *CSCL Europe*: a) original version; b) optimized version



a)



б)



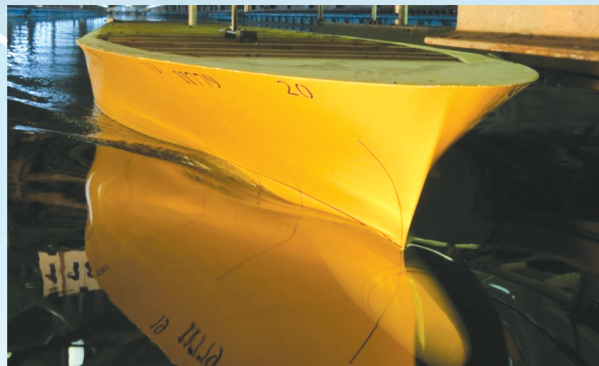
в)

Рис. 6. Модель контейнеровоза *CMA CGM Attila*: а) исходный вариант; б) оптимизированный вариант № 1; в) оптимизированный вариант № 2

Fig. 6. Model of the containership *CMA CGM Attila*: a) original version; б) optimized version No. 1; в) optimized version No. 2



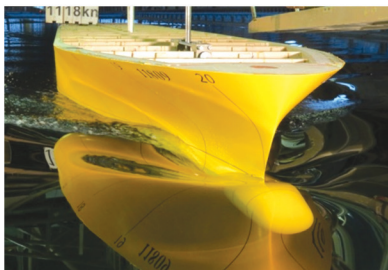
a)



б)

Рис. 10. Модель контейнеровоза CSCL Europe во время буксировочных испытаний:
а) исходный вариант; б) оптимизированный вариант. Скорость буксировки соответствует скорости натурного судна 18 уз

Fig. 10. Containership CSCL Europe model during towing tests:
a) original version; b) optimized version. Towing speed corresponds to 18 knots full-scale speed



Исходный вариант



Оптимизированный вариант № 1



Оптимизированный вариант № 2

a)



Исходный вариант



Оптимизированный вариант № 2

б)

Рис. 11. Модель контейнеровоза CMA CGM Attila во время буксировочных испытаний:
а) при осадке $T = 12,0$ м; б) при осадке $T = 13,0$ м. Скорость буксировки соответствует скорости натурного судна 18 уз

Fig. 11. Containership CMA CGM Attila model during towing tests:
a) at draft $T = 12.0$ m; b) at draft $T = 13.0$ m. Towing speed corresponds to 18 knots full-scale speed