

# ВЪЗМОЖНОСТ ЗА ОПТИМИЗАЦИЯ НА КОРАБНИТЕ ЕНЕРГИЙНИ РАЗХОДИ ЧРЕЗ КОНСТРУКТИВНИ И ЕКСПЛОАТАЦИОННИ МЕРОПРИЯТИЯ

Асен Атанасов, Технически университет, Варна  
Росен Атанасов, Тодор Коритаров, ВВМУ "Н. Й. Вапцаров", Варна

## POSSIBILITY OF OPTIMIZATION OF SHIPPING ENERGY EXPENSES BY CONSTRUCTION AND OPERATIONAL EVENTS

Asen Atanasov, Technical University, Varna  
Rosen Atanasov, Todor Koritarov, Nikola Vaptsarov Naval Academy, Varna

**Abstract:** *The publication aims to seek reserves to improve ship energy efficiency through measures to reduce hull resistance and overall losses during the operation. After the discovery and assessments of the significance of potential losses, recommendations were made to shipowners to be useful to them in their dialogue with shipbuilders and shippers.*

**Key words:** *optimization, project energy index, operational energy index.*

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

През последните години корабособствениците, съобразяващи се с енергийната стратегия на ИМО и с наложените инструкции за намаляване на разхода на гориво [2,3], а така също и движени от желанието си за намаляване на експлоатационните разходи обръщат все по-голямо внимание на хидродинамичните проблеми за оптимизация на корабните корпуси и винтове. В табл. 1 са показани най-общите съображения за икономическата целесъобразност от провеждане на изследванията по намаляване на съпротивлението на корпуса и на бъдещите печалби от тяхната реализация.

Оптимизирането на хидродинамичната ефективност на корпуса на кораба и на пропульсивната уредба (двигател-винт) с цел постигането на най-малка изискуема

мощност и най-добра ефективност на задвижването включва редица взаимно свързани усилия. В стремежа си да посочим най-общо възможностите за доказване на енергийните спестявания и цената за тяхното въвеждане отбелязваме тенденциите за оптимизиране на формата на корабните корпуси и на насочването на потоците от корпусите към гребните винтове, на взаимното разположение на винта и перото на руля и преодоляването на външните съпротивления на вълните и вятъра.

Като приемаме, че решаването на така поставените въпроси, обединени под наименованието "**намаляване на съпротивлението на корпуса и повишаване на ефективността на задвижването**", са една обособена група от енергоспестяващи мерки ще разгледаме по-подробно всяка от тях.

Таблица 1

Спестявания	Чрез по-нататъшната оптимизация на корпусните форми и винтове се очаква намаляване на разхода на гориво от 5 до 8%.
Типове кораби	Всички типове кораби
Нови или съществуващи кораби	Нови и перспективни кораби
Цена	Хидродинамичните изпитания (тестове) и компютърните изследвания на динамиката на флуидите (CFD - програми) за многопроходни кораби струват от 200 000\$ до 500 000\$ за клас от кораби.

### 2. ИЗЛОЖЕНИЕ

#### 2.1. Оптимизация на формата на корпуса

Докато основните размери на корпуса са сравнително добре оптимизирани в различните корабостроителници [3], съществуват съществени различия във формата на корпусите и в условията на работа на гребните винтове. Практиката показва, че корабостроителниците в повечето случаи се насочват към оптимизиране около определеното проектно газене, докато на ефективността под баласт или на частично натоварване се обръща по-малко или нулево внимание.

За да се оптимизира напълно формата на корпуса

са необходими големи масиви от данни, включващи както резултатите от експлоатацията, така и от изчисления върху реалните обекти, от специализирани изпитания на модели в басейни и от компютърни изчислителни процедури (CFD). Смята се, че най-добрата част от съвременните конструкции попадат в горната вероятностна граница (квантила) на отклоненията над средните стойности на ефективността [3]. Става дума за конструкции, които са с около 5% по-добри от горната граница на квантила, което означава, че е възможно допълнително подобрение с 3 до 5% от над разпространените в момента реализации. Няма причина да се приемат корабни конструкции,

Таблица 2

## Стандартни конструкции на танкери

Характеристики		Типове кораби			
		Panamax продукт	Aframax нефт	Suezmax нефт	VLCC нефт
Товарен капацитет	m <sup>3</sup>	54,000	132,000	180,000	360,000
Дължина най-голямаL	m	182,000	249,000	280,000	333,000
Дължина между перпендикулярите LBP	m	174,000	239,000	270,000	320,000
Ширина В	m	32,200	44,000	48,000	58,000
Дълбочина D	m	19,000	21,200	24,000	31,200
Проектно газене	m	11.20	13.60	15.90	21.00
Газене-лятна водолиния	m	12.62	15.06	17.41	22.05
Кораба-лек	тон	10,052	19,310	25,819	43,258
Проектен блок- коэффициент на пълнота		0.800	0.825	0.825	0.820
Дедвейт при проектно газене	тон	41,533	101,932	148,869	285,154
Дедвейт при товарнаводолиния	тон	49,203	116,135	166,576	303,032
Брой на винтовете		1	1	1	1
Състояние на морето		15%	15%	15%	15%
Проектна скорост при 90% MCR	вз	14.9	14.9	15.2	15.8
Изискуема мощност на двигателя (100% MCR)	kW	9,085	13,746	17,976	26,722

Таблица 3

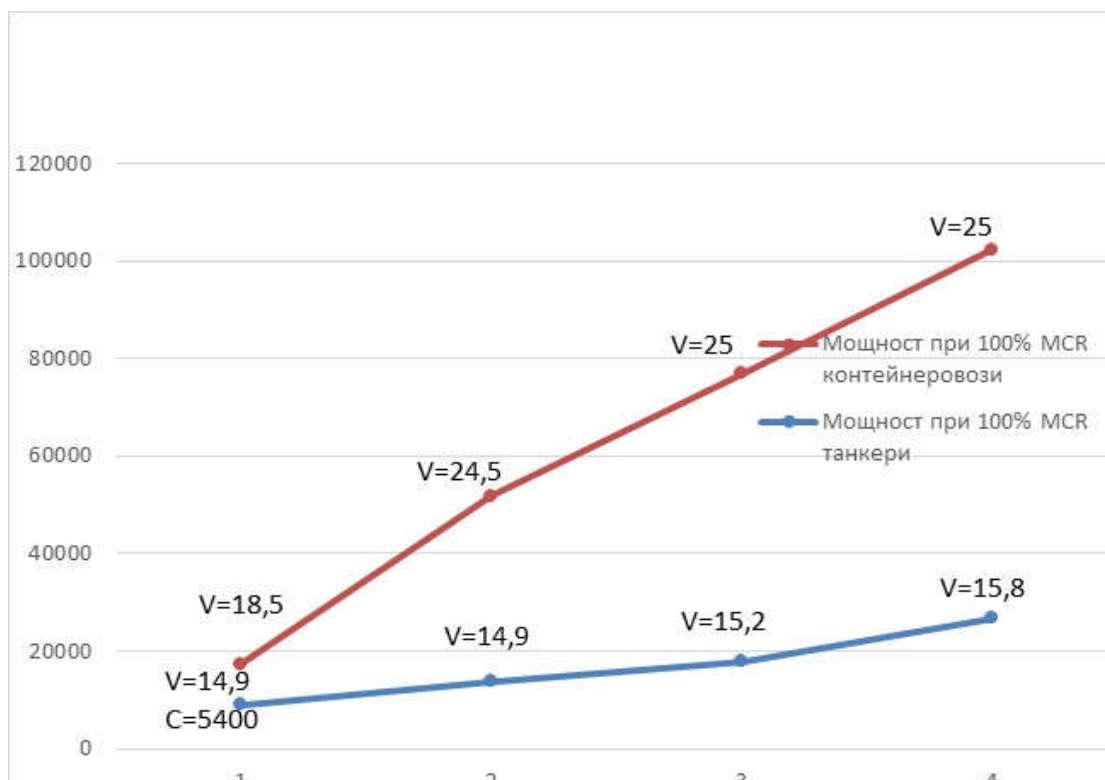
## Стандартни конструкции за контейнеровози

Характеристики		Типове кораби				
		Feeder	Panamax	Neo- Panamax	Post- Panamax	Ultra Large
Капацитет на слотовете	ТЕИ	1,000	4,500	4,500	8,000	12,500
Дължина най-голямаL	m	145,248	295,625	280,145	333,256	388,396
Дължина между перпендикулярите LBP	m	136,000	275,000	260,600	308,000	356,000
Ширина В	m	23,400	32,200	34,800	42,800	48,200
Дълбочина D	m	11,750	21,000	19,300	24,500	29,850
Проектно газене	m	7.60	11.80	11.80	13.00	14.20
Газене-лятна водолиния	m	8.51	13.22	13.22	14.56	15.90
Кораба-лек	тон	5,022	19,119	19,071	31,752	47,063
Проектен блок- коэффициент на пълнота		0.655	0.630	0.630	0.630	0.665
Дедвейт при проектно газене	тон	11,257	48,524	50,206	79,187	119,437
Дедвейт при товарнаводолиния	тон	13,669	58,817	60,747	96,068	143,865
Брой на винтовете		1	1	1	1	1
Състояние на морето		15%	15%	15%	15%	15%
Проектна скорост при 90% MCR	вз	18.5	24.5	24.5	25.0	25.0
Изискуема мощност на двигателя (100% MCR)	kW	8,355	38,121	41,664	58,966	75,705

чиито характеристики не ги поставят в горния квантил на корабите построени в последното десетилетие, което означава, че в близко бъдеще следва да се предвидят нови по-ефективни надвишаващи днешните най-добри съдове. В табл. 2 и 3 са показани следните показатели на най-

новите конструкции на танкери и контейнеровози, чиято ефективност попада във вероятностния интервал на най-добрите.

Въз основа на тези данни са построени графики, между дедвейта и изискуемата мощност, която в случая



Фиг. 1. Влияние на дедвейта, скоростта и капацитета върху необходимата мощност

е основен показател на ефективността (фиг. 1).

Вижда се, че скоростта на нарастване на мощността при контейнеровозите е по-голяма. В желанието си да изясним причините за това на графиките сме посочили стойностите на работните скорости и капацитета на сравняваните кораби. По-нагледен резултат с по-голяма практическа стойност може да бъде получена от използването на регресионната формула на Holtrop-Mennen за оценка на съпротивлението на корпуса и стандартните серии на гребните вятла. С помощта на тази формула се определят безразмерните зависимости на ефективността, с отчитане на характеристиките и особеностите на корпуса (LBP, ширина, газене, коефициент  $C_B$ ). В графичните представяния на фиг. 2, при които пресметнатата безразмерна ефективност се оценява по разположението спрямо зависимостта  $E_f = 1,0 = \text{const}$  са използвани след-

ните означения:

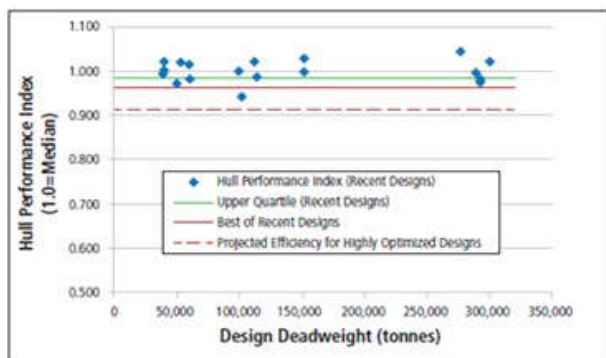
- Индекси на ефективността на конкретния проект (конструкция), пресметнат по формулата

1. Зависимост, около над която са разположени индексите на новите проекти. Това са всички нови проекти, попадащи в доверителния интервал без да са най-добрите.

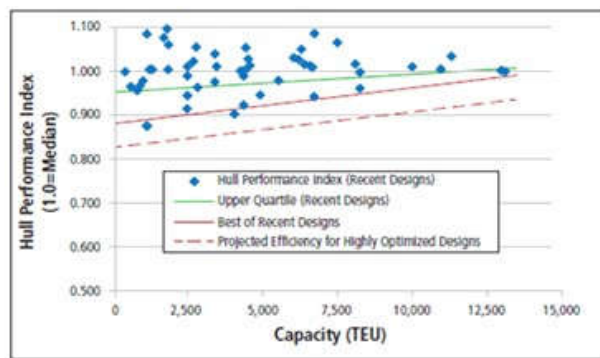
2. Най-добрите от най-новите проекти.

3. Линия, ограничаваща т.н. високо оптимизирани проекти, които са с най-ниски стойности на изискуемата мощност.

Диаграмите за безразмерната ефективност потвърждават констатацията за по-високата чувствителност на индексите на контейнеровози в сравнение с този на танкери. Вариациите на индексите на ефективност при танкерите са по-малки от тези при контейнеровозите, но не са незначими. Практическото приложение на графи-



Oil Tankers



Containerships

Фиг. 2. Сравнение на ефективността на корпусите на танкери и контейнеровози

ките се свежда до сравняване на пресметнатите стойности с числото 1,0, което представлява средният индекс на оценяваните кораби. Например изчисленият индекс на корпуса от 1,03 показва, че корабът изисква 3% повече мощност от средната стойност, докато индексът от 0,96 показва, че необходимата мощност е с 4% по-малка от медианата. Линията означена като №1 ограничава доверителната област на индексите за най-ефективните кораби (горен квантил). Това означава, че 25% от корабите, показващи най-доброто цялостно представяне са разположени под тази линия.

В заключение отбелязваме, че е в интерес на корабособственика да оцени внимателно ефективността на проектите, предлагани от корабостроителниците.

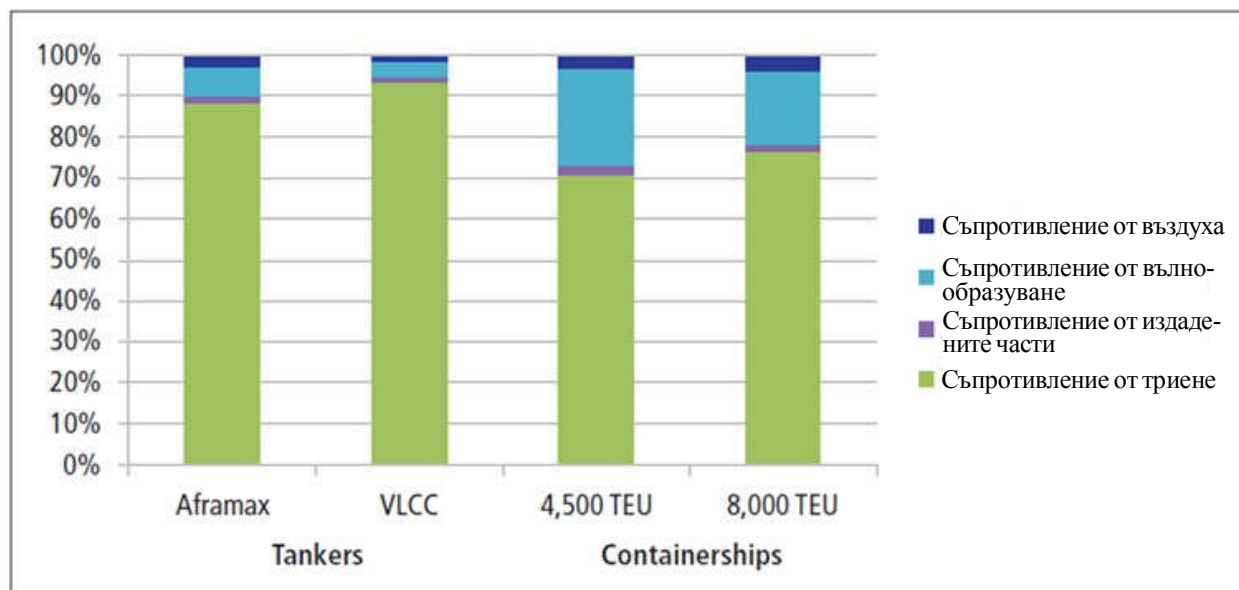
## 2.2. Влияние на компонентите на съпротивлението на корпуса

На фиг. 3 е показано разпределението на компонентите на съпротивлението при плаване на танкери и контейнеровози на спокойна вода с проектна скорост. Те са: съпротивление от триене, от вълнообразуване, от въздуха и от издадените части.

Вижда се, че съпротивлението от триене (вискозно) представляващо от 70 до 93% за танкери и за контейнеровози е основна част от общото съпротивление. Вижда се също така, че този процент е най-голям при големите

и бавни кораби. Вълновото съпротивление се увеличава с увеличаване на корабната скорост и както се вижда от фиг. 3 то е по-голямо при високоскоростните кораби (контейнеровози) в сравнение с по-нискоскоростните (танкери). Тъй като вискозното съпротивление на корпуса на танкера е по-високо, при проектирането им се акцентира върху намаляването на намокрената повърхност. Важно е също така да се осъществи плановост на постоянния преход към винта, за да се осигури равномерното му обтичане (т. е. постоянни аксиални скорости при всеки радиус). По-заоблените форми на булбовете обикновено осигуряват по-гладко обтичане, което води до по-добра обща ефективност на корабите, що се отнася до общото им съпротивление.

При високоскоростни кораби с по-фини форми на корпуса, която е типична за по-големите контейнеровози се увеличава процентът на вълновото съпротивление (от 18 до 23% от общото съпротивление за стандартните 4500 и 8000 TEU контейнеровози). Тези кораби се характеризират с по-големи съотношения L/B, което позволява преместването на LCB към кърмата, докато все още се поддържа добър поток на обтичане на винта. Това позволява намаление на входящия ъгъл на вълните и омекотяване на обводите при носа. Удължената и фина форма на булба на контейнеровозите води до намаляване на вълновото съпротивление.



Фиг. 3. Компоненти на съпротивлението на корпуса при условия на спокойна вода при проектна скорост

## 2.3. Оптимизиране на носовата и кърмовата част

Оптимизирането на носовата част включва в значителна степен формата и дизайна на булба, предната част на водолинията и др. В процеса на оптимизация се използват рутинни изчисления на потенциалните потоци. Правилно проектираният булб, намалява съпротивлението на вълните, като произвежда своя собствена вълнова система, чиято фаза е различна от фазата на носовата вълна от корпуса, създавайки нулиращ ефект в цялостното

намаляване на съпротивлението на вълните. Потокът е хоризонтален и намалява ефекта от завихрянето, предизвикано от предната най-широка част на дъното на кораба. Физическите фактори, имащи отношение към модела за оптимизация на булба са неговият обем, вертикалното и хоризонтално изменение на центъра му и неговата форма. Булбът с обратна крушовидна форма е ефективен при проектни условия, като работи най-добре при газения под проектното (т.е. газене под баластното или това

при частично натоварване). Цилиндрично оформените булбове предлагат компромисни решения. V-образната форма на булба може да бъде използвана за намаляване на слеминга. При по-бързи и по-тесни кораби се предпочитат булбове с по-голям обем и с удължена форма. Булбове тип "пачи-врат" и издължените булбове са особено ефективни при газения и скорости, изменящи се в малки граници. По-широките и големи танкери, и кораби за насипни товари често са оборудвани с булбове с голяма площ, а също така и с V-образна форма, така че да действат като традиционен булб при газене под баластното. Булбовете са най-ефективни само при проектните стойности на числото на Фруд. Промените на скоростта и газенето влияят съществено върху вълнообразуването, така че намаляването на тези два фактора води до увеличаване на създаваното вълново съпротивление. Тъй като товарните кораби работят малко време само при проектните условия се налага допускането на компромиси при проектирането на булба, така че да се осигури добро представяне при работа извън очаквания обхват на работните газения и скорости. Maersk Lines докладва за икономии на гориво от над 5% чрез модифициране на булба и оптимизиране на газенето. Като цяло V-образната форма е за предпочитане пред U-образната, тъй като при нея се избягва създаването на допълнително съпротивление при движението на кораб. Влиянието на булба при увеличени съпротивления от лошо време все още е слабо изучено.

*Оптимизиране на кърмовата част* е насочено към намаляването на въздействието на кърмовата вълна, подобряване на обтичането на винта и избягване на образуването на вихрови движения. Подобряването на естественото обтичане на кърмата чрез подходящ дизайн е предпоставка за подобрене на пропульсивните характеристики на кораба. Развитието и прилагането на методите за изследване на вискозни потоци са довели до подобрене в конструкцията и взаимното разположение на кърмата, винта и руля и до повишаване на пропульсивните качества на кораба като цяло.

*Резервите за оптимизация на задвижването* се търсят в намиране на най-добрите условия за работа на двойно винтова пропульсивна уредба и в усъвършенстване на комплекса "корпус-винт-перо на руля".

Корабите, оборудвани с двойно винтова пропульсивна уредба се отличават с повишена маневреност и са особено удобни, когато енергията, необходима за единично задвижване е повишена. Пропульсивната мощност на едновинтови кораби може да бъде повишена в рамките на разумното, ако се лимитира по отношение на газенето, като диаметърът на винта се намали адекватно на намаленото газене. По сведения на шведския изпитателен център SSPA въвеждането на двувинтова пропульсивна уредба при кораби с голяма пълнота на корпуса ( $C_B > 0,70$ ) може да увеличи ефективността с 2-3%. За тънки високоскоростни кораби двойното винтово задвижване е за предпочитане защото при него се наблюдават по-малки вибрации и кавитация.

Втората група резерви за повишаване на ефектив-

ността на управлението и намаляване на енергийните разходи се търсят в измененията на вида и формата на винто-рулевата група. Тези конструктивни решения са описани като инженерни съоръжения, но все още няма окончателни резултати от тяхното прилагане [2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Ще изброим предполагаемите предимства на някои от тях, без да ги разглеждаме от конструктивна гледна точка.

- SURF-BULB (Swept-back UP-thrusting Rudder whit BULB) [10]. Устройството представлява булб, инсталиран на перото на руля с две крила, перпендикулярно разположени на перото. Японската обединена морска корпорация публикува на страницата си резултат от изпитания на новопостроени танкери тип VLCC с допълнително инсталирани SURF-BULB устройства, които показват икономия на гориво от 3 до 5%, което отговаря на около 700 тона на година.

- Устройство за предварително завихряне на потока пред винта (Supper Steam Duct). Един от вариантите на SSD е дюза или пръстен, поставен на корпуса на кораба, преди гребния винт. Предполага се, че чрез предварително завихряне и хомогенизиране на водната струя, попадаща върху винта се намаляват ротационните загуби [6,8]. На проведени изпитания на едно от устройствата на танкер VLCC под баласт със скорост от 14 въз. е реализирана икономия на мощност до 7,1% и увеличение на скоростта с 0,25 въз. при постоянни обороти на винта [11].

- Противовъртящи се винтове (Contra-Rotating Propellers) CRP представлява система от два коаксиално инсталирани един зад друг винта, въртящи се в противоположни посоки. Твърди се, че CRP води до повишение на ефективността благодарение на задния винт, който унищожават енергийните загуби в следствие на завихрената на спирала струя от предния винт. Системата CRP съвместно с SSD подобрява управляемостта, а според авторите е предпоставка за намаление на необходимата мощност до 10% [9].

- Интегрирана винто-рулева система (Ruder - Bulb). Системата RB представлява булб, който се инсталира на перото на руля зад системата CRP. Резултатите от натурни изпитания, проведени от фирмата "Becker Marine Systems" показват възможности за повишаване на ефективността на движителния комплекс с 3-4%.

- Крила за изправяне на водния поток към винта - Low Viscous Resistance Fins (LVRF) и крила към корпуса на кораба преди винта от типа Pre - Swirt Stator (PSS). Това са системи от крила, предназначени да изправят завихрената водна струя, попадаща към винта. Изпитанията на LVRF, проведени от Namura Control Fins показват възможности за икономия 2-5%, а тази на PSS проведени от Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering (DSME) - за ползи при танкери VLCC от 4 до 4,8% [5].

- Energo Pro Fin е енергоспестяващо устройство, което се състои от модифицирана капачка на главината на гребния винт с перки. Това устройство за разлика от досега разгледаните е търговски продукт на фирмата WARTSILA и има потвърден ефект до 2% [7].

#### 2.4. Роля на аналитичните и моделни изпитания

При разработването на нови корпусни форми се препоръчва повтарящ се процес от последователни компютърни хидродинамични анализи (CFD) и моделни изпитания. Типичният процес може да включва три или повече интерации от аналитични и моделни изпитания за определяне на съпротивлението и необходимата мощност. Те трябва да се извършват за най-малко три различни газения и няколко стойности на диферентите и работните скорости. Провеждането на една пълна и изчерпателна програма за изпитания, която струва между \$200 000 и \$500 000 може да бъде лесно обоснована за големи серии от кораби. Изчисленията на потенциалния поток на свободната бордова повърхност, известни още като незначителни изчисления се отнасят в момента към рутинната част от оптимизацията на формата на корпуса. Те могат да бъдат включени в параметричните изследвания на основните размери и по-специално за установяване на влиянието на LCB и настройката на Св. Използването на CFD-методите е полезно при оценката на влиянието на входящия ъгъл и при оптимизирането на кърмата и булба, но те не могат да заместят напълно скъпоструващите моделни изпитания. Тези инцидентни изчисления не са ефективни за оценка на промените в корпуса, които оказват влияние върху потока около него, където вискозитетът върху вълновото съпротивление може да бъде по-изразен.

Значителен потенциал за спестяване на разхода на гориво чрез оптимизиране на извънкорпусните параметри, при които бъдещите работни режими се отличават от индивидуалния дизайн и проектната скорост. Промените в газенето, диферента и скоростта, предизвикани от променливите условия на експлоатация могат да променят драматично вълновия профил и цялостното съпротивление. Поради това корабособственикът и конструкторът трябва да подготвят ясна спецификация на различните експлоатационни и икономически условия - газене, диферент и скорост в различните етапи от изпълнение на транспортната задача. Като се обръща внимание на т.н. извънспецификационни условия (частично натоварване, плаване под баласт и намаление на скоростта) могат да бъдат реализирани съществени ефекти и малко или никакви въздействия върху проектното изпълнение на газенето и скоростта. В [1] е решена задачата за определяне на оптималната скорост на кораб тип "Panamax" при различни натоварвания и цени на горивата и фрахта, при което може да бъде реализирана икономия на гориво до 5%. Друг пример: Хамбургският басейн за моделни изпитания (HSVA) отчита възможността за намаление на съпротивлението с 12 до 16% и съответно определяне на необходимата мощност 70% от тази при проектно газене и скорост от 89% от проектната [3]. Това е било постигнато чрез оптимизиране само на булба и екстремното усилие без намаление на другите печалби от проектирането. Разликата в скоростите между състоянията на пълно натоварване и под баласт на танкери, построени през последните десет години варира от 0,7 до 1,2 въз.

Тъй като малко проектантите се чувстват комфортно

при използването само на компютризираните анализи (CFD), за количествена оценка на необходимата мощност, се препоръчва използването на моделни изпитания в басейни. Моделните изпитания освен това дават на конструктора да наблюдава вълновите модели и условията на обгичане на винта. Моделните изпитания имат висока точност (погрешност 2-3%), въпреки, че и най-добрите изпитателни басейни могат да допускат значителни грешки при оценяването на по-малко конвенционални конструкции при неспецификационни режими.

При разработването на нови форми на корпуса се налага да се правят много компромиси. Въпреки, че се постига значителен напредък при оптимизирането на формата на корпуса, като основа на проектирането, създаването на модерната съвременна линия остава като част от изкуството и част от науката и все още не може да се използва като заместител на опитния конструктор.

### 3. ИЗВОДИ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

В заключение отбелязваме, че с помощта на разкритите резерви за подобряване на енергийната ефективност ние нямаме амбицията да навлизаме в специфичната дейност на проектантите или в конкретните процедури и алгоритми за оптимизация. Посочените от нас икономически възможности могат да бъдат полезни на корабособствениците при договарянето на кораби с добър конструктивен индекс (EEDI) и при изпълнение на планове за енергийна ефективност с най-добри операции на енергийни индекси (EEOI).

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Недев, Ас., Белев, Бл. и др.* Оптимизация на скоростта на търговските кораби. Известия на съюза на учените, Варна, декември, 2016.
2. *Белев, Бл.* Управление на енергийната ефективност на корабите "Ларго Сити" Варна, 2017.
3. *ABS World Head Quarters*, Abs Ship Enrgy Efficienog Measures States and Guidanie.
4. *Becker Bulb Rudders* - improved propulsion efficiency with topmanoeuvrability, Becker Marine Systems, [Електронен формат], Достъпно чрез URL: <http://www.becker-marine-systems>, (Дата на използване: 24.12.2016).
5. *Choi Y.*, Energy Saving Devices, [Електронен формат], Достъпно чрез URL: <https://www.scribd.com/document/100653246/2008-11-DSME-ShipEnergy-Saving-Devices>, (Дата на използване: 24.11.2016).
6. *Devanney J.*, Detailed Studies of the Impact of EEDI on VLCC Design and CO2 Emissions, Center for Tankship Excellence, Florida, 2010, p. 33.
7. *Energy saving device (ESD)*, Wartsila Enrgo pro Fin.
8. *Hannes J.*, Towards Energy Efficiency, PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, 2013, p. 88.
9. *Keh-Sik Min, Bong-Jun Chang, Heung-Won Seo*, Study on the Contra-Rotating Propeller system design and full-scale performance prediction method, Available online 16 March 2016, [Електронен формат], Достъпно чрез URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2092678216303806>, (Дата на използване: 14.12.2016)
10. *Marine equipment*, JMU supplies the ship's energy saving device SURFBULB and anti-rolling tank Mup-ART ?, [Електронен формат], Достъпно чрез URL: [https://www.jmuc.co.jp/en/products/keihin\\_marine/](https://www.jmuc.co.jp/en/products/keihin_marine/), (Дата на използване: 14.12.2016)
11. *Mewis F.*, Propulsionsversuche mit und ohne Mewis Duct®, Schiff & Hafen, Mai 2012, Nr. 5.