

ХИДРОДИНАМИЧНИ СРЕДСТВА ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА КОРАБИТЕ

Стефан Кюлевчелиев, Александрина Василева, Светлозар Георгиев

Abstract: IMO’s Marine Environment Protection Committee (MEPC) introduced a number of new compulsory regulations related to reducing the GHG emissions.

The objective of this paper is to discuss the IMO measures with special emphasis on the hydrodynamic means of fulfilling these requirements.

Some of these means are illustrated, which the authors have some practical experience with.

Keywords: EEDI, EEOI, SEEMP, ship energy saving devices.

1. Въведение.

Повишаването на енергийната ефективност на корабите винаги е било във фокуса на вниманието на проектантите, операторите и корабособствениците, главно по икономически съображения. Напоследък, интересът към този проблем се съживи и засили поради екологичната загриженост на обществото. Това стимулира Комитетът за защита на околната среда Marine Environment Protection Committee (MEPC) на ИМО, да започне обсъждане, за да се подготви въвеждане на редица нови задължителни регулации свързани с намаляването на емисиите на парникови газове от корабите.

Целта на този доклад е да се дискутират мерките на ИМО, с акцент на хидродинамичните средства за постигане на съответствие с изискванията.

2. Мерки на ИМО за намаляване на емисиите на парниковите газове.

Международната морска организация (ИМО) въвежда регулации в три обособени групи от мерки.

ТРИ ОБОСОБЕНИ МЕРКИ		
Технически мерки	Експлоатационни мерки	Пазарни мерки
EEDI – конструктивен индекс за енергийна ефективност	EEOI – експлоатационен индикатор за енергийна ефективност	Цени/класификация на горивата за корабосплаване
Валиден САМО за кораби от 2013 г.	SEEMP – План за управление на енергийната ефективност	Търговия с емисии
	Валиден за всички кораби в експлоатация	Данъци на бункеровниците

Някои от регулаторните изисквания са вече в сила с перспектива да стават все по-стриктни в бъдеще.

- EEDI – Конструктивен индекс за енергийна ефективност
Най-общата дефиниция на EEDI е:

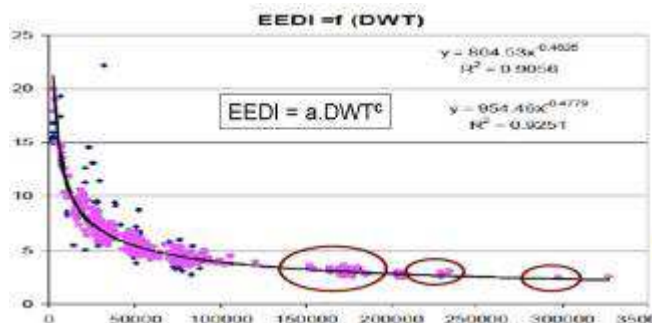
$$EEDI = \frac{\text{ЕМИСИИ}}{\text{ПОЛЗА ЗА ОБЩЕСТВОТО}}$$

а по-разгънатата предствлява изчисляване на емисиите на кораб в проектно състояние (мощност, скорост и т.н), отнесени към транспортната работа:

$$EEDI = \frac{\text{МОЩНОСТ} \cdot \text{СПЕЦИФИЧЕН РАЗХОД} \cdot \text{ПРЕОБРАЗУВАНЕ В CO}_2}{\text{ТОВАРОНОСИМОСТ} \cdot \text{СКОРОСТ}} \quad (1)$$

Всеки от членовете в това уравнение е разписан разширено, отчитайки главния двигател, спомагателните механизми, отбора на мощност, прилагането на енергоспестяващи средства, а към скоростта е въведен коефициент отчитащ влиянието на експлоатационните условия. С регресионен анализ на базата данни на ИМО са изведени референтни линии за EEDI за седем типа кораби, под които трябва да е индекса за новопроектирани кораби. Регресията е степенна функция от дедуейта:

$$EEDI = a \cdot DWT^c \quad (2)$$



Фиг. 1. Референтна крива на EEDI за кораби за насипни товари.

Изведените сега максимални стойности ще са валидни до 2014 г. След това на всеки 5 години тези стойности ще бъдат снижавани с по 10 %, т.е. изискванията ще стават все по-строги.

Многобройни дебати съпровождат извеждането на референтните стойности на EEDI. Някои от тях още продължават. Тук ще споменем един от най-важните проблеми – зависимостта на EEDI от скоростта.

Ако приемем както е прието, че мощността е пропорционална на V^3 , от формула (1) следва, че $EEDI \sim f(DWT, V^2)$. От друга страна, референтната линия зависи само от дедуейта (формула 2). Следователно:

$$A(DWT, V^2) < B(DWT)$$

Това означава, че спазването на изискването на ИМО, води до ограничаване на скоростта. Нещо повече, парадоксално, оптималното решение на горното неравенство е $V = 0$. Това обаче обезсмисля „ползата за обществото“ в основната дефиниция на EEDI.

- EEOI – Експлоатационен индикатор за енергийна ефективност

$$EEOI =$$

$$\frac{\text{ГОРИВО} \times \text{КОЕФИЦИЕНТ ЗА ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КЪМ CO}_2}{\text{КОЛИЧЕСТВО ТОВАР} \times \text{РАЗСТОЯНИЕ}}$$

Този индекс отразява емисиите на парникови газове от корабите в действителна експлоатация. Следователно може да бъде повлиян от промените в дейността на кораба, докато EEDI е свързан само с проектните характеристики на плавателния съд. Той все още не е задължителен.

- SEEMP – План за управление на енергийната ефективност на кораба, валиден за всички кораби в експлоатация

SEEMP е задължителен да съществува на борда, но няма задължително съдържание. Изпълнението му включва четири стъпки плюс една доброволна.

- Планиране
- Изпълнение
- Инспекция (мониторинг)
- Самооценка и корекции
- Доброволно докладване при поискване от класификационна организация

На практика това означава да се поставят цели и да се прилагат добри практики, да се избира оптимален курс, оптимален баласт, оптимален диферент, добра поддръжка на повърхността на корпуса и пр.

3. Хидродинамични устройства и мерки за енергийна ефективност

Съществуват много и различни методи за оптимизиране на енергийните разходи на кораба. Според ABS [1] съвременните мерки и средства за увеличаване на енергийната ефективност, могат да се разделят на две групи: за новостроящи се кораби и за новостроящи се и кораби в експлоатация.

Като за новостроящи кораби се отнасят:

- оптимизация на корабната форма
- оптимизация на конструкцията на корпуса

А към втората група спадат:

- енергоспестяващи устройства
- ефективност на корабите в експлоатация
- двигатели и механизми.

Ролята на корабната хидродинамика за повишаване на енергийната ефективност за удовлетворяване на новите регулации за намаляване на парниковите емисии може да се разглежда в следните аспекти:

- Оптимизация на корабната форма от гледна точка на съпротивлението.
- Повишаване пропульсивния коефициент на кораба с оптимизиране на гребния винт и прилагане на допълнителни енергоспестяващи устройства.
- Определяне на влиянието на външните условия при експлоатация (вятър, вълнение и др.) за оптимизиране на курса на кораба.
- Определяне на оптимален диферент на кораба от гледна точка на мореходните му качества.

Някои от тези дейности са представени и дискутирани по-долу, на базата на практиката и опита на авторите.

3.1. Оптимизация на корабната форма

Оптимизацията на корабната форма продължава да се признава от морската общност, като все по-важно средство за подобряване на енергийната ефективност на корабите. Този начин има три приложими варианта за изпълнение: използвайки стандартна форма и пропульсивна система, налична за съответната корабостроителница, модифициране на съществуваща форма спрямо определени условия на експлоатация и разработване на нов проект.

Оптимизацията на съществуващ кораб спрямо определени условия на плаване се изразява главно в модификация на някои части (т.н. ретрофит), напр. оптимизиране на формата на булбовия нос, оптимизиране на кърмовата форма както от гледна точка на съпротивлението, така и на взаимодействието с двигателя.

При проектирането на нов кораб се оптимизират формата на корпуса и пропульсивната система, като се прави оценка на всички фактори, оказващи влияние върху поведението на кораба на вода.

3.1.1 Оптимизиране на главните параметри на кораба

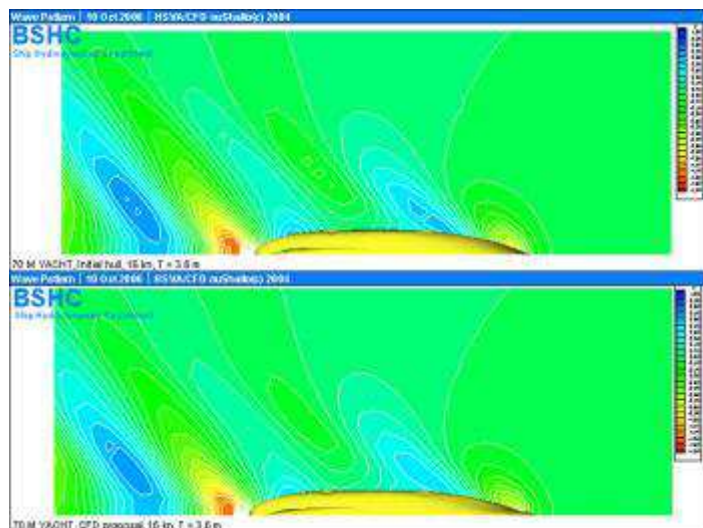
Съществуват многобройни аналитични инструменти и софтуерни пакети за изследване и оптимизиране на алтернативни проектни решения. Те извършват многокритериална оптимизация – хидродинамика, якост, устойчивост и пр. Икономическите съображения също се вземат предвид в многокритериалната оптимизация.

3.1.2. Минимизиране съпротивлението на корпуса

Оптимизация на корабната форма при зададени главни размери може да се извършва с моделни изпитания на различни модификации на формата на корпуса. Това, обаче, е скъпо начинание и се прилага при много отговорни проекти.

С развитието на компютърната хидродинамика (CFD) тя все повече се прилага за целта с много по-малко разходи. Доколкото компютърните програми, решаващи задачата за напълно вискозен поток със свободна повърхност са твърде взискателни към необходими компютърни ресурси (компютърна мощност и трудоемкост), „работният кон“ на

проектантите все още са по-бързите числени методи за потенциално обтичане. Фигура 2 илюстрира оптимизация на корпуса на 70-метрова моторна яхта, извършена в ЦХА – БАН, с помощта на такъв програмен продукт – □-SHALLO на Хамбургския басейн (HSVA)



Фиг.2. Оптимизация на формата на корпуса с компютърни симулации

Много различни устройства са изследвани за коригиране на енергийните характеристики на неоптимални корабни проекти или за подобряване на вече оптимален или близък до оптималния проект, възползвайки се от физични явления приемани като второстепенни по важност при нормалния процес на проектиране на даден кораб. Тези устройства могат да се групират по следния начин:

3.1.3 Устройства повишаващи пропульсивния коефициент

Изследвани и внедрени са много различни устройства за коригиране на енергийните характеристики на неоптимални корабни проекти или за подобряване на вече оптимален или близък до оптималния дизайн, възползвайки се от физични явления приемани като второстепенни по важност при нормалния процес на проектиране на даден кораб. Тези устройства могат да се групират по следния начин:

- Устройства за хомогенизиране на потока и избягване на откъсване

Като цяло устройствата за хомогенизиране на потока и избягване на откъсване имат функция за подобряване на потока обтичащ кораба, те са разработени,

така че да се избегнат проблеми с гребния винт и/или с допълнителното съпротивление на формата в кърмата. Такива са булбова (Хогнерова) кърма, вихроразбиващи крила, тунелна кърма и др. Очакваната икономия е в границите от 0 до 5%.

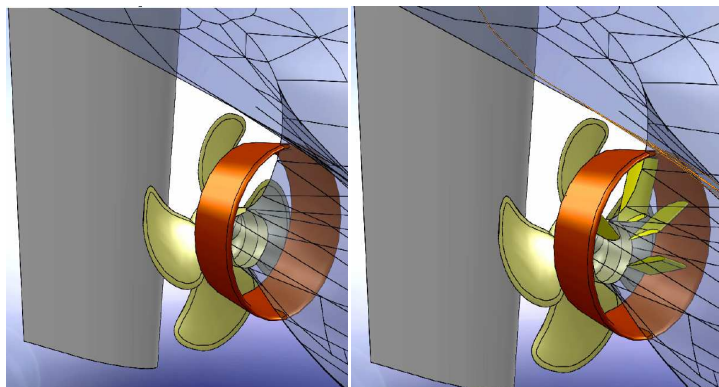
• Устройства за предварително завихряне на потока пред винта

Тези устройства са допълнителни стърчащи части закрепени към корпуса, целящи предварително завихряне на потока, обратно на посоката на въртене на гребния винт. По този начин се намаляват ротационните загуби в струята зад винта. Подходящи са за реконструкция на съществуващи кораби и инсталиране на новостроящи се.

Варианти на този вид устройства са предварително завихрящи крила и статори и предварително завихрящи крила с ускоряваща дюза: такива са Mitsui integrated ducted propeller, Hitachi’s Zosen Nozzle, Sumitomo’s Integrated Lammeren Duct and Becker’s Mewis Duct. При инсталиране на устройства от този тип се очаква икономия на енергия в диапазона 3 до 9%.

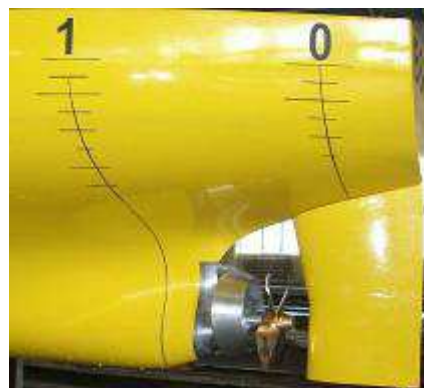
Тук представяме едно от тези устройства – BMS Mewis Duct® (Дюза на Мевис), каквото е вече многократно изпитвано в ЦХА – БАН, Варна с участието на авторите.

Устройството представлява хомогенизираща дюза, комбинирана със система от крила, предварително завихрящи потока пред винта. Това намалява ротационните загуби в струята зад винта, но също ускорява потока към вътрешните радиуси на винта (Фиг. 3).



Фиг. 3. Комбинацията BMS Mewis Duct®

Формата на дюзата и ъглите на атака на крилата в нея се оптимизират с помощта на CFD и последващи моделни изпитания, чиито резултати се представят като гаранция за ефективност на клиента.

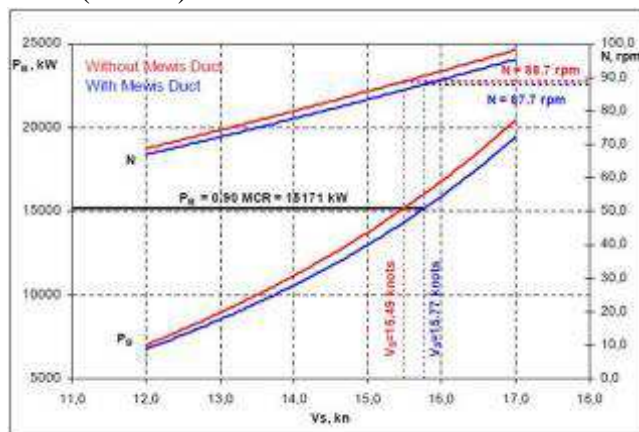


Фиг.4 Корабен модел с монтирана дюза на Мевис

Устройството е подходящо за кораби с голяма пълнота и големи натоварвания на винта по упор. Очакваната икономия на енергия е в диапазона 3% to 9%, в зависимост от натоварването на винта и на практика не зависи от газенето и скоростта на кораба.

В [2] са приведени реални данни за 45000 ДВТ кораб за генерални товари, при който периодът на възвращаемост на инвестициите е около 1 ¼ години.

Най-важното е, че устройството е приложимо за преоборудване на съществуващи кораби. Поради едновременното намаляване на двата основни типа загуби, при намалената мощност и увеличена скорост оборотите на винта се променят несъществено, т.е. не е нужно повторно проектиране и смяна на гребния винт (Фиг. 5).



Фиг. 5. Резултати за 158 000 DWT танкер, изпитан в ЦХА-БАН, Варна

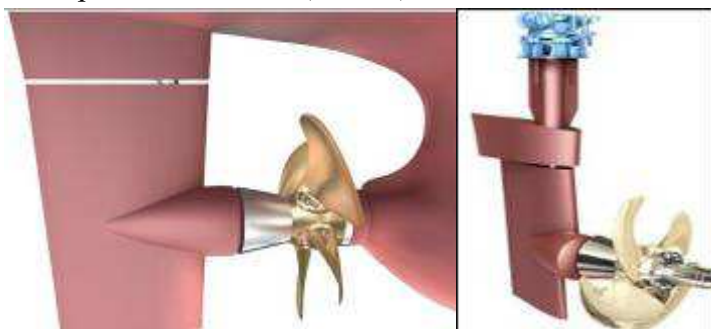
- Устройства за въздействие на потока зад винта

Ролята на тези устройства е да формира потока зад гребния винт. В някои случаи, това означава опит да се превърнат ротационните компоненти на потока, създадени от движителя, в аксиални. В други случаи, са само за потискане на вредните характеристики на потока. Такива устройства са усукани пера на кораба, крила и статори за завихряне на потока зад винта, рули с инсталиран булб и пр.

Очакванията от инсталирането на такива устройства е от 2 до 6%.

Тук представяме едно от тези устройства – Интегрирана винтово-рулева система (PROMAS), каквото е изпитвано в ЦХА – БАН, Варна.

Promas включва усукан балансиран рул с булб („Булб на Коста“), който е плавно свързан към главината на гребния винт с обтекател и е адаптиран и оптимизиран към проекта на винта (Фиг. 6).



Фиг. 6. Интегрирана винтово-рулева система (PROMAS)

Добре проектирано усукване на руля го съгласува към завихрянето на струята на винта и намалява местния ъгъл на атака към входящия ръб на руля. Това води до по-ефективен рул с по-ниско съпротивление и по-добро възстановяване на ротационната енергия на струята на винта.

В комбинация с булб на Коста, интензивната вихрова кавитация от главината се елиминира, което допълнително увеличава ефективността.

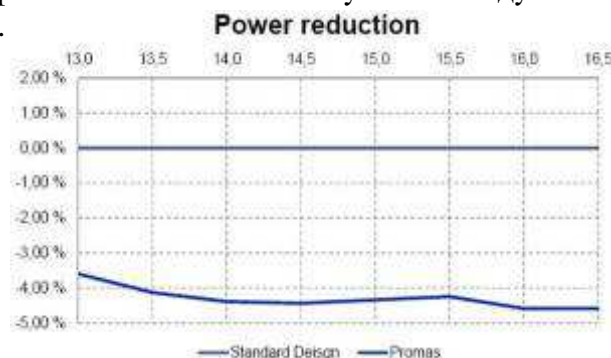
Най-добри резултати се постигат за пълни, едновинтови кораби с коефициент на обща пълнота 0,75 – 0,85 и проектна скорост в диапазона 14 – 16 възла. В такива случаи намалението на мощността може да е 6 – 9 % в сравнение с конвенционалните решения.

Фигура 7 показва корабен модел, оборудван със системата PROMAS, изпитан в ЦХА – БАН.



Фиг.7 Корабен модел с интегрирана винтово-рулева система (PROMAS)

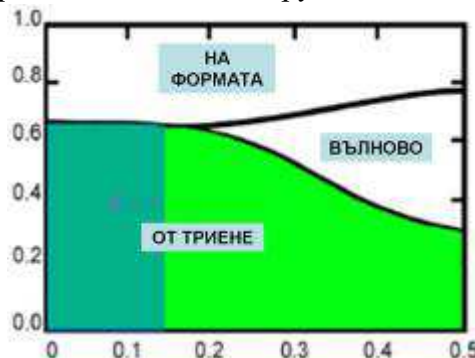
Резултатите от моделните изпитания на 50 000 ТДВ продуктовоз, проведени в ЦХА-БАН, Варна са обобщени на фигура 8 [4]. Ефективността във този случай е между 4 и 5 %.



Фиг. 8. Намаляване на мощността при прилагане на PROMAS

3.2. Системи за понижаване на съпротивлението от триене

Тук разглеждаме една стара, но възвращаща се идея - използването на въздушна смазка. Фигура 9 показва относителния дял на основните компоненти на съпротивлението при различни числа на Фруд.



Фиг. 9. Относителен дял на компонентите на съпротивлението във функция от числото на Фруд

При ниски числа на Фруд съпротивлението от триене е преобладаващата компонента на съпротивлението. Следователно, намаляването му би имало най-съществен ефект. Един начин за това е въздушната смазка. Това означава подаване на въздух през отвори в корпуса. Въздухът създава тънък слой (изкуствена каверна) между тялото и течността и намалява съпротивлението от триене. Въздушната смазка е ефективна не само поради управлението на граничния слой, но и защото плътността на въздуха е много по малка (около 800 пъти) от тази на водата. Въздушната смазка може да се раздели на три основни категории [5]:

- a) Мехурчета (Bubble Drag Reduction - BDR);
- b) Въздушен слой (Air Layer Drag Reduction - ALDR)
- c) Частична каверна (Partial Cavity Drag Reduction - PCDR).

Фигура 10 илюстрира трите типа въздушна смазка.



Фиг.10 Типове въздушна смазка
a - мехури, b - въздушен слой, c - частична каверна

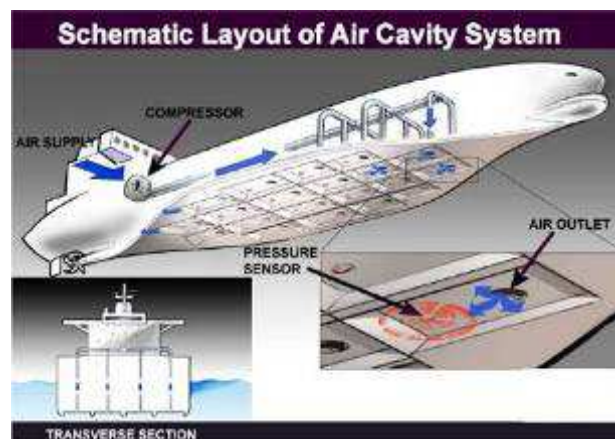
Изследванията по проблема се възраждат и вече има някои практически внедрявания. Фигура 11 илюстрира практическа реализация на мехурчеста въздушна смазка при новопостроен кораб [6].



Фиг. 11. Система за въздушна смазка на Мицубиши (MALS)

С натурни изпитания са установени нетни икономии на енергия между 8 и 12% в зависимост от дебелината на въздушния слой. Интерес представляват нетните икономии, доколкото този метод изисква разход на мощност за подаване на въздуха.

Друга система, Stena AirMax PCDR Project, засега изпитана само на мащабен прототип, реализира въздушна смазка тип частична каверна [5], фигура 12.



Фиг. 12. Система Stena AirMax с въздушна смазка тип частична каверна

3.3. Съвместимост на различните методи

Много от енергоспестяващите средства са съвместими, т.е могат да се прилагат едновременно, разбира се без механично сумиране на ефекта им.

В [1] е направен изчерпателен анализ на приложимостта на 25 енергоспестяващи средства към различни типове кораби, както и взаимната съвместимост на енергоспестяващите средства.

4. Ефективност на кораби в експлоатация

Най-полезните и преки средства на оператора за подобряване поведението на кораба са решенията, взети в съответствие с начина на водене на плаването, за редовната поддръжка и следене на разхода на гориво. Всяко пътуване дава възможност за оптимизиране на скоростта, както и избор на най-добро газене и диферент за съответни условия.

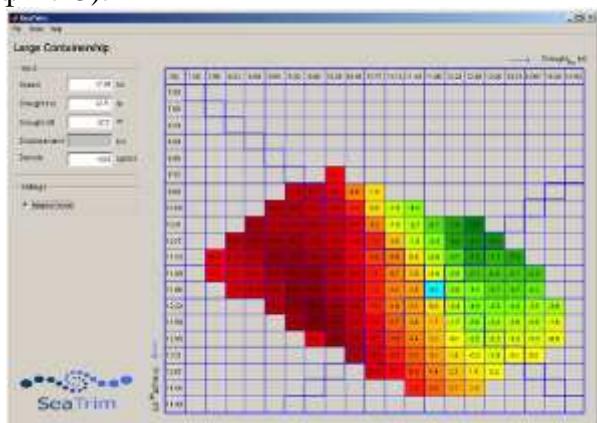
По-добрата енергийна ефективност на корабите е пряко свързана с целите на наскоро наложените от ИМО цели, на плана за управление на енергийната ефективност

(SEEMP), който е валиден за всички кораби в експлоатация.

Методите за подобрене на ефективността на кораби в експлоатация са:

- Оптимизация на скоростта
- Безопасен и енергийно-ефективен избор на курса
- Оптимизация на газене/диферент

Традиционно корабните форми се проектират и оптимизират за едно или две газения и диференти. Понякога по-малко газене, при малка разлика в диферента, може да предизвика по-голямо съпротивление от по-голямо газене при подходящ диферент. Затова, вече е регулярна практика да се изследват тези ефекти предварително и да се инсталират бордови компютърни системи за консултиране на капитана и карго-плана (фиг.13).



Фиг.13. Пример за бордови оптимизатор на диферента [7]

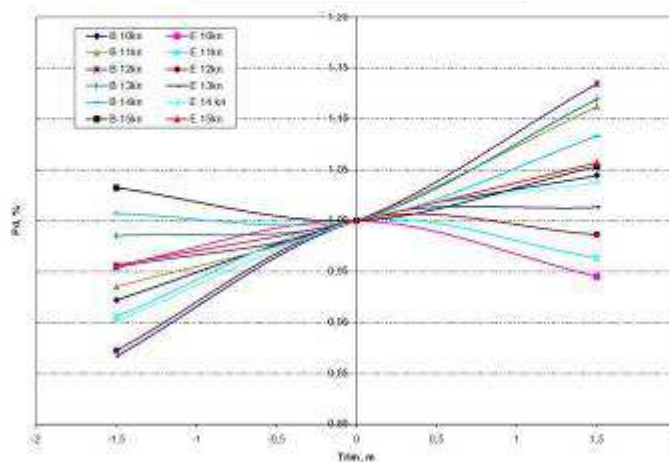
Този метод е подходящ, както за кораби в експлоатация, така и за нови кораби. Подходящ е за всички типове кораби, но най-голяма полза има при такива, плаващи на дълги маршрути. С оглед на вложените разходи и съответните печалби, този метод е може би един от „най-евтините”, както е посочено в следващата таблица.

Икономии	Средно 2% намаление на консумацията на гориво
Тип кораби	Всички кораби, но най-голям ефект при кораби с дълги маршрути
Нови/реконструкция	И двете
Разходи	Разходи за добиване на данните са 50000 – 100000 \$ (общо за всички кораби от серия) с помощта на моделни изпитания. Разходи за ефективно ползване на данните (бордови компютърни системи) – 500 – 5000 \$ за кораб. Експлоатационни разходи – за баластране и времето за карго-планиране за оптимизиране на разпределението на товара.

Традиционният подход за определяне на оптималния диферент е да се ползват моделни изпитания за оценка на съпротивлението за една матрица от газения и диференти. Препоръчително е да се провеждат, както буксировъчни, така и пропульсивни изпитания, тъй като диферентът, макар да оказва влияние главно върху съпротивлението на кораба, оказва влияние и върху коефициентите на взаимодействие, в резултат върху пропульсивния коефициент. Все повече започва да набира популярност и приложимост използването на компютърна хидродинамика (CFD) като допълнение или заместване на моделните изпитания.

Фигура 14 показва резултатите от изпитания на 19 000 ТДВ асфалтовоз при две газения и вариране на диферента, изпитани в ЦХА – БАН, Варна

Случай	Диферент	
B1	1,5	Диферент на кърма
B2	0	Равен кил
B3	-1,5	Диферент на нос
E1	1,5	Диферент на кърма
E2	0	Равен кил
E3	-1,5	Диферент на нос



Фиг. 14. Икономия на мощност с изменение на диферента

Видно е, че ефектът на диферента варира както със средното газене, така и със скоростта.

5. Предизвикателства пред изпитателните басейни

Въвеждането на новите регулации е критичен момент за изпитателните басейни. Досега, те традиционно провеждаха моделни изпитания на чисто комерсиална основа,

обаче отсега нататък ще бъдат под много по-щателен и критичен контрол от класификационните организации.

Като част от тази регулаторна програма, ИМО вече изисква подробна документация, анализ и сертифициране на експерименталните методики, наблюдения на място и рецензиране на резултатите от моделни изпитания от страна на класификационните организации.

Освен това, експерименталните басейни трябва да имат сертифицирана Система за Управление на Качеството.

6. Заключение

Новите регулации на ИМО, свързани с намаляването на емисиите на парникови газове от корабите, поставят нови предизвикателства пред всички страни в морския бизнес: корабособственици, проектанти, изследователски институции по корабна хидродинамика, застрахователни дружества, класификационни организации.

Хидродинамичните средства за повишаване на енергийната ефективност на корабите могат да помогнат значително за удовлетворяване на изискванията.

Част от работата, докладвана в тази статия е извършена по Проект НП11 "Изследване на възможността за снижение съпротивлението на кораба с въздушна смазка" финансиран от Държавния бюджет, реализиран от екип на ТУ-Варна.

ЛИТЕРАТУРА

1. ABS, Ship energy efficiency. Status and guidance, www.eagle.org
2. Friedrich Mewis, Propulsionsversuche mit und ohne Mewis Duct®, Schiff & Hafen, Mai 2012, Nr. 5
3. PROMAS. High efficiency propulsion system, www.rolls-royce.com
4. Rolls-Royce proprietary information, 19 September 2013
5. Steven L. Ceccio & Simo A. Mäkiharju, Air Lubrication Drag reduction on Great Lakes Ships, University of Michigan, 9 February 2012

6. Shuji Mizokami, Manabu Kawakado, Mitsuhiko Kawano, Takeo Hasegawa, Ichiro Hirakawa. Implementation of Ship Energy-Saving Operations with Mitsubishi Air Lubrication System, *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 50 No. 2 (June 2013)*
7. p8 Performance monitoring and trim optimization.pdf (on the Internet)

За контакти:

9010 Варна, ул. “Студентска”1
Технически университет -Варна
Корабостроителен факултет
доц. д-р инж. Стефан Кюлевчелиев
e-mail: stefan.q@bshc.bg
тел.: 052 383 243