

## БЕЗОПАСНОСТ ПРИ РАБОТА С ВТЕЧЕН ПРИРОДЕН ГАЗ В ТЕХНОЛОГИЧНИ СИСТЕМИ ЗА МОРСКИ СЪДОВЕ (НАУЧНА СТУДИЯ)

Силвия Лецковска, Кольо Орешков, Радостин Долчинков,  
Камен Сейменлийски, Атанас Йовков  
*Бургаски свободен университет*

**Резюме:** През последните години гамата от кораби, използващи втечен природен газ /LNG - Liquefied natural gas/ като гориво, се разширява – контейнеровози, пътнически фериботи, ро - ро кораби, кораби клас Ro-Pax, кораби клас Con-Ro, круизни кораби, ледоразбивачи, влекачи, сондажни кораби, подежни сондажни платформи, снабдителни съдове за офшорни съоръжения, високоскоростни фериботи, вкл. пътнически автомобили, различни видове танкери, газовози за различни видове газове, риболовни кораби, помощни кораби за рибовъдни ферми, влекачи, речни кораби за различни цели и редица други. Неговото приложение има редица предимства, но е съпътствано и с нови предизвикателства. Част от тях са разгледани в настоящата студия.

**Ключови думи:** Втечен природен газ, кораби, безопасност.

## SAFETY WHEN WORKING WITH NATURAL GAS IN SHIPTECHNOLOGY SYSTEMS (SCIENTIFIC STUDY)

Silvija Letskovska, Kolyo Oreshkov, Radostin Dolchinkov,  
Kamen Seymenliyski, Atanas Yovkov  
*Burgas Free University*

**Abstract:** In recent years, the range of ships using liquefied natural gas (LNG) as fuel has been expanding - container ships, passenger ferries, ro-ro ships, Ro-Pax class ships, Con-Ro class ships, cruise ships, icebreakers, tugboats, drilling ships, jack-up drilling platforms, supply vessels for offshore facilities, high-speed ferries, including passenger cars, various types of tankers, gas carriers for various types of gases, fishing vessels, auxiliary vessels for fish farms, tugboats, river vessels for various purposes and a number of others. Its application has a number of advantages, but is also accompanied by new challenges. Some of them are discussed in this study.

**Keywords:** Liquefied natural gas (LNG), ships, safety.

### Въведение

На фона на цялостното влошаване на екологичната ситуация в развитите и развиващите се страни, делът на емисиите от морския транспорт е твърде значителен. В момента един от най-важните проблеми, тревожещи човечеството, е търсенето на алтернативни източници на енергия.

Това се дължи не само на предстоящия недостиг на петролни суровини, но и на екологични проблеми, тъй като използването на въглеводородни горива в двигателите с вътрешно горене е съпроводено с емисии на огромни количества вредни вещества в атмосферата

Основните стимули за преминаване към LNG е екологичността, ефективността и безопасността по отношение на алтернативните горива.

По отношение на опасността от пожар и експлозия LNG е най-безопасният от всички използвани течни моторни горива и втечнени въглеводородни газове, той е нетоксичен, не причинява корозия на оборудването и не замърсява околната среда.

Предимствата на използването на LNG от техническа гледна точка като гориво във водния транспорт са следните:

- Отпада необходимостта от пречистване на отпадъчните серни оксиди (SOx) поради пълното отсъствие на сяра в газовото гориво;
- Значително намаляване на съдържанието на азотни оксиди (NOx) в отработените газове (два пъти за четиритактови дизелови двигатели и 20-25% за двутактови);
- Почти пълна липса на твърди частици в отработените газове, поради особеностите на горивния процес на газовото гориво. Няма нужда от монтиране на прахоуловители;
- Намаляване на емисиите на CO<sub>2</sub> с приблизително 20%.
- Увеличаване на експлоатационния живот на буталните двигатели, намаляване на образуването на въглерод в тях.

В момента в света тежат интензивни разработки в областта на корабните двигатели, системите за съхранение и подготовка на гориво, оборудване за бункериране на кораби и пристанищно оборудване.

С развитието на корабоплаването и необходимостта от използване на екологични горива, втечненият природен газ (LNG) се утвърждава като предпочитан източник на енергия. Той има редица предимства, включително по-ниски емисии на вредни вещества и по-висока енергийна ефективност. Въпреки цитираните предимства, при работата с LNG съществуват значителни рискове, свързани с възникването на експлозии, пожар и течове. Затова правилната работа с технологични системи за втечнен газ е от първостепенно значение за безопасността на екипажа и на околната среда [5].

LNG е природен газ (основно метан, CH<sub>4</sub>), изкуствено втечнен до -162 °C за лесно съхранение или транспортиране. За икономична употреба той се преобразува в газообразно състояние в специални регазификационни терминали /изпарение без наличието на въздух/.

При втечняването обемът му се намалява до 600 пъти, което улеснява съхранението и транспортирането. Газът е силно запалим и може да образува експлозивни смеси с въздух, което налага стриктно спазване на мерките за безопасност.

## I. ОСНОВНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПРИРОДНИЯ ВТЕЧЕН ГАЗ

LNG се състои от 85-95% метан, а останалите 5% включват етан, пропан, бутан, азот [1]. Долната граница на калоричността е 50,116 kJ/kg, или 20 MJ/l. По време на процеса на преработка природният газ се пречиства от вода, серен диоксид, въглероден диоксид и др. При изгаряне на парите се отделят въглероден диоксид (въглероден диоксид, CO<sub>2</sub>) и водни пари.

Чистият LNG не гори, не се запалва или експлодира сам. В открито пространство при нормални температури LNG се връща в газообразно състояние и бързо се смесва с въздуха. При изпаряване природният газ може да се запали, ако влезе в контакт с източник на пламък [1,2,3,4,5].

При концентрации във въздуха от 4,4% до 5% и над 16% природният газ гори, при концентрации от 5 до 16%, сместа му с въздух експлодира [2]. Ако концентрацията е по-малка от 4,4%, тогава няма да има достатъчно газ, за да възникне пожар, а ако е повече от 17% в сместа ще има твърде малко кислород, за да се запали.

LNG се съхранява в кипящо състояние в термично изолирани резервоари с голям капацитет. Всеки приток на топлина отвън причинява изпаряване на част от LNG в газовата фаза. Газът, който се изпарява, се нарича изпарен газ. Съставът на изпарения газ зависи от състава на LNG. Например изпареният газ може да съдържа 20% азот, 80% метан, а също и следи от етан. Съдържанието на азот в изпарения газ може да бъде приблизително двадесет пъти по-високо от това на LNG.

Тъй като предимно азотът и метанът се изпаряват в газовата фаза, останалата течност съдържа повечето висши въглеводороди. Изпарените газове при температури под минус 113 °C за чистия метан и минус 85 °C за смес от 80% метан и 20% азот ще бъдат по-тежки от околния въздух.

При нормални условия плътността на изпарените газове е приблизително 0,6 от тази на въздуха.

Както при всеки флуид под налягане, когато налягането на LNG се намали под неговата точка на кипене, като например при преминаване през клапан, част от LNG ще се изпари и температурата му ще падне до новата си точка на кипене при това налягане. Този процес е известен като бързо изпаряване.

Тъй като LNG е многокомпонентна смес, съставите на изпарения газ и останалата течност са различни. Например, при спад на налягането от  $10^3$  Pa, бързото изпаряване на  $1 \text{ m}^3$  LNG при точка на кипене, съответстваща на налягане в диапазон от  $1 \cdot 10^5$  Pa до  $2 \cdot 10^5$  Pa води до освобождаване на приблизително 0,4 kg газ.

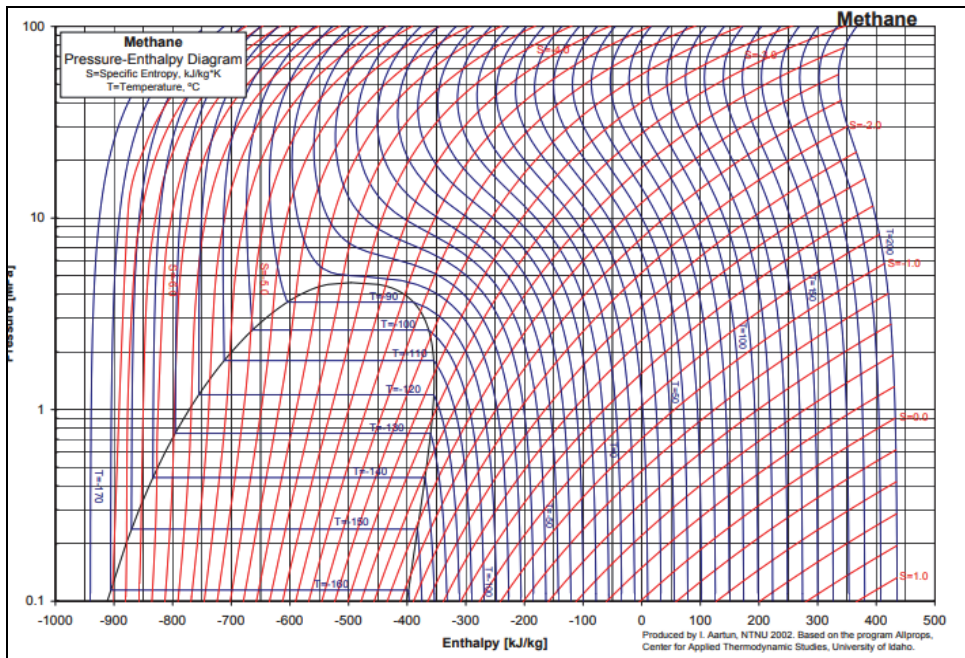
Топлотворната способност на газа зависи от източника на използвания газ и процеса на втечняване на газа. Диапазонът на стойността и може да бъде от  $\pm 10$  до 15 процента. Типичната брутна топлотворната способност на LNG е приблизително 50 MJ/kg. Типичната нетна топлинна стойност на LNG е 45 MJ/kg.

За да се сравнят различни видове гориво, калоричността може да бъде изразена в единици енергия на единица обем, което се нарича енергийна плътност, изразена в MJ/литър.

Плътността на LNG е приблизително 0,41 kg/l до 0,5 kg/l, в зависимост от температурата, налягането и състава в сравнение с плътността на водата, която е 1,0 kg/l.

При средна стойност от 0,45 kg/l, типичната енергийна плътност е 22,5 MJ/l (при по-висока калоричност) или 20,3 MJ/l (при по-ниска калоричност).

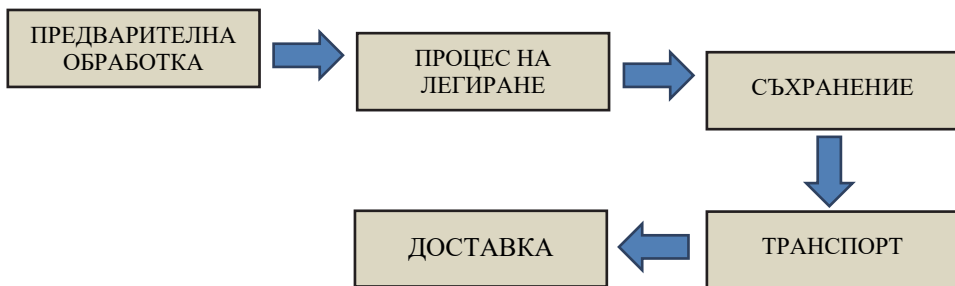
Диаграмата на Молиер е името, дадено на диаграма, която описва свойствата на газ и има енталпия като една от своите скали. Диаграмата показва условията на преход от едно фазово състояние в друго. На Фиг. 1 е показана диаграмата енталпия/налягане за метана.



Фиг. 1. Диаграма на състоянието на метана.

Процесът на производство на LNG започва с предварителната обработка на суровината – природен газ, влизащ в системата, за да се отстранят примеси като H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, живак и въглеводороди с високо молекулно тегло (Фиг. 2).

След това захранващият газ влиза в блока за втечняване, където се охлажда до температура от -145 °C до -163 °C.



Фиг. 2.

Независимо от това, че типът или броят на нагревателните цикли и/или използваните хладилни агенти може да варира в зависимост от технологията, основният процес включва циркулация на газ през алуминиеви тръбни намотки и излагането му на компресиран хладилен агент. Тъй като хладилният агент се изпарява, преносът на топлина води до охлаждане на газа в намотките. След това LNG се съхранява в специален изолиран резервоар с двойни стени под атмосферно налягане, готов за транспортиране до крайната му дестинация.

Обемната енергийна плътност на LNG е приблизително 2,4 пъти по-висока от тази на компресирания природен газ (CNG), което прави транспортирането на природен газ по море като LNG икономично. Енергийната плътност на LNG е сравнима с пропан и етанол, но е само 60% от тази на дизела и 70% от тази на бензина [3].

По-голямата част от втечнения природен газ се транспортира по суша с камиони/ремаркета, проектирани да бъдат транспортирани при криогенни температури. Междуконтиненталният транспорт на втечен природен газ се извършва на специални газови танкери.

След като бъде доставен на обекта, втечненият природен газ трябва да се съхранява във вакуумно изолирани резервоари или резервоари с плоско дъно. Когато втечненият природен газ е готов за разпространение, той влиза в инсталация за регазификация, където се изпомпва в изпарител и се нагрява обратно до газообразна форма. След това газът постъпва в газоразпределителната система и се доставя до крайния потребител.

Втечненият природен газ може също да се използва за посрещане на пиковото търсене, когато конвенционалната тръбопроводна инфраструктура може да задоволи по-голямата част от търсенето, но не и пиковото търсене. Такива инсталации обикновено се наричат инсталации за намаляване на пиковото потребление на втечен природен газ, тъй като целта им е да намалят част от пиковото търсене от това, което се изисква да се доставя по тръбопровод.

Втечненият природен газ може да се използва като гориво за двигатели с вътрешно горене. Втечненият природен газ е в начален етап на приемане като основно гориво за транспорт. В момента се оценява и тества като гориво за тежкотоварни превозни средства, превозни средства с висока проходимост, морски кораби и влакове. Има известни проблеми, свързани с резервоарите за гориво и подаването на газ към двигателя, но въпреки тези трудности преходът към втечен природен газ като гориво за превозни средства вече е започнал.

Втечненият природен газ се конкурира директно със сгъстения природен газ като гориво за превозни средства с природен газ, тъй като двигателите са идентични. Възможно е да има приложения, при които камиони, автобуси, влакове и кораби, работещи с втечен природен газ, могат да бъдат икономически жизнеспособни за редовно доставяне на втечен природен газ заедно с редовни товари и/или пътници до малки изолирани общности без достъп до тръбопроводи.

Природният газ, който захранва двигатели с два типа гориво, се превозва на кораби като кипяща течност и се транспортира при налягане малко над атмосферното. Когато получената топлина проникне през изолацията на резервоара, това води до повишаване на температурата на втечнения природен газ, което помага за превръщането на течността в газ. Тъй като топлината навлиза в резервоара, налягането в резервоара се увеличава поради кипенето. Изолацията на резервоара е проектирана по най-съвременна технология [6,7,8,9].

Въпреки това топлината прониква в изолацията на резервоарите. Кипенето протича, докато корабът плава. По време на буря товарът с втечен природен газ се движи и плиска в резервоарите. Изпареният газ представлява 0,1 - 0,25% от дневната производителност на корабите.

Резервоарите трябва да се поддържат при постоянно налягане. Ако налягането в резервоарите стане твърде високо, предпазните клапани се отварят, изпусвайки отработените газове в атмосферата, докато свръхналягането се облекчи.

Тъй като повторното втечняване на LNG на борда е неикономично за повечето кораби, газът, генериран от изпарението, се изпраща към задвижващата система на кораба и се използва като гориво за парни котли и корабни дизелови двигатели, работещи с два типа гориво. Това намалява използването на бункерно гориво, като по този начин намалява разходите за гориво и поддръжка на оборудването.

Европа може да се нарече световен лидер в използването на LNG като корабно гориво. Понастоящем по-голямата част от корабите, задвижвани с LNG (повече от 70%), работят по вътрешноевропейски маршрути. Норвегия е лидер сред европейските страни.

Последните оценки показват, че капитализацията на европейския пазар за бункериране на LNG може да надхвърли 12 милиарда долара до 2024 г. В момента в Европа активно се тестват различни схеми за бункериране – „от бряг до кораб“, „от кораб до кораб“, „дистерна от камион до кораб“.

В стратегията за мобилност и горива на германското федерално правителство отделна глава е посветена на природния газ като гориво за кораби. „Втечненият природен газ се разглежда като обещаващо алтернативно гориво за корабоплаването – включително вътрешното корабоплаване“, се казва в стратегията [4, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Класификационното общество Det Norske Veritas (DNV), което в известен смисъл изпълнява функции по технически надзор на кораби, подкрепя идеята за преобразуване на корабите на газово гориво.

Компанията Containerships (част от CMA CGM Group), специализирана в областта на вътрешноевропейските мултимодални контейнерни превози, на 4 юли 2019 г. за първи път извърши комбинирана операция на бункериране на LNG на своя кораб и разтоварване/товарене на контейнери.

Контейнеровозният кораб NORD, работещ с LNG стана първият контейнеровоз в Европа, който се зарежда с газово гориво.

За да се осигурят безпроблемни операции по товарене и разтоварване и да се гарантира безопасността на бункерирането, Containerships работи в тясно сътрудничество с доставчика на корабно гориво Shell, пристанищната администрация на Ротердам и RST (Rotterdam Short Sea Terminals). Корабът е бил зареден с почти 200 тона втечен природен газ.

CMA CGM, една от първите компании за линейни превози, които използват LNG за контейнеровози, планира да има 20 LNG кораба до 2022 г., включително девет 22 000-тонни контейнерни кораба.

Безвъзмездни средства се отпускат за изграждане и преустройство на кораби, задвижвани с LNG. Испанската круизна компания Balearia получи грант от Европейската комисия в размер на 11,8 милиона евро за преобразуване на 5 кораба в LNG (20% от общата инвестиция), програмите за държавна подкрепа предоставят отстъпки до 30% от пристанищните такси за LNG кораби (например в Ротердам, Гьотеборг).

### ***Екологични предпоставки***

Според експерти от Loyd's Marine Intelligence 75% от стоките в света се транспортират от търговския флот, който наброява повече от 50 хиляди кораба с обща товароносимост около 1,4 милиарда тона. Голямо е и отрицателното влияние на водния транспорт върху атмосферния въздух, особено в пристанищата.

Използването на LNG за захранване на главните двигатели на кораби, както и за генериране на електричество за захранване на кораби докато са в пристанището, помага за ограничаване на нарастването на замърсяването и отговаря на все по-строгите

екологични ограничения на Международната морска организация (ИМО), която работи под егидата на ООН.

Морското корабоплаване нанася големи щети на околната среда.

Корабите изгарят тежко гориво и отделят големи количества частици сажди, серни и азотни оксиди, които са опасни както за здравето, така и за околната среда. Освен това, отрицателният баланс на въглероден окис е приблизително милиард тона или 4,5% от глобалните емисии на въглероден диоксид. Борбата за нулеви емисии е на всички фронтове. От 2015 г. съдържанието на сяра в корабното гориво е ограничено. През 2016 г. съдържанието на азотни оксиди е ограничено за нови кораби.

Конвенцията за предотвратяване на замърсяването от кораби (MARPOL 73/78) е сключена през 1973 г. и е изменена през 1978 г. През 1997 г. е допълнена от „Протокол от 1997 г.“, който включва Приложение № VI „Процедура за предотвратяване на замърсяването на въздуха от кораби“, което влезе в сила през 2005 г.

МАРПОЛ 73/78 е Международна конвенция, предвиждаща комплексни мерки за предотвратяване на експлоатационното и трансграничното замърсяване на морето с нефт, течни вещества в големи количества, вредни вещества в опаковки, отпадни води.

Конвенцията Marpol също така определя зоните за контрол на емисиите – ЕСА. Основните зони с регулируеми емисии са определени от Международната морска организация и обхващат прибрежните акватории с висока концентрация на икономически центрове и интензивност на пътническото и товарното пароходство.

Конвенцията ограничава съдържанието на сяра (SOx) и азот (NOx) на прахови частици (PM) в горивото.

Табл. 1 и Табл. 2 показват съвременните изисквания (максимални стойности) за корабното гориво. Преминаването към използване на LNG позволява да се изпълнят тези изисквания.

Таблица 1. Съвременни изисквания (максимални стойности) към корабното гориво

Област на приложение	Норми	Дата на въвеждане	NOx	PM <sub>10</sub>	Сяра
Вътрешни води	CCR етап 4	01.01.2016	1,5 g/kWh	0,02 g/kWh	0,001%
Крайбрежни води	SECA - етап 4	01.01.2015	Не се регулира	Не се регулира	0,10%
Открито море	ИМО етап 3	01.01.2020	Не се регулира	Не се регулира	0,50%

- SECA/Sulphur Emission Control Area/ или зоните за контрол на серните емисии са морски райони, в които е установен по-строг контрол върху околната среда, за да се сведат до минимум емисиите във въздуха от корабите, както е определено в Приложение VI на Протокола MARPOL от 1997 г.

- CCR (Carbon Capture Readiness) – готовност за улавяне на въглероден диоксид. Правното основание за законодателната концепция за CCR (Готовност за улавяне на въглерод) е член 9а от Директивата за LCP (Големите горивни инсталации). Добавен е от член 33 от Директивата CCS (Директива 2009/31/ЕО на Европейския парламент и на Съвета от 23 април 2009 г. относно геоложкото съхранение на въглероден диоксид и за изменение на Директива 85/337/ЕИО на Съвета, Европейски пар-

ламент и Директиви 2000/60/ЕО, 2001/80/ЕО, 2004/35/ЕО, 2006/12/ЕО, 2008/1/ЕО и Регламент (ЕО) № 1013/2006 (ОВ L 140, 5.6.2009 г., стр. 114) и се повтаря от член 36 от новоприетата Директива на Европейския парламент и на Съвета относно промишлените емисии (Директивата IED, вижте: законодателна резолюция на Европейския парламент от 7 юли 2010 г.).

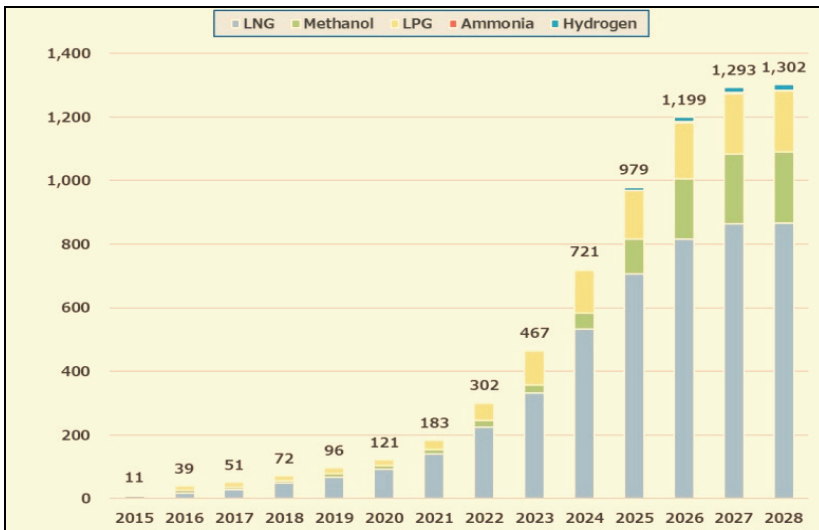
Таблица 2. Съвременни изисквания на VI MARPOL към съдържание на сяра в горивото, в %

Регион	2010	2012	2015	2020
Особени райони - SECAs	1	-	0,1	-
Целия свят	4,5	3,5	-	0,5

Международна морска организация (ИМО) е специализирана агенция, създадена от ООН през 1948 г., за да се занимава с безопасността на живота в морето и предотвратяване на замърсяването. От създаването си ИМО е приела близо 50 конвенции, многобройни протоколи и поправки и над 800 кодекса и препоръки, обхващащи широк кръг от теми. Част от тях са Конвенциите SOLAS, MARPOL и товарните водолинии, илюстриращи значението на ИМО в световните морски дейности. ИМО е междуправителствената организация, специализирано учреждение на ООН, служеща като апарат за сътрудничество и обмен на информация по технически въпроси, свързани с международното търговско производство на кораби.

Според ИМО днес световният флот вече оперира около 2400 кораба с двигатели, способни да използват както традиционно гориво, така и втечен природен газ. Още над 2000 единици са в договор и са в различни етапи на строителство.

Много по-ясна картина не само за броя, но и за тенденциите на развитие на корабите с двигатели с алтернативно гориво се предоставя от скорошно (май 2024 г.) изследване на японското класификационно общество Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK):

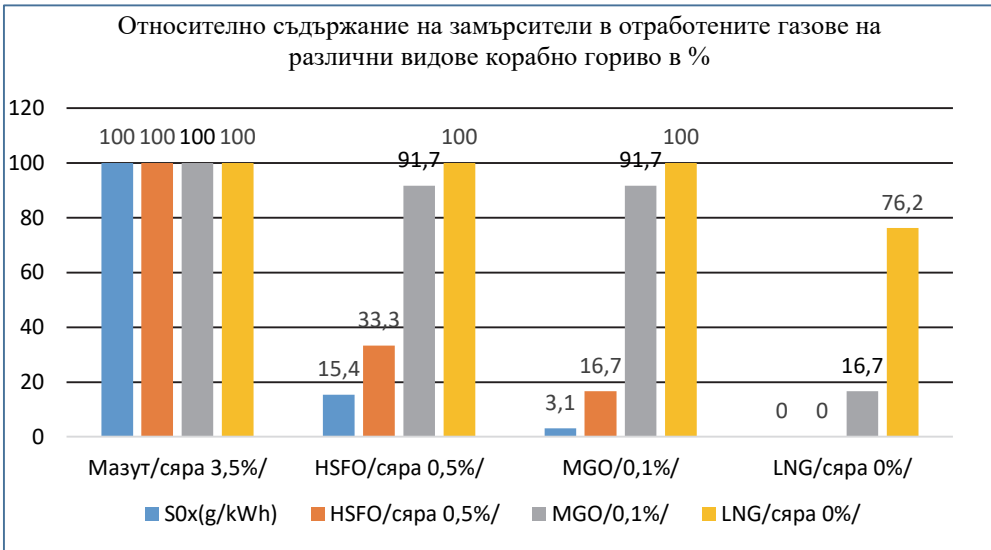


Фиг. 3. Плавателни съдове с двигатели, които могат да работят с алтернативни горива (в експлоатация, единици).

Видно е, че дори да не се вземат предвид газовите превозвачи, корабите с LNG задвижващи системи уверено водят сред всички други видове алтернативно гориво и 2024 година обещава да бъде най-плодотворната година за въвеждане в експлоатация на нови такива кораби.

LNG е много по-екологично чисто гориво в сравнение с традиционните.

Сравнение на отделените емисии при използване на различни видове гориво за морския транспорт е показано на Фиг. 4.



Фиг. 4. Съдържание на замърсителите в отработените газове на корабните горива: мазут – нефтен остатък, който се получава след дестилиране на бензиновите, керосиновите и газоловите (дизеловите) фракции; High Sulfur Fuel Oil (HSFO) – корабното гориво с високо съдържание на сяра; корабно дизелово гориво (MGO); природен втечнен газ – Liquefied natural gas (LNG).

### Техническа реализация

LNG се използва за три типа корабни задвижващи системи: газови, газодизелови и електрически с газ/газ-дизелово задвижване.

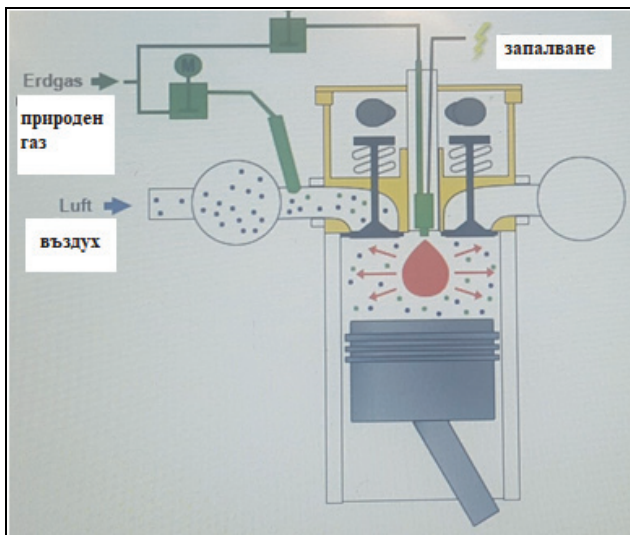
Двигателите с искрово запалване работят само с природен газ, докато двугоривните газ-дизелови двигатели могат да работят с дизел, CNG и тежко гориво. Днес основните производители на този пазар са: Wartsila, Rolls-Royce и Itsubishi Heavy Industries.

По-строгите разпоредби на Международната морска организация (IMO) доведоха до разработването на двигатели с два вида гориво – дизел и LNG. Такива енергетични системи се наричат двугоривни – „Dual Fuel“ или „DF Engine“.

Агрегатите от този тип имат възможност да работят в два режима – дизелов и газодизелов. При първия режим въздухът се подава към цилиндъра през отворен клапан, след което се компресира от бутало, впръсква се дизелово гориво в цилиндъра и възниква процес на запалване.

Основният проблем, който възниква при изгаряне на газ (LNG), вместо на конвенционално гориво (MGO, DMA, RMG 380 и др.), е неговата много висока температура на запалване, следователно принципът на samozапалване, който се използва при запалване на горивото – въздушна смес при дизелови двигатели, не работи в случай, че в горивната камера на двигателя се впръсква само газ. Това е основната причина за необходимостта от осигуряване на допълнителен източник на запалване на газовъздушната смес в горивната камера на двигателя.

В режим на работа на газодизелов двигател смес от газ и въздух влиза в цилиндъра, след което се компресира от буталото. Преди буталото да достигне горната мъртва точка на цилиндъра, се впръсква малко количество дизелово гориво (~ 1%), което води до запалване на сместа (Фиг. 5). Ако стартирането е успешно и запалването е стабилно, тогава двигателят превключва напълно на газово гориво. Замяната на дизелово гориво с газ обикновено отнема около една минута.



Фиг. 5. Двигател, работещ на газ (LNG) по принципа на Ото.

Правилата за безопасност при работа с такива двигатели са подобни на правилата за безопасност при работа с газ. Изтичането на метан може да причини опустошителна експлозия, така че всички газопроводи са с двойни стени, за да се предотвратят течове и експлозии.

Газопроводната система е оборудвана и с гасители на пламък на входа на захранващия газопровод, система за освобождаване на свръхналягане и детектори за теч на газ. Изпускателният отвор над всеки двигател също е оборудван с детектор за газ.

При установяване на теч веднага се спира подаването на газ към двигателя и той автоматично преминава в дизелов режим на работа, а газът се пренасочва към газогоривния блок, където се оползотворява.

При нарушаване на цялостта на двойните газопроводни тръби системата има вход за впръскване на инертен газ - азот, за продухване и освобождаване на системата от взривоопасен газ.

Основният технически съветник на ИМО е Международната асоциация на класификационните дружества (International Association of Classification Societies, IACS), с цел разработване на общи (сравними) стандарти и правила за осигуряване на безопасността на морския транспорт.

Дейностите на IACS са насочени към уеднаквяване на правилата за класифициране, измерване, конструкция, експлоатация и ремонт на морски плавателни съдове, за материалите, използвани в корабостроенето, снабдяването на морските плавателни съдове с технически средства и др.

Правилата и насоки на IACS и нейните класификационни дружества-членки са задължителни при присвояване на клас на кораб.

## **II. СТАНДАРТИ И ТЕХНОЛОГИИ ЗА БЕЗОПАСНОСТ ПРИ ИЗПОЛЗВАНЕ НА LNG**

Едни от най-важните стандарти в областта на бункерирането на LNG са:

- ISO/TS 16901:2015 Ръководство за оценка на риска за проектиране на наземни инсталации за втечен природен газ, включително процедури за интерфейс между брега и кораба / ISO/DTS 16901:2015 - Guidance on performing risk assessment in the design of onshore LNG installations including the Ship/Shore interface;
- EN ISO 16903:2015 Характеристики на LNG, влияещи върху дизайна и избора на материали/ EN ISO 16903:2015 Characteristics of LNG, influencing the design, and material selection;
- EN ISO 16904:2016 Проектиране и изпитване на офшорни преносни линии за LNG за конвенционални наземни терминали /EN ISO 16904:2016 Design and testing of LNG marine transfer arms for conventional onshore terminals
- EN ISO 20088-1:2016 – Определяне на устойчивостта към криогенни разливи на изолационни материали – Часть 1 течна /EN ISO 20088-1:2016 - Determination of the resistance to cryogenic spillage of insulation materials – Part 1: Liquid phase
- ISO 15970:2008 - Природен газ – определяне на свойствата – обемни свойства: плътност, налягане, температура и фактор на компресиране ISO 15970:2008 - Natural gas -- Measurement of properties -- Volumetric properties: density, pressure, temperature and compression factor
- IEC 60079-10-1:2015 Взривоопасни среди - част 10-1: класификация на зоните - взривоопасни газови атмосфери/IEC 60079-10-1:2015 – Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres

Определена роля в разработването на нормативни документи за флота за втечен природен газ и за бункерирането на втечен природен газ играят международните неправителствени организации – сдружения на юридически и физически лица на различни формални основания, най-често по вид дейност или по принцип на географска общност.

Организационно такива организации обикновено са саморегулиращи се организации. Много международни неправителствени морски организации издават свои документи, регулиращи определени въпроси, свързани с дейността на тези организации: препоръки, правила и др.

Такива документи, без да имат формален статут, понякога стават де факто стандарти в съответните области на дейност.

Най-значимите международни неправителствени морски организации, свързани с корабоплаването на газ-гориво и бункерирането на LNG:

- Международната асоциация на пристанищата / IAPH;
- Асоциация за използване на газ като гориво за морски кораби /SGMF;
- Европейска агенция за морска безопасност / European Maritime Safety Agency (EMSA);
- Асоциация на международните превозвачи на газ и оператори на терминали /Society of International Gas Tanker and Terminal Operators (SIGTTO).

#### *Изисквания към материалите за изграждане на тръбопровод за LNG*

Днес стоманата е основният материал, използван за производството на конструкции, машини и механизми, работещи при криогенни температури. При тези условия материалът трябва да осигурява високо ниво на якост, съчетано с висока якост на удар и ниска чувствителност към крехко разрушаване [6].

Едни от най-използваните са хром-никеловите стомани, които запазват висока пластичност и якост в широк температурен диапазон и са устойчиви на корозия. В допълнение към недостига на никел и високата цена, недостатъкът на стоманите от тази група е тяхната ниска якост при стандартни условия. Въз основа на това напоследък се извършва преход към стомани, в които делът на никела като легиращ елемент е намален поради използването на манган. За допълнително укрепване на материала в състава се въвежда азот за стабилизиране на аустенита.

Изолацията за криогенни тръбопроводи може да бъде: с твърди материали (полиуретанова пяна), екран-вакуум, прах (перлит, аерогел), на базата на разпенени полимери. Екранно-вакуумната изолация се счита за най-ефективна, тя се състои от голям брой екраниращи слоеве от тънък алуминий, разделени един от друг с „пакет“ от стъклена вата. Цялата тази структура е поставена под вакуум от не повече от 0,0013 Pa. Екранната вакуумна изолация има висока цена и се произвежда само за тръбопроводи с малък диаметър (не повече от 264 mm).

В последните години активно се използват полимерни и композитни материали на тяхна основа. Новото поколение полимери включва полиетилен със свръхвисоко молекулно тегло, който има висока специфична якост, надвишаваща въглеродните и армидните влакна.

Якостни характеристики на полимерите: якост на опън и модул на еластичност, са значително по-ниски от тези на стоманата.

Уставновено е, че полиетиленовите тръби имат значителна устойчивост на деформация при продължително едноосово натоварване при квазиравновесни условия при ниски температури (до  $-80^{\circ}\text{C}$ ), което се изразява в повишаване на границата на провлачване на полимери с понижаваща се температура [7].

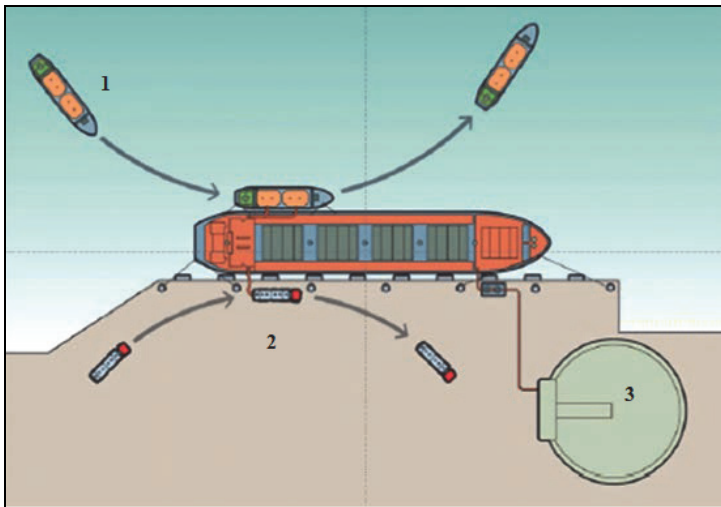
Изборът на типа конструкция на резервоара за съхранение на LNG зависи от много фактори, като терен, дизайн, безопасност, геология, метеорология, екология, както и спецификата на приложимите стандарти и разпоредби. Въпреки това, независимо от структурата, всички съоръжения за съхранение са обединени от изотермичен метод за съхранение, който се състои в постоянно поддържане на отрицателна температура и налягане, близки до атмосферното.

Схемите за бункериране на кораби с втечен природен газ не се различават от зареждането с традиционни видове гориво (Фиг. 4). Основните опции включват:

- кораб – кораб, (Ship to ship, STS). Това е модерен метод за бункериране, при който зарежданият с гориво съд има обем на резервоара над 100 кубични

метра. Средният капацитет на един бункер е от 1000 до 10 000 куб.м., обемът на бункерирания LNG е 100-6500 кубически метра, скорост на бункериране – 500-1000 кубични метра на час (Фиг. 6, 1).

- брегова точка /автоцистерна/ – кораб (Truck to ship, TTS). Това е най-простият метод за бункериране, позволява зареждане малки и средни кораби, закотвени към кея, с обем на резервоара до 200 кубически метра.. Средният обем на бункерирания природен газ е 50-100 куб.м. м, скорост на бункериране – 40-60 куб.м. на час (Фиг. 6, 2).
- терминал – кораб (Port to ship, PTS). Тази схема, предназначена повече за бъдещето, включва бункериране на големи кораби, акостирани на кея, чрез специален тръбопровод от резервоар за втечен природен газ в терминал на сушата. Средният обем на бункерирания LNG е от 500 до 20 хиляди кубически метра, скорост на бункериране – 1000-2000 куб.м. на час (Фиг. 6, 3).



Фиг. 6. Схеми на зареждане/бункериране/.

Съществуващите технологии за бункериране на LNG се свеждат главно до използването на автомобилни резервоари (CryoPAGZ). Тази технология е доказана от дълго време, позволява да се вземат оптимални логистични решения, гарантира, че корабът ще бъде напълнен с втечен метан в точното време на удобно за клиента място и в необходимото количество. В допълнение, същото оборудване за зареждане с гориво може да се използва в интерес на автомобилния транспорт и автономните съоръжения за газификация.

Основният недостатък на тази технология са нейните ограничени възможности за бункериране.

Средният автомобилен танкер за метан може да транспортира само 40-80 куб.м. LNG, а обемът на резервоарите на среден кораб достига няколко хиляди кубически метра, за голям кораб – няколко хиляди. Следователно, за да се бункерира кораб, трябва да се използват или няколко (понякога повече от 10) такива машини, или многократни повторения на една бункерова от камион-цистерна.

Надеждността на тази опция също е намалена поради възможни ограничения на движението по пътищата, което може да забави целия процес. Освен това при бунке-

риране на кораб с помощта на камион-цистерна е практически невъзможно да се извършат други операции, като товарене/разтоварване на кораба или качване/слизване на пътници.

Напоследък набира скорост вторият метод за бункериране (от кораб до кораб). В пристанищата по света има все повече бункерни баржи. Сред предимствата им са гъвкавост и мобилност, достатъчна скорост и обем на бункериране, както и възможност за бункериране на кораба по време на товарене/разтоварване или качване/слизване на пътници.

Недостатъците на този метод са високите разходи за изграждане на резервоари за бункериране, както и строга връзка с зоната на работа и потребителите.

Третият метод за бункериране (корабен терминал) все още се разработва. Създаването на специални бункерни мощности е скъпо и е препоръчително само ако има стабилно търсене. Досега бункерирането на кораби с втечен природен газ от шлепове като цяло остава по-евтино, отколкото от съоръжения на сушата. Освен това терминалите за бункериране са предназначени за големи кораби за LNG, но все още няма много от тях в света. Освен това е малко вероятно танкер или лайнер редовно да спира на същия терминал. А обслужването на малките кораби няма да покрие разходите за строителството му.

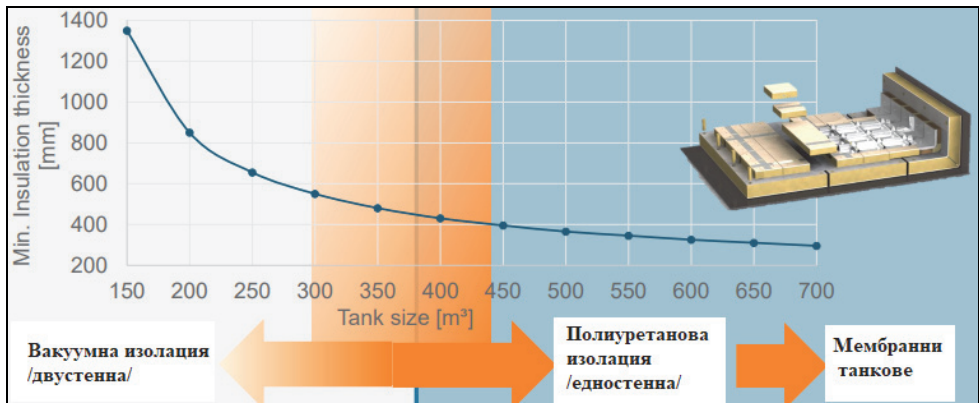
Днес бункериране от този тип се извършва в пристанища като Ротердам (Холандия), Хамерфест (Норвегия), Зеебрюге (Белгия), Клайпеда (Литва), Стокхолм (Швеция), Джаксънвил (САЩ). През август 2020 г. Джаксънвил отпразнува 100-то бункериране на кораб за LNG от терминала. Транспортните компании все още не са решили предпочитанията си за бункериране: от камион-цистерна, бункерна баржа или стационарен пункт на сушата.

Всеки вариант има своите предимства и недостатъци. Досега опитът показва, че бункерните баржи са най-добното средство за доставка на LNG, особено в онези пристанища, където няма инфраструктура за LNG.

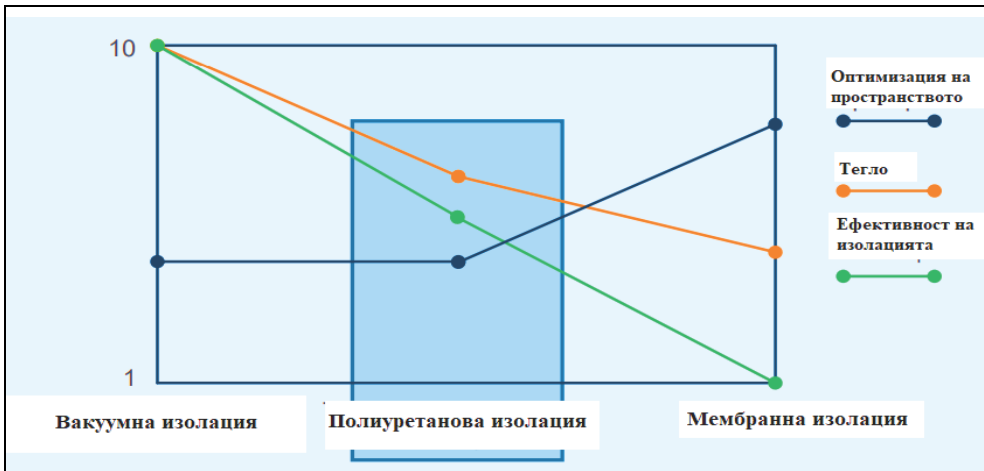
По своите енергийни параметри природният газ като корабно гориво е почти еквивалентен на видовете мазут, традиционно използвани на корабите в съотношение: 1 тон мазут е равен на 1 хил. м<sup>3</sup> природен газ.

Като се има предвид това, може да се определи необходимото количество газово гориво, което ще гарантира, че продължителността на работа на кораба без бункериране на LNG е равна на опцията за използване на традиционно гориво, при същия режим на работа на основните двигатели.

Като се вземе предвид и факта, че в втечено състояние обемът на природния газ е 600 пъти по-малък, отколкото в неговото състояние при нормални условия, е възможно да се оцени общият обем на криогенните резервоари за LNG, които са необходими за поставянето му на борда на плавателния съд [8].



Фиг. 7. Зависимост между дебелината на изолацията и обема на резервоарите.

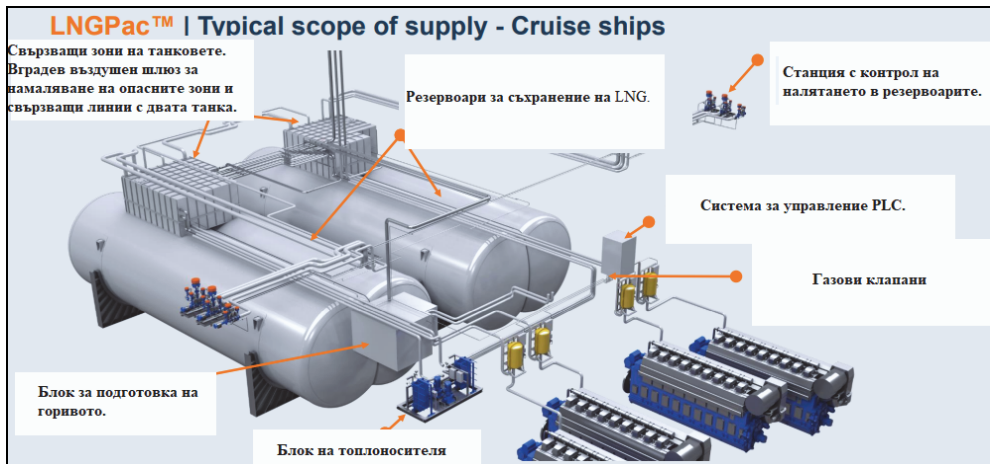


Фиг. 8. Предимства на различните видове резервоари.

От гледна точка на функционалните и структурни характеристики на морските кораби с LNG като гориво за корабни енергийни установки, може да се каже, че LNG се съхранява като гориво на борда на кораби в цилиндрични криогенни резервоари, изработен от специална подсилена пластмаса с якост на опън 1029 МПа.

Стените на резервоара са произведени по такъв начин, че да издържат на налягане от 0,3 до 10 бара, да съхраняват LNG при температура от -162 °С и да имат плътност 0,450 t/m<sup>3</sup> при 1 bar. Резервоарите за съхранение винаги са с двойни стени с изключително ефективна изолация между тях. Изолацията (Фиг. 7 - 8), без значение колко е ефективна, сама по себе си няма да поддържа температурата на LNG на ниско ниво, в резултат на което LNG се съхранява като „кипящ криоген“, т.е. той е много студена течност в точката на кипене за налягането, при което се съхранява [9].

Една система с използване на LNG е показана на Фиг. 10.



Фиг. 10. Схема на използване на LNG на круизен кораб.

За бункериране и тръбопроводи на кораби, работещи с втечен природен газ, газопроводите обикновено не трябва да минават през жилищни, обслужващи или контролни зони. Всяка газова тръба, преминаваща през затворено пространство на кораб извън машинното отделение, трябва да бъде разположена в двойна тръба или канал с механична вентилация под налягане, осигуряваща 30 обмена на въздух на час и системи за откриване на газ. Каналът трябва да бъде оразмерен така, че да издържи на налягането, генерирано при скъсване на тръбата.

За тръбопроводи с ниско налягане (макс. 10 бара), размерът на канала трябва да бъде проектиран за проектно налягане не по-малко от това на газовата тръба.

Също така, когато се използва втечен природен газ като гориво за корабни електроцентрали, е необходимо да се осигури подходящо ниво на безопасност. По този начин основният въпрос за безопасността при доставянето на газ на кораб ще бъде ограничаването и контрола на местата, където той може да присъства, като се има предвид, че не може да възникне запалване, освен ако природният газ не се смеси в съотношение от 5,3% към 14% с въздух.

Съображенията за безопасност при използване на природен газ като основно гориво на борда на корабите се считат за един от факторите, влияещи върху преминаването от дизел към природен газ. Тъй като природният газ се смята за по-чисто гориво с по-високо енергийно съдържание, това го направи по-подходящ за всички морски енергийни приложения като дизелови двигатели, парни турбини и газови турбини.

Оценката на безопасността се извършва чрез процес на количествена оценка на риска, като се използва анализ на честотата и последствията. Като пряко свързан метод за анализ на риска, анализът на честотата и последствията проучва и анализира опасностите от пожар и експлозия, които са възможните последици от аварии с изтичане на LNG и LH2 гориво по време на бункерни операции.

Определянето на забранените зони по време на процеса на бункериране на двете горива се извършва чрез извършване на количествена оценка на риска, без да се взема предвид факторът на човешко присъствие, като например броя на хората, участващи в процеса на бункериране.

Пожарът и експлозията са придружени от критична дистанция, която е пряко свързана с анализа на последствията, както и с вероятността за тяхното възникване.

Те причиняват пренос на топлина или свръхналягане. Така в зависимост от размера им може да се провокира нараняване на човека.

Много круизни компании вече инвестират в разработването на LNG кораби, като начин да се осигури устойчиво бъдеще за индустрията. Например, Carnival Corporation прогнозира, че скоро половината от техния флот ще бъде захранван с LNG.

Като пример за гореизложеното може да се представи изградената система за втечен природен газ (LNG) в съответствие с кодекса IGF, утвърден с Резолюция MSC.391(95) (приета на 11 юни 2015 г.). Тя включва следните компоненти:

- Пространство за съхранение на гориво (FSHS) – мястото, където се намират резервоарите за втечен природен газ;
- Пространство за свързване на резервоарите (TCS) – зона, в която са разположени всички отвори на тръбопроводите в резервоарите, както и съответните клапани и сензори;
- Клапанна кутия (VB) - място, където са монтирани вентилите и сензорите за управление на системата;
- Помещения за обработка на парите (VHR) – два отделни блока, които включват компресори за изпарение на газ (BOG), подгреватели, нагредатели, изпарители и студени кутии (CB);
- LNG бункерни станции (BS) – две станции, разположени по една от всяка страна на кораба.

Всички тези компоненти са категоризирани като опасни зони съгласно IGF кода, който определя изискванията за безопасност за кораби, използващи газови горива или други горива с ниска точка на възпламеняване.

За повишаване на нивото на безопасност, освен предвидената вентилация според кода, в пространствата FSHS, TCS, CB и VB се прилага работа в намалена кислородна атмосфера.

На борда на кораба има две LNG бункерни станции – една от лявата страна и една от дясната страна. Тези станции разполагат с колектори за зареждане с LNG и за връщане на парите на LNG към доставчика при необходимост.

Всяка станция е оборудвана с свързващ фланец DN200 за течност и DN100 за пара. За всяка линия има инсталиран клапан за аварийно изключване (ESD), който се отваря пневматично и се затваря с пружина.

На линиите за течност и пара са монтирани допълнителни ръчни клапани, както и различни ръчно задвижвани продухващи клапани.

Монтирана е и кръстосана свързваща линия DN80 между пара и течност, която позволява предварително охлаждане на бункерната тръба с LNG пара преди започване на зареждането.

Към колекторното пространство са свързани DN150 тръби, включващи двустенни изолирани бункерни тръби. Външната изолация е направена от PU, а тръбите имат азотно налягане в пръстеновидното пространство. Разширителни маншони не са монтирани, като при нужда се използват разширителни примки. Всяка бункерна станция е снабдена със съдове за оттичане, дренажни устройства и тръбни опори.

Пространства за съхранение и свързване на резервоари, FSHS и TCS, са определени като зони, които не са предназначени за редовен достъп и са херметически затворени с достъп през шахта и изпълнени с азотна атмосфера.

Резервоарът за LNG от дясната страна на кораба (№1), заедно със своите специализирани TCS, BS, CB и №1 VHR, образува влака за обработка на горивен газ от дясната страна. Резервоарът за LNG от лявата страна (№3) и свързаните с него TCS, BS, CB и №2 VHR съставляват влака за обработка на горивен газ от лявата страна.

Централният LNG резервоар (№ 2) със своето пространство за свързване на резервоара (TCS) е директно свързан с VHR на пристанищния LNG резервоар (№ 3) и влака за обработка на горивен газ № 2 VHR.

Всеки блок за обработка на парите (VHR – vapour handling room) минава през две отделни трасета за обработка на горивен газ. Основното оборудване, което е инсталирано във всяко VHR, включва:

- BOG подгревател;
- BOG компресор;
- Изпарител на горивен газ;
- Нагревател на горивен газ;
- Свързани клапани за управление, изключване, невръщане и освобождаване на налягането;
- Продухващи връзки и локално/отдалечено оборудване за управление.

Всеки блок за обработка на парите е проектиран да осигурява горивен газ на всички потребители едновременно и при различни нива на капацитет, в зависимост от нуждите.

Въпреки че LNG резервоарите са предназначени за специфични трасета за обработка на газ, всеки резервоар за втечнен природен газ може да осигури изпаряващ се газ (BOG) чрез колектора за пари към газовите трасета, който обслужва всички потребители.

Когато LNG резервоарите са били изпразнени по време на предишното плаване, те трябва да бъдат охладени преди ново зареждане с LNG.

Процедурата за охлаждане трябва да се изпълнява преди започване на процеса на зареждане с LNG. Операцията по охлаждане е задължителна след сух док или след пълното изпразване на резервоарите за LNG. Основната цел на охлаждането е да се избегне възникването на студен шок и топлинен стрес в системата поради резките температурни промени. Освен това, охлаждането помага за намаляване на прекомерното образуване на изпарения по време на LNG бункерните операции.

Трябва да се спазват следните изисквания:

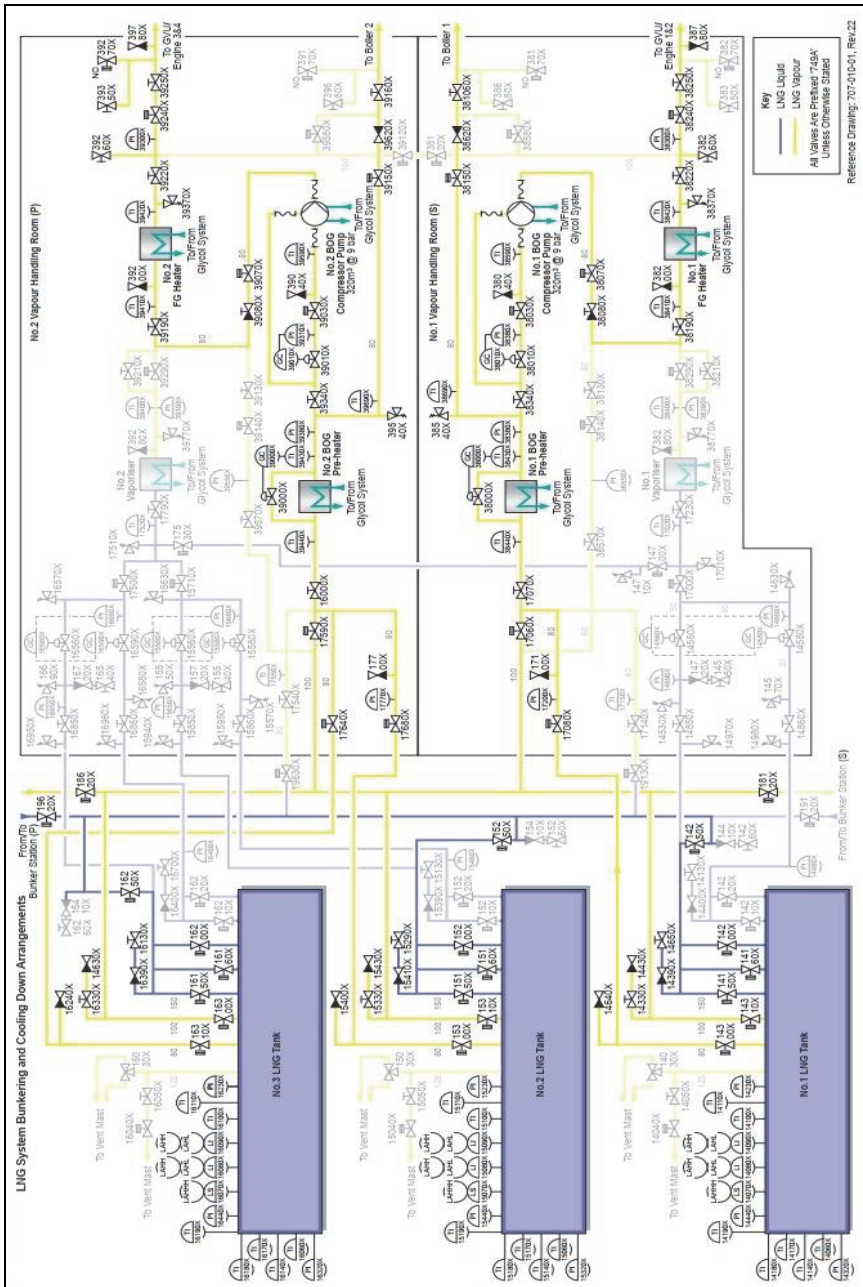
1. Първоначални условия на резервоара:
  - Температура: между  $-20^{\circ}\text{C}$  и минимум  $-10^{\circ}\text{C}$ ;
  - Точка на оросяване: под  $-160^{\circ}\text{C}$ ;
  - Налягане: от 0.5 до 1.0 bar(g);
  - Съдържание на метан (CH<sub>4</sub>): между 98% и 100% обемни.
2. Условия за бункерната станция при захранване:
  - Налягане на LNG: приблизително 1.6 bar(g);
  - Капацитет за зареждане: около 600 kg/h;
  - Налягане на LNG при разпръскващите дюзи: минимум 0.6 bar(g);
  - Температурен градиент: максимално  $10^{\circ}\text{C/h}$ .
3. Целеви условия след охлаждане:
  - Температура на дъното на резервоара:  $-130^{\circ}\text{C}$ ;
  - Температура в горната част на резервоара:  $-100^{\circ}\text{C}$ ;
  - Налягане: от 0.5 до 1.0 bar(g);
  - Съдържание на метан (CH<sub>4</sub>): между 98% и 100% обемни.

Тази процедура гарантира безопасно охлаждане на резервоарите и предпазва системата от потенциални проблеми, свързани с температурните промени и образуването на газови изпарения.

Контролираната операция по охлаждане е от съществено значение за минимизиране на общия топлинен стрес в LNG инсталацията. Максимално допустимият

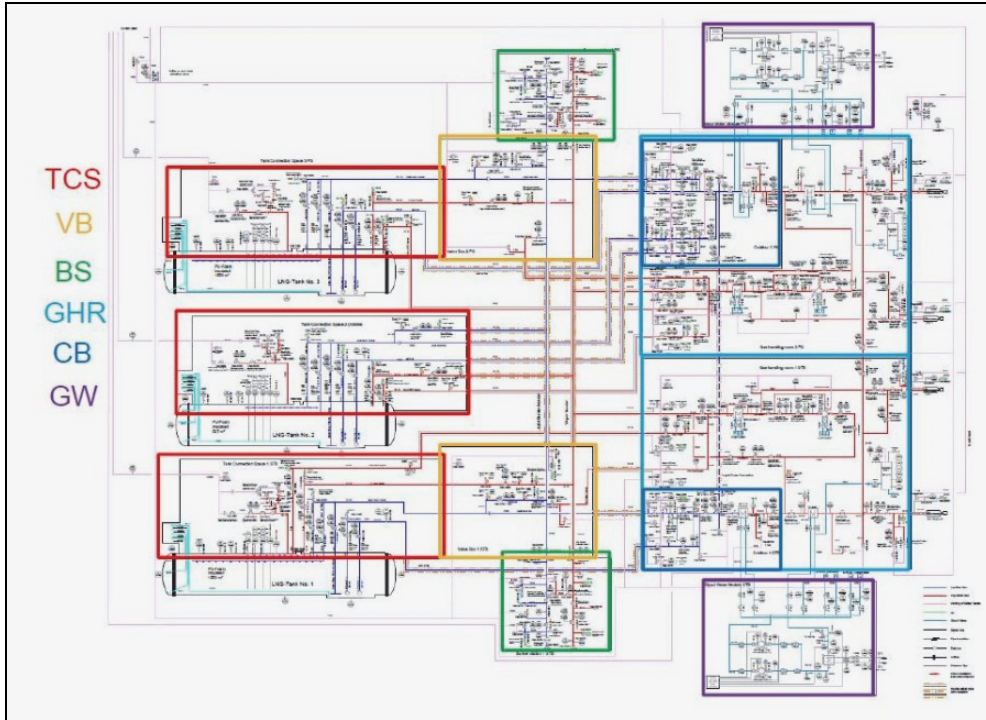
температурен градиент за корпуса на резервоара е 10°C/h и не трябва да бъде превишаван, за да се запази топлинният стрес в рамките на допустимите граници.

Поддържането на температурата и налягането в определените граници е ключова част от тази операция. Налягането на подаваното LNG при дюзите за пръскане трябва да бъде под 0,6 bar(g).



Фиг 11. Схема на горивната система на кораба.

Резервоарите за LNG и криогенната тръбопроводна система трябва да бъдат постоянно наблюдавани по време на охлаждането, за да се осигури правилно движение и да се избегне прекомерното напрежение в материалите.



Фиг. 12. Блок-хема на горивната система на кораба.

На схемата от фиг. 12 са използвани следните съкращения:

- TCS, Tank Connection Space. Това е мястото, където са всички всички тръбопроводни, които излизат от танковете, всички сензори и клапани за съответните танкове минават от там.
- VB, Valve Box. Това е мястото, където са разпределителните клапани за контрол на потока;
- BS, Bunker Station – бункерната станция за зареждане на втечнения газ;
- GHR, Gas Handling Room (vapour handling room или gas handling room) е помещение, в което се намират BOG компресорите, топлообменниците, изпарителите и CB;
- CB, Cold Box;
- GW, Glycol Water module;
- FSHS, Fuel Storage Hold Space. Това е мястото, където са разположени LNG танковете.

Корабната система за втечен природен газ (LNG) е проектирана да приема, съхранява и обработва втечен природен газ. Корабната система за втечен природен газ включва няколко отделни помещения, които са: Бункерната станция (BS), Простран-

ството за съхранение на резервоара (THS), Пространството за свързване на резервоара (TCS), Кутията за клапани (VB), Студената кутия (CB) и Помещението за обработка на изпарения (VHR). Тези помещения/пространства са определени като опасни зони, където може да се натрупа експлозивна смес от газ и въздух.

Поради изискванията за резервиране, трасетата за работа с гориво на Резервоар №1 и Резервоар №3 са свързани кръстосано по линиите за подаване на втечен природен газ и по линиите за подаване на изпарения към двигателите и котлите. Всички консуматори на газ могат да бъдат захранвани от Резервоар №1 или Резервоар №3, или едновременно и от двете трасета за работа с гориво.

Резервоар №2 е свързан с трасето за работа с гориво на Резервоар №3. Поради наличието на кръстосани връзки, Резервоар №2 може да захранва всички консуматори самостоятелно или едновременно с всеки от другите два резервоара.

Помощното помещение е свързано с корабната система за горивен газ LNG и съдържа Модул за гликолова вода (GWM). Това пространство е определено като неопасна зона, където не се очаква експлозивна газова атмосфера. В това пространство обикновено може да се влиза, не са предвидени въздушни шлюзове.

Всяка бункерна станция е оборудвана с колектор за свързване за получаване на LNG и с колектор за изпарения за връщане на изпаренията на брега по време на операция по зареждане с LNG, ако това е подходящо и прието от доставчика на LNG.

Всяка колекторна връзка на бункерните станции е оборудвана с ESD клапан за аварийно затваряне, ръчен клапан за затваряне, предпазни клапани за облекчаване на налягането, връзки за продухване и тестване. Монтирани са инструменти за локално и дистанционно наблюдение и управление, предоставящи пълна информация за актуалното състояние на системата.

Пространствата за съхранение на резервоарите (THS) и пространствата за свързване на резервоарите (TCS) са определени като „помещения, които обикновено не се влизат“ и са херметически затворени, изолирани с люк и запълнени с азотна атмосфера. Бункерните станции (BS), кутията за клапани (VB), студената кутия (CB) и помещението за обработка на изпарения (VHR) са определени като „помещения, които обикновено се влизат“ и са с въздушна атмосфера, достъпни през въздушен шлюз. Всички тези пространства са определени като опасни зони, в които може да има експлозивна газова атмосфера.

Резервоарът за LNG №1 от десния борд заедно със свързаните TCS, CB, BS, CB и VHR формират трасето за обработка на горивен газ №1 на десния борд. Резервоарът за LNG №3 от левия борд заедно със свързаните TCS, CB, BS, CB и VHR формират трасето за обработка на горивен газ №2 на левия борд. Централният резервоар за LNG №2 със своето TCS е свързан директно с VHR на резервоар №3 на левия борд.

Три резервоара за втечен природен газ (LNG) са разположени в долната средна част на кораба, като всеки резервоар е напълно затворен в индивидуално отделение за съхранение на гориво (FSH). Всеки резервоар за LNG е оборудван с пространство за свързване на резервоара (TCS), което се намира в пространството за съхранение на резервоара (THS) и обхваща всички тръбни връзки и люка на резервоара за достъп до него.

THS е затворено пространство без изкуствена вентилация, но запълнено с азотен газ. Това предотвратява натрупването на експлозивна смес от газ и въздух и осигурява правилното консервиране на материалите в това пространство. Пространството е определено като опасна зона.

Всички пространства за съхранение на резервоари трябва да се поддържат в атмосфера с намалено съдържание на кислород (16-17 об.% O<sub>2</sub>). Достъпът до всички

THS е от помещението за обработка на газ (GHR) чрез люкове. Позицията на люковете (отворено/затворено) ще бъде засичана. Атмосферата в пространствата за съхранение се наблюдава чрез система за откриване на газ.

В случай на изтичане на газ в пространството за съхранение, температурата на стоманата трябва да се поддържа в приемливи граници, за да се предотвратят възможни крехки фрактури.

THS са оборудвани със сензори за метан и кислород. Те генерират предупреждения и аларми. Алармите и съобщенията се изпращат към IMACS на кораба.

Откриването на газ, налягане или ниска температура в THS ичма за цел задействане на вентилацията на THS чрез сигнал към IMACS на кораба (натрупване на налягане поради изтичане на LNG или неправилен процес на продухване с N<sub>2</sub>).

Пространството за свързване към резервоара (TCS) е напълно затворено пространство, в което обикновено не се влиза. Достъпът е чрез люк, затворен с болтове. Това пространство е определено като опасна зона, но обикновено не се вентилира.

Атмосферата е обогатена с азот, като съдържанието на кислород е намалено до стойност  $\leq 12$  об.%. В случай на изтичане на газ в това пространство, тази атмосфера предотвратява образуването на експлозивна смес от газ и въздух. Въпреки това, при газова аларма и преди влизане в това помещение, вентилацията се стартира, като се осигуряват 30 смени на въздуха на час.

Пространството е оборудвано с необходимите връзки за продухване с азот и аериране. То е под постоянен газов контрол, включен в фиксираната система за откриване на газ.

TCS съдържа всички връзки за резервоара за LNG и изпарения с техните спирателни клапани, връзка за вентилационна линия с вентилационна система, всички инструменти за резервоара, изброени по-горе, както и връзки за продухване за всеки тръбен участък.

Двата основни резервоара за втечен природен газ (LNG) са оборудвани със собствени специализирани кутии за клапани (VB). VB не е пространство за нормална експлоатация, но може да бъде достъпно по всяко време чрез въздушен шлюз. Всяка VB е свързана със своята съответна бункерна станция (BS). Атмосферата е обогатена с азот, като съдържанието на кислород е намалено до стойност  $\leq 12$  об.%. В случай на изтичане на газ в това пространство, тази атмосфера предотвратява образуването на експлозивна смес от газ и въздух. Въпреки това, при газова аларма и преди влизане в това помещение, вентилацията се стартира, осигурявайки 30 смени на въздуха на час.

Това пространство е определено като опасна зона и се поддържа под отрицателно налягане по време на вентилация.

Двете помещения за обработка на газ (GHR) са разположени по централната линия на кораба. Помещението за обработка на изпарения (VHR) е херметически затворено към кораба. Достъпът до това помещение става чрез система за въздушен шлюз.

Помещението за обработка на газ (GHR) на всяко трасе включва две помещения: Помещение за обработка на изпарения (VHR), в което на долното ниво се намира студена кутия (CB). VHR е с въздушна атмосфера и е класифицирано като опасна зона. То е постоянно вентилирано и наблюдавано чрез централизирана система за откриване на газ. Атмосферата на студената кутия е обогатена с азот, като съдържанието на кислород е намалено до стойност  $\leq 12$  об.%. В случай на изтичане на газ в тази кутия, тази атмосфера предотвратява образуването на експлозивна смес от газ и въз-

дух. Въпреки това, при газова аларма и преди влизане в това помещение, вентилацията се стартира, осигурявайки 30 смени на въздуха на час.

Оборудването на VHR е проектирано да поддържа налягането в резервоара за LNG в желаните граници от 0.5 до 1.0 bar g и да осигурява достатъчно количество горивен газ според необходимостта на консуматорите при съответното налягане.

Коридорът на VHR съдържа цялото оборудване за обработка на изпаренията на горивния газ и е достъпен за влизане. Коридорът на студената кутия съдържа изпарителя на LNG с прилежащите течни тръбопроводи за обработка на горивния газ LNG и обикновено не се влиза в него. Основната част от горивния газ се произвежда чрез изпаряване на LNG в изпарителя, осигурявайки доставка на горивен газ LNG за всички консуматори.

Дизайнът на VHR позволява използването на двата коридора едновременно, което позволява на системата да намали високото налягане в резервоара за кратко време до нормалното работно налягане от около 200 mbar g.

Долното ниво на палубата на VHR, обозначено като студена кутия (CB), съдържа цялото оборудване за обработка на течен LNG. Това помещение е проектирано да издържа на ниските температури при разлив на LNG, като е оборудвано със вторична бариера (вътрешна облицовка от неръждаема стомана с изолация спрямо конструкцията на кораба, известна като „дизайн на студена кутия“). Горният палубен етаж на VHR съдържа цялото оборудване за обработка на изпарения, което обработва изпарения при температура  $\geq 0$  °C.

Студената кутия е част от помещението за обработка на газ (GHR) и осигурява горивния газ LNG за всички консуматори едновременно при всякаква капацитет, както е поискано. Въпреки че LNG-резервоар №1 е посветен на трасе №1, а LNG-резервоар №2 и №3 са посветени на трасе №2, всеки LNG-резервоар може да осигури LNG на всяко от двата трасета чрез пресичащи се връзки между двете студени кутии (CB).

LNG обикновено се доставя от бордовите LNG резервоари чрез използване на помпите в самия резервоар или, като алтернатива, директно от брега по време на операция за зареждане с LNG. Изпаренията, които преминават през изпарителя (GNG), се изпращат към VHR, където ще се свържат с линията за изпарения преди горивния нагревател, преминавайки към двигателите на пропульсивната система или към котлите.

Студената кутия съдържа изпарителя на LNG с два контролни клапана за капацитет нагоре, спирателни клапани, клапани за облекчаване на налягането, връзки за продухване и местни/удалечени инструменти.

Помещението е под контролирана атмосфера, обогатена с азот ( $O_2 \leq 12$  об.%), и е затворено с херметически закрепена капачка.

Тези помещения съдържат всичкото оборудване за обработка на течности; това помещение е проектирано да устои на ниската температура на LNG.

VHR е част от помещението за обработка на газ (GHR), съдържащо всяко от двете трасета за обработка на горивен газ. Основното оборудване включва предварителен нагревател на BOG, компресор за горивен газ с придружаващите го контролни клапани, спирателни клапани, ненавъртателни клапани, клапани за облекчаване на налягането, връзки за продухване и местни/удалечени инструменти.

Всеки VHR осигурява горивен газ за всички консуматори едновременно при всякакъв капацитет, както е поискано. Въпреки че LNG-резервоар №1 е посветен на трасе №1, а LNG-резервоар №2 и №3 са посветени на трасе №2, всеки LNG-резер-

воар може да предоставя BOG през горивната линия за изпарения към всяко от двете трасета, обслужващи всички консуматори.

BOG, получен от резервоарите, преминава през предварителния нагревател на BOG, компресора за горивен газ и горивния нагревател за газ, формирайки линията за горивен газ BOG.

Линията за горивен газ LNG е изпарен LNG (GNG), преминаващ от изпарителя на LNG в VHR към горивния нагревател за газ (FGH). Линията за горивен газ BOG и линията за горивен газ LNG се съединяват нагоре по течението от FGH, обслужвайки отделно или едновременно горивния газ към двигателите на пропульсивната система или към котлите.

**FGH** е абривиатура за **Fuel Gas Heater** (Горивен нагревател за газ). Това е устройство, което се използва за нагряване на горивния газ до необходимата температура, преди той да бъде подаден към двигателите на кораба или котлите. Целта на FGH е да осигури правилни условия за горене и да поддържа горивния газ в оптимално състояние, като се регулира температурата му според изискванията на консуматорите.

### III. ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТ НА ТЕХНОЛОГИЧНИЯ ПРОЦЕС

Пътят на LNG от танковете за съхранение до консуматорите (генераторите и корабните котли) включва следните етапи:

1. **Зареждане на LNG в танковете:** LNG се зарежда в бордовите резервоари чрез помпи, които го транспортират от брега. Резервоарите са разположени в долната част на кораба и са оборудвани с тръбопроводи и вентилационни системи за безопасност.

2. **Обработка на горивен газ:**

- LNG преминава през специализираните **Танк-контактни помещения (TCS)**, които обхващат всички връзки между тръбопроводите и осигуряват достъп до танковете за поддръжка. Атмосферата в тези помещения е обогатена с азот, за да се предотврати образуването на експлозивни газови смеси. В случай на газова авария, започва вентилация;
- След това LNG преминава през **Студената кутия (СВ)**, където се осъществява процесът на изпаряване. Тук LNG се изпарява в горивен газ и се осигурява необходимото налягане и количество газ за консуматорите. Студената кутия е проектирана да устои на ниските температури, които възникват при разлив на LNG.

3. **Обработка на изпаренията (BOG):**

- Изпаренията (BOG) от танковете преминават през **предварителен нагревател на BOG**, който ги загрява, след което преминават през **компресор за горивен газ и горивен нагревател**, като се формира линия за горивен газ BOG.

4. **Преминаване през горивния нагревател (FGH):**

- В помещението за обработка на изпарения (**VHR**), изпаренията от LNG и BOG се комбинират и се подават към **горивния нагревател за газ (FGH)**, където температурата и налягането на газа се регулират.

5. **Доставка на горивен газ към консуматорите:**

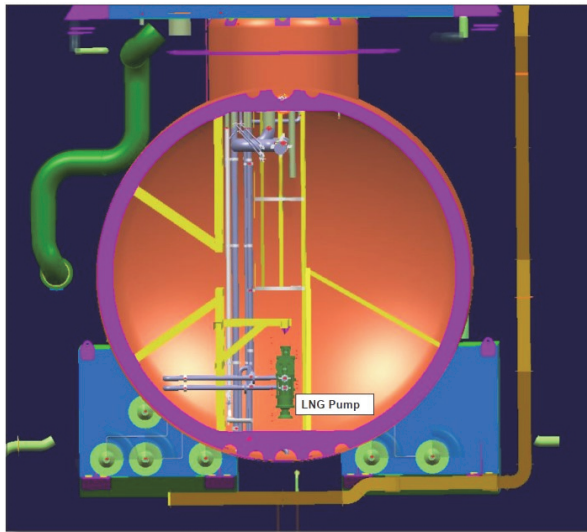
- След преминаване през FGH, горивният газ (както от LNG, така и от BOG) преминава по тръбопроводи към **двигателите на пропульсивната система и/или котлите**, като осигурява необходимото гориво за работа на кораба.

6. **Безопасност и мониторинг:**

- Всички тези процеси се наблюдават от централизирана система за откриване на газ, като всички помещения, през които преминава LNG и изпаренията, са оборудвани с датчици за газ и вентилационни системи за осигуряване на безопасността на операциите.

Целият процес е проектиран да гарантира безопасността на съхранението, обработката и доставката на LNG, като се предотвратяват рискове от експлозии и осигурява необходимото количество гориво за консуматорите.

Особеност на системата е използването на потопяеми помпи в резервоарите (Фиг. 12).



Фиг. 12.

Оборудването трябва да се движи свободно върху своите плъзгащи се основи, за да се предотврати натрупването на напрежение.

Осигурени са точки за наблюдение, които позволяват проследяване на движенията в околните и криогенните условия.

За целите на мониторинга на температурата и съхраняването на данните в протокола са създадени диаграми с криви на тенденции в системата IAMCS. Тези диаграми илюстрират промяната на работните параметри с течение на времето.

При изпълнение на студена тестова работа, за всеки отделен LNG резервоар е осигурен дисплей с крива на тенденцията, който показва всички температурни показания както за корпуса, така и за вътрешността на резервоара.

За справка и по-добра преценка е включена и граничната линия на температурния спад (температурен градиент).

Възможни аварии, свързани с охлаждането на LNG резервоари и работата на LNG инсталациите, могат да включват:

1. Температурен шок и топлинен стрес:

- Описание: Ако максимално допустимият температурен градиент от  $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$  бъде превишен, това може да доведе до температурен шок, който да предизвика

микропукнатини или разрушаване на корпуса на резервоара или тръбопроводите.

- Възможни последици: Напрежения в материалите, изтичане на LNG, потенциални повреди по корпуса на кораба.
2. Изтичане на LNG поради повреди в уплътненията или тръбопроводите:
    - Описание: Аварии могат да се случат при повреди в уплътненията, фланците или тръбите, водещи до изтичане на втечен природен газ.
    - Възможни последици: Изтичането може да предизвика замръзване на околните повърхности, образуване на облак от изпарения, който е потенциално експлозивен при контакт с източник на запалване.
  3. Неуспех на охладителната система или неправилно функциониране:
    - Описание: Ако охладителната система не функционира правилно, може да настъпи прегряване на резервоара или недостатъчно охлаждане, което да предизвика стрес в тръбопроводите и съоръженията.
    - Възможни последици: Деформации и напрежения в системата, аварийни спирания и риск от възпламеняване на газа.
  4. Прекомерно образуване на парите на LNG:
    - Описание: Прекомерното образуване на пари по време на охлаждането или зареждането с LNG може да доведе до натрупване на налягане в резервоара или системата.
    - Възможни последици: Активиране на предпазните клапани, изпускане на газ в атмосферата, което създава риск от запалване.
  5. Заседнали плъзгащи основи:
    - Описание: Ако оборудването не се движи свободно върху своите плъзгащи основи, това може да причини натрупване на напрежение и потенциално разкъсване на тръбопроводите.
    - Възможни последици: Повреда на криогенните тръби и потенциално изтичане на LNG.

Историята на аварии с LNG кораби показва различни видове инциденти и свързаните с тях рискове.

#### 1. Скорошни инциденти:

- През август 2023 г. в Суецкия канал LNG корабът BW Lesmes се сблъсква с петролен танкер поради техническа повреда, водеща до загуба на управление и засядане. Макар и без тежки последствия, това демонстрира риска от навигационни проблеми при LNG плавателни съдове.

#### 2. Исторически аварии:

- През 1971 г. в Ла Специя, Италия, се случва инцидент с „превъртане“ (rollover), при който два слоя LNG с различна плътност се смесват внезапно, предизвиквайки масово отделяне на пари и щети на резервоара;
- През 1973 г. в Стейтън Айлънд, Ню Йорк, пожар по време на ремонт на празен LNG резервоар предизвиква смъртта на 37 работника.

#### 3. Аварии, свързани с разливи:

- През 1965 г. инцидент с кораба Jules Verne води до разлив на LNG, причинявайки пукнатини по палубата на кораба поради ниските температури.
- През 1979 г. при инцидент с кораба Mostafa Ben Bouliad се наблюдава изтичане на малко количество LNG при разтоварване в Ков Пойнт, Мериленд.

Тези примери подчертават важността на строгите протоколи за безопасност и постоянно наблюдение по време на операции с LNG кораби, за да се предотвратят аварии и да се ограничат щетите при инциденти.

Сравнявайки LNG корабите и корабите, работещи с дизел или мазут, по отношение на безопасността, съществуват важни различия и специфики, които трябва да бъдат разгледани:

Опасности, свързани с горивото:

#### 1. *LNG кораби:*

- **Криогенна температура:** LNG се съхранява при изключително ниски температури (около  $-162^{\circ}\text{C}$ ), което налага използването на специализирани криогенни резервоари и оборудване. Изтичането на LNG може да предизвика замръзване и сериозни наранявания;
- **Запалимост:** LNG е запалимо при определени условия, когато се изпари и смеси с въздуха в съотношение 5-15%. Въпреки това, в течна форма е сравнително безопасно, тъй като не може да се запали;
- **Безопасност при боравене:** LNG системите са оборудвани с множество предпазни механизми, като клапани за високо налягане, системи за откриване на изтичания и автоматични спирателни механизми.

#### 2. *Кораби на Дизелово/мазутно гориво:*

- **Запалимост и пожари:** Дизеловото гориво и мазутът са по-малко запалими от LNG, което намалява риска от експлозии. Те изискват по-висока температура за възпламеняване, което ги прави по-безопасни от тази гледна точка;
- **Токсичност:** Изпаренията от мазут и дизел могат да бъдат токсични и да представляват опасност за здравето при продължителна експозиция;
- **Проливи:** Разливите на мазут са силно вредни за околната среда и почистването им е трудно.

#### Оборудване за безопасност:

- **LNG кораби:** Тези кораби са оборудвани със съвременни системи за откриване на газ и защита от изтичане, които включват сензори за метан и други газове, автоматично спиране на подаването на гориво и системи за обезвреждане на излишния газ;
- **Дизелови/мазутни кораби:** Макар и да имат защити срещу пожари и разливи, тези кораби не се нуждаят от криогенна изолация и специфични системи за контрол на газ, което ги прави по-малко сложни.

#### Експлозивни рискове:

- **LNG кораби:** Въпреки че LNG в течна форма не е запалимо, парите му могат да формират експлозивни смеси с въздуха при определени условия. Тези кораби са проектирани с високи стандарти за безопасност, включително системи за вентилация и оборудване за обезвреждане на изпарения;
- **Дизелови/мазутни кораби:** Дизелът и мазутът имат по-ниска вероятност за формиране на експлозивни смеси с въздуха. Рискът от експлозии обикновено е по-нисък, освен ако няма сериозно прегряване или повреда на системите.

#### Екологична безопасност:

- **LNG кораби:** При евентуален разлив, LNG се изпарява бързо, без да замърсява водната повърхност, което намалява дългосрочното въздействие върху

околната среда. Въпреки това, изпаренията могат да бъдат опасни при вдишване;

- **Дизелови/мазутни кораби:** Разливите на мазут и дизел могат да имат катастрофални последици за морската среда и да причинят трайни щети на екосистемите.

#### **Регулаторни изисквания и обучение:**

- **LNG кораби:** Изискват по-специализирано обучение на екипажа за работа с криогенни системи и управление на потенциални рискове, свързани с втечен природен газ;
- **Дизелови/мазутни кораби:** Обучението за работа с тези кораби е по-стандартно и познато за повечето морски професионалисти.

LNG корабите предлагат по-чиста и модерна алтернатива с повишени мерки за безопасност и по-малко вреди за околната среда. Въпреки това, управлението им изисква специализирано обучение и спазване на строги мерки за безопасност поради спецификата на криогенния газ.

Дизеловите и мазутни кораби са по-прости за експлоатация и имат по-ниски рискове за пожар и експлозии, но крият по-високи екологични рискове при разливи и дългосрочна токсичност.

Сравнението на LNG кораби и дизелови/мазутни кораби по отношение на инциденти и безопасност включва анализ на станали случаи и точна статистика за тях.

### **История на инцидентите с LNG кораби**

#### ***Брой инциденти***

LNG корабите имат относително малък брой инциденти в сравнение с общия им брой в експлоатация. От десетилетия LNG индустрията има един от най-добрите показатели за безопасност в морския сектор. Според анализи от различни източници, през последните 50+ години има регистрирани много малко сериозни инциденти, свързани с LNG кораби.

#### ***Характер на инцидентите***

Повечето инциденти са свързани с човешка грешка или технически неизправности, но рядко водят до значителни последици благодарение на строгите мерки за безопасност. Пример за сериозен инцидент е случката в Бостън през 1944 г., когато експлозия в LNG съоръжение доведе до жертви и поражения. Оттогава са въведени значително по-строги правила и стандарти за безопасност.

#### ***Статистика***

LNG транспортните операции имат регистриран нисък процент инциденти – по-малко от 0.3% от всички превозвани товари са били замесени в сериозни Происшествия.

История на инцидентите с дизелови/мазутни кораби

#### ***Брой инциденти***

Корабите, работещи с дизел или мазут, са по-често замесени в инциденти, главно заради по-голямото си разпространение и възможностите за различни аварии, включително пожари, разливи и механични повреди.

#### ***Характер на инцидентите***

Пожарите и експлозиите са по-редки поради високата температура на възпламеняване на дизела и мазута. Въпреки това, разливите и замърсяването на околната среда са значителен проблем. Пример за голямо замърсяване е разливът от кораба

„Eххон Valdez“ през 1989 г., когато мазутен разлив доведе до сериозни екологични последици.

### **Статистика**

Според доклади от Международната морска организация (ИМО) и други източници, разливите на нефт от танкери са намалели през последните десетилетия, но все пак остават проблем. Между 1970 и 2020 г. има над 5,000 регистрирани разлива на нефт с различна степен на тежест.

### **Сравнение по сериозност на инцидентите**

- **LNG кораби:** Макар и редки, инцидентите с LNG могат да имат сериозни последици, ако се стигне до експлозия на изпарения или при изтичане на голямо количество газ. Обаче строгите мерки за безопасност и новите технологии намаляват риска;
- **Дизелови/мазутни кораби:** Повечето инциденти включват разливи, които водят до сериозни и дълготрайни екологични щети. Пожарите и експлозиите са по-малко вероятни, но могат да се случат при неправилна поддръжка или човешка грешка.

### **Изводи:**

- **LNG кораби:** Исторически данните показват, че LNG корабите са по-безопасни по отношение на броя на инцидентите. Съвременните LNG системи са оборудвани с напреднали системи за безопасност и автоматично управление, което води до значително намален риск от големи произшествия;
- **Дизелови/мазутни кораби:** Те имат по-висок брой регистрирани инциденти, особено свързани с разливи. Въпреки че рискът от големи експлозии е понисък, разливите на нефт и замърсяването остават основен проблем.

Наличните статистики и анализи показват, че LNG корабите, макар и да имат своите рискове, са по-безопасни от гледна точка на честотата и сериозността на инцидентите в сравнение с дизеловите и мазутните кораби. Това се дължи на стриктните международни стандарти за безопасност и усъвършенстваните технологии, използвани при LNG превозите.

### **Литература**

- [1]. Liquefied Natural Gas: Understanding the Basic Facts (англ.). US Department of Energy (DOE) Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory (август 2005). <https://xn--80ajamiccthtvc4b5g.xn--p1ai/info/publikatsii>
- [2]. В. Комащенко, Ю. Малышев, Б. Федунец. Технология проведения горно-разведочных выработок. Изд. 2-е. 2022. с. 276
- [3]. Топливо будущего для легковых и грузовых автомобилей, доктор Джеймс Дж. Эберхардт, Министерство энергетики США, 2002 г. Семинар по снижению выбросов от дизельных двигателей (DEER), 25–29 августа 2002 г.
- [4]. MARPOL-73/78 (Marine Pollution) Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 г.
- [5]. «Использование сжиженного природного газа на водном транспорте», Е.Н. Пронин, Санкт-Петербург, май 2016 год.

- 
- 
- [6]. Voronov V. A., Karyakina E. D., Akhmerov E. V. Analysis of technical solutions in transport and storage of liquefied natural gas. Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda. 2019. No 3. p. 15–22.
- [7]. Anoshkin A. N., Pospelov A. B., Yakushev R. M. Features of deformation and destruction of combined polymer pipes at low temperatures. Bulletin of PNRPU Mechanics. 2014. No 2 P. 5–28
- [8]. И. И. Хасанов, А. Р. Гимаева, Особенности бункеровки топлива для судов на сжиженном природном газе, Транспорт и хранения нефтепродуктов и углеводородного сырья, 2017
- [9]. Мизгирев, Е. Л. Сжиженный природный газ как одна из альтернатив в качестве топлива для судовых энергетических установок / Е. Л. Мизгирев. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2022. — № 27 (422). — С. 19-21. — URL: <https://moluch.ru/archive/422/93828/>
- [10]. [https://www.korabel.ru/news/comments/spg\\_kak\\_sudovoe\\_toplivo\\_plyusy\\_minusy\\_i\\_perspektivy\\_2.html](https://www.korabel.ru/news/comments/spg_kak_sudovoe_toplivo_plyusy_minusy_i_perspektivy_2.html)
- [11]. Eldar Zaerov, Study of the potential for hydrogen production with photovoltaic power plant and fuel cell Yearbook BSU 2015, volume XXXI ISSN: 1311-221X, p. 36 – 39
- [12]. Радостин Долчинков, Христо Михайлов, ИНЖЕНЕРИНГОВА БЕЗОПАСНОСТ ПРИ ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА ЕНЕРГИЙНИ СИСТЕМИ, БСУ - ГОДИШНИК Том XLVIII, 2023, с.330-345, ISSN: 1311-221X
- [13]. Долчинков Р., М. Бангев, Предотвратяване на пожари причинени от електрическа дъга, Международна научна конференция СИНЯ ИКОНОМИКА И СИНЬО РАЗВИТИЕ, ISBN: 978-619-7126-57-0, стр.441-451, 2018
- [14]. Радостин Долчинков, Иван Попов, ПОЖАРНА БЕЗОПАСНОСТ НА ПЛАВАТЕЛНИ СЪДОВЕ, МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ ЧЕРНО МОРЕ – ВРАТА И МНОГО МОСТОВЕ, БУРГАСКИ СВОБОДЕН УНИВЕРСИТЕТ, Бургас, 2022 ISBN: 978-619-253-017-4
- [15]. Радостин Долчинков, Иван Попов, ПРЕВАНТИВНИ МЕРКИ И ДЕЙСТВИЯ ПРИ ПОЖАР НА БОРДА НА КОРАБ, МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ ЧЕРНО МОРЕ – ВРАТА И МНОГО МОСТОВЕ, БУРГАСКИ СВОБОДЕН УНИВЕРСИТЕТ, Бургас, 2022 ISBN: 978-619-253-017-4