

- ti / V. V. Nguyen. Khanhoy: Transport (Ministerstvo Transporta V'yetnama), 1996. – P. 77.
22. Bailey, S. I. Corrosion of Stainless Steels in the Marine Splash Zone / Bailey, S. I. and Li, X. // *Advanced Materials Research*. - 2013. - Vol. 610–613. - P. 272–275.
23. Xiang-rong, Z. Study on the corrosion peak of carbon steel in marine splash zone / Xiang-rong, Z., Gui-qiao, H. & Cai-feng, L. // *Chin. J. Ocean. Limnol.* - 1997. - Vol. 15. - P. 378–380.
24. Liang M. Corrosion and pitting of 6060 series aluminium after 2 years exposure in seawater splash, tidal and immersion zones / M. Liang, R. Melchers, I. Chaves // *Corrosion Science*. - 2018. - Vol. 140. - P. 286–296.
25. Vu, V. M. Katodnaya zashchita morskikh sooruzheniy, udalennykh ot stacionarnykh istochnikov elektrosnabzheniya / V. M. Vu, B. B. Chernov, A. M. Nugmanov, L. YU. Firsova // *Morskoy Vestnik*. – 2020. – № 1(73). – P. 66–69.
26. Fam V. CH. Ekspluatatsionnoy nadezhnost' morskikh prichalov v portakh V'yetnama: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.19 / Fam Van Chung. - M., 2010. - 162 p.
27. Vu, V. M. Otsenka effektivnosti primeneniya katodnoy zashchity morskikh sooruzheniy s pitaniyem ot solnechnykh paneley / V. M. Vu, B. B. Chernov, A. M. Nugmanov // *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. - 2019. - № 4(93). - P. 132–137.

УДК: 656.612: 656.613.2

DOI: 10.34046/aumsuomt94/22

## АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ROLLOVER ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЛАВУЧИХ РЕГАЗИФИКАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

*Д. А. Давыдов, аспирант*

*А. С. Арангулов, аспирант*

*В. А. Туркин, доктор технических наук, профессор*

В статье предоставлен анализ эксплуатации плавучих регазификационных установок (ПРГУ) сжиженного природного газа (СПГ). Осуществляется обзор состояния отрасли на данный момент. Проводится сравнение плавучих регазификационных установок и терминалов хранения сжиженного природного газа, рассматриваются их преимущества и недостатки. Рассматривается такое явление как Rollover (перемешивание слоёв СПГ с резким повышением избыточного давления в танке), его суть, причины, предпосылки и стадии протекания. Выполнен анализ возможности снижения риска возникновения Rollover исходя из компонентного состава и состояния сжиженного природного газа. Также представлены рекомендации для предотвращения возникновения Rollover во время и после грузовых операций по приёму сжиженного природного газа, исходя из особенностей эксплуатации плавучей регазификационной установки. Показано, что во время грузовых операций необходимо тщательно следить за параметрами, падение или повышение которых может вызвать срабатывание автоматической системы прерывания погрузки, так как после её срабатывания потребуется время, чтобы восстановить режим работы всего сопряжённого оборудования, за которое давление в танке может достичь давления срабатывания предохранительных клапанов.

**Ключевые слова:** плавучая регазификационная установка, ПРГУ, сжиженный природный газ, СПГ, Rollover, танкер-газовоз, MARVS

This article provides an analysis of floating regasification units (FSRU) for liquefied natural gas (LNG) operation. The current state of the industry reviewed. The comparison of floating storage regasification units and liquefied natural gas storage terminals carried out, their advantages and disadvantages are considered. Phenomenon such as Rollover (mixing of LNG layers with a rapid excessive pressure increase in the tank), its essence, reasons, premises and stages of flow are considered. The analysis of Rollover risk reducing possibility based on the component composition and condition of liquefied natural gas carried out. Also provided recommendations for prevention occurrence of Rollover during and after cargo operations of liquefied natural gas loading, based on the operating characteristics of the floating storage regasification unit. It is shown that during cargo operations it is necessary to carefully monitor the parameters, the fall or increase of which can trigger the automatic loading interruption system, since after its operation it will take time to restore the operation of all associated equipment, during which the pressure in the tank can reach the response pressure safety valves.

**Keywords:** Floating storage regasification unit, FSRU, liquefied natural gas, LNG, Rollover, LNG carrier, MARVS

### Введение

В течение последних лет роль и значение природного газа в энергобалансе мировой экономики постоянно возрастает, что обусловлено как его высокой эффективностью в качестве энергетического ресурса и сырья для промышленности,

так и повышенной в сравнении с нефтью и углем экологичностью. Это обусловлено тем, что в процессе сжижения происходит очистка газа от вредных примесей и сернистых соединений, поэтому на выходе получается практически чистый газ с высоким содержанием метана. Гибкость транс-

портировки СПГ делает его более ликвидным товаром и создает условия для создания полноценного независимого механизма ценообразования на природный газ. Сжиженный природный газ характеризуется более высоким качеством и безопасностью по сравнению с традиционным газом. Кроме того, технологии сжижения постоянно развиваются, и себестоимость СПГ будет в дальнейшем снижаться. Значительным фактором роста спроса на газ выступает также рост личного потребления, доля которого в общем энергобалансе постоянно увеличивается, особенно в группе промышленно развитых странах мира. Возрастает также спрос на энергию со стороны сферы услуг и общественного сектора. В последние годы в от-

расли происходят весомые преобразования, которые, прежде всего, связаны с технологическими прорывами, призванными повысить гибкость рынка СПГ. Речь идет о переменах на стороне спроса – появление приёмных плавучих регазификационных установок (рис. 1). Плавучие регазификационные установки, являются одним из важнейших факторов развития рынка СПГ в мире. По итогам октября 2017 года эксплуатировалось 24 установки, на 15 единиц уже размещены заказы, а заказы на новые плавучие хранилища в ближайшие 5 лет составят 30-50 единиц. В последние годы при выборе технологического решения для своего приемного терминала СПГ в 50% случаев инвестор принимает решение в пользу плавучей установки[1].

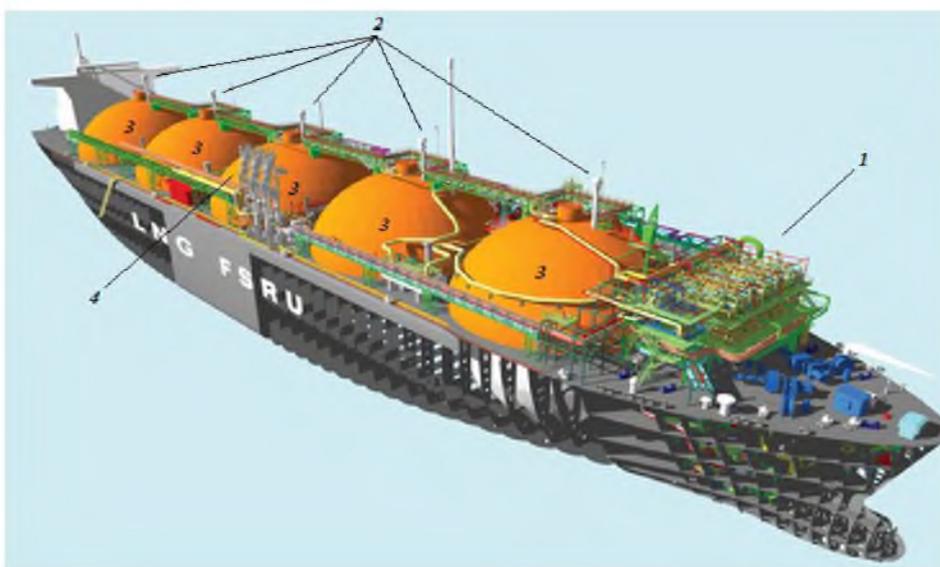


Рисунок 1 – внешний вид ПРГУ: 1– регазификационная установка; 2– мачты для сброса избыточного давления газа; 3 – грузовые танки с СПГ; 4– соединения грузовых магистралей для перекачки СПГ и газа

### Преимущества плавучих регазификационных установок

Преимущества плавучей регазификационной установки заключаются в следующем:

- в отличие от стационарных терминалов СПГ, требующих больших площадей земли, как правило, дорогостоящих в прибрежной черте, специального глубоководного судового хода и причала для приема судов СПГ, плавучий терминал можно расположить вдали от основных морских путей и обойтись на берегу лишь небольшим участком для подключения к газораспределительной сети;

- ПРГУ размещаются на значительном удалении от береговой черты, при желании могут располагаться за пределами территориальных вод. Это позволяет обеспечить удаление судна на безопасное расстояние от береговых объектов, а также минимизировать воздействие на окружающую среду[4];

- в случае размещения ПРГУ на некотором удалении от берега, пропадают ограничения по осадке швартуемого судна;

- у ПРГУ более низкая стоимость, чем у наземного СПГ-терминала;

- срок строительства ПРГУ около 1-3 лет - от инвестиционного решения до ввода в эксплуатацию, в зависимости от географического расположения, пропускной мощности и инвестиционных решений. Для сравнения, проект наземного СПГ - терминала реализуется в срок не менее 4-6 лет. Так же стоит отметить возможность переоборудования танкера-газовоза в ПРГУ;

- как и наземный СПГ-терминал, ПРГУ может использоваться для приема партий СПГ от небольших производителей;

- в случае, если нужна в регазификации в определенный момент пропала, в силу того, что ПРГУ конструируется на базе танкера-газовоза, судно может использоваться для транспортиров-

ки СПГ. Таким образом сохраняется его экономическая рентабельность.

### Свойства сжиженного природного газа и их влияние на rollover

Стоит помнить о том, что индустрия ПРГУ довольно молода и неизбежно столкнется с некоторыми, уже известными, проблемами СПГ-терминалов. Одной из таких проблем является Rollover (ролловер, переворачивание), который происходит при смешивании СПГ двух разных плотностей. На данный момент существует руководство по практике эксплуатации регазификационных установок. Тем не менее, стандартное руководство по оперативной практике еще не разработано на должном уровне, а то, что имеется, недостаточно для прогнозирования, предотвращения и смягчения последствий Rollover.

Таблица 1 – Зависимость плотности и температуры кипения СПГ от состава газа и избыточного давления [2]

Давление, МПа	Состав, % метана	Молекулярная масса, кг/кг·моль	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Температура кипения, °С
0,5	97	16,7	392	-135
	80	20,9	459	-132
0	97	16,7	422	-162
	80	20,9	495	-160

Плотность СПГ является функцией температуры жидкости с температурным градиентом примерно 1,35 кг/ (м<sup>3</sup>·°С). Плотность СПГ может быть измерена непосредственно, но, как правило, рассчитывается по данным о компонентном составе СПГ, который определяют путем газохроматографического анализа (процесс исследования газовых смесей на предмет количества содержащихся в них компонентов) [7].

Хроматографический анализ природного газа необходим для выявления товарных и технологических характеристик, определяющих условия его наиболее эффективного транспорта и подачи потребителям. В договорах на поставку в обязательном порядке прописаны требования, предъявляемые к составу газа. Проверка качества природных газов с последующим определением их основных физико-химических свойств позволяет предотвратить или же устранить возможные разногласия при взаимных расчетах между газотранспортными предприятиями и потребителями [9].

Для определения плотности сжиженного природного газа рекомендуется метод, установленный в ISO 6578, основанный на применении расширенного принципа соответственных состояний к уравнению состояния метана как основного компонента СПГ [3].

Термин «Rollover» относится к процессу, при котором в грузовых танках с СПГ образуется большое количество газа в течение короткого периода времени. Rollover приводит к возникновению быстрого и бесконтрольного повышения избыточного давления в танке [5]. Причинами Rollover, в основном, являются:

1. Разница между температурами закачиваемого сжиженного природного газа и того газа, что уже находится в танке.
2. Разнородность компонентного состава СПГ и его плотности.

Плотность сжиженного природного газа зависит от компонентного состава и избыточного давления, и колеблется в диапазоне значений от 430 кг/м<sup>3</sup> до 470 кг/м<sup>3</sup>, но в отдельных случаях может достигать 520 кг/м<sup>3</sup> (табл. 1).

В танке с сжиженным природным газом возможно наличие двух устойчивых слоев, которые образуются, как правило, в результате неполного смешивания СПГ разной плотности – нового и остатка в ёмкости. Внутри слоя плотность жидкости одинакова, но плотность жидкости в нижнем слое танка больше плотности жидкости в верхнем слое. В дальнейшем, из-за притока тепла в танки хранения сжиженного природного газа, тепло- и массообмена между слоями и испарения жидкости с поверхности, плотность слоев выравнивается путем самопроизвольного перемешивания.

Такое перемешивание называется Rollover, и если, как это часто бывает, жидкость в нижней части резервуара становится перегретой относительно давления паровой фазы в емкости СПГ, то смешивание сопровождается резким увеличением скорости испарения. В большинстве случаев такое испарение является очень быстрым. При этом, в случае недостаточно интенсивного отбора газа, повышение давления в емкости достаточно, чтобы вызвать срабатывание предохранительных клапанов MARVS (Maximum allowable relief valves setting).

На практике, Rollover можно разделить на две стадии. Когда сжиженный природный газ находится в резервуаре, постепенное испарение на границе фаз пар/жидкость препятствует повышению температуры верхнего слоя СПГ, в то

время как плотность слоя увеличивается. Нижний слой СПГ не испаряется из-за статического давления верхнего слоя сжиженного природного газа. В силу того, что сжиженный природный газ имеет низкую теплопроводность, то от нижнего слоя СПГ к верхнему проходит лишь малая доля тепла. Следовательно, температура нижнего слоя сжиженного природного газа увеличивается, а плотность уменьшается (рисунок 1а).

Если равновесие слоёв в грузовом танке внезапно нарушается в результате качки, движения судна, или если плотность нижнего слоя СПГ становится ниже, чем плотность верхнего слоя, то нижний слой резко поднимается вверх. В этот момент на поднявшийся «тёплый» СПГ уже не действует статическое давление верхнего слоя, поэтому он свободно выкипает и испаряется, вызывая резкое повышение давления в грузовом танке (рисунок 1б) [6].

Риск возникновения Rollover можно предотвратить путём минимизированного наличия остаточного груза в танке, что в данное время применяется при эксплуатации судов-газовозов. В случае же эксплуатации плавучей регазификационной установки, такой метод не всегда предоставляется возможным, исходя из этого, оператору остаётся тщательно управлять и наблюдать за процессом погрузки. Возможному возникновению Rollover, как правило, предшествует период, в течение которого скорость образования газа будет значительно ниже обычной, её необходимо постоянно контролировать, чтобы убедиться, что жидкость не аккумулирует тепло. Если есть основания полагать, что это происходит, необходимо стремиться обеспечить циркуляцию жидкости в танке для смешения ее различных слоев [5].

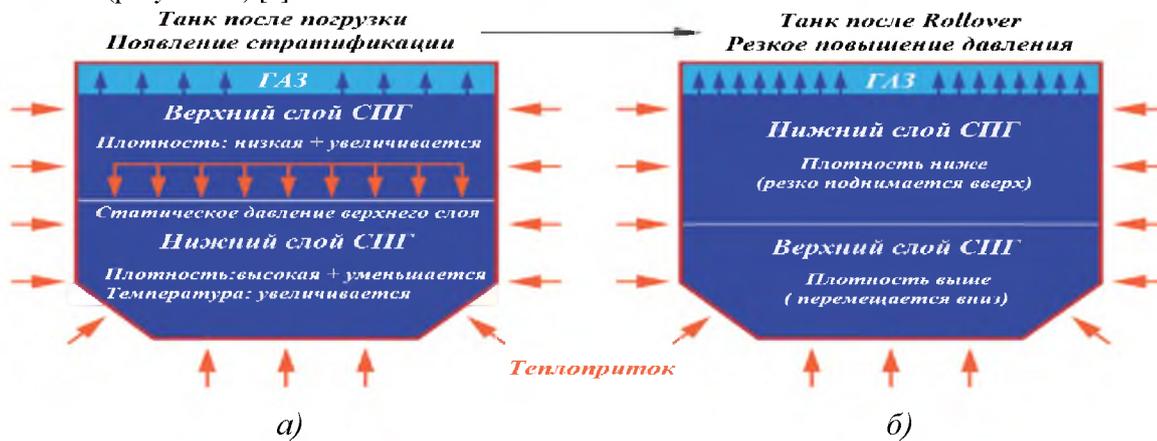


Рисунок 2 – механизм проявления Rollover: а) танк после погрузки; б) Танк после Rollover

Стоит учитывать, что высокое содержание азота в СПГ также может вызвать Rollover вскоре после прекращения заполнения емкости вследствие преимущественного испарения азота. Как показывает практика, это предотвращается

путем поддержания содержания азота в сжиженном природном газе менее 1% и при тщательном наблюдении за количеством отбираемого газа. Примеры составов и свойств СПГ указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Примеры составов и свойств сжиженного природного газа в точке кипения при нормальном давлении [2]

Наименование компонента и характеристики СПГ	Молярная доля компонента, %		
	Пример 1	Пример 2	Пример 3
Азот	0,5	1,79	0,36
Метан	97,5	93,9	87,2
Этан	1,8	3,26	8,61
Пропан	0,2	0,69	2,74
И-Бутан	-	0,12	0,42
Н-Бутан	-	0,15	0,65
Пентаны	-	0,09	0,02
Молекулярная масса, кг / моль	16,41	17,07	18,52
Температура кипения, °С	-162,6	-165,3	-161,3
Плотность, кг/ м³	431,6	448,8	468,7
Объём газа (при 0 °С и 101,325 кПа), получаемый из объёма СПГ, м³/ м³	590	590	568
Объём газа (при 0 °С и 101,325 кПа), получаемый из тонны СПГ, м³/ 10³ кг	1367	1314	1211

Анализ таблицы 2 показывает, что сжиженный природный газ состоит в основном из

метана, а также содержит небольшие количества этана, пропана, бутана, азота и других компонентов, присутствующих в природном газе.

Сжиженный природный газ имеет критическую температуру ниже температуры окружающей среды. В зависимости от компонентного состава температура кипения СПГ лежит в диапазоне от -167 °С до -157 °С при атмосферном давлении. Критическая температура составляет -82,0 °С. При температурах, больших критической, сжиженный природный газ больше не может находиться в жидком состоянии вне зависимости от давления.

Природный газ, охлажденный до -162 °С, хранится и транспортируется в сжиженном виде. Объем СПГ в 600 раз меньше объема природного газа, что, с одной стороны, облегчает его хранение и обеспечивает возможность транспортировки на большие расстояния. С другой стороны, при разливе газа в сжиженной форме при темпе-

ратуре -160 °С из одного объема жидкости образуется приблизительно 600 объемов газа плотностью 1,86 кг/м<sup>3</sup>.

Пары сжиженного природного газа при атмосферном давлении и температуре кипения -162 °С имеют относительную плотность 1,8 кг/м<sup>3</sup>, которая означает, что в этих условиях пары СПГ тяжелее воздуха будут скапливаться при разливе на поверхности земли или воды. Однако, пары сжиженного природного газа быстро нагреваются, при достижении температуры -110 °С их относительная плотность становится равной 1 кг/м<sup>3</sup>, пары начинают быстро подниматься вверх. Следовательно, холодные пары СПГ, в случае локализации на поверхности земли, при холодной погоде представляют опасность для дыхания и могут вызвать асфиксию, так как при сохранении отрицательной плавучести в воздухе пары сжиженного природного газа вытесняют кислород.

Таблица 3 – Типичный состав СПГ различных стран-производителей [8]

Страна	Азот, %	Метан, %	Этан, %	Пропан, %	Плотность, кг/ м <sup>3</sup>
Абу Дабби	0.3	84.8	13.2	1.6	467
Алжир, Arzew	0.6	88.0	9.0	2.0	464
Алжир, Bethioua 1	0.9	88.1	8.4	2.0	455
Алжир, Skikda	0.5	91.8	6.9	0.6	446
Австралия, NWS	0.1	87.4	8.3	3.4	467
Бруней	0.1	90.6	5.0	2.9	461
Египт, Damietta	0.1	97.7	1.8	0.22	427
Египт, Idku	0.0	95.9	2.8	0.9	436
Экваториальная Гвинея	0.0	93.4	6.5	0.0	439
Индонезия, Агун	0.2	90.7	6.2	2.0	457
Индонезия, Badak	0.0	91.2	5.5	2.4	456
Ливия	0.7	81.6	13.4	3.7	485
Малайзия	0.3	90.3	5.3	3.1	461
Нигерия	0.1	92.1	5.3	2.1	458
Норвегия	0.8	91.8	5.7	1.3	451
Оман	0.4	87.9	7.3	2.9	470
Перу	0.6	89.1	10.3	0.1	456
Катар, Qatargas I	0.4	90.1	6.2	2.3	460
Россия, Сахалин	0.1	92.6	4.5	1.9	449
Тринидад	0.0	97.1	2.5	0.2	429
США, Alaska	0.2	99.7	0.1	0.0	423
Йемен	0.0	93.3	5.7	0.9	434

Проанализировав компонентный состав сжиженного природного газа различных стран производителей, указанных в таблице 3, можно судить о том, насколько разнородным может быть состав одного и того же газа, в зависимости от места добычи и обработки.

**Заключение**

В целях предотвращения Rolloverвремя и после погрузки следует:

- контролировать плотность СПГ в грузовом танке, в случае, если он заполнен СПГ разных изготовителей. При обнаружении расслоения жидкой фазы должны быть приняты меры, снижающие степень риска;

- перед грузовыми операциями, уделять особое внимание грузовой документации, в частности плотности сжиженного природного газа и его составу (таблица 3);

– вовремя и после грузовых операций вести непрерывное наблюдение за давлением в грузовых танках, в случае его повышения, постараться увеличить отбор газа;

– во время грузовых операций тщательно следить за параметрами, падение или повышение которых может вызвать срабатывание автоматической системы прерывания (ESDS – emergency shutdown system) погрузки, так как после её срабатывания потребуется время, чтобы восстановить режим работы всего сопряжённого оборудования, за которое давление в танке может достичь давления срабатывания предохранительных клапанов;

– если погрузка судна осуществляется параллельно с работой регазификационной установки, стоит помнить, что ESDS не контролируется системой регазификации, но срабатывание ESD вызовет срабатывание системы остановки регазификации (PSD – process shutdown system).

– следить за состоянием и режимом работы оборудования, осуществляющего отбор газа: котлами, дизель-генераторами, компрессорами низкого и высокого давления, устройством для сжигания газа (GCU).

#### Литература

1. Выгон Г., Белова М. Развитие мирового рынка СПГ: вызовы и возможности для России. Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО. 2013
2. Физико-химические свойства природного газа: методическое пособие / ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» филиал Учебно-производственный центр. Челябинск, 2008, 13-25 С.
3. ГОСТ Р 57431-2017 (ИСО 16903:2015) Газ природный сжиженный. Общие характеристики. 2018.
4. FSRU (плавучее хранилище СПГ). URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/transportirovka-i-khranenie/141908-fsru-plavuchee-khranilishche-spg/> (дата обращения: 05.02.2020)
5. Rollover in LNG Storage Tanks. Summary Report by the GIIGNL Technical Study Group on the Behaviour of LNG in Storage. Public Version. Second Edition: 2012 – 2015.
6. LNG Bunkering: Technical and Operational Advisory. ABS. 2017. 13-18 С.
7. Floating storage and regasification units face specific LNG rollover challenges: Consideration of saturated vapor pressure provides insight and mitigation options M. Kulitsaa & David A. Wood. 2018.
8. International Gas Union Natural Gas Conversion Pocketbook. 2012. -23 С.
9. Азбука производства. Хроматографический анализ газа. URL: [https://stavropol-](https://stavropol-tr.gazprom.ru/press/news/2019/05/868/?mode=preview)

[tr.gazprom.ru/press/news/2019/05/868/?mode=preview](https://stavropol-tr.gazprom.ru/press/news/2019/05/868/?mode=preview) (дата обращения: 07.02.2020)

10. Кондратьев С.И. Максимизация надежности процессов в условиях межсистемных взаимодействий с не вполне определенными параметрами [Текст] / С.И. Кондратьев, А.П. Лицкевич В сборнике: Стратегия развития транспортно-логистической системы Азово-Черноморского бассейна. Проблемы безопасности морского судоходства, технической и коммерческой эксплуатации морского транспорта Материалы 1-й международной научно-технической и 6-й региональной научно-технической конференции. Ответственные за выпуск: академик РАТ, д.т.н., проф. В.В.Демьянов, академик РАТ, д.э.н., проф. В.Е.Деружинский.– 2007.– С. 204-207.
11. Кондратьев, С.И. Теоретические основы управления крупнотоннажными судами по критериям безопасности и энергосбережения: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук [Текст] / С.И. Кондратьев.–Новороссийск: Новороссийская государственная морская академия, 2004.
12. Каракаев А.Б. Основные принципы моделирования и информационной поддержки процессов управления эксплуатацией судовых электроэнергетических систем. (Часть 1) [Текст]/А.Б. Каракаев, А.В. Луканин, Е.В. Херкерт//Эксплуатация морского транспорта.– 2017.– № 2 (83).– С. 114-122.

#### References

1. G. Vygon, M. Belova. Razvitie mirovogo rynka SPG: vyzovy i vozmozhnosti dlya Rossii. Energeticheskiy centr Moscovskoi shkoly upravleniya SKOLKOVO. 2013
2. Fiziko–chimicheskie svoistva prirodnogo gaza: metodicheskoe posobie. ООО «Gazprom transgaz Ekaterinburg» filial Uchebno–produzvodstvennyi centr Chelyabinsk. 2008. pp 13-25.
3. GOST R 57431-2017 (ISO 16903:2015) Gaz prirodnyi szhizhennyi. Obschie harakteristiki. 2018.
4. FSRU (plavuchee khranilishche SPG). URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/transportirovka-i-khranenie/141908-fsru-plavuchee-khranilishche-spg/> (date of the application: 05.02.2020).
5. Rollover in LNG Storage Tanks. Summary Report by the GIIGNL Technical Study Group on the Behaviour of LNG in Storage. Public Version. Second Edition: 2012 – 2015.
6. LNG Bunkering: Technical and Operational Advisory. ABS. 2017. pp 13-18.
7. Floating storage and regasification units face specific LNG rollover challenges: Consideration of saturated vapor pressure provides insight and mitigation options M. Kulitsaa & David A. Wood. 2018.
8. International Gas Union Natural Gas Conversion Pocketbook. 2012. -23 p.

9. Azbuka proizvodstva. Chromatograficheskiy analiz gaza. URL: <https://stavropol-tr.gazprom.ru/press/news/2019/05/868/?mode=preview> (date of the application: 07.02.2020).
10. Kondrat'ev S.I. Maksimizatsiya nadezhnosti processov v usloviyah mezh sistemnykh vzaimodeystviy s ne vpolne opredelennymi parametrami [Tekst] / S.I. Kondrat'ev, A.P. Lickevich V sbornike: Strategiya razvitiya transportno-logisticheskoy sistemy Azovo-Chernomorskogo bassejna. Problemy bezopasnosti morskogo sudohodstva, tekhnicheskoy i kommercheskoy ekspluatatsii morskogo transporta Materialy 1-j mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy i 6-j regional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Otvetstvennye za vypusk: akademik RAT, d.t.n., prof. V.V.Dem'yanov, akademik RAT, d.e.n., prof. V.E.Deruzhinskij. 2007. S. 204-207.
11. Kondrat'ev, S.I. Teoreticheskie osnovy upravleniya krupnotonnazhnymi sudami po kriteriyam bezopasnosti i energosberezheniya [Tekst] / S.I. Kondrat'ev avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Novorossiyskaya gosudarstvennaya morskaya akademiya. Novorossiysk, 2004.
12. Karakaev A.B. Osnovnye principy modelirovaniya i informacionnoj podderzhki processov upravleniya ekspluatatsiej sudovykh elektroenergeticheskikh sistem. (CHast' 1) [Tekst]/A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert//Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2017. № 2 (83). S. 114-122.

УДК 629.5.015

DOI: 10.34046/aumsuomt94/23

## СОВРЕМЕННЫЕ СУДОВЫЕ МАЛОБОРОТНЫЕ ДИЗЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ: СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ

*С.А. Худяков, доктор технических наук, профессор  
А.В. Игнатенко*

История, перспективы и вызовы в развитии судовых малооборотных дизелей с электронным управлением. Аспекты, связанные с обеспечением мер по выполнению экологических требований IMO Tier III, в том числе – переход на газообразное топливо, конструктивные особенности оборудования систем обработки выпускных газов. Связанное оборудование и системы управления. Отмечены проблемы силовой гидравлической системы данных дизелей, связанные с появлением износов в элементах и падением давления в системе. Рассмотрены методы восстановления прецизионных пар данной системы, с целью повышения показателей надежности пропульсивных установок в целом.

**Ключевые слова:** малооборотные дизели, электронное управление, эксплуатация, перспективы, газообразное топливо, проблемы, отказы, гидравлическая система, утечки, восстановление

The review of current state and potential prospects: electronically controlled low speed marine diesel engines, including development, up-to-date challenges and future potential. IMO Tier III related features and issues: achieving compliance requirements, transition to gas fuels. Alterations in the equipment and the control systems reviewed. Engines hydraulic power system (HPS) equipment wear related problems highlighted. The reconditioning methods for the precision pairs reviewed as a part of a process to increase propulsion plants reliability.

**Keywords:** low speed diesel engines, challenges, electronic control, operation, prospects, gas fuel, problems, failures, hydraulic system, leakage, reconditioning.

Первый опыт практической реализации главных судовых малооборотных дизелей (МОД) с электронным управлением фирмы MANB&W впервые был представлен на конгрессе CIMAC (англ. - *The International Council on Combustion Engines*) в 2001 г. Прототипом стал главный двигатель (ГД) танкера «Bow Cecil» норвежского судовладельца «Odffell ASA» модели 6L60ME с цилиндровой мощностью 1920 кВт, частотой вращения 123 мин<sup>-1</sup>, средним эффективным давлением 17,0 бар и следующими параметрами цилиндра: диаметр – 600 мм, ход поршня – 1944 мм.

Конструкция МОД серии ME, в основном, схожа с конструкцией серий MC или MC-C: детали остова, коленчатый вал, элементы цилиндропоршневой группы – идентичны, а существенным отличием является принципиально

иной подход, реализованный для управления системой газораспределения и топливной аппаратурой.

В большинстве двигателей такого типа распределительный вал отсутствует – его функции выполняет микропроцессорная система управления (МПСУ), которая на основе входного сигнала от «тахо-системы» с электронными датчиками (энкодерами) положения коленчатого вала (ПКВ) дизеля и с учетом выбранного режима работы формирует управляющие воздействия для:

– топливных насосов высокого давления (ТНВД), задавая закон подачи топлива в функции угла ПКВ, определяя момент начала подачи топлива в цилиндр и цикловую подачу топлива;