

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК: 620.92

О. К. Безюков,
В. Л. Ерофеев,
А. С. Прякин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХЛАДОПОТЕНЦИАЛА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ, РАБОТАЮЩИМИ НА СЖИЖЕННОМ ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

В статье оцениваются возможности уменьшения загрязнений с судов, использующих в качестве моторного топлива сжиженный природный газ (СПГ), снижение эмиссии парниковых газов. Предложены пути превращения диоксида углерода в твердую фазу — сухой лёд — за счет использования хладопотенциала криогенного топлива. Рассмотрены перспективы использования на судах СПГ в качестве моторного топлива. Произведена оценка величины хладопотенциала СПГ в системе его топливоподготовки. Определены потребности в «холоде» для получения из продуктов сгорания СПГ диоксида углерода в твердой фазе — сухого льда. Предложен ряд технологических схем получения сухого льда из продуктов сгорания СПГ. Эти инновации могут улучшить показатели энергетической эффективности судов не только за счет снижения количества расходуемого топлива (и, следовательно, уменьшения выбросов CO₂), но и за счет превращения диоксида углерода в сухой лёд, что оказывается экономически эффективным.

Ключевые слова: криогенный хладопотенциал, сжиженный природный газ, сухой лёд, регазификация, десублимация, парниковые газы.

Введение

Использование сжиженного природного газа (СПГ) в качестве судового моторного топлива имеет существенные перспективы не только экономические (разная стоимость СПГ и нефтяных топлив), но и экологические — за счет уменьшения выбросов диоксида углерода CO₂, окислов азота NO_x и серы SO_x. В качестве предупреждения для всей морской индустрии звучит предложение организации «Oxfam» и «Зеленой группы» Всемирного фонда дикой природы на сессии в Дурбане о взывании налога в 25 долл. за тонну судового топлива на основе нефти. Использование СПГ позволит выполнить не только строгие экологические нормативы по выбросам, введенные в действие с 2015 г. для зон контроля выбросов [1] (Emission Control Areas-Eca), а также введенные в действие с 2012 г. режимы контроля выбросов с морских судов вдоль района побережья США и требования по обязательному переходу по всему миру на использование мазута с низким содержанием серы (LSHFO) — с максимальной долей серы не выше 0,5 %, но и иные, не менее строгие нормативы.

Согласно данным выполненных MECIntelligence исследований, если сегодня в мире на газовом топливе работает около 100 судов мирового торгового флота, то к 2020 г. их количество может увеличиться до 10 000 судов. Нарастает тенденция строительства судов с двухтопливными двигателями, позволяющими работу как на нефтяном топливе, так и на газовом. Так, сегодня почти три четверти заказанных судов для транспортировки СПГ строятся с двухтопливными двигателями [2] — [5]. В Норвегии успешно эксплуатируются 25 судов на природном газе. В Бельгии планируется строительство терминалов для хранения СПГ в качестве судового топлива [6]. Таким образом, развитие мирового судостроения в направлении использования СПГ в качестве судового топлива является очевидным. При использовании СПГ в качестве судового топлива требуется найти ряд новых технических решений, связанных, в том числе, с системами бункеровки, хранения и топливоподготовки.

Российский морской регистр судоходства констатировал величину общих выбросов от международного судоходства в 2007 г. равную 2,7 % мировых выбросов. Прогнозируемое увеличе-

ние среднего количества выбросов к 2050 г. возрастет минимально в три раза, а максимально — в 5,4 раза по сравнению с показателями 2007 г.

Рабочий орган Международной морской организации, являющейся специализированным учреждением ООН, Комитет по защите морской среды (МЕРС), выступил с инициативой разработки инструмента по защите атмосферы от парниковых газов. Международная конвенция по предотвращению загрязнений с судов (MARPOL 73/78) в гл. 4 Приложения VI к MARPOL [1] установила требования, направленные на снижение эмиссии парниковых газов, которые в соответствии с Резолюцией ИМО МЕРС.203(62) [7] вступили в силу с 1 января 2013 г. Установлен также показатель энергетической эффективности, оценивающий количество выбросов CO_2 в расчете на единицу произведенной продукции ($t\ CO_2/(т·км)$).

Далее рассмотрим возможности еще одного способа снижения количества выбросов CO_2 за счет извлечения диоксида углерода из отработавших газов, перевода его в твердую фазу — сухой лед, хранения, а также его последующего использования.

Хладопотенциал СПГ. Система подготовки топлива СПГ к сжиганию в судовых двигателях требует его регазификации и подогрева за счет подвода теплоты. Предложения использовать систему регазификации СПГ для получения твердого диоксида углерода уже высказывались ранее нами и другими авторами [8], [9]. Способом достижения цели — снижения выбросов CO_2 — является использование эксергии «холода СПГ» как своеобразного вторичного энергетического ресурса (ВЭР_{хол}), имеющегося у СПГ при хранении на судне (хладопотенциала СПГ). Сопоставление температурных параметров по поверхности теплообмена любых теплообменных аппаратов систем охлаждения отработавших газов, содержащих CO_2 в газовой фазе, и системы подготовки природного газа к подаче в двигатель (от криогенного состояния до температуры окружающей среды) показывает возможности осуществления ряда схем получения сухого льда — твердой фазы CO_2 (рис. 1). При этом возможно рассмотрение следующих предложений.

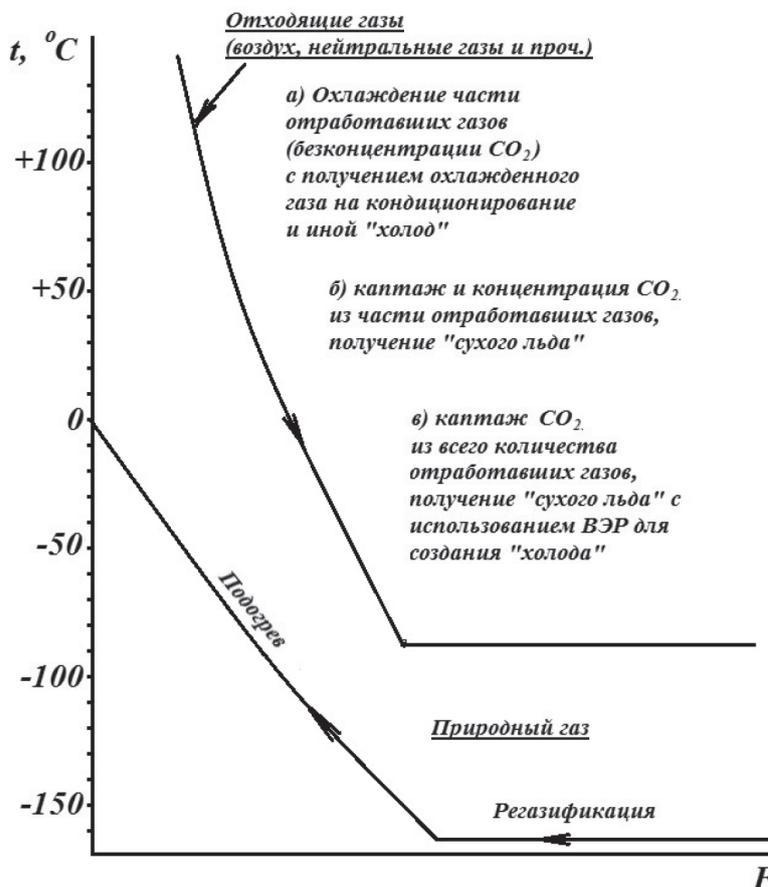


Рис. 1. Изменение температур в элементах систем топливоподготовки СПГ и системах получения сухого льда

1. Охлаждение части отработавших газов — продуктов сгорания СПГ без концентрации диоксида углерода для получения его твердой фазы — сухого льда.

2. Извлечение (каптаж) из продуктов сгорания природного газа бóльшего количества CO_2 путем его концентрации и последующего получения его твердой фазы.

3. Извлечение из продуктов сгорания природного газа всего количества диоксида углерода, концентрации его и последующего получения сухого льда с привлечением (в случае необходимости) дополнительного «холода» за счет использования ВЭР двигателя в абсорбционной холодильной установке.

Для выбора конкретной схемы следует сопоставить «возможности холода» при криогенном состоянии СПГ в системе топливоподготовки с «потребностями в холоде» для производства различного количества твердой фазы CO_2 — сухого льда, а в случае необходимости определить дополнительные возможности производства «холода», используя ВЭР двигателя. Под «возможностями холода» СПГ, которым бункеруется судно, будем понимать количество теплоты (и ее температурные характеристики), которое необходимо подвести к природному газу в системе топливоподготовки от хранения топлива до его подачи в двигатель. Поскольку природный газ более чем на 95 % состоит из метана (CH_4), то свойства СПГ будем рассматривать как свойства метана. СПГ может поступать и храниться на судне при криогенных параметрах [10] – [14]: температуре $t_{\text{хр}} \approx -162$ °С, плотности $\rho = 0,415$ кг/л (дизельное топливо — 0,86 кг/л), а иногда — при давлении примерно 0,6 МПа и соответствующей температуре кипения. В зависимости от условий ввода природного газа в газодизель система топливоподготовки должна предусматривать следующие величины давлений газа:

- в случае внешнего смесеобразования — 0,2 ... 0,4 МПа;
- при внутреннем смесеобразовании — 20 ... 25 МПа;
- для четырехтактных газодизелей требуемое давление газа не превышает 1,0 МПа

[4], [7].

Количество теплоты, необходимой для подвода к СПГ с целью его регазификации и подогрева до температуры ввода газа в газодизель в расчете на 1 кг метана (СПГ), вычисляется по формуле

$$|q| = i_1 - i'_1, \quad (1)$$

где i'_1 — энтальпия жидкого метана при температуре и давлении хранения в криогенной емкости; i_1 — энтальпия перегретого пара (газовой фазы) — метана, подаваемого в газодизель при соответствующем давлении.

Основываясь на данных [11] – [14], можно установить, что для подготовки СПГ к сжиганию в тепловом двигателе необходимо подведение количества теплоты $q_{\text{СПГ}} = 750 \dots 800$ кДж/кг СПГ (при давлении газа 0,5 ... 0,6 МПа и соответствующих температурах, причем почти 60 % (59,6 % и т. д.), необходимой для подготовки метана для газодизеля, требуется только для регазификации при криогенных температурах ($r/|q|$). Эта величина и может быть названа хладопотенциал СПГ.

Способы получения углекислоты и её параметры. Углекислый газ CO_2 , в зависимости от температуры и давления, может находиться в газообразной, жидкой и твердой фазах. Диаграмма фазового равновесия CO_2 представлена на рис. 2.

Линии фазового равновесия делят всю область диаграммы на три части: области твердой, жидкой и газообразной фаз. В тройной точке в динамическом равновесии сосуществуют все три фазы. Переход из газообразной фазы в жидкую называется *конденсацией*, из жидкой в твердую — *затвердеванием*, а из газообразной в твердую — *десублимацией*.

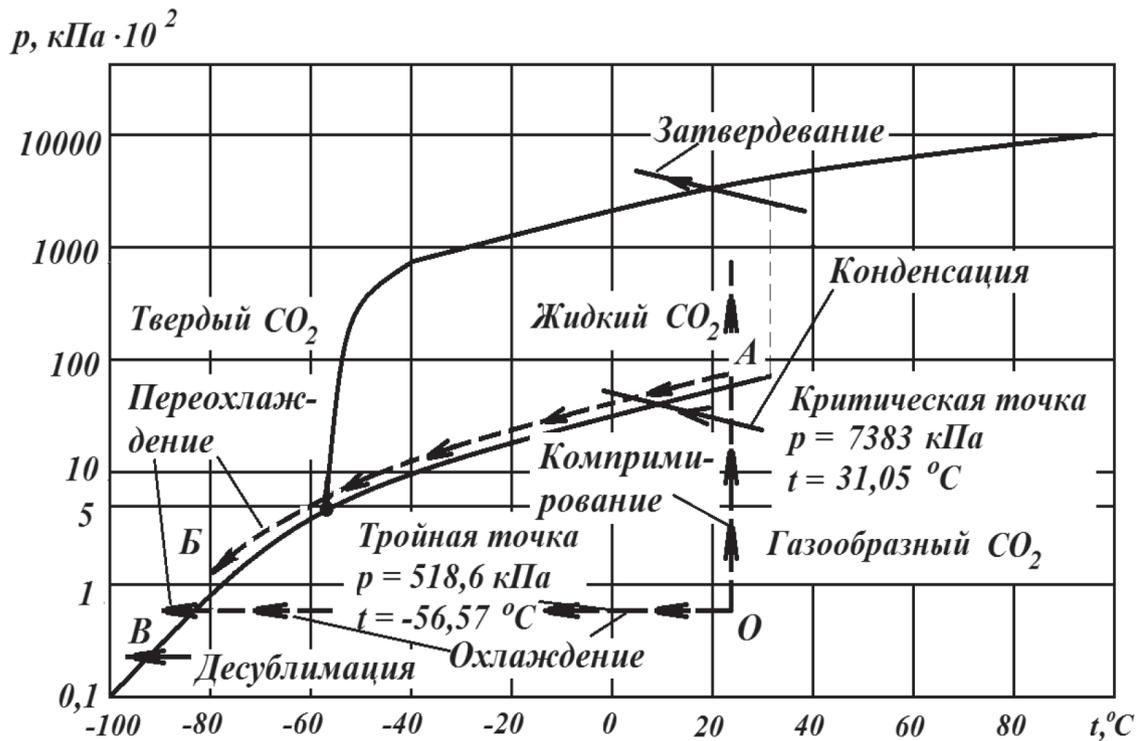


Рис. 2. Диаграмма фазового равновесия $\text{CO}_2, p = f(t)$

Традиционные схемы получения углекислоты (CO_2 — жидкость) из продуктов сгорания предусматривают выделение газообразной фазы CO_2 с последующей ее конденсацией. Точка *A* характеризует традиционные параметры хранения жидкой фазы — углекислоты (например, в баллонах при $t = 20$ °С, $p = 5,8 - 6,0$ МПа). В случаях получения газовой фазы CO_2 или твердой фазы — сухого льда — углекислоту подвергают дросселированию — значительному снижению давления. Процесс сопровождается дроссель-эффектом — снижением температуры [14]. В ряде случаев сухой лед получают «вымораживанием» в процессе охлаждения воды, сопровождаемым охлаждением газа и десублимацией. Количество теплоты, необходимой для охлаждения газообразного CO_2 от стандартных физических условий ($p = 760$ мм рт. ст., $t = 20$ °С) до начала сублимации, составит

$$\Delta i = i_{20} - r = 651,2 - 596,5 = 54,7 \text{ кДж}/(\text{кг } \text{CO}_2) \approx 55 \text{ кДж}/(\text{кг } \text{CO}_2),$$

а для производства 1 кг сухого льда необходим отвод 651,2 кДж теплоты (удельная холодопроизводительность — кДж/(кг CO_2)). Количество CO_2 (кг), образовавшегося при сжигании 1 кг топлива, показывает величина безразмерного конверсионного фактора C_F [1], [2] (для СПГ $C_F = 2,75$ минимальное по сравнению с другими углеводородными топливами). Таким образом, «потребности в холоде» (в расчете на 1 кг сгоревшего СПГ) для получения сухого льда из продуктов сгорания определится как произведение удельной холодопроизводительности на безразмерный конверсионный фактор C_F и составит

$$q_{\text{СПГ}} = q_{\text{CO}_2} \cdot C_F = 650 \cdot 2,75 = 1787,5 \text{ кДж}/(\text{кг СПГ}).$$

Совмещенные характеристики процессов регазификации СПГ и подогрева природного газа для подачи его в газодизель и процессов получения сухого льда из газообразного диоксида углерода, представленные на рис. 3, показывают принципиальную возможность использования криогенного потенциала СПГ для получения сухого льда из продуктов сгорания СПГ.

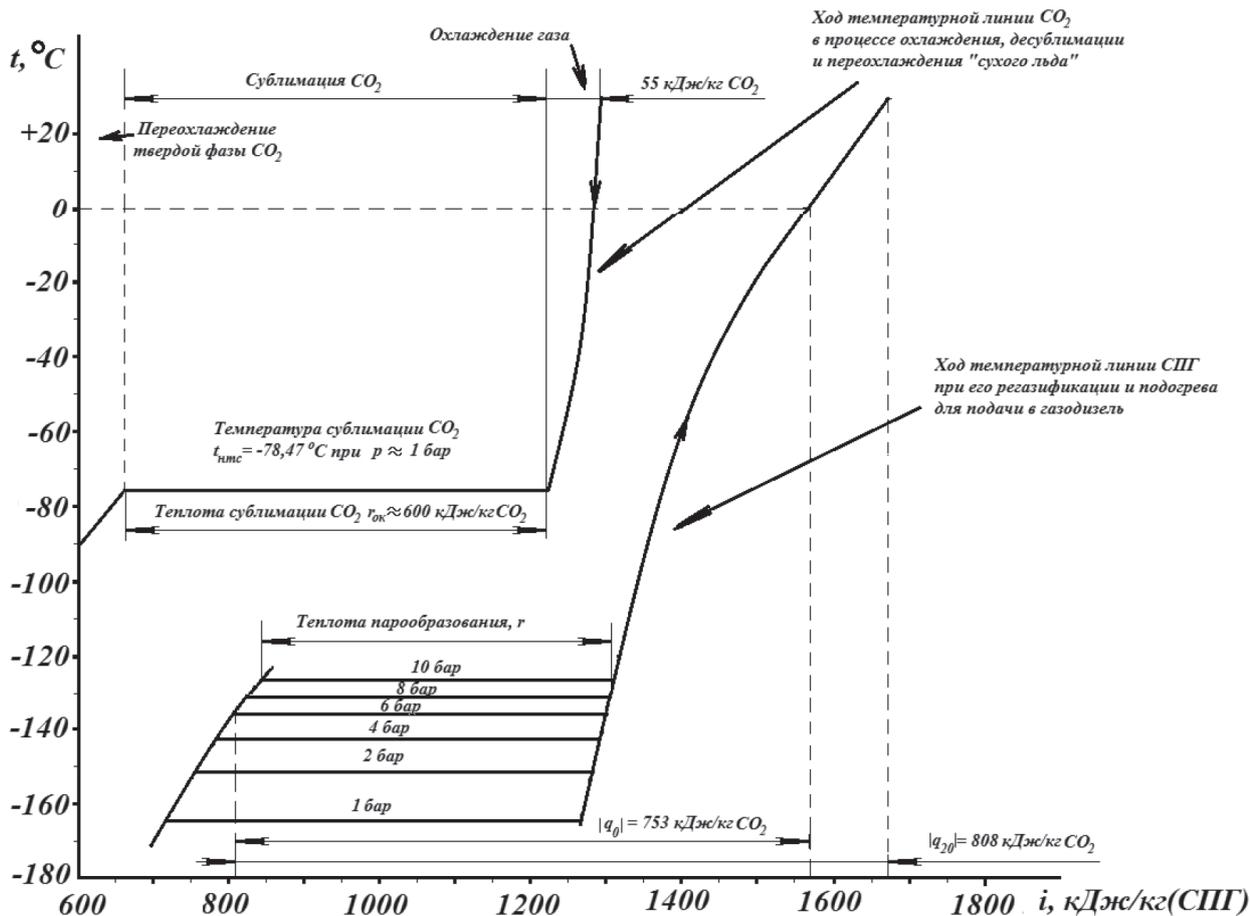


Рис. 3. Характеристики температурного напора в процессах регазификации СПГ и получение сухого льда (линия охлаждения диоксида углерода условно сдвинута по оси энтальпий от начала оси координат)

«Потребность в холоде» для охлаждения продуктов сгорания от температуры $t_1 \approx 250$ °С (после различных схем использования ВЭР_{газ} для когенерации и тригенерации) до температуры десублимации CO_2 $t_2 = -78,47$ °С рассчитывается по формуле

$$q^{\text{пр.сгор}} = L_{\text{действ}}^{\text{пр.сгор}} c_p (t_2 - t_1) = (8 \dots 26) \cdot 1 \cdot (250 + 78,47) \approx (2600 \dots 8580) \text{ (кДж/(кг СПГ))}. \quad (2)$$

Величина действительного количества продуктов сгорания 1 кг метана $L_{\text{действ}}^{\text{пр.сгор}}$, определяемая во многом коэффициентом избытка воздуха ($\alpha \approx 1,1$ для котельных установок, $\alpha \approx 1,8 \dots 2,1$ — для дизельных ДВС и большее значение — для ГТУ), может быть вычислена из соответствующих стехиометрических соотношений.

При организации охлаждения отработавших газов до температуры окружающей среды ($t \approx 21,5$ °С), например, осуществления «мокрого выхлопа» водой, потребности в «холоде» охлаждением до температуры десублимации существенно снизятся:

$$q^{\text{пр.сгор}} = (8 \dots 26) \cdot 1 \cdot (21,5 + 78,47) \approx (800 \dots 2600) \text{ (кДж/(кг СПГ))}. \quad (3)$$

При этом «потребности в холоде» снижаются не только за счет уменьшения перепада температур, но и за счет поглощения из них паров воды — осушения продуктов сгорания.

Инновационные схемы использования хладопотенциала СПГ для получения сухого льда. Для сопоставления «возможностей» и «потребности в холоде» для получения сухого льда из продуктов сгорания СПГ составим тепловые балансы для нескольких схем.

Схема 1. Охлаждение части отработавших газов с «вымораживанием» CO_2 :

$$q_{\text{часть}}^{\text{пр.сгор}} = (L_{\text{действ}}^{\text{пр.сгор}} c_p \Delta t + r_{\text{CO}_2} L_{\text{CO}_2}) g, \quad (4)$$

где $q_{\text{часть}}^{\text{пр.сгор}}$ — количество теплоты, необходимой для охлаждения части продуктов сгорания, кДж/(кг СПГ); r_{CO_2} — теплота сублимации диоксида углерода, кДж/(кг CO_2); $L_{\text{действ}}^{\text{пр.сгор}}$, L_{CO_2} — действительное количество продуктов сгорания и количество CO_2 (кг) в расчете на сгорание 1 кг метана, кг/(кг СПГ); c_p — массовая изобарная теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(кг·К); g — массовая доля продуктов сгорания, подвергаемая охлаждению с целью получения сухого льда; Δt — температурный напор между температурой продуктов сгорания и температурой десублимации CO_2 .

Из последней формулы может быть вычислена доля продуктов сгорания, подвергаемая охлаждению с целью получения сухого льда без использования каких-либо схем концентрации CO_2 и без охлаждения остальных компонентов продуктов сгорания.

Схема 2. Извлечение (каптаж) и концентрация CO_2 из части отработавших газов с последующим получением сухого льда:

$$q_{\text{СПГ}} = q_{\text{CO}_2} \cdot C_F \cdot g, \quad (5)$$

где $q_{\text{СПГ}}$ — «возможности холода» СПГ, кДж/(кг СПГ); q_{CO_2} — удельная холодопроизводительность CO_2 , кДж/(кг CO_2); C_F — безразмерный конверсионный фактор, кг CO_2 /кг СПГ; g — массовая доля продуктов сгорания, подвергаемая каптажу.

Схема 3. Извлечение (каптаж) и концентрация CO_2 из всего количества отработавших газов с последующим получением сухого льда не только за счет хладопотенциала СПГ, но и с привлечением «холода» от ВЭР двигателя в условиях тригенерации. В этом случае тепловой баланс определится как

$$q_{\text{СПГ}} + q_{\text{ВЭР}}^{\text{тригенер}} = C_F q_{\text{CO}_2}, \quad (6)$$

где $q_{\text{ВЭР}}^{\text{тригенер}}$ — удельное (на 1 кг СПГ) количество «холода», получаемого за счет использования ВЭР тепловых двигателей в схемах абсорбционных холодильных установок.

Как известно, в реальных процессах «возможности» оказываются меньше, а «потребности» — больше, чем для идеальных процессов. Эти факторы могут быть учтены введением специального коэффициента использования $\xi = 0,7 \dots 0,9$ (отношение «возможностей» к «потребностям»). Сопоставление потенциала «холода» СПГ (возможности) с потребностями в «холоде» для получения сухого льда показывает нецелесообразность полного извлечения CO_2 из отработавших газов теплового двигателя судна из-за недостаточности хладопотенциала СПГ. Так, для получения 1 кг твердого CO_2 (без переохлаждения) необходимо приблизительно 650 кДж «холода», а для получения твердого CO_2 в количестве 2,75 кг (равное C_F) требуется $q_{\text{CO}_2} = 650 \cdot 2,75 = 1787,5$ кДж «холода», и соотношение «возможностей» и «потребностей» составит

$$\frac{q_{\text{СПГ}}}{q_{\text{CO}_2}} = \frac{750 \dots 800}{1785,7} = 0,4 \dots 0,44, \quad (7)$$

следовательно, «возможности» топливоподготовки СПГ в расчете на 1 кг топлива (СПГ) позволяет десублимировать лишь приблизительно 40 % произведенного при этом диоксида углерода (схема 2). В том случае, если снижение выбросов парниковых газов (CO_2) менее, чем на 40 % окажется достаточным, то целесообразно использовать схему 1. При этом упрощаются требования к элементам системы, ответственным за отделение CO_2 из отработавших газов и концентрации CO_2 . Доля продуктов сгорания, отводимых для «вымораживания», в условиях «мокрого выхлопа» и их осушения составит

$$g = \frac{q_{\text{СПГ}}}{L_{\text{действ}}^{\text{пр.сгор}} c_p \Delta t + r_{\text{CO}_2} L_{\text{CO}_2}} = \frac{750 \dots 800}{(8 \dots 26) \cdot 1 \cdot 100 + 596,5 \cdot 2,75} = 0,18 \dots 0,33. \quad (8)$$

На рис. 4 представлена принципиальная схема обработки части отработавших газов двигателя внутреннего сгорания с целью извлечения из них диоксида углерода с использованием «холода» СПГ.

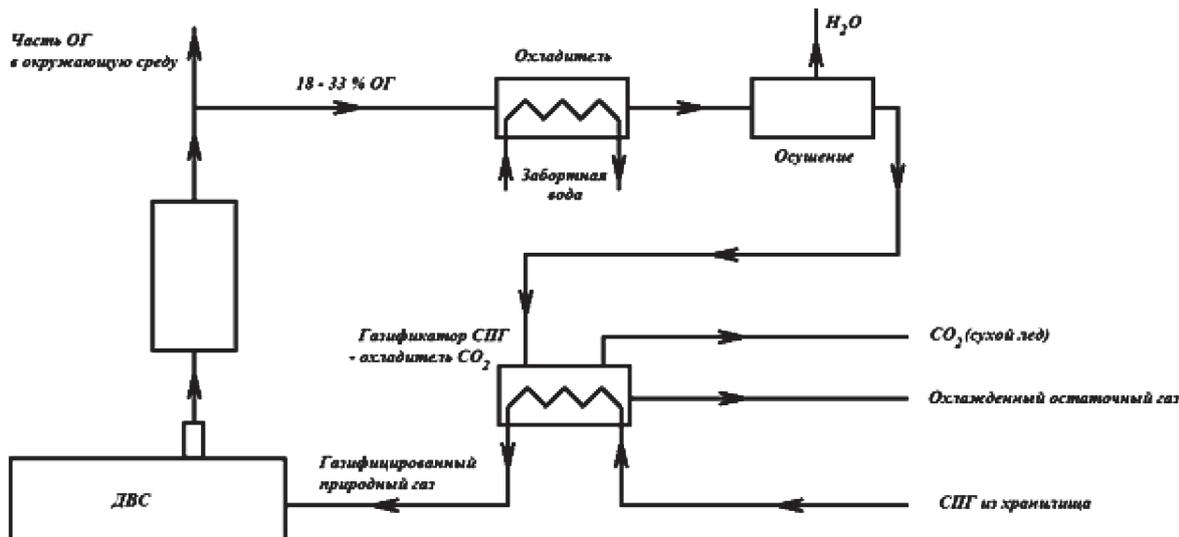


Рис. 4. Схема охлаждения части ОГ двигателя

Часть продуктов сгорания (18 ... 33 %) направляется в теплообменный аппарат, где охлаждается заборной водой, затем газы направляются в осушитель с целью отделения водяных паров. Осушенные продукты сгорания направляются в газификатор, куда одновременно подводится СПГ с целью его подготовки к сжиганию в двигателе. В результате отвода теплоты от продуктов сгорания происходит изменение агрегатного состояния СПГ (газификация) и десублимация CO_2 , в результате которой он переходит в твердую фазу. Оставшиеся охлажденные продукты сгорания, имеющие более низкие значения температур фазовых переходов, направляются на судовые нужды использования холода — кондиционирование, провизионные камеры и проч.

Схема, представленная на рис. 5, позволяет обеспечить извлечение большего количества CO_2 (до 40 %), его каптаж, концентрацию и использование эксергии «холода СПГ» только на получение сухого льда.

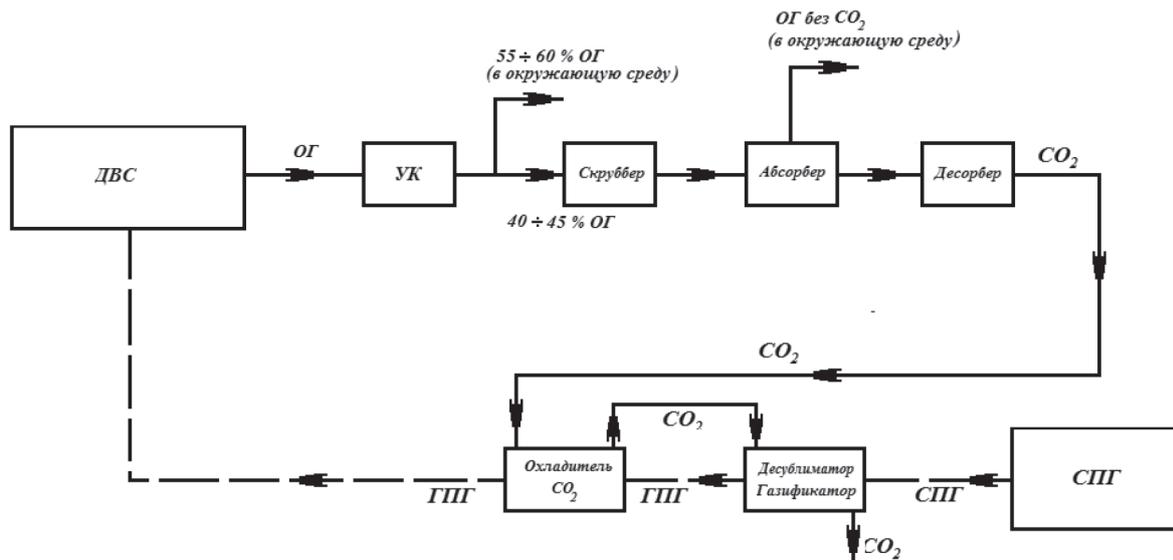


Рис. 5. Схема концентрации CO_2 с последующей десублимацией

Реализация данной схемы обеспечивает использование ВЭР отработавших газов в утилизационном котле (УК) с одновременным снижением их температуры. Дальнейшее охлаждение отработавших газов и их очистка производится в скруббере, откуда газы поступают в абсорбер,

Представленная схема предусматривает многоступенчатое охлаждение отработавших газов:

- в утилизационном котле (использование ВЭР для получения тепловой энергии);
- охлаждение отработавших газов;
- осушение отработавших газов;
- охлаждение отработавших газов с использованием «холода», вырабатываемого абсорбционными холодильными установками, использующими ВЭР теплового двигателя;
- дальнейшее охлаждение с использованием «холода» газифицированного СПГ. На этом этапе одновременно производится подготовка СПГ к сжиганию в двигателе. При этом происходит «вымораживание» (десублимация) CO_2 из смеси газов (азот, кислород, диоксид углерода и пр.) вследствие различия их физических свойств, поскольку процессы изменения агрегатного состояния остальных компонентов смеси происходят при более низких температурах. Охлажденные газы могут направляться на судовые нужды либо выбрасываться в атмосферу (очищенные от CO_2).

Анализ традиционных способов отделения CO_2 и получение его твердой фазы показал необходимость использования серьезной компрессорной техники и низкотемпературной холодильной техники, а также устройств по концентрации диоксида углерода. Предлагаемые нами инновационные решения использования криогенного потенциала СПГ позволяет существенно упростить традиционные технологии получения сухого льда.

Технико-экономическая целесообразность предлагаемых инновационных схем. Кроме традиционных возможностей использования сухой лед может быть применен для криобластинга — очистки поверхностей от загрязнений в условиях судоремонта. В случаях длительного пребывания судна в условиях плавания и накопления сухого льда он может быть захоронен в глубине моря. Твердый диоксид углерода имеет плотность $\rho^{\text{тв}} = 1563 \pm 2 \text{ кг/м}^3$ [11], что примерно в 1,5 раза выше, чем у воды, таким образом, наше предложение позволяет обеспечить его надежное захоронение в случае необходимости.

При непосредственном вымораживании CO_2 из части отработавших газов «потенциал холода» СПГ исключает необходимость в низкотемпературной холодильной технике и устройствах для концентрации диоксида углерода. Основным принципом оценки технико-экономической целесообразности применения любого из предлагаемых методов снижения выбросов с судов парникового газа CO_2 является соотношение между «затратами» и «результатами». «Затраты» включают в основном стоимость дополнительного оборудования, позволяющего уменьшить выбросы CO_2 и оценить их возможно лишь при конкретном рассмотрении каждого проекта. Они практически единовременны и составляют незначительную добавку к стоимости судна. «Результаты» же проявляются во время всего периода эксплуатации судна.

В данном случае может быть реализована новая концепция взаимоотношений — энергосберегающий перформанс-контракт — превращение будущей экономии энергии в сегодняшние капиталовложения. «Результаты» количественно можно измерить, по крайней мере, по четырем следующим направлениям.

1. Снижение экологического ущерба.
2. Ликвидация «упущенной выгоды», (или снижение штрафных санкций) при допуске в зоны с ужесточенными экологическими требованиями.
3. Снижение эксплуатационных затрат при переходе к работе на более дешевое топливо, например, на сжиженный природный газ.
4. Выручка от продажи готового продукта, получаемого вследствие реализации какого-либо предложения (например, сухого льда — твердой фазы диоксида углерода).

Стоимость снижения экологического ущерба можно оценить по стоимости покупки квоты при превышении ее величины, установленной для судов в соответствии с Киотским протоколом.

Эта величина составляет 2,7 ... 3 евро за 1 т CO_2 (апрель 2013 г.).

Если оценить ликвидацию «упущенной выгоды» чрезвычайно сложно, то снижение эксплуатационных затрат на топливо можно получить сопоставлением цен на различные нефтяные и альтернативные топлива, например:

мазут 40 — 9300 ... 14000 руб./т;
 мазуты флотские Ф-5, Ф-12 — 9000 ... 20000 руб./т;
 мазут флотский, вид А — 7200 руб./т;
 мазут флотский, вид Г — 7800 руб./т;
 дизельное топливо — 16600 ... 34500 руб./т;
 СПГ — 8000 ... 15500 руб./т.

Одним из способов снижения выбросов с судов диоксида углерода CO_2 является превращение его в твердую фазу — сухой лед — и последующее использование или захоронение.

Цена диоксида углерода высшего сорта зависит от состояния и формы, в которой он находится. Так, путем запроса в организации, реализующие технические газы [15] – [17], углекислота в баллонах намного дороже, чем в изотермических цистернах, цена гранулированного сухого льда (для криобластинга) из-за дефицитности значительно превышает цену на сухой лед в брикетах. В таблице отражены данные результатов запроса.

Цены на диоксид углерода в России

Цена, руб./т	Жидкая углекислота высшего сорта		Сухой лёд	
	Низкотемпературная (в цистернах) высокого давления	(в баллонах 40 л)	в брикетах	гранулированный
Минимальная	2080	11000	20000	16000
Максимальная	7500	20000	60000	100000
Средняя	4190	16500	40000	58000

Результаты анализа указывают на высокую доходность использования сухого льда.

Заключение

1. Использование СПГ в качестве моторного топлива имеет существенные перспективы, причем система подготовки топлива требует его регазификации и подогрева. В зависимости от условий хранения СПГ величина его хладопотенциала составляет 750 – 800 кДж/кг СПГ, при этом около 60 % его приходится на процесс регазификации при криогенной температуре.

2. Строгие экологические нормы энергетической эффективности требуют снижения выбросов парниковых газов, из которых определяющим является диоксид углерода. Одним из способов снижения его выбросов является превращение газообразного вещества в твердую фазу — сухой лёд. Для этого потребуется охладить углекислый газ до начала сублимации и сублимировать его, что составит около 650 кДж/кг CO_2 при отрицательной температуре.

3. Сопоставление «возможности» хладопотенциала СПГ и потребности в «холоде» для получения сухого льда выявили целесообразность использования своеобразного вторичного энергетического ресурса — хладопотенциала СПГ, что позволило представить несколько вариантов схем получения сухого льда.

4. Исследования позволили определить пределы «возможности» хладопотенциала СПГ для получения сухого льда:

- при охлаждении части продуктов сгорания топлива (18 ... 33 %) без концентрации из них диоксида углерода (каптажа) возможно получить до 0,50 ... 0,90 кг сухого льда на один кг СПГ;

- при включении в схему систем концентрации (каптажа) CO_2 и его извлечении лишь из 40 ... 44 % отработавших газов возможно получить до 1,1 ... 1,2 кг CO_2 /кг СПГ;

- для получения большего количества сухого льда к хладопотенциалу СПГ необходимо добавить «холод», получаемый за счет утилизации ВЭР в абсорбционных холодильных установках.

Каждое из предлагаемых инновационных решений улучшает показатели энергетической эффективности судов не только за счет снижения количества расходуемого топлива (и, следовательно, уменьшения выбросов CO₂), но и за счет превращения диоксида углерода в сухой лед, что оказывается экономически эффективным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов. (MARPOL 1973/78) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1828544> (дата обращения: 24.03.2014).
2. Хасанов И. И. Развитие средств и технологий морского транспорта сжиженных газов: дис. ... канд. техн. наук: 07.00.10 / И. И. Хасанов. — Уфа, 2015. — 160 с.
3. Natgas.info: Liquefied Natural Gas Chain [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.natgas.info/gas-information/what-is-natural-gas/lng> (дата обращения: 20.12.2015).
4. Кириллов Н. Г. Сжиженный природный газ как универсальное моторное топливо XXI века: технологии производства и системы долгосрочного хранения. Газовая промышленность. Серия: Газификация. Природный газ в качестве моторного топлива. Использование газа. — М.: [б. и.], 2002. — 63 с.
5. Чепалис И. В. Проблемы устойчивой работы газодизелей при использовании естественно испарившегося груза метановозов в качестве топлива / И. В. Чепалис // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29) — С. 68–75.
6. Бункеровку судов газом в портах Бельгии обеспечит DNV [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://gasin4m.com/post_1327496380.html (дата обращения: 24.03.2014).
7. Resolution MEPC.203(62). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.imo.org/en/Pages/Default.aspx> (дата обращения: 10.01.2016).
8. Burel F. Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion / F. Burel, R. Taccani, N. Zuliani // Energy. — 2013. — Vol. 57. — Pp. 412–420. DOI:10.1016/j.energy.2013.05.002.
9. Лавренченко Г. К. Энерготехнологические комплексы на природном газе с когенерационной установкой и тепловым насосом для производства электрической энергии, жидкого диоксида углерода и газообразного азота / Г. К. Лавренченко, А. В. Копытин // Технические газы. — 2005. — № 3 (2005). — С. 15–24.
10. Сжиженный природный газ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.sgd.lt/index.php?id=429&L=2> (дата обращения: 21.10.2015).
11. Mokhatab S. Handbook of Liquefied Natural Gas. — 1st Edition / S. Mokhatab, J. Y. Mak, J. V. Valappil, D. A. Wood. — Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2014. — 589 p.
12. Дабахов С. И. Развитие производства жидкого диоксида углерода на ОАО «Завод Уралтехгаз» / С. И. Дабахов, Р. М. Завадских, Н. П. Пермяков // Технические газы. — 2007. — № 3 (2007). — С. 60–64.
13. Лавренченко Г. К. Повышение эффективности производства жидкого диоксида углерода / Г. К. Лавренченко, А. В. Копытин // Технические газы. — 2007. — № 4 (2007). — С. 29–36.
14. Загоруйченко В. А. Теплотехнические расчеты процессов транспорта и регазификации природных газов: справ. пособие / В. А. Загоруйченко, Р. Н. Бикчентай, А. В. Вассерман. — М.: Недра, 1980. — 156 с.
15. Прочая промышленная химия [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ru.all.biz/prochaaya-promyshlennaya-himiya-bgc516> (дата обращения: 01.08.2015).
16. Углекислый газ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ballgaz.ru/co2.html> (дата обращения: 21.08.2015).
17. КИСЛОРОД СЕРВИС ФАРМ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.o2kirov.ru/tehnicheskie-gazy/uglekislyj-gaz> (дата обращения: 21.08.2015).

USES OF A HLADOPOTENTIAL OF THE LIQUEFIED NATURAL GAS FOR DECREASE IN EMISSIONS OF CARBON DIOXIDE HEAT POWER INSTALLATIONS

In article possibilities of reduction of pollution from the ships using liquefied natural gas (LNG) as motor fuel the, decreasing in emission of greenhouse gases are estimated. Ways of transformation of carbon dioxide in to a firm phase — an artificial ice due to use of a «cold potential» of cryogenic fuel are offered.

Prospects of use on vessels LNG as motor fuel are considered, the assessment of size of a «cold potential» of LNG in system of its fuel preparing is made. Needs for “cold” for receiving carbon dioxide LNG from combustion products in a firm phase — an artificial ice are defined. A row of technological schemes of receiving an artificial ice from LNG combustion products was offered. This innovations improve indicators of power efficiency of ships not only due to decrease in amount of the spent fuel is offered (and, therefore, reduction of emissions of CO₂), but also due to transformation of carbon dioxide into an artificial ice, which is economically effective.

Keywords: the cryogenic cold potential, the liquefied natural gas, an artificial ice, regasification, de sublimation, greenhouse gases.

REFERENCES

1. Mezhdunarodnaja konvencija po predotvrashheniju zagrjaznenija s sudov. (MARPOL 1973/78). Web. 24 March 2014 <<http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1828544>>.
2. Hasanov, I. I. Razvitie sredstv i tehnologij morskogo transporta szhizhennyh gazov. Diss. Ufa, 2015.
3. Natgas.info: Liquefied Natural Gas Chain. Web. 20 Dec. 2015 <<http://www.natgas.info/gas-information/what-is-natural-gas/lng>>.
4. Kirillov, N. G. *Szhizhennyj prirodnyj gaz kak universalnoe motornoe toplivo XXI veka: tehnologii proizvodstva i sistemy dolgosrochnogo hranenija. Gazovaja promyshlennost. Serija: Gazifikacija. Prirodnyj gaz v kachestve motornogo topliva. Ispolzovanie gaza*. M.: [b. i.], 2002.
5. Chepalis, I. V. “Problems of stable operation of dual fuel engines by using natural boil-off gas as fuel on lng carriers.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 68–75.
6. Bunkerovku sudov gazom v portah Belgii obespechit DNV. Web. 24 March 2014 <http://gasin4m.com/post_1327496380.html>.
7. Resolution MEPC.203(62). Web. 10 Jan. 2016 <<http://www.imo.org/en/Pages/Default.aspx>>.
8. Burel, F., R. Taccani, and N. Zuliani. “Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion.” *Energy* 57 (2013): 412–420. DOI:10.1016/j.energy.2013.05.002
9. Lavrenchenko, G. K., and A. V. Kopytin. “The energotechnological plants on natural gas with co-generation plant and thermal pump for manufacture of the electric energy, liquid carbon dioxide and gaseose nitrogen.” *Tehnicheskie gazy* 3(2005) (2005): 15–24.
10. Szhizhennyj prirodnyj gaz. Web. 21 Oct. 2015 <<http://www.sgd.lt/index.php?id=429&L=2>>.
11. Mokhatab, S., J. Y. Mak, J. V. Valappil, and D. A. Wood. *Handbook of Liquefied Natural Gas*. 1st Edition. Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2014.
12. Dabahov, S. I., R. M. Zavadsky, and N. P. Permyakov. “Development of manufacture of liquid carbon dioxide by SCJ «Plant Uraltechgaz».” *Tehnicheskie gazy* 3(2007) (2007): 60–64.
13. Lavrenchenko, G. K., and A. V. Kopytin. “Increase of efficiency of liquid carbon dioxide production.” *Tehnicheskie gazy* 4(2007) (2007): 29–36.
14. Zagorujchenko, V. A., R. N. Bikchentaj, and A. V. Vasserman. *Teplotehnicheskie raschety processov transporta i regazifikacii prirodnyh gazov. Spravochnoe posobie*. M.: Nedra, 1980.
15. Prochaja promyshlennaja himija. Web. 1 Aug. 2015 <<http://www.ru.all.biz/prochaya-promyshlennaya-himiya-bgc516>>.
16. Uglekislyj gaz. Web. 21 Aug. 2015 <<http://ballgaz.ru/co2.html>>.
17. Web. 21 Aug. 2015 <<http://www.o2kirov.ru/tehnicheskie-gazy/uglekislyj-gaz>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Безюков Олег Константинович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_sdvs@gumrf.ru
Ерофеев Валентин Леонидович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_sdvs@gumrf.ru
Пряхин Александр Сергеевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
pralser@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bezyukov Oleg Konstantinovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_sdvs@gumrf.ru
Erofeyev Valentin Leonidovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_sdvs@gumrf.ru
Pryakhin Alexander Sergeevich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
pralser@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 18 февраля 2016 г.

УДК 621.436

**В. В. Гаврилов,
В. Ю. Машенко**

**ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЕРАРХИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ**

Ввиду наличия весьма значительного числа факторов, влияющих на техническое состояние дизеля, невозможно создать единую диагностическую систему для выявления в достаточном объёме неисправностей, снижающих его топливную экономичность, поэтому в практике эксплуатации дизеля приходится применять набор, как правило, несогласованных между собой средств диагностирования. В статье описан предложенный авторами подход к созданию иерархического комплекса систем диагностирования дизеля, состоящего из общей и ряда локальных систем. Охарактеризована взаимная связь этих систем. Работа общей системы диагностирования основана на использовании результатов анализа индикаторных диаграмм, который позволяет ограничить область последующего поиска неисправности дизеля посредством локальных систем. Разработана локальная система диагностирования топливной аппаратуры, основанная на применении виброакустического метода измерений и результатов анализа виброграмм. Обоснован состав структурных и диагностических параметров для реализации общей и локальной систем диагностирования дизеля. Связь между указанными параметрами установлена в виде диагностических математических моделей, которые в данном случае разработаны с использованием метода малых отклонений. Применение предложенного комплекса систем диагностирования в процессе эксплуатации позволит оценить текущее техническое состояние дизеля и дать его прогноз.

Ключевые слова: техническое состояние дизеля, функциональное диагностирование, индикаторная диаграмма, топливная аппаратура, структурные и диагностические параметры, применение виброакустического метода.

Введение

Для обеспечения высоких показателей экономичности, надёжности, экологических показателей, низких затрат на эксплуатацию судовых дизелей требуется применение современных диагностических систем. В условиях эксплуатации особенно важно иметь возможность применять функциональное диагностирование, которое позволяет своевременно выявлять наличие и