

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 629.113

О. К. Безюков,
Е. В. Макарьев,
Махфуд Маад Мохаммед

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА СУДОВОГО ВЫСОКООБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ ЕГО ОХЛАЖДЕНИИ ВОДОЙ И АНТИФРИЗОМ

В статье рассмотрены эрозионно-коррозионные разрушения поверхностей систем охлаждения дизельных двигателей и возможности их снижения применением в качестве теплоносителя антифризов и повышения их температуры. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния воды, антифриза и их температуры на составляющие теплового баланса высокооборотного судового дизеля. Показано, что использование антифриза с температурой 90 °С не нарушает работу судового дизель-генератора ЗЧ12/14,5, ранее рассчитанного на использование в качестве теплоносителя воды при 70 °С. Установлено, что при переходе от охлаждения водой при 70 °С к охлаждению антифризом при 90 °С происходит перераспределение составляющих теплового баланса, небольшое увеличение эффективного КПД дизельного двигателя и сокращение расхода топлива, особенно заметное при нагрузках 25 и 50 %. При этом не были отмечены какие-либо негативные явления, что открывает перспективы повышения температуры антифриза до 100 — 110 °С без проведения существенных конструктивных изменений судовых высокооборотных ДВС.

Ключевые слова: судовые высокооборотные ДВС, эрозионно-коррозионные разрушения, жесткость рабочего процесса, вибрации, охлаждающие жидкости, антифризы, тепловой баланс, ультразвуковые теплорасходомеры.



ФЕДЕРАЛЬНАЯ целевая программа «Национальная технологическая база» и входящая в ее состав подпрограмма «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011 – 2015 гг. дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» предусматривают необходимость производства в России современных высокооборотных дизельных двигателей мощностью от 400 до 4000 кВт, обладающих высокой экономичностью и ресурсными показателями, лимитируемыми в настоящее время, прежде всего, теплонапряженным состоянием и повышенной виброактивностью. От этих негативных факторов в значительной мере зависят тепловые потери, интенсивность образования трещин и эрозионно-коррозионных разрушений омываемых водой поверхностей втулок и блоков цилиндров. В результате в четырехтактных высокооборотных двигателях при наработке 30 – 50 % от расчетной выбраковываются от 20 до 50 % втулок цилиндров из-за повреждений боковых поверхностей в результате эрозии, порождаемой вибрационной кавитацией [1].

Согласно феноменологической модели, предложенной в [2] и [3], процессы эрозионно-коррозионных разрушений в зарубашечном пространстве дизелей зависят от свойств и параметров как деталей остова (амплитуды и частоты колебаний, эрозионной и коррозионной стойкости материалов, напряженно-деформированного и теплового состояния), охлаждающей жидкости (плотности, скорости звука, вязкости, поверхностного натяжения, состава и количества растворенных примесей и ингибиторов, температуры и давления), так и свойств границ раздела поверхностей и жидкости (шероховатости и смачиваемости). Интенсивность образования кавитационных пузырьков (разрывов сплошности) определяет сочетание звукового давления, порождаемого вибрирующими поверхностями (динамический фактор), статического давления охлаждающей жидкости (статический фактор) и давления насыщения (тепловой фактор). Возника-

ющие под воздействием теплового потока и динамических импульсов, вызванных колебаниями втулок, паровые пузырьки в охлаждающей жидкости быстро растут, их объем увеличивается в тысячи раз в течение сотых долей секунды. Достигнув некоторого размера, определяемого интенсивностью теплового потока, свойствами и параметрами охлаждающей жидкости, пузырьки или отрываются от поверхности и, попадая в недогретое ядро потока, полностью или частично конденсируются, или в результате повышения звукового давления захлопываются, вызывая эрозионные разрушения втулок и блоков цилиндров высокооборотных судовых ДВС. Все это увеличивает трудоемкость обслуживания и стоимость ремонта дизелей, непроизводительные простои судов. Поэтому эксплуатация двигателей без применения специальных методов водоподготовки запрещена заводами-изготовителями.

Предпринимаемые в настоящее время усилия по созданию в России форсированных высокооборотных судовых дизельных двигателей типа 12ЧН15/17,5 (ПАО «Звезда») и 12ЧН18/21,5 (ОАО «УДМЗ»), предназначенных, в том числе, для применения на судах, предусматривают необходимость снижения их виброактивности, совершенствование охлаждающих жидкостей, свойства и параметры которых должны обеспечивать минимальные коррозионно-эрозионные разрушения втулок и блоков цилиндров, что, в свою очередь, благоприятно скажется на технико-эксплуатационных и ресурсных показателях двигателей в целом.

В [4] показано, что одним из основных факторов, который в значительной степени определяет силовую нагрузку и уровень вибраций деталей цилиндрико-поршневой группы и шатунов высокооборотных ДВС, является рабочий процесс ДВС, сопровождающийся высокой скоростью нарастания давления в камере сгорания. В [5] приведена индикаторная диаграмма дизельного двигателя 12ЧН18/20 (М482) (рис. 1), иллюстрирующая указанные нестационарные газодинамические процессы.

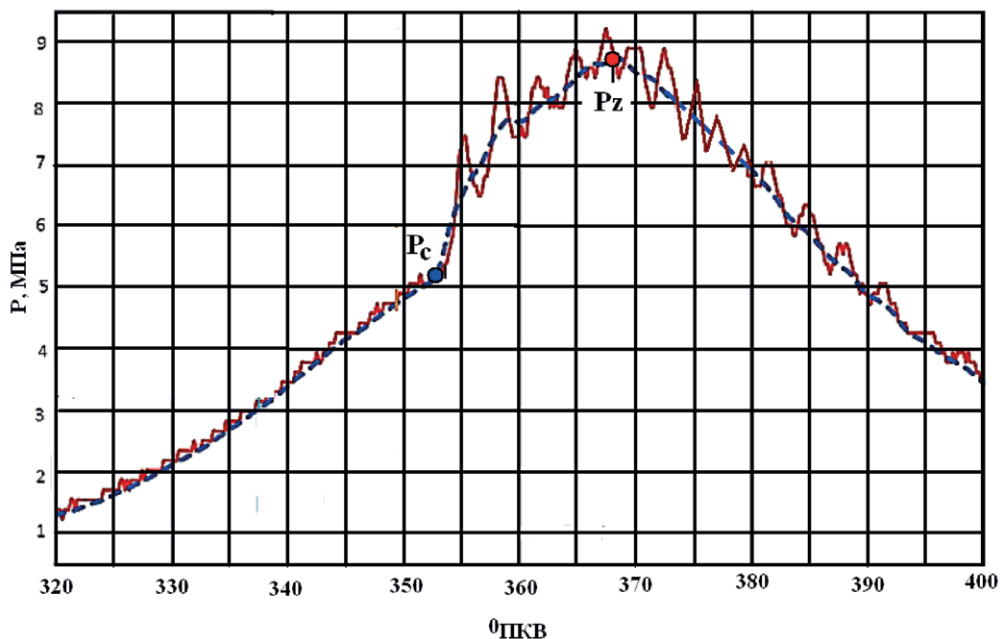


Рис. 1. Индикаторная диаграмма рабочего процесса судового дизельного двигателя 12ЧН18/20 (М482) на номинальном режиме ($g_e = 216$ г/кВт·ч; среднее индикаторное давление 1,184 МПа; степень повышения давления $\lambda = P_z / P_c = 1,67$; скорость нарастания давления $(dp / d\varphi)_{\max} = 0,71$ МПа / град. ПКВ); — — — измеренное давление; - - - — давление, осредненное по времени

Рассмотрим возможности снижения интенсивности вибраций и эрозионно-коррозионных разрушений в судовых высокооборотных дизельных двигателях за счет воздействия на параметры рабочего процесса.

В [6] приведен критерий подобия, позволяющий анализировать влияние газодинамических процессов при сгорании топлива и жесткости конструктивных элементов на интенсивность вибрации (виброперемещение) наружной поверхности δ втулки цилиндра,

$$\delta = \text{const} \cdot \sigma \cdot p_z \cdot \frac{S \cdot D^2}{Z_{vt}}$$

где $\sigma = g_i / g_{ц} = f(\tau_i)$ — показатель динамичности цикла, являющийся функцией периода задержки самовоспламенения топлива; g_i — масса топлива, поступившего в цилиндр двигателя за период задержки воспламенения; $g_{ц}$ — цикловая подача топлива; p_z — максимальное давление цикла; S — ход поршня; D — диаметр втулки цилиндра; Z_{vt} — цилиндрическую жесткость втулки цилиндра.

Указанная зависимость показывает, что одним из эффективных методов уменьшения вибраций ДВС является снижение жесткости рабочего процесса и максимального давления цикла, зависящих, прежде всего, от периода задержки самовоспламенения топлива.

Расчет периода задержки самовоспламенения может быть выполнен по формуле, приведенной в [7]:

$$\tau_i = 0,44 \cdot p_c^{-1,19} \cdot e^{4650/T_c}$$

где p_c и T_c — давление температура в конце процесса сжатия.

Он показывает, что увеличение температуры T_c на 50 °С сокращает период более чем на 50 %. Это приводит к увеличению подогрева воздуха в процессе наполнения и сжатия, что обеспечивает более быструю подготовку топлива к воспламенению и существенное сокращение периода задержки самовоспламенения [8], и, следовательно, к уменьшению количества топлива, впрыскиваемого в цилиндры за этот период. Это приводит к снижению показателя динамичности цикла $\sigma = g_i / g_{ц}$, максимальной скорости нарастания давления в цилиндре $(dp/d\varphi)_{\max}$, характеризующей жесткость рабочего процесса, и виброактивность дизельного двигателя.

Повышение температуры воздушного заряда может быть обеспечено:

- снижением интенсивности охлаждения наддувочного воздуха;
- увеличением температуры охлаждающей жидкости;
- применением присадок к охлаждающей воде, снижающих интенсивность теплообмена в зарубашечном пространстве.

Как показано в [9], подогрев наддувочного воздуха, снижая жесткость рабочего процесса и виброактивность ДВС, оказывает только косвенное влияние на эрозионно-коррозионные процессы в зарубашечном пространстве дизельных двигателей. Поэтому более предпочтительными являются методы, оказывающие влияние как на жесткость рабочего процесса, так и непосредственно на интенсивность эрозионно-коррозионных процессов в зарубашечном пространстве за счет изменения параметров и теплофизических свойств охлаждающих жидкостей.

В [10] показано, что повышение температуры охлаждающей воды, в том числе переход к высокотемпературному охлаждению, требует изменения давления и конструкции системы охлаждения, исключая объемное кипение в зарубашечном пространстве и крышках цилиндров, что может быть реализовано только вновь разрабатываемых двигателях или при их существенной модернизации. Поэтому более предпочтительным является поддержание высоких температур в системе охлаждения путем применения теплоносителей с высокой температурой кипения. К их числу относятся антифризы, обладающие рядом положительных качеств: низкой температурой замерзания (от –30 до –70 °С) и высокими температурами кипения (110 °С) и воспламенения, высокой теплоемкостью и теплопроводностью, малой вязкостью особенно при низких температурах [11] – [13]. Сравнительная характеристика физико-химических свойств воды, моноэтиленгликоля и антифриза марки А-40 приведена в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические свойства воды, моноэтиленгликоля и антифриза марки А-40

Показатель	Физико-химические свойства			
	Вода	Моно-этиленгликоль	Отношение моно-этиленгликоль / вода	Антифриз марки А-40
Молярная масса	18,01	62,07	3,45	–
Плотность при 20 °С, кг/м ³	998,2	1113	1,115	1070
Температура замерзания, К	273	261	1,046	233
Температуры кипения при 0,1 МПа, °С	100	197,7	1,977	108
Теплоемкость при 20 °С, кДж/(кг×°С)	4,184	2,422	0,579	3,29
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,60	0,265	0,438	0,406
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с	1,0	19 – 20	19 – 20	1,28
Теплота испарения, кДж/кг	2,258	0,800	0,354	–
Коэффициент объемного расширения (0 – 100 °С)	0,00046	0,00062	1,348	–

Источник: Тенденции в производстве охлаждающих жидкостей [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=342 (дата обращения: 03.03.2016).

Пониженная температура замерзания позволяет использовать антифризы для охлаждения ДВС судов, работающих на ледоколах, нефтегазодобывающих платформах, судах снабжения платформ, без риска промерзания внутреннего контура охлаждения в случае аварийных и нештатных ситуаций. Антифризы следует применять для охлаждения дизельных двигателей, конвертируемых из автотракторных и изначально спроектированных под низкотемпературные жидкости [14]. Кроме того, антифризы могут найти применение и в качестве теплоносителей в системах утилизации теплоты охлаждающей жидкости, наддувочного воздуха и отработавших газов. Наиболее часто на практике применяются антифризы, содержащие воду и этиленгликоль в объеме 50 – 65 %, т. е. содержание присадки (этиленгликоля) превышает концентрацию в охлаждающих жидкостях традиционных ингибиторов эрозионно-коррозионных разрушений и накипеобразования на один-два порядка, что не может не отразиться на протекающих в системе охлаждения теплофизических процессах. Кроме того, в состав товарных антифризов входят антипенные присадки и ингибиторы коррозии на основе солей органических и неорганических кислот.

Как показали исследования динамики и эрозионного воздействия кавитационных полостей, приведенные в [15] и [16], увеличение плотности и особенно вязкости антифриза по сравнению с водой способно существенно уменьшить кавитационную активность и снизить интенсивность эрозионных разрушений вибрирующих поверхностей систем охлаждения. В результате скорость эрозионных разрушений чугунных образцов при испытаниях на магнитострикторе в воде и в антифризе при 95 °С сокращается более чем в два раза [16]. Следует отметить, что, несмотря на ряд очевидных преимуществ, антифриз всё же имеет и ряд недостатков, по сравнению с пресной водой. Свойства воды как теплоносителя существенно лучше, чем у антифриза, что обуславливает уменьшение теплоотвода при его использовании.

В связи с изложенным, широкое внедрение антифризов в качестве теплоносителя внутреннего контура охлаждения судовых ДВС, не предназначенных изначально для использования низкотемпературных жидкостей, требует проведения специальных испытаний. К ним, прежде всего, относятся исследования:

- возможности перевода дизеля с охлаждения водой на охлаждение антифризом при одновременном повышении температуры до 90 °С;
- изменения составляющих теплового баланса.

Для выполнения этих исследований на кафедре теории и конструкции судовых ДВС ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова на базе судового дизель-генератора 3VD14,5/12-2SRW (3Ч12/14,5) создан специальный экспериментальный стенд [17], основные параметры которого представлены в табл. 2. Его отличительными особенностями являются использование комплекса современных измерительных приборов (ультразвуковые теплорасходомеры, цифровой анемометр, пирометр, промышленный ноутбук), способных работать в условиях повышенных вибраций и температур теплоносителей. На этом стенде были проведены испытания указанного дизельного двигателя по нагрузочной характеристике при его охлаждении пресной водой при температуре 70 ± 2 °С и антифризом при температуре 90 ± 2 °С.

Таблица 2

Основные характеристики дизель-генератора 3VD14,5/12-2SRW

Дизель-генератор 3VD14,5/12-2SRW	
Мощность, кВт	29
Напряжение, В	115
Год производства	1987
Предприятие-производитель	VEB, Лейпциг, Германия
Дизельный двигатель	
Модель	SKL, 3VD14,5/12-2
Тип	Четырехтактный, с водяным охлаждением, без наддува
Номинальная мощность, кВт	38
Номинальная частота вращения, об/мин	1500
Диаметр цилиндра, мм	120
Ход поршня, мм	145
Удельный расход топлива, г/(кВт·ч)	240
Генератор	
Модель	VEB GBCa 225 SIL-900S
Ток, А	278

Полученные результаты были обработаны и представлены в виде графиков (рис. 2 – 3).

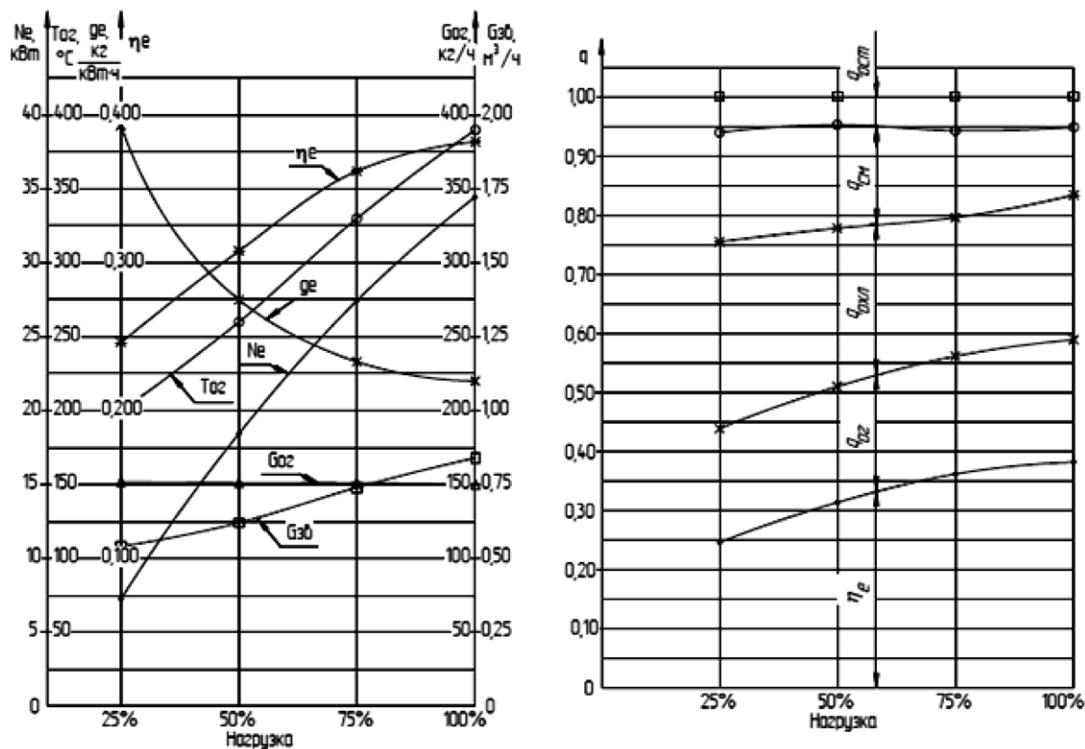


Рис. 2. Нагрузочная характеристика и тепловой баланс дизеля, охлаждаемого водой при 70 °С

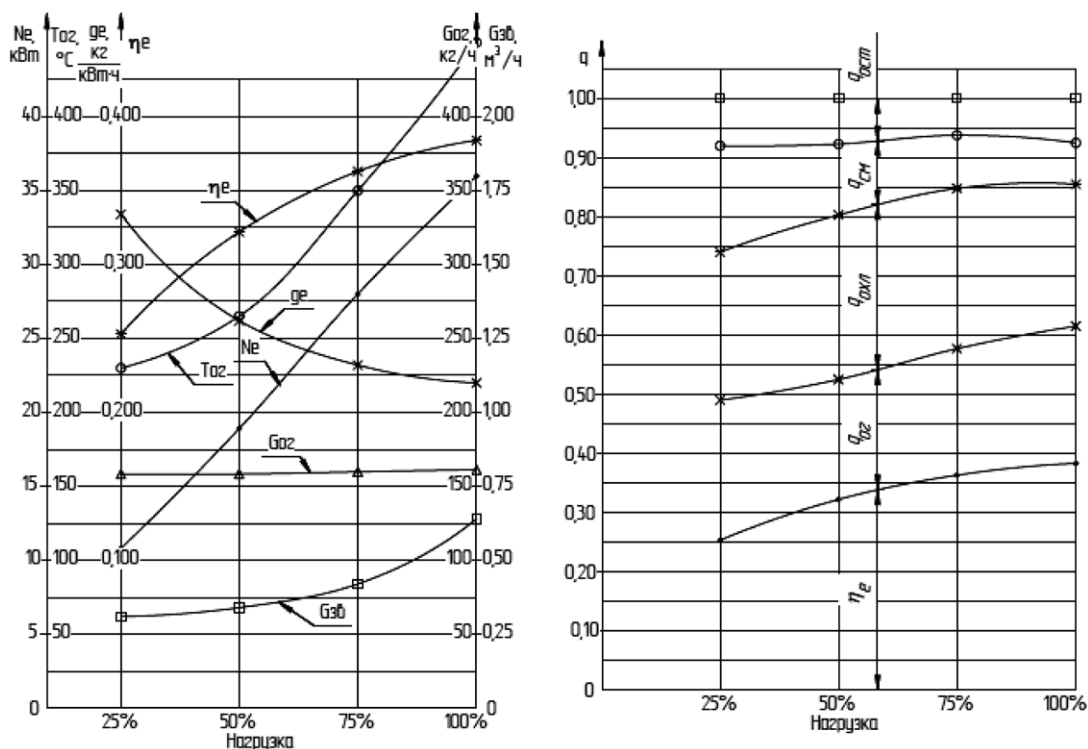


Рис. 3. Нагрузочная характеристика и тепловой баланс дизеля, охлаждаемого антифризом при 90 °С

Результаты эксперимента подтвердили, что при работе с паспортными параметрами двигателя ($T_{\text{охл}} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{\text{м}} = 70 - 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и при использовании в качестве хладагента пресной воды с увеличением нагрузки от 25 % до номинальной происходит увеличение эффективного КПД (от 24 до 37 %). Потери в охлаждающую воду при изменении нагрузки от 25 до 75 % уменьшаются с 32 до 23 %, но при нагрузке 100 % возрастают до 28 %, что, по-видимому, связано с началом поверхностного кипения недогретой воды в верхней части зарубашечного пространства и крышках цилиндров, сопровождающееся ростом интенсивности теплоотдачи. Относительные тепловые потери с отработавшими газами примерно постоянны (около 20 %) во всем диапазоне исследованных нагрузок. При использовании антифриза при 90 °С при росте нагрузки от 25 % до номинального режима происходит увеличение эффективного КПД (от 25,3 % до 38,3 %). Относительные тепловые потери с отработавшими газами также примерно постоянны (около 23 %), однако выше, чем при охлаждении водой при 70 °С. Как абсолютные, так и относительные тепловые потери в антифриз существенно уменьшаются во всем исследованном диапазоне нагрузок.

В результате проведенных испытаний установлено, что при переходе от охлаждения водой при 70 °С к охлаждению антифризом при 90 °С происходит перераспределение составляющих теплового баланса, небольшое увеличение эффективного КПД дизельного двигателя и сокращение расхода топлива, особенно заметное при нагрузках 25 и 50 %. Таким образом, испытания в течение 18 час. показали, что использование антифриза с температурой 90 °С не нарушает работу судового дизель-генератора 3VD14,5/12-2SRW (1500 мин⁻¹), ранее рассчитанного на использование в качестве теплоносителя воды при 70 °С. При этом не были отмечены какие-либо негативные явления (нехарактерный шум, нестабильность частоты вращения, повышение вибраций или температуры смазочного масла). Это открывает перспективы повышения температуры антифриза до 100 — 110 °С без проведения существенных конструктивных изменений судовых высокооборотных ДВС.

Следует особо отметить, что затраты на антифриз как средства оптимизации теплового состояния и уменьшения кавитационно-коррозионных разрушений и накипеобразования на один

двигатель мощностью до 1000 кВт на год пренебрежимо малы — много меньше затрат на топливо, расходуемое СЭУ в течение одних суток. Тем более его применение сопровождается сокращением расхода топлива при нагрузках около 50 % — наиболее характерных для дизель-генераторов. В то же время охлаждающие жидкости, содержащие этиленгликоли, потенциально могут существенно сократить эрозионно-коррозионные разрушения блоков, втулок и крышек цилиндров, наиболее массивных, дорогих и трудоемких в ремонте деталей остова дизельных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Валишин А. Г.* Оценка ресурса цилиндровых втулок ДВС при вибрационной кавитации / А. Г. Валишин // Двигателестроение. — 2008. — № 1. — С. 20–23.
2. *Безюков О. К.* Основы комплексного совершенствования охлаждения судовых дизелей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / О. К. Безюков. — СПб.: СПГУВК, 1996. — 48 с.
3. *Безюков О. К.* Основные положения феноменологической модели эрозионно-коррозионных разрушения втулок цилиндров судовых дизелей / О. К. Безюков // Материалы докладов Всероссийской научно-методической конференции. — СПб.: СПГУВК, 1994. — С. 117–119.
4. *Ионас Я. Б.* К вопросу о влиянии скорости нарастания давления в камере сгорания на силовую нагрузку деталей поршневого двигателя / Я. Б. Ионас // Научные труды НАТИ. — 1970. — № 204. — С. 46–58.
5. *Иванченко А. А.* Выбор математической модели для описания характеристики выгорания топлива при доводке судового дизеля с аккумуляторной топливной системой / А. А. Иванченко, В. А. Макуров, И. А. Щенников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 31–37.
6. *Афанасьева О. В.* Безразмерные комплексы для оценки виброактивности судовых дизелей / О. В. Афанасьева, О. К. Безюков // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 4. — С. 56–59.
7. *Кавтарадзе Р. З.* Теория поршневых двигателей. Специальные главы / Р. З. Кавтарадзе. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — 720 с.
8. *Тимофеев В. Н.* Температурный режим двигателей внутреннего сгорания и его регулирование / В. Н. Тимофеев. — Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2008. — 358 с.
9. *Лудченко Н. И.* Энергетическая эффективность подогрева наддувочного воздуха для ДВС типа ЧН21/21 / Н. И. Лудченко, О. Л. Мартемьянов, В. О. Сайданов [и др.] // Двигателестроение. — 2010. — № 3. — С. 22–25.
10. *Разуваев А. В.* Повышение эффективности систем высокотемпературного охлаждения двигателей / А. В. Разуваев // Двигателестроение. — 1999. — № 2. — С. 9–11.
11. ГОСТ 28084-89. Жидкости охлаждающие низкотемпературные. Общие технические требования. — М.: Стандартинформ, 2007. — 15 с.
12. *Кириченко Н. Б.* Автомобильные эксплуатационные материалы / Н. Б. Кириченко. — М.: Академия, 2014. — 208 с.
13. *Ратнов А. Е.* Улучшение эксплуатационных показателей транспортных двигателей путем совершенствования свойств охлаждающих жидкостей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Е. Ратнов. — СПб.: СПбГПУ, 2005. — 21 с.
14. *Иванов И. Е.* Системы охлаждения поршневых ДВС: монография / И. Е. Иванов, М. Г. Шатров, Т. Ю. Кричевская. — М.: Изд-во МАДИ, 2015. — 168 с.
15. *Безюков О. К.* Исследование динамики и эрозионного воздействия кавитационных полостей / О. К. Безюков, Ю. А. Гривнин, С. П. Зубрилов, В. А. Ларин // Межвузовский сб. «Взаимодействие тел с границами раздела сплошной среды». — Чебоксары, 1985. — С. 21–29.
16. *Красножон П. А.* Оценка влияния экологически безопасных охлаждающих жидкостей на надежность автомобильных двигателей / П. А. Красножон, В. А. Янчеленко // Двигателестроение. — 2014. — № 2. — С. 35–37.
17. *Макарьев Е. В.* Стенд для теплосбалансных испытаний судовых ДВС / Е. В. Макарьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 12–19.

RESEARCH HEAT BALANCE MARINE HIGH-SPEED DIESEL ENGINES, COOLED WATER AND ANTIFREEZE

The article describes the erosion-corrosion fracture surface cooling systems of diesel engines and the possibility of reducing the use as a coolant and antifreeze to increase their temperature. The results of experimental studies of the influence of water, antifreeze and temperature on the components of the heat balance of high-speed marine diesel.

It is shown that the use of antifreeze with a temperature of 90 °C does not disrupt marine diesel generator 3CH12 / 14.5, previously designed for use as a coolant water at 70 °C. It was established that during the transition from the cooling water at 70 °C cooling antifreeze at 90 °C redistribution of heat balance, a slight increase in the effective efficiency of the diesel engine and reduce fuel consumption, especially noticeable at loads of 25 and 50%.

This has not been observed any negative phenomena, which opens prospects for raising the coolant temperature to 100 – 110 °C without substantial design changes of high-speed marine engine.

Keywords: marine internal combustion engines, coolants, antifreeze, heat balance, ultrasonic heat meters.

REFERENCES

1. Valishin, A. G. "Evaluation of Resource of Engines Cylinder Liner Exposed to Vibratory Cavitation." *Dvigatelsestroyeniye* 1 (2008): 20–23.
2. Bezyukov, O. K. *Osnovy kompleksnogo sovershenstvovaniya ohlazhdeniya sudovyh dizelej*: Abstract of Dr. diss. (Tech.). SPb.: SPGUVK, 1996.
3. Bezjukov, O. K. "Osnovnye polozheniya fenomenologicheskoy modeli jerozionno-korroziionnyh razrusheniya vtukov cilindrov sudovyh dizelej." *Materialy dokladov Vserossijskoj nauchno-metodicheskoy konferencii*. SPb.: SPGUVK, 1994: 117–119.
4. Ionas, Ja. B. "K voprosu o vlijanii skorosti narastaniya davleniya v kamere sgoraniya na silovuju nagruzku detalej porshnevoego dvigatelja." *Nauch. tr. NATI* 204 (1970): 46–58.
5. Ivanchenko, A. A., V. A. Makurov, and I. A. Shennikov. "Selecting a mathematical model for describing characteristics of the fuel burnup at operational development marine diesel engine with common rail system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 31–37.
6. Afanasjeva, O. V., and O. K. Bezukov. "Dimensionless groups for the vibroactivity estimation of the ship diesel engines." *Jekspluatsija morskogo transporta* 4 (2008): 56–59.
7. Kavtaradze, R. Z. *Teorija porshnevnyh dvigatelej. Specialnye glavy*. M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2008.
8. Timofeev, V. N. *Temperaturnyj rezhim dvigatelej vnutrennego sgoraniya i ego regulirovanie*. Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta, 2008.
9. Ludchenko, N. I., O. L. Martemyanov, V. O. Saidanov, V. V. Bozhko, L. A. Stolyarchuk, A. V. Razuvaev. "Air Preheating to Boost Energy Efficiency of CH21/21 Engines." *Dvigatelsestroyeniye* 3 (2010): 22–25.
10. Razuvaev, A. V. "Povyshenie jeffektivnosti sistem vysokotemperaturnogo ohlazhdeniya dvigatelej." *Dvigatelsestroenie* 2 (1999): 9–11.
11. Russian Federation. GOST 28084-89. Low-freezing cooling Fluid. General specifications. M.: Standartinform, 2007.
12. Kirichenko, N. B. *Avtomobilnye jekspluatsionnye materialy*. M.: Akademija, 2014.
13. Ratnov, A. E. *Uluchshenie jekspluatsionnyh pokazatelej transportnyh dvigatelej putem sovershenstvovaniya svojstv ohlazhdajushih zhidkostej*: Abstract of PhD diss. (Tech.). SPb.: SPbGPU, 2005.
14. Ivanov, I. E., M. G. Shatrov, and T. Ju. Krichevskaja. *Sistemy ohlazhdeniya porshnevnyh DVS: monografija*. M.: MADI, 2015.
15. Bezjukov, O. K., Ju. A. Grivnin, S. P. Zubrilov, and V. A. Larin. "Issledovanie dinamiki i jerozionnogo vozdeystvija kavitacionnyh polostej." *Mezhvuzovskij sbornik "Vzaimodejstvie tel s granicami razdela sploshnoj sredy"*. Cheboksary, 1985: 21–29.
16. Krasnozhon, P. A., and V. A. Yanchelenko. "Influence of Environmentally-sound coolants on Car Engine Reliability." *Dvigatelsestroyeniye* 2 (2014): 35–37.
17. Makaryev, E. V. "Stand for thermal balance testing of ships internal combustion engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(27) (2014): 12–19.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Безюков Олег Константинович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
okb-nayka@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru
Макарьев Евгений Васильевич —
кандидат технических наук,
ведущий инженер проектов.
ООО «МТ-Групп»
Makariyev-SMF@yandex.ru
Махфуд Мохаммед Маад — аспирант.
Научный руководитель:
Безюков Олег Константинович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
maad_mahfood@yahoo.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bezyukov Oleg Konstantinovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
okb-nayka@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru
Makariyev Evgeny Vasilievich —
PhD, principal project engineer.
ООО «MT-Grupp»
Makariyev-SMF@yandex.ru
Mahfoud Mohammad Maad — postgraduate.
Supervisor:
Bezyukov Oleg Konstantinovich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
maad_mahfood@yahoo.com

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2016 года

УДК 621.431.36:629.5.03-08

Н. Г. Кириллов

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА
И ПЕРВЫЙ ОПЫТ СОЗДАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО СУДНА
НА СЖИЖЕННОМ ПРИРОДНОМ ГАЗЕ**

Статья посвящена анализу решения проблем при создании первого российского судна, работающего на сжиженном природном газе. Проанализированы современные экологические требования к морским и речным судам. Рассмотрено влияние водного транспорта на экологию крупных портов, в частности, Санкт-Петербурга. Сделан вывод о необходимости применения природного газа в качестве моторного топлива для судовых двигателей. Изложены уникальные отечественные технологии по переводу судовых дизелей на двухтопливный режим и использованию быстростъемных криогенных емкостей СПГ. Приведены результаты ходовых натурных испытаний судна-газохода с использованием сжиженного природного газа в качестве моторного топлива. В ходе испытаний при работе на двухтопливном режиме судовой энергетической установки был достигнут коэффициент замещения дизельного топлива 70 % (30 % — дизельное топливо, 70 % — сжиженный природный газ). Теоретические работы и натурные испытания первого отечественного судна на сжиженном природном газе проводились под научным руководством автора. Полученный опыт может дать уже в ближайшее время мощный толчок отечественным судостроителям к созданию высокоэкономичных и экологических судов речного и смешанного плавания, а России стать одним из мировых лидеров по применению СПГ на водном транспорте.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, компримированный природный газ, судовая энергетическая установка, газодизель, судно-газоход, емкость СПГ.

**Экологические проблемы эксплуатации водного транспорта
в России и Санкт-Петербурге**

Одним из проявлений перехода развитых стран мира на новый технологический уровень является стремительно растущее применение альтернативных видов моторного топлива, среди которых наиболее перспективным является природный газ. Изначально применение природного газа в качестве моторного топлива на транспортных средствах преследовало технико-эконо-