

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.436

В. А. Жуков,
д-р техн. наук, доц.

ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

OUTLOOK OF IMPROVING OF SHIP DIESEL ENGINE'S COOLING SYSTEM

Статья посвящена перспективным направлениям модернизации систем охлаждения дизельных двигателей, входящих в состав судовых энергетических установок. Необходимость предлагаемых модернизаций обусловлена ростом тепловых нагрузок на детали цилиндропоршневой группы, вызванной форсированием двигателей, повышением ресурсных и экологических требований, предъявляемым к судовым энергетическим установкам. В статье предложены и обоснованы такие направления модернизации систем охлаждения, как переход на высокотемпературное охлаждение, регулирование свойств охлаждающей жидкости, совершенствование автоматического регулирования параметров охлаждения, связанное с управлением параметрами систем охлаждения и газотурбинного наддува. Определена совокупность мероприятий, необходимых для проведения модернизации. Представлены перспективные схемы систем охлаждения судовых дизельных двигателей, описаны принципы их действия, предложены конструкции основных элементов модернизированных систем. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований и эксплуатационных испытаний подтверждают, что модернизация систем охлаждения двигателей по предложенным направлениям позволят повысить экономичность, надежность и экологическую безопасность судовых энергетических установок.

The article is devoted to main directions of modernization of cooling system of ship diesel engines. The necessity of this modernization is conditioned by increase of heat loading on parts of cylinder-piston group in consequence of forcing of diesel engines and growth of reliability and ecological requirement for ship's power plant. In the article such directions of modernization as high temperature cooling, improving of automatic regulation of cooling parameters, connected control of cooling and supercharging parameters and correction of cooling liquid's properties are offered and argued. Totality of action, which is necessary for modernization is determined. In the article schemes of perspective cooling systems for ship diesel engines and design of it's elements were presented. The principles of function for these systems are described. Results of theoretical and experimental investigations and exploitation test confirms that modernization of cooling system of ship diesel engines on offered directions will provide increase of economical, reliability and ecological indexes of ship's power plant.

Ключевые слова: судовой дизель, система охлаждения, высокотемпературное охлаждение, наддув, охлаждающая жидкость, автоматическое регулирование.

Key words: ship diesel engines, cooling system, high temperature cooling, supercharging, cooling liquid, properties, automatic regulation.



ОСНОВНЫМИ тенденциями развития судовых энергетических установок (СЭУ) различного назначения, основу которых составляют дизельные двигатели, являются повышение топливной экономичности и надежности при удовлетворении экологических требований, устанавливаемых нормативами ИМО.

Повышение экономичности СЭУ обеспечивается, главным образом, за счет снижения удельного эффективного расхода топлива главных и вспомогательных двигателей путем повышения давления наддува p_k (до 0,6 МПа) и среднего эффективного давления рабочего цикла p_e двигателей (до 3,0 МПа) [1], что приводит к повышению тепловых и механических нагрузок на детали и узлы двигателя. Обеспечение надежной работы двигателя возможно лишь при условии поддержания безопасного, с точки зрения механических свойств конструкционных

материалов и смазывающих свойств моторного масла, температурного уровня деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ). Температурное состояние деталей ЦПГ дизеля оказывает существенное влияние на характер протекания рабочего цикла, а, следовательно, и на индикаторные и эффективные показатели, на экономичность работы двигателя. Температурное состояние деталей ЦПГ определяется функционированием системы охлаждения (СО) двигателя и степенью ее совершенства.

Модернизация СО является обязательным условием форсирования главных и вспомогательных судовых дизелей. Системы охлаждения современных и перспективных судовых дизелей должны обеспечивать оптимальное и стабильное тепловое состояние деталей и узлов. Оптимальным следует считать такой температурный уровень, при котором материалы деталей сохраняют свои прочностные свойства, моторные масла сохраняют высокую смазывающую и несущую способность, а потери теплоты через систему охлаждения минимальны. В судовых дизелях за редким исключением применяются жидкостные СО, обеспечивающие теплоотвод требуемой интенсивности и обладающие возможностью гибкого регулирования теплового состояния ДВС. Исследования процессов переноса теплоты от рабочего тела в цилиндре двигателя к охлаждающей жидкости в системе охлаждения [2], [3] показали, что эффективные показатели двигателя могут быть повышены за счет сокращения тепловых потерь при переходе на высокотемпературное охлаждение (ВТО).

Переход на ВТО обеспечивает наиболее благоприятные условия для протекания рабочего цикла дизеля и улучшения его индикаторных показателей на частичных нагрузках за счет повышения температуры стенок камеры сгорания и сокращения периода задержки воспламенения; повышение механического КПД дизеля во всем диапазоне нагрузок за счет уменьшения вязкости масла на зеркале цилиндра; перераспределение составляющих теплового баланса ДВС в направлении роста доли теплоты, превращаемой в механическую работу, и величины потерь теплоты с отработавшими газами с одновременным уменьшением относительных отвода теплоты в охлаждающую жидкость, что расширяет возможности утилизации энергии в системе газотурбинного наддува и дает возможность уменьшить массу и габариты теплообменных аппаратов систем смазки и охлаждения двигателя; стабилизацию температурных полей деталей ЦПГ, что, несмотря на повышение их средней температуры, приводит к снижению термических напряжений в деталях ЦПГ.

При этом следует учитывать, что переход на ВТО предъявляет повышенные требования к качеству регулирования теплового состояния двигателя, так как нарушение требуемых режимов охлаждения неизбежно приводит к перегреву двигателя и резкому снижению ресурсных и экономических показателей. Двигатель внутреннего сгорания как объект регулирования по тепловому состоянию необходимо рассматривать как многофакторный, многопараметрический, динамический, стохастический объект, управление которым требует новых подходов и методов, примеры которых представлены в работах [4], [5].

Процессы теплоотвода в жидкостных СО сопровождаются кавитационно-коррозионными разрушениями элементов систем и образованием отложений на охлаждаемых поверхностях. С повышением уровня форсированности двигателя и ростом тепловых и механических нагрузок интенсивность указанных процессов возрастает. Эти процессы крайне негативно сказываются на надежности и эффективности ДВС. Для предотвращения нарушения режимов охлаждения необходимо совершенствовать эксплуатационные свойства охлаждающих жидкостей и обеспечивать их требуемое качество в процессе эксплуатации.

Перспективы совершенствования жидкостных СО судовых дизелей связаны с решением взаимосвязанных задач, таких как:

- 1) определение параметров охлаждения, оказывающих наиболее существенное влияние на надежность и эффективность работы двигателя;
- 2) обоснованный выбор параметров охлаждения для различных скоростных и нагрузочных режимов двигателя;
- 3) совершенствование систем автоматического регулирования теплового состояния ДВС, и связанного управления параметрами систем охлаждения и наддува;

4) разработка устройств, обеспечивающих автоматический контроль и регулирование параметров охлаждения и наддува.

В работе [6] показано, что функционирование жидкостных СО ДВС характеризуется двумя группами параметров: режимными и водно-химическими.

К первой группе относятся температура охлаждающей жидкости $T_{ож}$, перепад температур в контуре охлаждения ΔT , определяющий плотность теплового потока $q_{охл}$ через охлаждаемые поверхности и количество отводимой через систему охлаждения теплоты $Q_{охл}$. Перспективными для судовых ДВС являются высокотемпературные системы охлаждения (ВТО), в которых температура охлаждающей жидкости превышает 100°C . Исследования влияния ВТО на показатели рабочего цикла дизеля [7] показали, что при незначительном снижении индикаторного КПД за счет роста механического КПД имеет место повышение эффективного КПД и перераспределение тепловых потоков: увеличиваются потери с отработавшими газами и уменьшается доля потерь с охлаждающей жидкостью.

Переход на высокотемпературное охлаждение возможен за счет повышения давления во внутреннем контуре СО, в этом случае может быть реализован принцип поддержания постоянства заданного статического давления путем воздействия на охлаждающую жидкость с помощью сжатого воздуха. Схема такой системы представлена на рис. 1 [8]. При запуске двигателя и в период его прогрева температурный уровень обеспечивается термостатом 8. После прогрева двигателя и его работы на режимах, близких к максимальной мощности, температура охлаждающей жидкости приближается к температуре кипения, о чем на блок 12 управления поступает сигнал от датчика 14. При появлении в полостях охлаждения пристеночного пузырькового кипения на блок управления 12 от оптического датчика 16 поступает сигнал о наличии паровой фазы. На основании полученной информации блок управления вырабатывает управляющий сигнал, подаваемый на клапан 11, через который сжатый воздух от компрессора 10 поступает в герметичный расширительный бак 8, что обеспечивает повышение давления в системе охлаждения и исключает возможность перехода пузырькового кипения в пленочное.

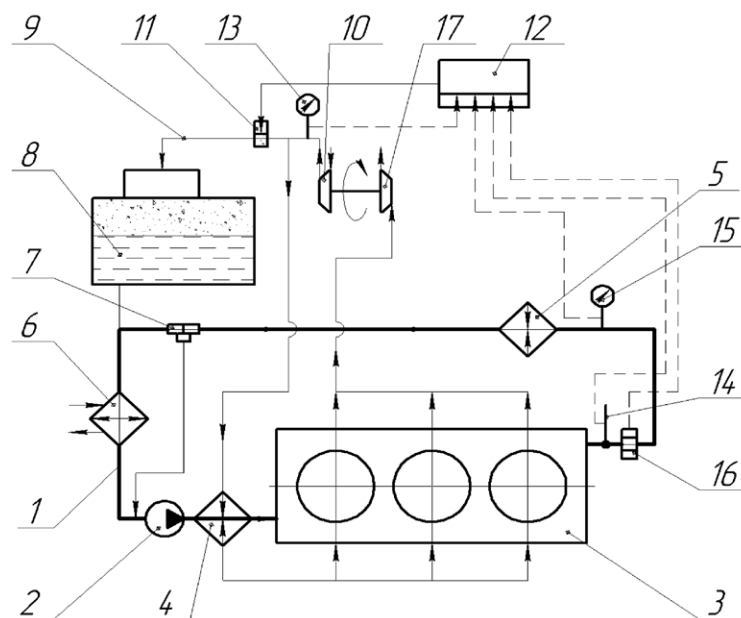


Рис. 1. Схема системы охлаждения с регулированием давления во внутреннем контуре:

- 1 — внутренний контур СО; 2 — циркуляционный насос;
3 — рубашка охлаждения поршневой части; 4 — охладитель наддувочного воздуха;
5 — водомасляный охладитель; 6 — водо-водяной охладитель;
7 — термостат; 8 — расширительный бак; 9 — воздушная магистраль; 10 — компрессор;
11 — редукционный клапан; 12 — блок управления; 13 — датчик давления наддува;
14 — датчик температуры охлаждающей жидкости на выходе двигателя;
15 — датчик давления в системе охлаждения;
16 — оптический датчик присутствия в охлаждающей жидкости паровой фазы; 17 — турбина

Проблеме определения параметров охлаждения, обеспечивающих наилучшие экономические, экологические и ресурсные показатели работы двигателя на различных режимах, посвящена работа [9].

Связанное управление температурой охлаждающей жидкости, давлением и температурой наддувочного воздуха с целью обеспечения наилучших экономических и экологических показателей работы двигателя актуально для современных и перспективных высокофорсированных дизелей и предусматривается современной концепцией охлаждения ДВС [10]. Перспективность совершенствования систем автоматического регулирования температуры наддувочного воздуха в зависимости от режима работы двигателя подтверждается исследованиями, представленными в работах [11], [12].

Для реализации такого подхода предложена [13] модернизированная система газотурбинного наддува, представленная на рис. 2. Основу системы составляет электронный блок управления. В его память занесены значения предпочтительных параметров наддува в виде функциональной зависимости от режима работы двигателя, определяемого частотой вращения и цикловой подачей. Таким образом, значения предпочтительных параметров наддува для произвольного режима рассчитывается программно.

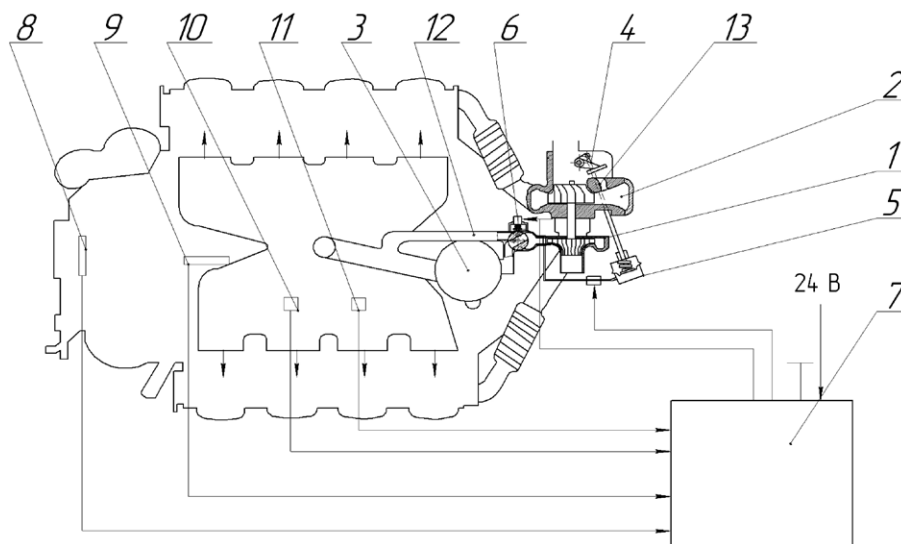


Рис. 2. Схема управления параметрами наддува:

- 1 — компрессор; 2 — турбина; 3 — охладитель наддувочного воздуха;
- 4 — заслонка перепускного клапана; 5 — пневмоэлемент управляющий заслонкой;
- 6 — клапан перепуска наддувочного воздуха мимо ОНВ;
- 7 — электронный блок управления; 8 — датчик частоты вращения;
- 9 — датчик положения рейки топливоподачи;
- 10 — датчик давления наддувочного воздуха на впуске в двигатель;
- 11 — датчик температуры наддувочного воздуха на впуске в двигатель;
- 12 — байпасный канал наддувочного воздуха; 13 — канал перепуска отработавших газов

Система работает следующим образом. Перед пуском двигателя заслонка 4 перепускного канала 13 под действием возвратной пружины управляющего пневмоэлемента находится в закрытом положении, когда все отработавшие газы направляются на рабочее колесо турбины. Клапан перепуска наддувочного воздуха 6 под действием возвратной пружины находится в положении, когда весь наддувочный воздух направляется в охладитель наддувочного воздуха 3. После запуска двигателя на электронный блок управления начинают поступать сигналы с датчиков режима работы двигателя. К ним относятся индуктивный датчик частоты вращения 8 и датчик положения рейки топливного насоса 9, определяющий цикловую подачу топлива. На основе их сигналов электронный блок рассчитывает предпочтительные значения параметров наддувочного воздуха для данного режима работы.

Помимо данных о режиме работы, на электронный блок управления поступают аналоговые сигналы о фактическом значении температуры и давления наддувочного воздуха на входе в цилиндр (датчики 10, 11), где они преобразуются в цифровые значения. Полученные значения сравниваются с расчётными, и в случае отличия выполняется регулирующее воздействие на исполнительные органы. Их функции выполняют перепускной клапан отработавших газов и перепускной клапан наддувочного воздуха. Перепускной клапан отработавших газов (рис. 3) перепускает часть отработавших газов в обход рабочего колеса. Он состоит из заслонки 4, выполняющей непосредственно функцию клапана, и пневмоэлемента 2, управляющего посредством тяги её работой. При поступлении наддувочного воздуха под определённым давлением в надмембранную полость пневмоэлемента 2 эластичная мембрана 7, соединённая с тягой 8, преодолевая усилие пружины 9, перемещается, поворачивая заслонку и открывая перепускной канал 3.

Для устранения зависимости момента открытия заслонки от величины давления наддува в канал подвода наддувочного воздуха к надмембранному пространству устанавливается электромагнитный клапан. Таким образом, регулирование давления наддува осуществляется управляющим сигналом электронного блока управления. Необходимо отметить, что при данной системе регулирования компрессор должен быть несколько большей производительности по сравнению с нерегулируемым турбокомпрессором для гарантированного обеспечения заданных давлений наддува.

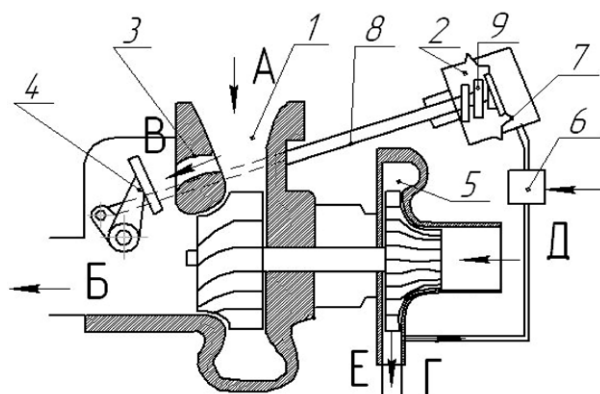


Рис. 3. Перепускной клапан отработавших газов:

- А — подвод ОГ к турбине; Б — отвод ОГ от турбины;
В — перепуск ОГ; Г — подвод управляющего давления наддува;
Е — подача воздуха под давлением; Д — подвод воздуха к компрессору;
1 — сопловой аппарат турбины; 2 — управляющий пневмоэлемент;
3 — перепускной канал; 4 — заслонка; 5 — улитка компрессора; 6 — электромагнитный клапан;
7 — эластичная мембрана; 8 — тяга; 9 — пружина

Основной характеристикой водно-химического режима, определяющей интенсивность кавитационно-коррозионных разрушений, является водородный показатель pH охлаждающей жидкости. Наиболее эффективным способом регулирования водородного показателя охлаждающих жидкостей ДВС является введение присадок в систему охлаждения. Перспективным направлением модернизации является автоматическое обеспечение требуемых свойств охлаждающей жидкости за счет коррекции концентрации содержащихся в ней присадок (рис. 4) [14].

Охлаждающая жидкость отводится от рубашки 5 охлаждения поршневой части двигателя по трубопроводу 19. Термостат 8 направляет жидкость либо на всасывание циркуляционного насоса 4 (при непрогретом двигателе), либо в водо-водяной охладитель 3 (при прогревом двигателя).

Охлаждающая жидкость, подаваемая циркуляционным насосом 4, проходит через охладитель 6 наддувочного воздуха и водомасляный охладитель 7, затем по трубопроводу 1 возвращается в рубашку 5 охлаждения поршневой части. Всасывающая магистраль 10 насоса 4 соединена с расширительным баком 9, к которому присоединена емкость 11, заполненная концентратом присадки. Подача

присадки в контур 1 охлаждения осуществляется через игольчатый клапан 12, который открывается и закрывается по сигналу, поступающему от блока 13 управления. Управляющее воздействие вырабатывается блоком управления на основании информации, получаемой от анализатора 18 химических свойств теплоносителя, и перепада давлений на входе в двигатель и выходе из него, определяемого датчиками 15 и 17, при этом учитывается температура охлаждающей жидкости на входе в двигатель и выходе из него, определяемая датчиками 14 и 16. В анализаторе 18 химических свойств определяются такие свойства жидкости, характеризующие ее химическую агрессивность и склонность к накипеобразованию, как водородный показатель, жесткость, кислородо- и солесодержание.

Перепад давления в рубашке охлаждения позволяет оценить степень деструкции макромолекул водорастворимых полимеров и мицеллярных образований поверхностно-активных веществ, входящих в состав присадок. Управляющее воздействие на дозирующий игольчатый клапан 12 вырабатывается в результате сравнения информации, поступившей в блок 13 управления от датчиков, и заложенных в его память требуемых значений показателей качества охлаждающей жидкости. В качестве анализатора химических свойств охлаждающей жидкости можно использовать приборы «Мультитест ИПЛ-513» или «Мультитест КСЛ-101», позволяющие определять водородный показатель (рН) жидкости, жесткость, общее солесодержание

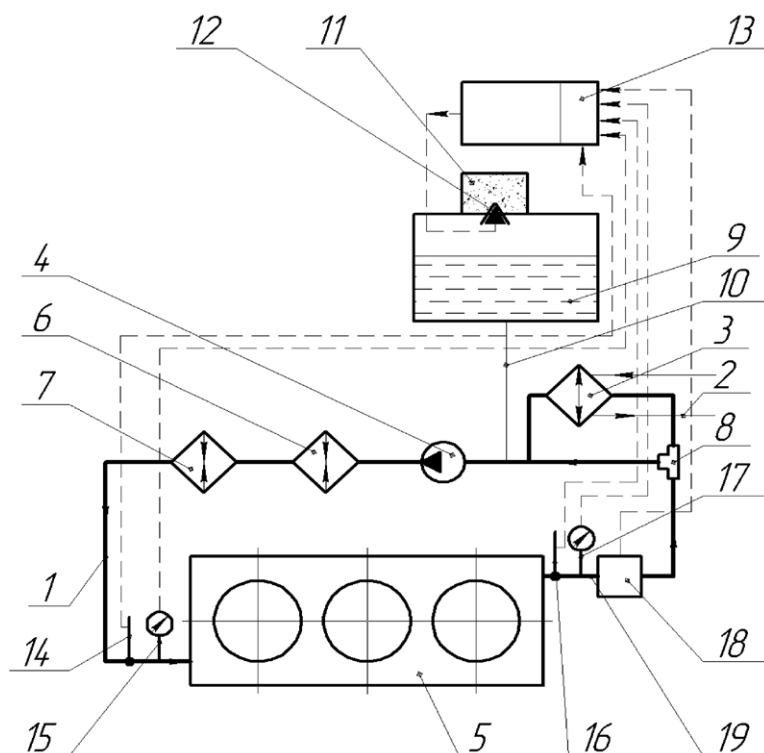


Рис. 4. Система охлаждения с автоматической коррекцией свойств охлаждающей жидкости
1 — замкнутый контур; 2 — разомкнутый контур; 3 — водо-водяной охладитель;
4 — циркуляционный насос; 5 — рубашка охлаждения; 6 — охладитель надувочного воздуха;
7 — водомасляный охладитель; 8 — термостат; 9 — расширительный бак;
10 — всасывающая магистраль насоса; 11 — емкость с концентратом присадки; 12 — игольчатый клапан;
13 — блок управления; 14, 16 — датчики температуры; 15, 17 — датчики давления;
18 — анализатор химических свойств охлаждающей жидкости; 19 — отводящий трубопровод

Таким образом, в предлагаемой системе охлаждения обеспечивается непрерывный и оперативный контроль качества охлаждающей жидкости и, при необходимости, автоматическое восстановление ее эксплуатационных свойств. По сравнению с существующими системами охлаждения предлагаемая система облегчает обслуживание двигателей внутреннего сгорания и повышает их надежность.

В качестве блока управления в предложенных системах можно использовать программируемый микропроцессор, например АТМega8 или PIC16F1823, что позволит регулировать давление в системе охлаждения в зависимости от режима работы двигателя по заложенной в блок управления программе и поступление присадки в систему охлаждения в зависимости от физико-химических свойств охлаждающей жидкости.

Расчетные, лабораторные и стендовые исследования, а также эксплуатационные испытания показали, что предлагаемые технические решения позволяют за счет модернизации системы охлаждения и совершенствования автоматического регулирования параметров охлаждения и наддува обеспечить повышение надежности и экономичности судовых дизелей. Дальнейшие исследования целесообразно посвятить разработке алгоритмов управления для программируемых микропроцессоров.

Список литературы

1. Конкс Г. А. Мировое судовое двигателестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта / Г. А. Конкс, В. А. Лашко. — М.: Машиностроение, 2005.
2. Жуков В. А. Перспективы высокотемпературного охлаждения транспортных ДВС / В. А. Жуков // Автомобильная промышленность. — 2011. — № 5. — С. 7–10.
3. Разуваев А. В. Повышение эффективности энергетических установок / А. В. Разуваев, Е. А. Соколова, Е. А. Разуваева // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 3. — № 1. — С. 150–159.
4. Денисов В. П. Управление системой охлаждения двигателей внутреннего сгорания на основе нечеткого логического вывода / В. П. Денисов, И. И. Матяш, О. О. Мироничева // Вестник СибАДИ. — 2012. — Т. 3. — № 25. — С. 11–17.
5. Дорохов П. А. Теоретическое исследование теплопереноса и распределения теплоты в судовом двигателе внутреннего сгорания / П. А. Дорохов, А. Ф. Дорохов // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. Серия: Морская техника и технология. — 2011. — № 1. — С. 101–104.
6. Безюков О. К. Комплексный подход к выбору конструкции и параметров систем охлаждения транспортных ДВС / О. К. Безюков, В. А. Жуков, М. А. Тарасов // Вестник двигателестроения. — 2003. — № 2. — С. 70–73.
7. Безюков О. К. Совершенствование системы жидкостного охлаждения транспортных ДВС. Двигатели внутреннего сгорания / О. К. Безюков, В. А. Жуков, Е. Н. Николенко // Всеукраинский науч.-техн. журнал. — 2013. — № 1. — С. 56–61.
8. Пат. 2459093 РФ, МПК F01P 5/10. Система охлаждения двигателя внутреннего сгорания / О. К. Безюков, В. А. Жуков. — Опубл. 20.08.2012. — Бюл. № 23. — 7 с.
9. Безюков О. К. Комплексная оптимизация параметров охлаждения судовых энергетических установок / О. К. Безюков, В. А. Жуков // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 1 (13). — С. 51–60.
10. Безюков О. К. Современная концепция регулирования охлаждения судовых дизелей / О. К. Безюков, В. А. Жуков, В. Н. Тимофеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 93–103.
11. Жуков В. А. Модернизация системы газотурбинного наддува конвертированного дизеля / В. А. Жуков, М. С. Курин // Вестник машиностроения. — 2007. — № 3. — С. 17–19.
12. Мошенцев Ю. Л. Возможности регулирования температур теплоносителей в альтернативной системе охлаждения дизельных двигателей магистральных тепловозов / Ю. Л. Мошенцев, А. А. Гогоренко, Д. С. Минчев [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. — 2012. — № 10. — С. 92–97.
13. Пат. 2472950 РФ, МПК F02B 37/16 F02B 37/18 F02B 37/22 F02D 23/00. Система турбонаддува двигателя внутреннего сгорания / В. А. Жуков, М. С. Курин. — Опубл. 20.01.2013. — Бюл. № 2. — 7 с.
14. Патент 2453714 РФ, МПК F01P 5/10. Система охлаждения двигателя внутреннего сгорания / Жуков В. А. — Опубл. 20.06.2012. — Бюл. № 17. — 7 с.