



Исаева Марина Васильевна

**РАЗРАБОТКА ИНВАРИАНТНЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ
КОНТРОЛЯ ТЕПЛОАПРЯЖЕННОСТИ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ
ГРУППЫ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПО КОСВЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ**

05.08.05 – «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Судовые энергетические установки» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Калининградский государственный технический университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Ковальчук Леонид Игнатьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теория и конструкция судовых двигателей внутреннего сгорания» ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова»

Ерофеев Валентин Леонидович

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Судовые двигатели внутреннего сгорания» ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского»

Кучеров Владимир Никанорович

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

Защита состоится _____ 2018 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 307.007.02 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Калининградский государственный технический университет» по адресу: 236022, Калининград, Советский проспект, 1, аудитория 255.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» www.klgtu.ru.

Электронная версия автореферата размещена на официальном сайте ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» www.klgtu.ru « _____ » 2018 г. и на официальном сайте ВАК Министерства образования и науки РФ <http://vak3.ed.gov.ru> « _____ » 2018 г.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Н. Ю. Бугакова

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Надежность современных форсированных дизелей в значительной степени определяется работоспособностью деталей, образующих камеру сгорания. Многочисленные случаи отказов деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) дизелей самых различных назначений заставляют все более тщательно подходить к оценке условий работы этих деталей на стадии проектирования и в эксплуатации. По данным Норвежского классификационного общества, полученным на основе анализа надежности 930 малооборотных дизелей в течение двух лет эксплуатации, 22% повреждений пришлось на детали ЦПГ, причем основной причиной были тепловые перегрузки. По этой причине наличие объективных данных о параметрах, характеризующих теплонапряженность деталей ЦПГ в эксплуатационных условиях, является одним из важных факторов при решении задачи обеспечения надежности судовых дизелей.

Существующие методы контроля за работой дизеля, как правило, не предусматривают непосредственного измерения составляющих тепловой напряженности, т. е. температур и напряжений в стенках деталей ЦПГ. Тепловое состояние дизеля оценивается по косвенным параметрам. Считается, что поддержание этих параметров в определенных пределах должно исключить тепловые перегрузки деталей ЦПГ.

При установлении допустимых значений косвенных параметров, характеризующих тепловую и механическую напряженность деталей ЦПГ на скоростных режимах работы дизеля, исходят из их значений на номинальном режиме. Выполнение этого условия в процессе эксплуатации является гарантией рационального расходования ресурса деталей ЦПГ, заложенного в их конструкцию в процессе проектирования и изготовления двигателя.

Многочисленные экспериментальные исследования показывают на принципиальную возможность достоверной оценки теплового состояния деталей ЦПГ по величине коэффициента избытка воздуха при сгорании α . Установлено, что при нормальном техническом состоянии дизеля на режимах внешней скоростной характеристики теплонапряженность деталей ЦПГ не увеличивается, если значения коэффициента избытка воздуха при сгорании α поддерживаются на уровне номинального режима.

Изложенные обстоятельства свидетельствуют о необходимости и актуальности проведения исследований, направленных на развитие существующих и разработку новых методов контроля теплонапряженности деталей ЦПГ по коэффициенту избытка воздуха при сгорании, как одного из эффективных средств поддержания на заданном уровне тепловых нагрузок на детали ЦПГ судовых дизелей в эксплуатации.

Степень проработанности темы. Различным аспектам научно-методических вопросов контроля теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы посвящены работы отечественных ученых: Б. Я. Гинцбурга, А. К. Костина, Л. А. Иванова, М. К. Овсянникова,

Г. А. Давыдова, В. С. Семенова, Н. Д. Чайнова, В. Г. Заренбина, Н. А. Иващенко и других.

Зарубежные фирмы «MAN-Бурмейстер и Вайн», «Доксфорд» применяют свои параметры для оценки изменения уровня теплонапряженности деталей ЦПГ по мере форсирования двигателей наддувом.

На основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований показано, что по научно-методическим вопросам контроля теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы по косвенным параметрам еще не выработан единый подход, что влияет на уровень отработки принятых для практической реализации методик и достоверность контроля теплонапряженности деталей ЦПГ современных судовых дизелей в эксплуатации по косвенным параметрам.

Проведение исследований по дальнейшему развитию косвенных методов контроля теплонапряженности судовых дизелей должно обеспечить оценку теплового состояния деталей ЦПГ с учетом условий плавания, особенностей и качества протекания рабочих процессов в цилиндрах.

К настоящему времени такой уровень отработки методик контроля теплонапряженности деталей ЦПГ по косвенным параметрам еще не достигнут.

Цель исследования. Разработка экспериментально-теоретических моделей для контроля теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы судовых дизелей по косвенным параметрам с учетом условий плавания и качества протекания рабочих процессов в цилиндрах.

Объект исследования. Цилиндропоршневая группа судовых дизелей.

Предмет исследования. Модели для контроля теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы судовых дизелей по косвенным параметрам.

Поставленная цель достигается последовательным решением нижеследующих задач.

1. Оценка фактических условий работы судовых дизелей и анализ опубликованных методов контроля теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы по косвенным параметрам.
2. Разработка принципов, методов и алгоритмов формирования инвариантных экспериментально-теоретических моделей для функционального диагностирования рабочих процессов в цилиндрах и контроля теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы судовых дизелей по косвенным параметрам.
3. Формирование инвариантных экспериментально-теоретических моделей для функционального диагностирования рабочих процессов в цилиндрах и контроля теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы судовых дизелей по косвенным параметрам.
4. Опытная проверка работоспособности разработанных экспериментально-теоретических моделей.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы экспериментального исследования, численные методы

анализа и линейной алгебры, стандартные возможности расчетных модулей программ MathCAD, MS Excel.

Научная новизна исследования состоит в том, что сформулированы принципы, разработаны методы и алгоритмы формирования инвариантных экспериментально-теоретических моделей, которые позволяют отделять возмущения, возникающие со стороны потребителя, от возмущений, возникающих в двигателе, и в каждом конкретном случае определять предельные тепловые нагрузки на детали ЦПГ в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов с учетом качества процесса сгорания топлива в отдельных цилиндрах.

Теоретическая значимость выполненных исследований состоит в том, что сформулированы принципы и предложены новые методы количественного описания возможных режимов работы судовых дизелей, позволяющие в каждом конкретном случае минимизировать влияние погрешностей измерения информативных параметров на конечный результат решения. При этом в качестве информативных могут быть использованы параметры, контролируемые штатными приборами.

Практическая значимость выполненных в работе исследований состоит в том, что инвариантные экспериментально-теоретические модели сформированы на основе параметров, контролируемых штатными приборами, что позволяет обслуживающему персоналу осуществлять оперативный контроль теплового состояния деталей ЦПГ в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов работы двигателя и с учетом качества процесса сгорания топлива в отдельных цилиндрах.

Внедрение результатов исследования. Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ». Получены справки от судоремонтного предприятия ООО «СРП Преголь» и ЗАО «ВЕСТРЫБФЛОТ» о возможности внедрения и полезности использования результатов диссертационного исследования.

Личный вклад автора. Автором выполнен анализ результатов опубликованных исследований в предметной области, решены задачи по определению численных параметров инвариантных экспериментально-теоретических моделей, дана оценка их работоспособности посредством тестирования на полноразмерных судовых дизелях, разработаны рекомендации по практическому использованию разработанных моделей в судовых условиях.

Достоверность и обоснованность инвариантных экспериментально-теоретических моделей для контроля теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы подтверждается посредством сопоставления опытных и расчетных значений выходных обобщенных параметров моделей (температура отработавших газов и среднее индикаторное давление), гистограммами распределения погрешностей расчета по всему массиву исходных данных, результатами функционального диагностирования рабочих процессов в цилиндрах посредством разработанных моделей на полноразмерных дизелях в лабораторных условиях.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты анализа опубликованных методов контроля теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы по косвенным параметрам;
- принципы, методы и алгоритмы формирования инвариантных экспериментально-теоретических моделей на основе результатов стендовых и эксплуатационных испытаний судовых дизелей;
- инвариантные экспериментально-теоретические модели для функционального диагностирования рабочих процессов и оценки предельных тепловых нагрузок по цилиндрам;
- результаты проверки работоспособности инвариантных экспериментально-теоретических моделей на полноразмерных дизелях.

Апробация работы. Основные материалы исследования были представлены на:

- 15, 16, 17 межвузовских научно-технических конференциях аспирантов, докторантов, соискателей и магистров, секция «Эксплуатация и ремонт судовых энергетических установок» (г. Калининград, 2014, 2015, 2016 гг.);
- II Балтийском морском форуме, секция «Качество и надежность судовых технических средств и портового оборудования», г. Светлогорск, 26-30 мая, 2014 г.;
- III Международном Балтийском морском форуме, секция «Судовые и стационарные энергетические установки», г. Светлогорск, 24-30 мая, 2015 г.;
- IV Международном Балтийском морском форуме, секция «Судовые и стационарные энергетические установки», г. Калининград, БГАРФ, 22-28 мая, 2016 г.;
- V Международном Балтийском морском форуме, секция «Судовые и стационарные энергетические установки», г. Калининград, БГАРФ, 21-27 мая, 2017 г.;
- конференции «Global perspectives in MET: Towards Sustainable, Green and Integrated Maritime Transport», Varna, Bulgaria, 11-13 October, 2017.

Публикации. По теме диссертации опубликовано шестнадцать печатных работ (5,48 п.л./2,78 п.л.), пять из которых в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ; получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа контроля предельных тепловых нагрузок деталей цилиндропоршневой группы многоцилиндровых двигателей по косвенным параметрам».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 146 страниц машинописного текста, который включает 35 рисунков и 10 приложений; список литературных источников из 85 наименований.

Основное содержание работы

Во введении дано обоснование актуальности исследования, кратко изложено содержание глав, определены цель и задачи исследования, сформулированы основные результаты работы, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен анализ фактических режимов работы судовых дизелей; рассмотрено влияние различных эксплуатационных факторов на теплонапряженность деталей цилиндропоршневой группы; дана оценка косвенных методов контроля теплонапряженности деталей ЦПГ в судовых условиях. Показано, что существующие методы контроля теплонапряженности по косвенным параметрам основаны на моделях, не обладающих свойством инвариантности относительно возможных режимов работы, и не учитывают качество протекания рабочих процессов в отдельных цилиндрах, что влияет на достоверность контроля теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы в судовых условиях по косвенным параметрам.

Изложенные обстоятельства предопределили цель и задачи исследования, посредством решения которых цель достигается.

Во второй главе сформулированы принципы, методы и алгоритмы формирования инвариантных экспериментально-теоретических моделей для функционального диагностирования рабочих процессов в цилиндрах и контроля теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы по косвенным параметрам.

Формирование экспериментально-теоретических моделей для функционального диагностирования рабочих процессов в цилиндрах и контроля тепловой напряженности деталей цилиндропоршневой группы судовых дизелей по косвенным параметрам производится в соответствии с нижеследующими принципами.

1. Способность конкретного двигателя с заданным качеством вырабатывать механическую энергию характеризуется полем режимов, допустимых для длительной эксплуатации, под которым понимается часть координатной плоскости $N_e - n$ (эффективная мощность – частота вращения), ограниченная слева и справа вертикалями $n_{min} = const$ и $n_n = const$ (минимальная и номинальная частота вращения); сверху – верхней ограничительной характеристикой; снизу – координатной осью n .

2. Ограниченное таким способом поле включает всю совокупность режимов, определяющих условия функционирования всех элементов цилиндропоршневой группы, т. е. компонентов, подверженных воздействию наибольших тепловых нагрузок.

3. Положение границ описанного поля определяется только свойствами двигателя и не зависит от особенностей потребителя механической энергии, т. е. оно обладает свойством инвариантности относительно возможных режимов работы двигателя.

4. Для количественной оценки условий функционирования деталей цилиндропоршневой группы в исходном состоянии (заведомо исправный

двигатель) на основе входных в рабочий цилиндр и выходных из цилиндра параметров (информативные параметры) необходимо сформировать количественную структуру, которая во всех точках поля давала бы постоянные численные значения, т. е. обладала свойством инвариантности относительно возможных возмущений со стороны потребителя механической энергии.

5. Количественные структуры, обладающие свойством инвариантности относительно характеристик потребителя механической энергии, имеют практическую значимость лишь в тех случаях, когда информативные параметры, на основе которых они сформированы, доступны для оперативного контроля в судовых условиях. По этой причине, в последующем в качестве входных информативных параметров используются: G_m – часовой расход топлива, кг/ч; h – положение указателя нагрузки; P_k и T_k – давление и температура воздуха перед впускными органами двигателя.

В качестве выходных информативных параметров используются: t_g – температура отработавших газов по цилиндрам, °С; P_{mi} – среднее индикаторное давление по цилиндрам, МПа.

Входные информативные параметры принимаются одинаковыми для всех цилиндров; выходные параметры по отдельным цилиндрам – различные. Этим обеспечивается учет особенностей протекания рабочих процессов в отдельных цилиндрах двигателя.

6. Условием, по которому определяются режимы ограничительной по тепловой напряженности характеристики, является равенство $\frac{\eta_v}{\alpha} = \frac{\eta_{vH}}{\alpha_H} = const$.

7. Оценка теплового состояния деталей цилиндропоршневой группы производится по цилиндрам с учетом качества протекания в них рабочих процессов.

Разработаны два метода и два алгоритма количественного описания принципов формирования инвариантных экспериментально-теоретических моделей.

Первый метод и алгоритм реализуются в тех случаях, когда исходные данные о закономерностях изменения информативных параметров представлены в виде результатов стендовых испытаний нового двигателя по серии нагрузочных характеристик и соответствуют всему полю возможных режимов работы двигателя. При наличии таких исходных данных формирование инвариантных экспериментально-теоретических моделей реализуется по алгоритму с минимальным количеством вычислительных операций и минимальным влиянием погрешностей исходных данных на конечные результаты решения.

Второй метод и алгоритм формирования экспериментально-теоретических моделей реализуются в тех случаях, когда исходные данные представлены в виде результатов стендовых или эксплуатационных испытаний двигателя и соответствуют только части поля возможных режимов работы. В этих случаях вычислительные операции по определению параметров

инвариантных экспериментально-теоретических моделей реализуются в соответствии с нижеследующим алгоритмом.

1. Выбирается явный вид многофакторной функции (например, уравнение регрессии), которой могут быть аппроксимированы взаимосвязи между входными и выходными информативными параметрами для заданного множества результатов эксплуатационных или стендовых испытаний.

2. На основе явного вида аппроксимирующей функции и численных значений информативных параметров формируется система условных однородных уравнений $A \cdot x = 0$, где A – прямоугольная матрица порядка $m \times n$; m – число условных уравнений; n – число неизвестных и $m \gg n$.

3. Переход от условной системы однородных уравнений к эквивалентной нормальной системе осуществляется методом наименьших квадратов $A^T A \cdot x = 0$, где $A^T A$ – симметричная матрица порядка $n \times n$. Определяется спектр собственных чисел матрицы $A^T A$ и производится его анализ.

4. Устойчивые решения системы могут быть получены только в том случае, если в спектре собственных чисел матрицы $A^T A$ $(n-1)$ чисел существенно больше предполагаемого уровня погрешностей исходных данных, и только число λ_n существенно меньше этого уровня. При выполнении этого условия определяются численные значения неизвестных x_i многофакторной модели, аппроксимирующей весь массив исходных данных.

5. Построенная модель может быть рекомендована для практического использования в том случае, если она воспроизводит весь массив исходных данных с погрешностью, существенно не превосходящей предполагаемой погрешности исходных данных.

В каждом конкретном случае описанный алгоритм позволяет контролировать устойчивость вычислительного процесса, определять структуру и параметры экспериментально-теоретических моделей, которые описывают весь массив исходных данных с погрешностью, не превосходящей существенно предполагаемый уровень погрешностей исходных данных.

В третьей главе приведены примеры построения инвариантных экспериментально-теоретических моделей для диагностирования рабочих процессов в цилиндрах и контроля теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы. Для этой цели использованы результаты стендовых испытаний заведомо исправных двигателей.

На рисунке 1 приведены результаты испытаний одноцилиндрового четырехтактного двигателя 1Ч 17,5/24 по серии нагрузочных характеристик. Результаты испытаний представлены в безразмерной системе координат $t_{go} - G_{mo}$, где t_{go} – относительные значения температуры отработавших газов на выходе из цилиндра; G_{mo} – относительные значения часового расхода топлива. Переход к относительным значениям параметров выполнен по соотношениям:

$$t_{go} = \frac{t_g}{t_{gn}}; G_{mo} = \frac{G_m}{G_{mn}}; n_o = \frac{n}{n_n}. \quad (1)$$

В соотношениях (1) индексом « n » обозначены значения параметров, соответствующие номинальному режиму работы двигателя: $t_{gn} = 384^\circ\text{C}$; $G_{mn} = 3,14 \text{ кг/ч}$; $n_n = 630 \text{ мин}^{-1}$.

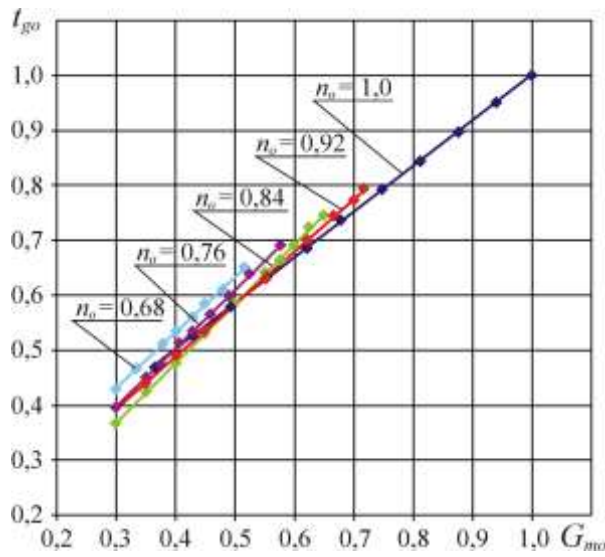


Рисунок 1 – Результаты стендовых испытаний двигателя 1Ч 17,5/24

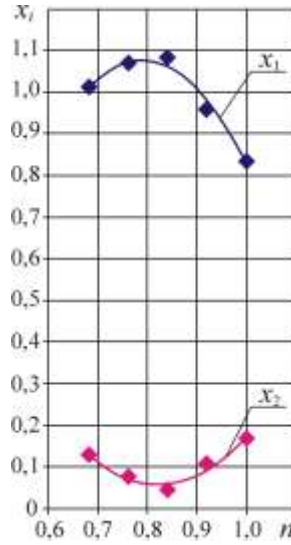


Рисунок 2 – Зависимости $x_1 = f(n_o)$ и $x_2 = f(n_o)$

Суть замысла сводится к тому, чтобы на основе названных информативных параметров сформировать уравнение поверхности, образованной последовательным смещением зависимости $t_{go} = f(G_{mo})$ в диапазоне изменения относительной частоты вращения двигателя $n_o = 1,0 \div 0,68$.

В данном случае характер зависимостей $t_{go} = f(G_{mo})$ можно безошибочно определить непосредственно по рисунку 1 – каждая из них может быть аппроксимирована линейной функцией, т. е. взаимосвязь между параметрами t_{go} и G_{mo} по характеристикам $n = const$ задана в виде:

$$t_{go} = x_1(n_o) \cdot G_{mo} + x_2(n_o), \quad (2)$$

где $x_1(n_o)$ и $x_2(n_o)$ – искомые функции частоты вращения двигателя.

Для определения функций $x_1(n_o)$ и $x_2(n_o)$ используем систему уравнений, аппроксимирующих нагрузочные характеристики. В данном случае эта система уравнений имеет вид:

1. $t_{go} = 0,8340 \cdot G_{mo} + 0,1671, \quad n_o = 1,0;$
2. $t_{go} = 0,9564 \cdot G_{mo} + 0,1062, \quad n_o = 0,9206;$
3. $t_{go} = 1,0818 \cdot G_{mo} + 0,0439, \quad n_o = 0,8413;$
4. $t_{go} = 1,0680 \cdot G_{mo} + 0,0754, \quad n_o = 0,7619;$
5. $t_{go} = 1,0113 \cdot G_{mo} + 0,1270, \quad n_o = 0,6825.$

(3)

Система уравнений (3) позволяет выявить закономерности изменения решений при переходе от одной нагрузочной характеристики к другой, т. е.

зависимости $x_1 = f(n_o)$ и $x_2 = f(n_o)$. Эти зависимости приведены на рисунке 2. Видно, что это нелинейные зависимости, поэтому они аппроксимированы полиномами второго порядка:

$$\begin{aligned} x_1 &= -5,6397 \cdot n_o^2 + 8,9016 \cdot n_o - 2,4359; \\ x_2 &= 3,6148 \cdot n_o^2 - 5,9422 \cdot n_o + 2,4990. \end{aligned} \quad (4)$$

Подстановкой (4) в (2) получено уравнение поверхности, образованной последовательным смещением зависимостей $t_{go} = f(G_{mo})$ при переходе от одной нагрузочной характеристики к другой:

$$\begin{aligned} t_{go} &= (-5,6397 \cdot n_o^2 + 8,901 \cdot n_o - 2,4359) \cdot G_{mo} + \\ &+ (3,6148 \cdot n_o^2 - 5,9422 \cdot n_o + 2,499) \end{aligned} \quad (5)$$

В работе дана оценка эффективности описанного метода и алгоритма построения модели (5) посредством сравнения двух гистограмм распределения погрешностей расчета: по уравнениям (3) и уравнению (5) по всему массиву исходных данных ($N = 48$). Показано, что весь массив исходных данных воспроизводится посредством уравнений (3) с погрешностью, не превышающей $\pm 1\%$, а уравнением (5) с погрешностью, не превышающей $\pm 2,5\%$.

При наличии технических средств, позволяющих в судовых условиях оперативно контролировать среднее индикаторное давление, могут быть сформированы инвариантные экспериментально-теоретические модели, в которых температура отработавших газов по цилиндрам замещена средним индикаторным давлением P_{mi} .

В качестве примера, в работе получено уравнение поверхности, образованной последовательным смещением зависимости $P_{mio} = f(G_{mo})$ для двигателя 40ДМ:

$$P_{mio} = (3,1111 \cdot n_o^2 - 6,7729 \cdot n_o + 4,6506) \cdot G_{mo} + 0,0230. \quad (6)$$

В работе показано, что уравнение (6) воспроизводит весь массив исходных данных ($N=25$) с погрешностью, не превышающей $\pm 4\%$.

Второй метод и алгоритм реализуются в тех случаях, когда исходные данные соответствуют только части поля возможных режимов работы двигателя.

На рисунке 3 приведена схема стендовых испытаний двигателя 6ДКРН 42/136-10. В данном случае область координатной плоскости $N_e - n$ ограничена сверху винтовой СВ и ограничительной ВА характеристиками; справа и слева – вертикалями $n_n = 167 \text{ мин}^{-1}$ и $n_{min} = 110 \text{ мин}^{-1}$; снизу – координатной осью n .

По второму методу и алгоритму, описанным во второй главе, для двигателя 6ДКРН 42/136-10 сформирована модель:

$$t_{go} = 0,585 + 0,351 \cdot n_o - 0,356 \cdot n_o \cdot G_{mo} + 0,412 \cdot G_{mo}^2, \quad (7)$$

которая воспроизводит весь массив исходных данных ($N=25$) с погрешностью $\pm 2,5\%$.

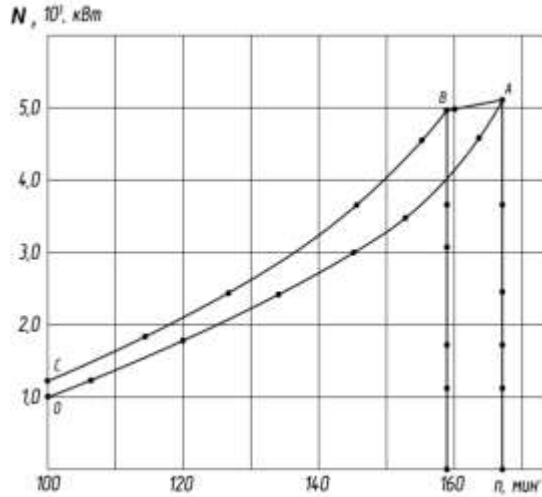


Рисунок 3 – Схема стендовых испытаний двигателя БДКРН 42/136-10

Особенности построения инвариантных экспериментально-теоретических моделей многоцилиндровых двигателей показаны на примере двигателя БЧН 25/34-3. Для этой цели использованы результаты стендовых испытаний нового двигателя БЧН 25/34-3 по серии нагрузочных характеристик в диапазоне частот вращения от $n_n = 500 \text{ мин}^{-1}$ до $n_{min} = 350 \text{ мин}^{-1}$, с шагом $\Delta n = 50 \text{ мин}^{-1}$.

Инвариантные экспериментально-теоретические модели построены на основании следующих информативных параметров: t_g – температура отработавших газов на выходе из цилиндров, °С; n – частота вращения коленчатого вала, мин^{-1} ; h – положение указателя нагрузки, условные единицы.

В вычислениях использованы безразмерные значения информативных параметров.

Уравнения поверхностей, образованных последовательным смещением отрезков монотонных кривых $t_{go} = f(h_o)$ по цилиндрам двигателя БЧН 25/34-3 в диапазоне изменения частот вращения $0,7 \leq n_o \leq 1,0$, получены в виде:

$$\begin{aligned}
 t_{gop}^I &= (-3,8625 \cdot n_o^2 + 9,2073 \cdot n_o - 6,2251) \cdot h_o^2 + \\
 &+ (2,7800 \cdot n_o^2 - 8,0892 \cdot n_o + 7,3663) \cdot h_o + (0,2300 \cdot n_o^2 + 0,9476 \cdot n_o - 1,3576); \\
 t_{gop}^{II} &= (-11,2870 \cdot n_o^2 + 23,0870 \cdot n_o - 12,3200) \cdot h_o^2 + \\
 &+ (12,3360 \cdot n_o^2 - 25,2750 \cdot n_o + 14,4410) \cdot h_o + (-3,2025 \cdot n_o^2 + 6,8727 \cdot n_o - 3,5649); \\
 t_{gop}^{III} &= (-8,8975 \cdot n_o^2 + 17,9770 \cdot n_o - 9,7956) \cdot h_o^2 + \\
 &+ (10,0850 \cdot n_o^2 - 20,3960 \cdot n_o + 12,1050) \cdot h_o + (-2,6650 \cdot n_o^2 + 5,6359 \cdot n_o - 3,0660); \\
 t_{gop}^{IV} &= (-7,9100 \cdot n_o^2 + 17,1740 \cdot n_o - 9,6694) \cdot h_o^2 + \\
 &+ (6,8600 \cdot n_o^2 - 16,0260 \cdot n_o + 10,4080) \cdot h_o + (-0,7625 \cdot n_o^2 + 2,8269 \cdot n_o - 1,8519); \\
 t_{gop}^V &= (-16,1970 \cdot n_o^2 + 35,9870 \cdot n_o - 19,9430) \cdot h_o^2 + \\
 &+ (14,1250 \cdot n_o^2 - 35,0740 \cdot n_o + 21,7750) \cdot h_o + (-1,5000 \cdot n_o^2 + 6,3550 \cdot n_o - 4,5003); \\
 t_{gop}^{VI} &= (-16,3950 \cdot n_o^2 + 35,2730 \cdot n_o - 19,4980) \cdot h_o^2 + \\
 &+ (12,9300 \cdot n_o^2 - 31,3310 \cdot n_o + 19,9940) \cdot h_o + (-0,6900 \cdot n_o^2 + 4,3364 \cdot n_o - 3,6266).
 \end{aligned} \tag{8}$$

На рисунке 4 приведена гистограмма распределения погрешностей расчета по уравнениям (8). Видно, что уравнения (8) воспроизводят весь массив исходных данных с погрешностью, не превышающей $\pm 3\%$.

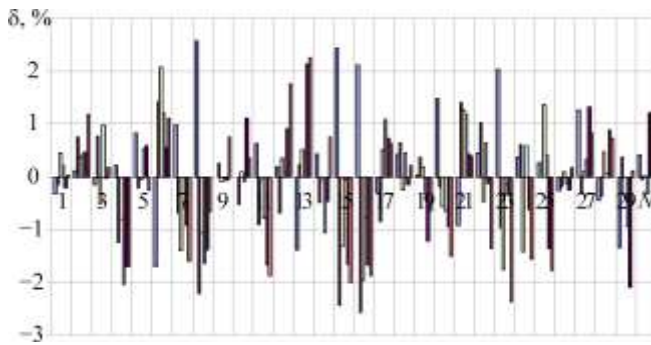


Рисунок 4 – Гистограмма распределения погрешностей расчета по всему массиву исходных данных

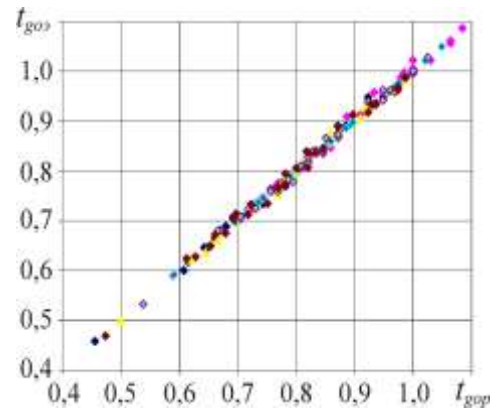


Рисунок 5 – Единственный инвариантный эталон двигателя 6ЧН25/34-3

В четвертой главе приведены результаты диагностирования рабочих процессов в цилиндрах посредством разработанных экспериментально-теоретических моделей; обсуждаются диагностические возможности моделей; сформированы уравнения и алгоритм их практического применения для контроля предельных тепловых нагрузок на детали цилиндропоршневой группы.

Если для конкретного двигателя сформированы экспериментально-теоретические модели типа (5), (6), (7), (8), то диагностирование рабочих процессов в цилиндрах производится по нижеследующему алгоритму.

1. Посредством представления $t_{goэ} = f(t_{гор})$ или $P_{mioэ} = f(P_{mioр})$ поверхности, образованные последовательным смещением зависимостей $t_{go} = f(G_{mo})$, $P_{mio} = f(G_{mo})$, $t_{go} = f(h_o)$, преобразуются в прямую-эталон.

2. В произвольный период эксплуатации регистрируются значения параметров t_g, n, G_m, P_{mi}, h на 4÷5 режимах в диапазоне $(0,5 \div 1,0)t_{go}$ или $(0,5 \div 1,0)P_{mio}$ и определяются их относительные величины.

3. По уравнениям (5), (6), (7), (8) определяются расчетные относительные значения выходного информативного параметра $t_{гор}$ или $P_{mioр}$.

4. Строятся линии $t_{goэ} = f(t_{гор})$ или $P_{mioэ} = f(P_{mioр})$, соответствующие фактическим условиям сгорания топлива в цилиндрах.

5. С учетом реальных отклонений построенных линий от эталона делается заключение о качестве функционирования цилиндров двигателя.

Для двигателя 6ЧН25/34-3 на основании моделей (8) сформирован единый инвариантный эталон, приведённый на рисунке 5, который использовался для функционального диагностирования рабочих процессов в цилиндрах двигателя.

Двигатель испытывался с искусственно введенными в систему топливоподачи и механизм газораспределения следующими неисправностями:

- давление впрыска топлива первого цилиндра было снижено до 7,5 МПа, а второго – до 5 МПа;
- зазор в приводе клапанов газораспределительного механизма третьего цилиндра был увеличен до 1 мм, а четвертого цилиндра – до 1,5 мм.

Результаты диагностирования двигателя 6ЧН25/34-3 приведены на рисунке 6. Видно, что все режимы первого цилиндра с разбросом, не превышающим погрешности измерения t_g , укладываются на эталон. Очевидно, данное давление впрыска близко к минимально допустимому, при котором заметного ухудшения смесеобразования не происходит. При давлении впрыска 5 МПа влияние чрезмерного уменьшения давления впрыска на протекание рабочего процесса в цилиндре проявляется так, что все режимы второго цилиндра укладываются на прямую, смещенную вниз от эталона.

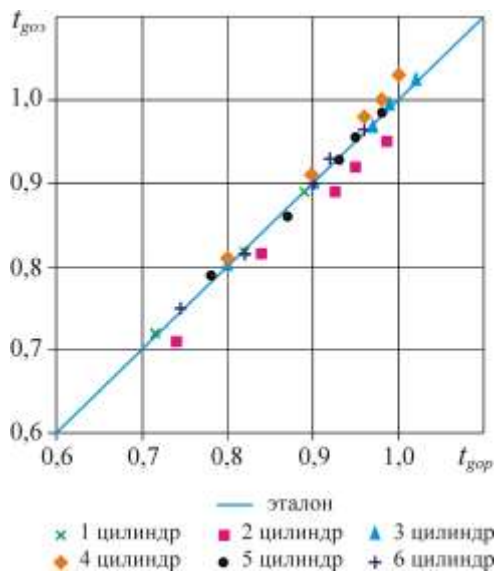


Рисунок 6 – Результаты диагностирования двигателя 6ЧН25/34-3

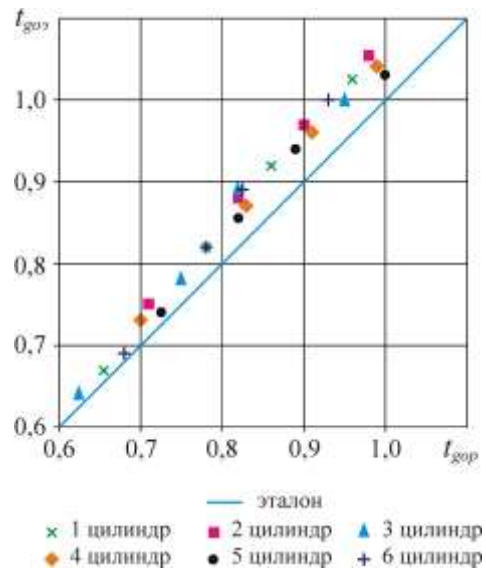


Рисунок 7 – Результаты диагностирования двигателя 6ЧН25/34-3

Согласно полученным результатам увеличение зазоров в приводе клапанов двигателя 6ЧН25/34-3 до 1 мм (третий цилиндр) мало влияет на качество процесса сгорания в диапазоне исследованных нагрузок. Можно сказать, что уровень этого влияния не превышает погрешностей измерения параметра t_g . При увеличении зазора до 1,5 мм (четвертый цилиндр) на режимах, близких к номинальному, достаточно отчетливо проявляется тенденция резкого отклонения действительных значений t_{go} вверх от эталона по нелинейному закону. Этот результат свидетельствует о том, что влияние уменьшения время-сечения органов газораспределения на качество процесса сгорания зависит от уровня нагрузки.

На рисунке 7 приведены результаты испытаний двигателя при уменьшенном примерно на 50 % проходном сечении воздушного фильтра. Перепад давлений на фильтре при этом составил 0,0016 МПа. Можно сказать, что в диапазоне нагрузок $(0,6 \div 1,0)t_{go}$ данная неисправность проявляется на всех цилиндрах в одинаковой мере, т. е. отклонения режимов отдельных цилиндров

вверх от эталона могут быть аппроксимированы единой линией с величиной разброса, не превышающей погрешности измерения параметров.

В связи с приведенными результатами функционального диагностирования рабочих процессов в цилиндрах с использованием разработанных инвариантных экспериментально-теоретических моделей, в работе поясняется механизм, посредством которого модели реагируют на проявление неисправностей в компонентах двигателя, обеспечивающих качество сгорания топлива в цилиндрах, а также обсуждаются некоторые особенности функционального диагностирования рабочих процессов в цилиндрах посредством инвариантных моделей.

Для определения уравнений ограничительных по тепловой напряженности характеристик деталей цилиндропоршневой группы используются инвариантные экспериментально-теоретические модели, в которых входным параметром является G_{mo} . В этих случаях появляется возможность выразить входной параметр G_{mo} через параметры воздуха перед впускными органами двигателя в соответствии с тождеством:

$$G_{mo} = g_{co} \cdot n_o = \frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot \frac{\eta_{no}}{\alpha_o} \cdot n_o, \quad (9)$$

где g_{co} – относительная величина цикловой подачи топлива; P_{ko} и T_{ko} – относительные значения давления и температуры воздуха перед впускными органами двигателя; η_{no} и α_o – относительные значения коэффициента наполнения и коэффициента избытка воздуха.

Уравнения ограничительных по тепловой напряженности характеристик четырех- и двухтактных двигателей различного уровня форсирования наддувом, приведенные ниже, определены с учетом условия $\frac{\eta_{no}}{\alpha_o} = 1,0$.

Двигатель 1 Ч17,5/24

$$|t_{go}| = (-5,6391 \cdot n_o^2 + 8,901 \cdot n_o - 2,4359) \cdot \frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot n_o + (3,6148 \cdot n_o^2 - 5,9422 \cdot n_o + 2,4990) \quad (10)$$

Двигатель 12ДН 23/30 (40ДМ)

$$|P_{mio}| = (3,1111 \cdot n_o^2 - 6,7729 \cdot n_o + 4,6506) \cdot \left(\frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot n_o \right) + 0,0230. \quad (11)$$

Двигатель 6ДКРН 42/136-10

$$|t_{go}| = 0,585 + 0,351 \cdot n_o - 0,356 \cdot n_o \cdot \left(\frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot n_o \right) + 0,412 \cdot \left(\frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot n_o \right)^2. \quad (12)$$

Если для конкретного двигателя определены уравнения ограничительных характеристик, то оценка теплового состояния деталей цилиндропоршневой группы производится по цилиндрам с учетом результатов функционального диагностирования рабочих процессов по нижеследующему алгоритму.

1. Производится замер входных информативных параметров n, P_k, T_k и выходного информативного параметра t_g или P_{mi} по цилиндрам.

2. Определяются относительные значения замеренных информативных параметров $n_o, P_{ko}, T_{ko}, t_{go}$ и P_{mio} .

3. Посредством моделей типа (5), (6), (7), (8) и описанного выше алгоритма производится функциональное диагностирование рабочих процессов в цилиндрах двигателя.

4. С учетом результатов функционального диагностирования по уравнениям ограничительных характеристик определяются расчетные значения температур отработавших газов по цилиндрам.

5. Оценка теплового состояния деталей цилиндропоршневой группы производится посредством сравнения замеренных и рассчитанных относительных значений температур отработавших газов или средних индикаторных давлений по цилиндрам.

6. Условие $t_{goэ} < |t_{gop}|$ или $P_{mioэ} < |P_{miop}|$ означает, что на данном цилиндре имеется запас по тепловой напряженности, а условие $t_{goэ} > |t_{gop}|$ или $P_{mioэ} > |P_{miop}|$ – тепловую перегрузку цилиндра, для исключения которой необходимо уменьшить подачу топлива на двигатель, пока не будет выполнено условие $t_{goэ} = |t_{gop}|$ или $P_{mioэ} = |P_{miop}|$.

Отличительные особенности уравнений ограничительных характеристик и алгоритм их практического применения определяются нижеследующими положениями.

1. Для определения уравнений ограничительных характеристик используются инвариантные экспериментально-теоретические модели, сформированные на основе теплотехнических параметров, контролируемых в судовых условиях штатными приборами.

2. Оценка предельных тепловых нагрузок на детали цилиндропоршневой группы на режимах ограничительных характеристик производится отдельно по цилиндрам, с учетом качества протекания в них рабочих процессов.

Заключение

1. Выполненный анализ факторов, определяющих теплонапряженность деталей цилиндропоршневой группы, показывает, что ограничительные по тепловой напряженности характеристики должны назначаться с учетом фактических режимов работы судовых дизелей, технического состояния систем, обеспечивающих качество процессов сгорания в цилиндрах.

2. Эффективность косвенных методов контроля теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы может быть существенно повышена посредством устранения необходимости привязки процесса контроля теплонапряженности к заданному режиму или режимам определенной характеристики.

3. Физической основой развитого в работе подхода к решению названных задач является понятие инвариантности моделей, описывающих

совокупность свойств, заложенных в конструкцию конкретного двигателя в процессе проектирования и определяющих его способность вырабатывать механическую энергию в поле допустимых для длительной эксплуатации режимов.

4. Сформулированы принципы, разработаны методы и алгоритмы, позволяющие реализовать процесс построения экспериментально-теоретических моделей для контроля предельных тепловых нагрузок на детали цилиндропоршневой группы отдельно по цилиндрам, с учетом качества протекания в них рабочих процессов.

5. На конкретных примерах двигателей 1Ч17,5/24, 6ДКРН 42/136-10, 6ЧН25/34-3, 12ДРН23/30 показана возможность и целесообразность формирования экспериментально-теоретических моделей на основе результатов стендовых испытаний новых двигателей по серии нагрузочных характеристик. При этом в качестве информативных параметров могут быть использованы параметры, контролируемые штатными приборами в судовых условиях.

6. Разработанные алгоритмы формирования и практического применения экспериментально-теоретических моделей легко программируются и могут быть использованы в автоматизированных системах управления судовых дизелей.

Последующие исследования должны быть направлены на разработку управляющих программ, обеспечивающих оптимальное тепловое состояние деталей цилиндропоршневой группы по цилиндрам двигателя, с учетом условий плавания и технического состояния систем, обеспечивающих качество процесса сгорания топлива в цилиндрах.

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:

а) научные статьи, опубликованные в ведущих российских периодических изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

1. Исаева, М. В. Теоретические предпосылки и алгоритм формирования моделей для контроля режимов ограничительных по тепловой напряженности характеристик судовых дизелей / М. В. Исаева, Л. И. Ковальчук // Судостроение. – 2015. – № 4(812). – С. 29–32. (0,25 п.л. /0,13 п.л.)

2. Исаева, М. В. Экспериментально-теоретические модели для диагностирования рабочих процессов в цилиндрах судовых дизелей / М. В. Исаева, Л. И. Ковальчук // Двигателестроение. – 2015. – № 4. – С. 30–33. (0,26 п.л. /0,13 п.л.)

3. Исаева, М. В. Алгоритм расчета ограничительной по тепловой напряженности характеристики судовых дизелей на основе результатов стендовых испытаний / М. В. Исаева, Л. И. Ковальчук // Эксплуатация морского транспорта. – 2016. – № 3(80). – С. 61–69. (0,56 п.л. /0,28 п.л.)

4. Исаева, М. В. Построение инвариантных экспериментально-теоретических моделей для функционального диагностирования воздушного

тракта судовых дизелей с наддувом / Л. И. Ковальчук, М. В. Исаева // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 3(37), Т. 1. – С. 85–90. (0,38 п.л. /0,19 п.л.)

5. Исаева, М. В. Расчет и контроль ограничительных по тепловой напряженности характеристик судовых дизелей / Л. И. Ковальчук, М. В. Исаева // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 4(38), Т. 2. – С. 100–104. (0,32 п.л. /0,16 п.л.)

б) публикации в прочих изданиях:

6. Исаева, М. В. Экспериментально-теоретические модели для определения из различных условий ограничительных по тепловой напряженности характеристик / Л. И. Ковальчук, М. В. Исаева // Научно-технические разработки в решении проблем рыбопромыслового флота и подготовки кадров : материалы пятнадцатой межвузовской научно-технической конференции аспирантов, докторантов, соискателей и магистрантов (27–31 октября 2014 г.) / БГАРФ ФГБОУ ВПО «КГТУ». – Калининград : Изд-во БГАРФ, 2015. – С. 28–32. (0,31 п.л. /0,16 п.л.)

7. Исаева, М. В. Алгоритм обработки результатов эксплуатационных испытаний главных судовых дизелей [Электронный ресурс] / Л. И. Ковальчук, М. В. Исаева // II Балтийский морской форум: материалы международного форума (Светлогорск, 26–30 мая 2014 г.). – Калининград : Изд-во БГАРФ, 2014. – С. 101–110. – № гос. регистрации 0321404071. (0,63 п.л. /0,32 п.л.)

8. Исаева, М. В. Алгоритм обработки результатов эксплуатационных испытаний главных судовых дизелей / М. В. Исаева, Л.И. Ковальчук // II Балтийский морской форум : тезисы докладов международного форума, 26-30 мая 2014 г. – I том. – Калининград : Изд-во БГАРФ, 2014. – С. 123–125. (0,19 п.л. /0,1 п.л.)

9. Исаева, М. В. Оценка влияния погрешностей исходных данных на параметры инвариантных диагностических эталонов [Электронный ресурс] / Л. И. Ковальчук, М. В. Исаева // III Балтийский морской форум: материалы Международного морского форума. – Калининград : Изд-во БГАРФ, 2015. – С. 262–268. – № гос. регистрации 0321504344. (0,44 п.л. /0,22 п.л.)

10. Исаева, М. В. Оценка влияния погрешностей исходных данных на параметры инвариантных диагностических эталонов / Л. И. Ковальчук, М. В. Исаева // III Международный Балтийский морской форум. Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии» : тезисы докладов. – I том. – Калининград : Изд-во БГАРФ, 2015. – С. 140–141. (0,12 п.л. /0,06 п.л.)

11. Исаева, М. В. Определение ограничительной по тепловой напряженности характеристики судовых дизелей на основе результатов стендовых испытаний [Электронный ресурс] / Л. И. Ковальчук, М. В. Исаева // IV Международный Балтийский морской форум: материалы Международного морского форума (Калининград, 22–28 мая 2016 г.). – Калининград : Изд-во БГАРФ, 2016. – С. 297–302. – № гос. регистрации 0321603515. (0,38 п.л. /0,19 п.л.)

12. Исаева, М. В. Определение ограничительной по тепловой напряженности характеристики судовых дизелей на основе результатов стендовых испытаний / Л. И. Ковальчук, М. В. Исаева // IV Международный Балтийский морской форум. IV Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии» : тезисы докладов. – Часть 1. – Калининград : Изд-во БГАРФ, 2016. – С. 153–155. (0,19 п.л. /0,09 п.л.)

13. Исаева, М. В. Оценка влияния погрешностей исходных данных на параметры инвариантных диагностических эталонов / М. В. Исаева, Л. И. Ковальчук // Известия КГТУ. – 2016. – № 42. – С. 195–205. (0,63 п.л. /0,33 п.л.)

14. Исаева, М. В. Практические методы построения экспериментально-теоретических моделей для практического диагностирования рабочих процессов в цилиндрах судовых дизелей/ Л. И. Ковальчук, М. В. Исаева // V Международный Балтийский морской форум. V Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии» : тезисы докладов. – Часть 1. – Калининград : Изд-во БГАРФ, 2017. – С. 137–139. (0,2 п.л. /0,1 п.л.)

15. Isaeva, M. V. Principles of creating invariant standards for the functional diagnosis of marine diesel engine / Kovalchuk L. I., Isaeva M. V. // 18-th Annual General Assembly on the International Association of Maritime Universities. Global perspectives in MET: Towards Sustainable, Green and Integrated Maritime Transport. – Volume 1. – Varna: Nikola Vaptsarov Naval Academy, 2017. – P. 541–550. (0,62 п.л. /0,32 п.л.)

в) свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

16. Программа контроля предельных тепловых нагрузок деталей цилиндропоршневой группы многоцилиндровых двигателей по косвенным параметрам: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017617410 / Исаева М. В., Ковальчук Л. И. : правообладатель ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет». – Заявка №2017614621; заявл. 22.05.2017; опубли. 04.07.2017.

Исаева Марина Васильевна

**РАЗРАБОТКА ИНВАРИАНТНЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ
КОНТРОЛЯ ТЕПЛОАПРЯЖЕННОСТИ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ
ГРУППЫ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПО КОСВЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 09.10.2018 г.

Формат 60x90 1/16.

Печать офсетная. Объем – 1,2 усл. печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ 1384.

Издательство БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ»
236029, г. Калининград, ул. Молодежная, 6