

РАСЧЕТЫ. КОНСТРУИРОВАНИЕ. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ	ANALYSES, DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF ENGINES
<i>Новиков Л.А., Кострыгин А.Н.</i> Реализация программы импортозамещения при постройке судовых двигателей типа Д49 на АО «Коломенский завод»	<i>Novikov L.A. and Kostrygin A.N.</i> 3 Import replacement program as applied to construction of type D49 marine diesel engines at JSC «Kolomna Works»
<i>Обозов А.А., Новиков Р.А.</i> Параметрическая оптимизация закона тепловыделения судового малооборотного дизеля	<i>Obozov A.A. and Novikov R.A.</i> 10 Parameters optimization of heat release curve in marine low-speed diesel engine
АВТОМАТИЗАЦИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ	AUTOMATION AND DIAGNOSTICS
<i>Волков Ю.В.</i> Цифровизация диагностических вибросигналов дизеля	<i>Volkov Yu.V.</i> 13 Digitization of vibration signals in engine diagnostics
ТОПЛИВО. СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	FUEL. LUBRICANTS
<i>Алимов В.А., Захаров Е.А., Сафаров Э.Г., Федянов Е.А.</i> Влияние добавок синтез-газа к пропан-бутану на процесс сгорания в автомобильном двигателе	<i>Alimov V.A., Zakharov Ye.A., Safarov E.G. and Fedyanov E.A.</i> 17 Addition of synthetic gas to propane-butane as a means to improve combustion in motor vehicle engine
<i>Прокopcова М.Д., Шаталов К.В., Уханов Д.А.</i> Методы оценки склонности моторных масел к образованию низкотемпературных отложений	<i>Prokoptsova M.D., Shatalov K.V. and Ukhanov D.A.</i> 21 Motor oil tendency to low-temperature sedimentation: evaluation methods
<i>Ватолин Д.С.</i> Особенности применения СПГ в качестве топлива для судовых ДВС	<i>Vatolin D.S.</i> 28 LNG as a fuel for marine reciprocating engines
НОВОСТИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ	ENGINE BUILDING NEWS
Развитие конструкции газовых двигателей (по материалам конгресса CIMAC)	35 Development of gas engine design (based on the CIMAC proceedings)
ИНФОРМАЦИЯ	INFORMATION
Рефераты статей	54 Synopsis

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л.А. Новиков, главный редактор

ПРЕДПРИЯТИЯ

А.Н. Кострыгин	<i>гл. конструктор</i>	<i>ООО ИЦД ТМХ, г. Коломна</i>
В.А. Шелеметьев	<i>зам. техн. директора</i>	<i>АО «Коломенский завод», г. Коломна</i>
С.В. Хильченко	<i>техн. директор</i>	<i>ООО «Морские пропульсивные системы», Санкт-Петербург</i>
А.К. Лимонов	<i>зам. гл. конструктора</i>	<i>ООО «Энергомаш», г. Щекино, Тульская обл.</i>
Е.И. Бирюков	<i>гл. конструктор</i>	<i>АО «Барнаултрансмаши», г. Барнаул</i>
А.В. Попов	<i>зам. ген. директора</i>	<i>АО «Волжский дизель им. Маминых», г. Балаково</i>
А.С. Куликов	<i>гл. констр. по двиг.</i>	<i>ПАО КАМАЗ, г. Набережные Челны</i>
В.И. Федышин	<i>директор</i>	<i>ООО МПЦ «Марине», Санкт-Петербург</i>
А.П. Маслов	<i>вед. инж.-конструктор</i>	<i>ООО «ЧТЗ-Уралтрак», г. Челябинск</i>
А.С. Калюнов	<i>начальник ИКЦ</i>	<i>ООО НЗТА, г. Ногинск</i>

НИИ

В.А. Сорокин	<i>зав. отделом</i>	<i>ЦНИИМФ, Санкт-Петербург</i>
В.И. Ерофеев	<i>нач. отдела</i>	<i>И ЦНИИ МО РФ, Санкт-Петербург</i>
В.В. Альт	<i>рук. науч. направления</i>	<i>ГНУ СибФТИ, г. Новосибирск</i>
Ю.А. Микутенок	<i>президент</i>	<i>НПХЦ «Миакрон-Нортон», Санкт-Петербург</i>

ВУЗЫ

В.А. Марков	<i>зав. кафедрой Э-2</i>	<i>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва</i>
Н.Д. Чайнов	<i>проф. кафедры Э-2</i>	<i>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва</i>
В.А. Рыжов	<i>проф. кафедры ТМС и САПР</i>	<i>КИ фил. МПУ, г. Коломна</i>
Ю.В. Галышев	<i>проф. ВШ энерг. маш.</i>	<i>СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург</i>
М.И. Куколев	<i>проф. ВШ гидротех. стр-ва</i>	<i>СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург</i>
О.К. Безюков	<i>проф. кафедры ТК СДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
А.А. Иванченко	<i>зав. кафедрой ДВС и АСЭУ</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
Л.В. Тузов	<i>проф. кафедры ТК СДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
С.П. Столяров	<i>зав. кафедрой СДВС и ДУ</i>	<i>ГМТУ, Санкт-Петербург</i>
В.К. Румб	<i>проф. кафедры СДВС и ДУ</i>	<i>ГМТУ, Санкт-Петербург</i>
А.В. Смирнов	<i>проф. кафедры Д и ТУ</i>	<i>ВИ(ИТ) ВА МТО, Санкт-Петербург</i>
В.О. Сайданов	<i>проф. кафедры Д и ТУ</i>	<i>ВИ(ИТ) ВА МТО, Санкт-Петербург</i>
А.А. Обозов	<i>проф. кафедры ТД</i>	<i>БГТУ, г. Брянск</i>
А.В. Разуваев	<i>проф. кафедры ЯЭ</i>	<i>БИТИ фил. ФГАОУ МИФИ, г. Балаково</i>

Издатель журнала — ООО «НПФ «Экология», Санкт-Петербург

Журнал «Двигателестроение» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Дата включения в обновленный перечень ВАК — 29.05.2017.

Группы научных специальностей:

05.02.00 — Машиностроение и машиноведение

05.04.00 — Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

05.14.00 — Энергетика

Электронные версии журнала (2005–2020 гг.) размещены на сайте «Научная электронная библиотека» (www.elibrary.ru) и включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Выпускающий редактор — Н.А. Вольская
Редактор инф. отдела — Г.В. Мельник
Ст. редактор — О.Д. Камнева
Верстка — А.В. Вольский

Сдано в набор 02.09.2020
Подписано в печать 23.09.2020
Формат бумаги 60 × 90 1/8

Бумага типографская.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7
Зак. 136. Тираж 700 экз.
Цена договорная

Почтовый адрес редакции журнала:
ООО «НПФ «Экология», 190020, Санкт-Петербург, а/я 9

Тел.: +7 (921) 956-31-94
+7 (812) 719-73-30

E-mail: ecology@rdiesel.ru
www.rdiesel.ru

**ДВИГАТЕЛЕ
СТРОЕНИЕ** Типография «Светлица»
Лиц. ПД № 2-69-618, 196158,
Санкт-Петербург, Московское шоссе, 25, 215

© Журнал «Двигателестроение». 2020. № 3 (281)

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ ПРИ ПОСТРОЙКЕ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТИПА Д49 НА АО «КОЛОМЕНСКИЙ ЗАВОД»

Л.А. Новиков, к.т.н., с.н.с., ген. директор
ООО НПФ «Экология», Санкт-Петербург
А.Н. Кострыгин, гл. конструктор
ООО ИЦД ТМХ, г. Коломна

На судовом дизеле типа Д49 модели 4-10Д49 исполнения V-16 выполнена программа экспериментальных исследований по определению оптимальных регулировок дизелей при их комплектации турбокомпрессорами отечественного производства типа ТК 35В-31 согласно программе импортозамещения. Установлено, что двигатели модели 4-10Д49 в оптимальном состоянии полностью соответствуют международным нормативам по выбросам NO_x (ИМО Tier-II) и требованиям российского стандарта по ограничению выбросов вредных веществ в атмосферный воздух (ГОСТ 31967–2012). При этом обеспечивается конкурентоспособный уровень технико-экономических характеристик и потребительских свойств. По результатам испытаний показана целесообразность формирования нового семейства судовых двигателей «Family 22Д49RU», представленного базовым двигателем мощностью 3630 кВт при 1000 об/мин. Приведены результаты сравнительных измерений выбросов NO_x , выполненных альтернативными электрохимическими и эталонными хемилюминесцентными газоанализаторами, сформулированы условия обеспечения эквивалентных результатов измерений.

Введение

В феврале 2018 г. на АО «Коломенский завод» была выполнена процедура сертификации на соответствие требованиям Правила 13.4 Приложения VI к Международной конвенции МАРПОЛ 73/78 (ИМО Tier-II) [1] семейства судовых двигателей универсального применения «Family 22Д49», представленного базовым двигателем типа Д49 (типоразмер ЧН26/26, модель 22Д49, мощность 1700 кВт при 1000 об/мин). В состав семейства были включены двигатели исполнения V-8 (модель 22Д49) и V-16 (модель 2-10Д49 мощностью 3600 кВт при 1000 об/мин), предназначенные для работы в составе дизель-генераторов в качестве бортовых электростанций (вспомогательные двигатели), или для привода винта регулируемого шага



(ВРШ) судов с электродвижением (главные двигатели). Цилиндровая мощность двигателей семейства «Family 22Д49» находится в диапазоне от 200 до 230 кВт при 1000 об/мин.

Комплектация двигателей семейства на момент сертификации базового двигателя (февраль 2018 г.) планировалась агрегатами наддува фирмы АВВ типа TPS48-F33 (для модели 22Д49 исполнения V-8) и типа TPS57-F33 (для модели 2-10Д49 исполнения V-16). Технические характеристики турбокомпрессоров фирмы АВВ обеспечивали оптимальное соотношение воздух–топливо на всех режимах эксплуатационной характеристики (в том числе на малых нагрузках), что позволяло достигать приемлемых характеристик по топливной экономичности и невысоких значений выбросов NO_x при малых углах опережения впрыска топлива $\varphi_{\text{впр}}$ [2]. Так, например, при установленном производителем (АО «Коломенский завод») для двигателей семейства «Family 22Д49» предельном значении $\varphi_{\text{впр}} = 13$ град ПКВ до ВМТ, удельный эффективный расход топлива базового двигателя модели 22Д49 исполнения V-8 на режиме максимальной длительной мощности ($P_{\text{МДМ}}$) составил $b_e = 211$ г/кВт·ч (средневзвешенный удельный расход топлива при испытаниях по циклу D2 составил $b_s = 225,4$ г/кВт·ч). При этом удельный средневзвешенный выброс NO_x 6,6–6,9 г/кВт·ч, что на 30–35 % ниже предельно-допустимого по нормативу ИМО Tier-II выброса $\text{NO}_x = 8,98$ г/кВт·ч.

Однако введение секторальных экономических санкций со стороны стран ЕС и прекращение поставок в РФ турбокомпрессоров фирмой АВВ привело к необходимости заменить комплектацию двигателей семейства «Family 22Д49» турбокомпрессорами отечественного производства. Импортозамещение для двигателей 22Д49 исполнения V-8 было реализовано достаточно успешно за счет их комплектации турбокомпрессорами типа ТКР 180.05.06 производства АО «Турботехника» (г. Протвино, Московской обл.). При испытаниях на стенде турбокомпрессоры ТКР 180.05.06 обеспечивали идентичные с агрегатами наддува АВВ характеристики по давлению наддува и производительности (рис. 1, а).

В отношении двигателей 2-10Д49 исполнения V-16 реализация импортозамещения оказалась более проблемной. Турбокомпрессоры с осевой турбиной типа ТК 35В-31 (рис. 1, б), были разработаны для тепловозных дизелей, выпускаемых ООО СКБТ (г. Пенза). В принципе они могут обеспечить приемлемые по производительности и давлению наддува характеристики при работе двигателя по нагрузочной характеристике. Однако различие в регулировках тепловозных и судовых дизелей, а также в составе и продолжительности

характерных режимов эксплуатационных характеристик привело к возникновению технических проблем, требующих решения. Так, например, вследствие более низкого КПД турбокомпрессора ТК 35В-31, при предельном значении угла опережения подачи топлива $\varphi_{впр} = 13$ град ПКВ до ВМТ для двигателей 2-10Д49 (условие принадлежности к семейству «Family 22Д49»), температура отработавших газов перед турбиной на номинальном режиме превышала заявленное изготовителем и одобренное Российским морским регистром судоходства (РС) предельное значение $T_{exh} = 650$ °С (при условиях по ISO 3046–1). Для обеспечения надежности судового двигателя превышение предельного значения T_{exh} недопустимо в соответствии с требованиями правил РС. Рабочие параметры двигателя, относящиеся к его потребительским свойствам, также ухудшились. Удельный эффективный расход топлива двигателя 2-10Д49 исполнения V-16 на режиме максимальной длительной мощности ($P_{МДМ}$) составил $b_e = 227$ г/кВт·ч (рост на 7,6 %), а удельный средневзвешенный расход топлива (эквивалент эксплуатационного расхода) при работе на режимах цикла D2 составил $b_z = 244,5$ г/кВт·ч (рост на 8,5 %). Понятно, что для двигателя типоразмера ЧН26/26 полученные в результате испытаний рабочие параметры не могут быть признаны удовлетворительными, поскольку в пределах ограничений, установленных концепцией семейства «Family 22Д49», двигатель имеет низкую топливную экономичность, работает с предельными значениями критериев, определяющих надежность, что может негативно отразиться на его конкурентоспособности [3].

1. Формирование нового семейства двигателей типа Д49 «Family 22Д49RU»

1.1. Необходимые конструктивные изменения и регулировки

Приведенные выше результаты испытаний первого построенного судового двигателя модели 2-10Д49 исполнения V-16, мощностью 3600 кВт при 1000 об/мин, укомплектованного турбокомпрессорами российского производства типа ТК 35В-31 (с конструкцией элементов проточной части, соответствующей тепловозной характеристике), углом опережения подачи топлива $\varphi_{впр} = 13$ град ПКВ до ВМТ, показали необходимость внесения следующих изменений:

- принимая во внимание значительный запас (в 30–35 %) по выбросам NO_x , по отношению к действующему нормативу IMO Tier-II, изменить регулировку двигателя для улучшения топливной экономичности и повышения надежности за счет более раннего впрыска топлива;
- конструкцию проточной части турбокомпрессора российского производства ТК 35В-31,

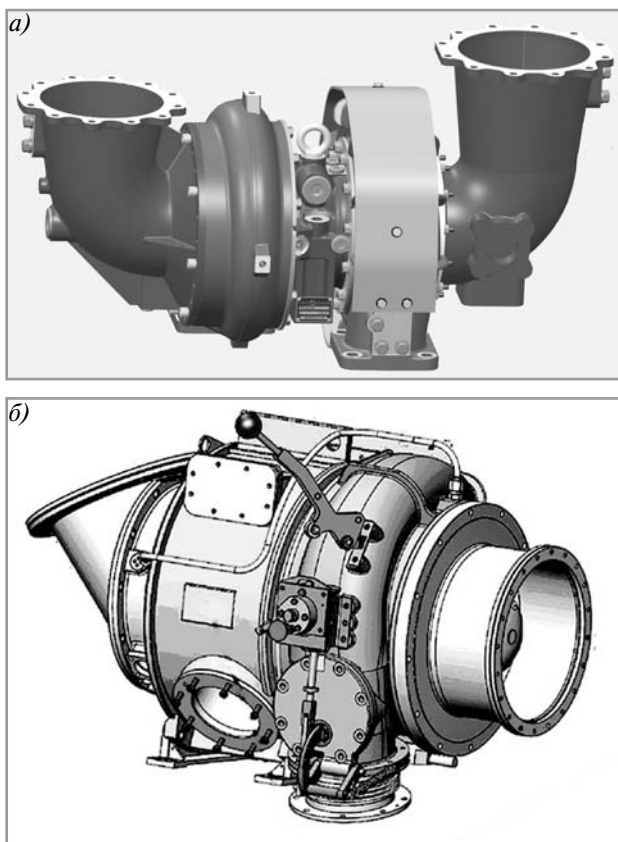


Рис. 1. Российские турбокомпрессоры, созданные по программе импортозамещения:
а — ТКР 180.05.06; б — ТК 35В-31

разработанного для тепловозных двигателей, доработать с учетом режимов работы, характерных для судовых двигателей типа Д49 исполнения V-16.

Концепцией семейства судовых двигателей предусмотрено, что изменение регулировок и внесение конструктивных изменений, влияющих на выбросы NO_x , требует формирования нового семейства судовых двигателей, построенных по программе импортозамещения, с проведением сертификационных испытаний базового двигателя нового семейства, поскольку ограничения, принятые для сертифицированного семейства «*Family 22Д49*», являются препятствием для реализации потенциала модернизации и улучшения потребительских свойств судовых двигателей типа Д49 исполнения V-16.

1.2. Конструктивные особенности двигателей нового семейства «*Family 22Д49RU*»

В 2020 г. АО «Коломенский завод» начал строительство новой серии судовых дизелей типа Д49 исполнения V-16 (модели 3-10Д49 и 4-10Д49), которые по компонентам и рабочим параметрам, влияющим на выбросы NO_x , идентичны двигателям 2-10Д49. Необходимые для улучшения топливной экономичности и надежности конструктивные изменения изготовитель (АО «Коломенский завод») принял решение реализовать на первом построенном двигателе модели 4-10Д49, при условии обеспечения его соответствия требованиям нормативу IMO Tier-II, с последующей сертификацией в качестве базового двигателя нового семейства «*Family 22Д49RU*».

Двигатель модели 4-10Д49 как объект для предстоящих сертификационных испытаний представляет собой четырехтактный, тронковый дизель исполнения V-16 (с прицепным шатуном), водяным охлаждением, турбонаддувом и охлаждением наддувочного воздуха, прямым впрыском топлива в камеру сгорания открытого типа. Двигатель развивает максимальную длительную мощность ($P_{\text{МДМ}}$), равную 3630 кВт при 1000 об/мин.

Рабочий процесс двигателя реализован в осесимметричной камере сгорания открытого типа при значениях среднего эффективного давления $p_{\text{ме}} = 19,7$ бар и максимальном давлении в цилиндре $p_c \leq 130$ бар на номинальном режиме работы. Впрыск топлива в камеру сгорания осуществляется гидромеханической форсункой, расположенной наклонно к оси цилиндра, через многодырчатый сопловой наконечник (9 отв. $\varnothing 0,39$ мм, угол конуса 150°) индивидуальным для каждого цилиндра ТНВД механического типа. Оптимальное значение угла опережения подачи топлива должно быть найдено по результатам предварительных исследовательских испытаний. Зарядка цилиндров осуществляется одноступенчатой системой турбонаддува, с двумя турбокомпрессорами типа ТК 35В-31 (по одному на каждый блок цилиндров) с осевой турбиной постоянного давления и охлаждением наддувочного воздуха. Для оптимизации конструкции элементов проточной части турбокомпрессора ТК 35В-31 были привлечены специалисты ООО СКБТ, участвующие в процессе проведения исследовательских испытаний.

Газообмен в цилиндре двигателя происходит через два впускных и два выпускных порта четырехклапанной крышки цилиндров. Продувка цилиндра и охлаждение днища поршня обеспечиваются за счет одновременного открытия впускного и выпускного клапанов при угловом перемещении коленчатого вала на 64° . Изменение степени сжатия ($\epsilon = 13,5$) на данном этапе модернизации двигателя не было предусмотрено.

Газообмен в цилиндре двигателя происходит через два впускных и два выпускных порта четырехклапанной крышки цилиндров. Продувка цилиндра и охлаждение днища поршня обеспечиваются за счет одновременного открытия впускного и выпускного клапанов при угловом перемещении коленчатого вала на 64° . Изменение степени сжатия ($\epsilon = 13,5$) на данном этапе модернизации двигателя не было предусмотрено.

1.3. Программа испытаний и методика измерений выбросов NO_x

Испытания по определению оптимального значения угла опережения впрыска топлива для двигателей типа Д49 исполнения V-16 были выполнены на моторном стенде АО «Коломенский завод» в июле 2020 г. Моторный стенд оборудован комплексом измерительных приборов, необходимых для контроля рабочих параметров с погрешностью, требуемой правилами Регистра.

Программа испытаний двигателя модели 4-10Д49, укомплектованного турбокомпрессорами типа ТК 35В-31, предусматривала измерение рабочих параметров и выбросов NO_x при последовательном (с шагом в 1–2 град ПКВ) увеличении угла опережения подачи топлива от $\varphi_{\text{впр}} = 13$ град ПКВ до ВМТ (максимальное значение, установленное ограничением для семейства «*Family 22Д49*») до тех пор, пока измеренное значение удельного средневзвешенного выброса NO_x не превысит предельно допустимое значение по требованиям норматива IMO Tier-II.

При проведении исследовательских испытаний измерение состава отработавших газов в целях экономии затрат на их проведение выполнялось с использованием портативного универсального газоанализатора, принадлежащего АО «Коломенский завод» с электрохимическим детектором измерения концентрации NO_x . Этот тип газоанализаторов по классификации «Технического кодекса по ограничению выбросов окислов азота от судовых дизельных двигателей» [3] (далее «Технический кодекс по NO_x ») относится к альтернативным средствам измерений и допускается к применению только при условии обеспечения результатов измерений, эквивалентных по точности и селективности, по отношению к определяемому компоненту, показаниям эталонных (хемилюминесцентных) газоанализаторов, реко-

мендованных «Техническим кодексом по NO_x ». Эти ограничения установлены в связи с тем, что на погрешность измерений, выполненных альтернативным газоанализатором, влияют такие факторы, как конструкция самого прибора, тип и качество электрохимических ячеек, наличие и эффективность системы пробоподготовки, наличие и количество в составе пробы анализируемых отработавших газов «мешающих» компонентов, таких как CO_2 , SO_2 , пары H_2O .

При проведении сертификационных испытаний двигателя типа 22Д49 как базового двигателя семейства «Family 22Д49», состоявшихся на АО «Коломенский завод», измерения состава отработавших газов и выбросов NO_x были выполнены одновременно двумя комплектами газоанализаторов: альтернативным универсальным электрохимическим газоанализатором и хемилюминесцентным газоанализатором с системой пробоподготовки, полностью соответствующим требованиям «Технического кодекса по NO_x ». Для исключения информации рекламного характера изготовители и модели газоанализаторов в настоящей статье не приводятся.

Корреляция показаний альтернативного и эталонного приборов в форме экспериментальных точек и аппроксимирующего полинома приведена на рис. 2.

Как видно из приведенных данных, среднеквадратичное отклонение (коэффициент надежности корреляции) экспериментальных точек от аппроксимирующей зависимости составляет 98 %, при этом результат измерения концентрации NO_x альтернативным прибором занижен (в среднем примерно на 7,4 %).

При обработке результатов измерений выбросов NO_x , выполненных на моторном стенде АО «Коломенский завод» при проведении исследовательских испытаний двигателя типа Д49 исполнения V-16 модели 4-10Д49, показания альтернативного прибора умножались на поправочный коэффициент 1,074 для получения результата, равноценного измерению эталонным хемилюминесцентным газоанализатором. Расчеты удельных средневзвешенных выбросов NO_x выполнялись по откорректированным результатам измерений с использованием компьютерных кодов, одобренных РС. В соответствии с положениями действующей редакции «Технического кодекса по NO_x » приведенная методика обработки результатов исследовательских испытаний позволяет их использовать для выпуска официальных протоколов сертификационных испытаний.

В качестве комментария к приведенным данным следует отметить, что аналогичные сравнительные испытания были выполнены признанной РС организацией ООО НПФ «Экология» для трех

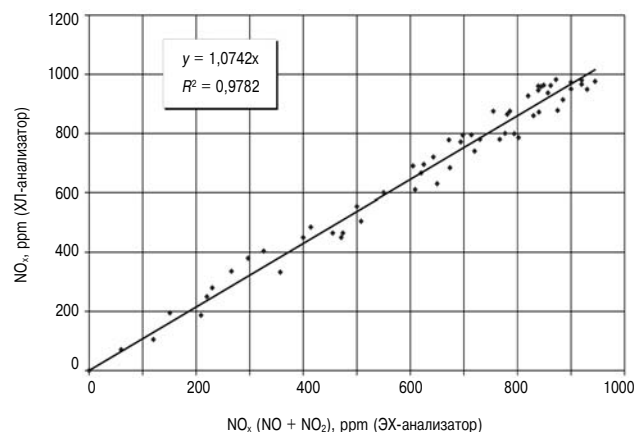


Рис. 2. Корреляция показаний эталонного (ХЛ) и альтернативного (ЭХ) газоанализаторов по результатам измерений выбросов NO_x на АО «Коломенский завод»

типов альтернативных газоанализаторов российского и зарубежного производства на малооборотных двухтактных, среднеоборотных и высокооборотных четырехтактных двигателях различного класса мощности. Результаты выполненных испытаний показали, что ошибка при измерении концентрации NO_x альтернативными газоанализаторами может составлять от +7 до -10 % в пределах эксплуатационной (винтовой или нагрузочной) характеристики дизеля.

Из анализа результатов выполненных сравнительных испытаний следует, что корреляционные зависимости показаний эталонного (ХЛ) и альтернативных (ЭХ) газоанализаторов не имеют универсального (постоянного) характера и требуют подтверждения эквивалентности результатов измерений при работе двигателя на различных сортах топлива в зависимости от наличия и эффективности системы пробоподготовки, определяющей количество «мешающих» компонентов в анализируемой пробе газов, а также после каждой замены выработавших ресурс электрохимических детекторов.

2. Результаты исследовательских испытаний

Основная цель проведения исследовательских испытаний двигателя типа Д49 исполнения V-16 модели 4-10Д49 состояла в определении оптимального значения угла опережения впрыска топлива, при котором обеспечивается максимально возможное повышение топливной экономичности при условии соблюдения действующего норматива IMO Tier-II по выбросам NO_x . В процессе проведения испытаний задача оптимизации элементов проточной части турбокомпрессора ТК 35В-31 была решена специалистами ООО СКБТ.

Результаты испытаний в наиболее общем виде, позволяющем проследить изменение основных целевых показателей двигателя в зависимости от угла опережения впрыска топлива сведены в

Изменение рабочих параметров и выбросов NO_x двигателя 4-10Д49 (3630 кВт при 1000 об/мин) в зависимости от $\varphi_{впр}$ при $P_{МДМ}$ и работе по нагрузочной характеристике (цикл испытаний D2)

№ п/п	Наименование, размерность	Угол опережения впрыска, град ПКВ до ВМТ				
		14	16	17	18	20
		Значения параметров при $P_{МДМ} = 3630$ кВт				
1	Удельный эффективный расход топлива, г/кВт·ч	226,12	221,00	217,76	217,57	212,59
2	Удельный эффективный расход воздуха, г/кВт·ч	7,5	7,3	7,0	6,8	6,7
3	Давление наддува (избыточное), кПа	243	242	236	225	212
5	Температура ОГ перед турбиной, °С	623	612	604	606	604
5	Удельный выброс NO_x , г/кВт·ч	8,26	8,27	8,47	8,61	10,97
6	Максимальное давление в цилиндре, бар	125	127	129	130	132
		Средневзвешенные значения параметров (цикл D2)				
7	Удельный средневзвешенный расход топлива, г/кВт·ч	243,1	239,1	236,1	236,4	231,8
8	Удельный средневзвешенный выброс NO_x , г/кВт·ч	7,04	7,35	7,86	8,23	10,26

табл. 1 и представлены в графической форме на рис. 3–8.

При анализе данных, приведенных в табл. 1, следует принять во внимание, что значения рабочих параметров и выбросов NO_x при изменении $\varphi_{впр}$ от 13 до 17 град ПКВ до ВМТ) получены при различных вариантах конфигурации проточной части турбокомпрессора ТК 35В-31 до того, как она была окончательно оптимизирована.

Результаты испытаний, обработанные по методике, изложенной в разделе 1.3, показали, что условие соответствия двигателя 4-10Д49 нормативу IMO Tier-II ($NO_x = 8,98$ г/кВт·ч) обеспечивается при значении $\varphi_{впр} \leq 18$ град ПКВ до ВМТ (рис. 3).

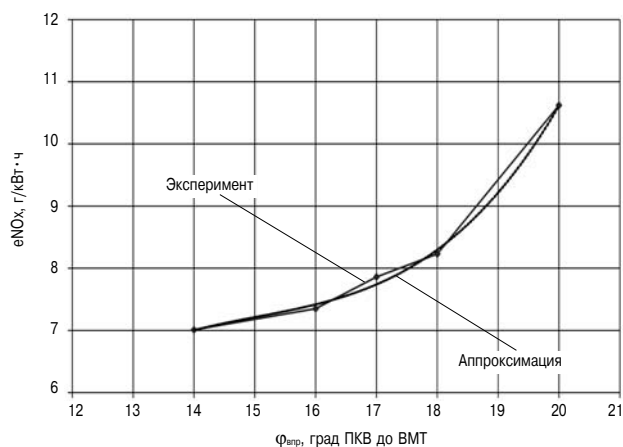


Рис. 3. Изменение удельного средневзвешенного выброса NO_x двигателя модели 4-10Д49 с ТК 35В-31 в зависимости от $\varphi_{впр}$ (нагрузочная характеристика, цикл испытаний D2)

Таблица 1

При значении $\varphi_{впр} = 18$ град ПКВ до ВМТ удельный средневзвешенный выброс NO_x составил 8,23 г/кВт·ч, что предусматривает минимальный запас до предельного значения норматива IMO Tier-II в количестве $NO_x = 0,75$ г/кВт·ч, необходимый для учета погрешностей при сборке и регулировках построенных двигателей членов семейства. Удельный средневзвешенный расход топлива (эквивалент эксплуатационного расхода) по режимам цикла D2 составил $b_z = 236,4$ г/кВт·ч (снижен на 4,5 % по сравнению с расходом топлива двигателя в исходном состоянии при ограничениях, вносимых концепцией семейства «Family 22Д49»), однако уровень экономичности базового двигателя модели 22Д49 семейства «Family 22Д49» ($b_z = 225,4$ г/кВт·ч) не был достигнут (рис. 4). Достигнутый удельный эффективный расход топлива на режиме $P_{МДМ}$ (рис. 5), где $b_e = 217,57$ г/кВт·ч, также остался выше на 3,1 % по сравнению с удельным расходом топлива базовым двигателем ($b_e = 211,23$ г/кВт·ч). Уровень экономичности, соответствующий базовому двигателю семейства «Family 22Д49» (модель 22Д49), может быть достигнут на двигателе модели 4-10Д49, уком-

данным

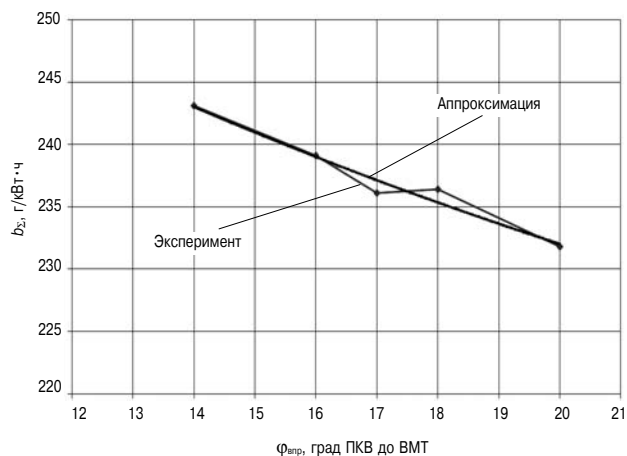


Рис. 4. Изменение удельного средневзвешенного расхода топлива (b_z) двигателя модели 4-10Д49 с ТК 35В-31 в зависимости от $\varphi_{впр}$ (нагрузочная характеристика, цикл испытаний D2)

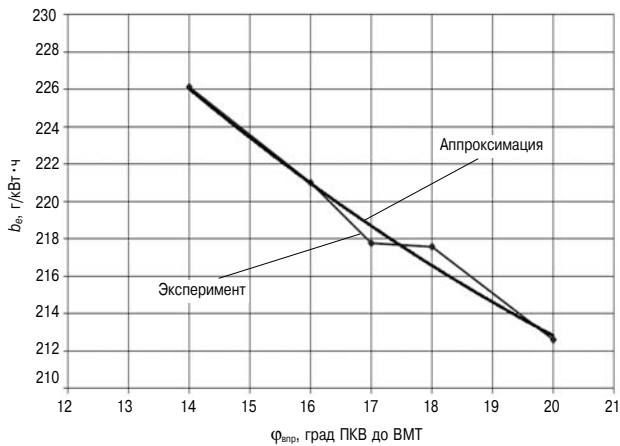


Рис. 5. Изменение удельного эффективного расхода топлива (b_e) двигателя модели 4-10Д49 с ТК 35В-31 на режиме $P_{МДМ}$ в зависимости от значения $\phi_{впр}$

плектованным агрегатом наддува отечественного производства ТК 35В-31, только при значении $\phi_{впр} \geq 20$ град ПКВ до ВМТ.

Однако при этом не соблюдается требование соответствия нормативу ИМО Tier-II (превышение нормы выбросов NO_x на 14 %). Следует отметить, что двигатели типа Д49 исполнения V-16, построенные по программе импортозамещения и предназначенные для установки на спецобъектах, для которых ограничения на выбросы вредных веществ отсутствуют, могут быть отрегулированы на режим наилучшей экономичности (см. рис. 5).

Условия надежности и безопасности эксплуатации установленного судового двигателя, в соответствии с требованиями правил Регистра, определяются двумя параметрами — максимальной температурой газов перед турбиной (T_{exh}) и максимальным давлением в цилиндре (p_z). Для двигателя типа Д49 исполнения V-16 модели 4-10Д49 предельные значения этих параметров

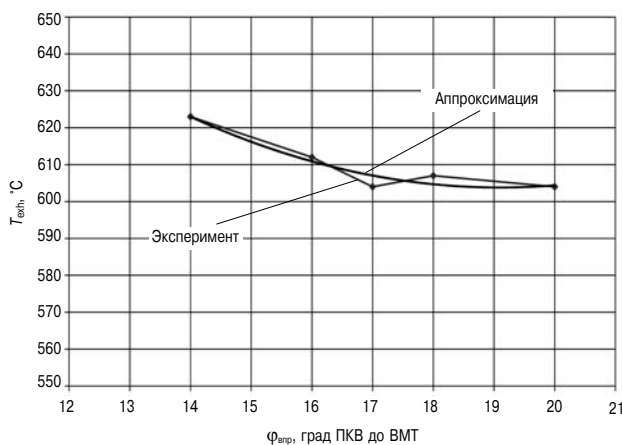


Рис. 6. Изменение температуры газов перед турбиной двигателя модели 4-10Д49 с ТК 35В-31 на режиме $P_{МДМ}$ при различных значениях $\phi_{впр}$

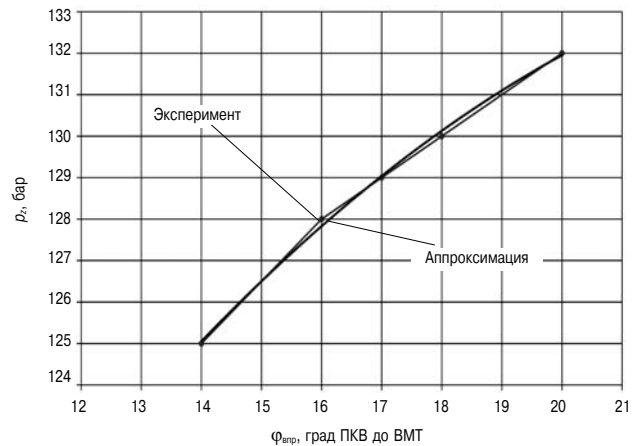


Рис. 7. Изменение максимального давления в цилиндре двигателя модели 4-10Д49 с ТК 35В-31 на режиме $P_{МДМ}$ при различных значениях $\phi_{впр}$

установлены на уровне: $T_{exh} \leq 650$ °C; $p_z \leq 150$ бар. При выбранном в качестве оптимального угла опережения впрыска топлива $\phi_{впр} = 18$ град ПКВ до ВМТ значения указанных параметров безопасности находятся в комфортной зоне в пределах всех режимов эксплуатационной характеристики дизеля 4-10Д49 (см. табл. 1 и рис. 6 и 7).

Так, например, при соблюдении условия $\phi_{впр} \leq 18$ град ПКВ до ВМТ, температура газов перед турбиной не превышает 610 °C (при максимально допустимом значении, установленном изготовителем турбокомпрессора $T_{exh} \leq 650$ °C), а максимальное давление в цилиндре $p_z \leq 130$ бар.

При выбранном в качестве оптимального значения $\phi_{впр} = 18$ град ПКВ до ВМТ турбокомпрессор отечественного производства ТК 35В-31 с проточной частью, оптимизированной под условия работы судового дизеля 4-10Д49, обеспечивает приемлемые характеристики по производительности и давлению наддува (рис. 8) с со-

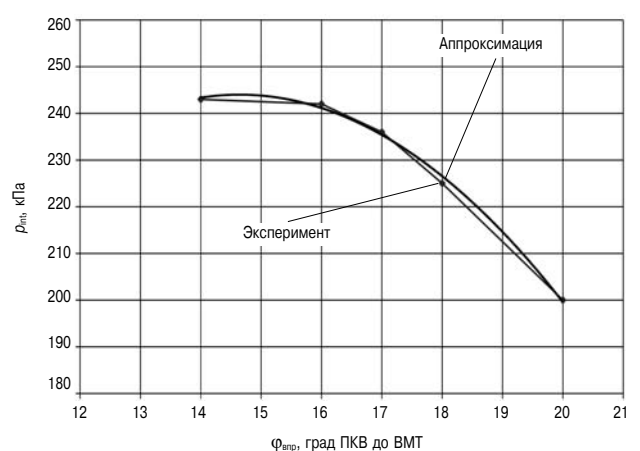


Рис. 8. Изменение давления наддува агрегатом ТК 35В-31 при работе двигателя модели 4-10Д49 на режиме $P_{МДМ}$ при различных значениях $\phi_{впр}$

Таблица 2

**Результаты испытаний двигателя 4-10Д49
(3630 кВт при 1000 об/мин)
на выбросы вредных веществ**

Цикл испытаний	D2				
	NO _x	CO	CH	PM	b _Σ
Удельные средневзвешенные значения, г/кВт·ч	8,23	1,20	0,13	0,21	236,4
Норма выброса NO _x (ИМО Tier-II), г/кВт·ч	8,98	—	—	—	—
Нормы выбросов по ГОСТ 31967–2012	8,98	1,50	0,40	—	—

блюдением требований безопасности, предписанных правилами РС.

Результаты испытаний двигателя модели 4-10Д49 в оптимальном состоянии на соответствие международным (ИМО Tier-II) и российским нормативам выбросов вредных веществ в атмосферный воздух (ГОСТ 31967–2012) представлены в табл. 2. Они показывают, что двигатели типа Д49 исполнения V-16, построенные по программе импортозамещения, укомплектованные турбокомпрессорами отечественного производства ТК 35В-31, полностью соответствуют требованиям охраны окружающей среды, обладают современным уровнем потребительских свойств, конкурентоспособны и далеко не исчерпали заложенный в их конструкции потенциал модернизации.

Выводы и предложения

Основные выводы, следующие из результатов исследовательских испытаний, выполненных в целях повышения экономичности и надежности судовых двигателей типа Д49 исполнения V-16, построенных на АО «Коломенский завод» по программе импортозамещения, при ограничениях, установленных требованиями ИМО Tier-II по выбросам NO_x, можно сформулировать следующим образом.

1. Для дизеля модели 4-10Д49 экспериментально определены оптимальные регулировки и комплектация, при которых обеспечивается конкурентоспособный уровень технико-экономических характеристик и соответствие действующим международным нормам выбросов вредных веществ с отработавшими газами.

2. Экспериментально подтверждено, что агрегаты наддува фирмы АВВ, поставки которых в

РФ были прекращены с введением секторальных экономических санкций, могут быть успешно заменены при комплектации двигателей типа Д49 турбокомпрессорами отечественного производства, выпуск которых освоен отечественными специализированными предприятиями.

3. С учетом того, что комплектация дизелей типа Д49 исполнения V-16 компонентами, влияющим на выбросы NO_x, изменена, а оптимальное значение $\varphi_{впр}$ выходит за пределы ограничений, установленных концепцией сертифицированного семейства «Family 22Д49», целесообразно сформировать новое семейство судовых двигателей «Family 22Д49RU», представленное базовым двигателем модели 4-10Д49 мощностью 3630 кВт при 1000 об/мин.

4. Положения действующей редакции «Технического кодекса по NO_x» допускают применение для целей сертификационных испытаний альтернативные газоанализаторы при условии подтверждения эквивалентности результатов измерений с эталонными хемилюминесцентными газоанализаторами. При этом достижение эквивалентности результатов измерений возможно только при наличии корреляционных зависимостей, полученных экспериментально, с учетом свойств объекта испытаний (имеется ввиду вид топлива и способ его воспламенения), конструкции системы пробоподготовки, определяющей количество в составе анализируемой пробы «мешающих» компонентов, а также при подтверждении корреляции после каждой замены выработавших ресурс электрохимических детекторов.

Литература

1. Revised MARPOL 73/78 ANNEX VI. Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships. Resolution MEPC 176(58). IMO, London, October 10, year 2008.
2. Миляев С.Б. Оптимизация фазовых показателей сгорания в дизельных и газовых двигателях для снижения выбросов оксидов азота // Двигателестроение. 2019. № 1. С. 14–19.
3. Новиков Л.А. Показатели вредных выбросов как средство конкурентной борьбы за рынок судовых и тепловозных дизелей // Двигателестроение. 2010. № 3. С. 18–21.
4. Revised NO_x TECHNICAL CODE (2008). Technical Code on Control of Emission of Nitrogen Oxides from Marine Diesel Engines. Resolution MEPC 176(58). IMO, London, October 10, year 2008.