УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ И АВТОРЫ!

Редакция журнала «Двигателестроение» информирует Вас о завершении процедуры подготовки государственной программы финансовой поддержки отрасли промышленного, судового и тепловозного двигателестроения, решение о необходимости которой было принято Правительственной комиссий по транспорту и связи под председательством заместителя председателя Правительства РФ С.Б. Иванова в декабре 2009 г.

Постановлением Правительства Российской Федерации № 820 от 6 октября 2011 г., были утверждены изменения, внесенные в федеральную целевую программу (ФЦП) «Национальная технологическая база» на 2007–2011 гг. Внесенные изменения по большей части относятся к дополнению действующей ФЦП новым разделом — подпрограммой «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011–2015 годах дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» (далее подпрограмма). В этом номере журнала опубликован с некоторыми сокращениями текст подпрограммы, поскольку его содержательная текстовая часть в значительной мере дублирует ранее опубликованную концепцию (см. журнал «Двигателестроение» № 2 (244), стр. 3–11). С полным текстом принятых изменений к ФЦП и содержанием мероприятий подпрограммы можно ознакомиться на официальном сайте Министерства промышленности и торговли РФ.

Функции государственного Заказчика и координатора мероприятий подпрограммы поручены департаменту базовых отраслей промышленности Министерства промышленности и торговли РФ (почтовый адрес: 109074, Москва, Китайгородский проезд, д. 7, контактное лицо по вопросам реализации мероприятий подпрограммы — Леонтьева Светлана Владимировна, тел. +7 (495) 632-8928, факс +7 (499) 346-0487, E-mail — Leontieva@minprom.gov.ru).

Безусловный и наибольший интерес для наших читателей и научно-технической общественности отрасли двигателестроения представляет Приложение № 3 подпрограммы, которое содержит полный перечень научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), намеченных к реализации, с указанием сроков их исполнения и объема финансирования из средств Федерального бюджета и привлеченных средств исполнителей (см. стр. 10 этого номера).

Перечень намеченных к реализации НИОКР включает 46 (сорок шесть) наименований, содержащихся в пяти разделах подпрограммы (см. раздел 3, стр. 7).

Конкурсные проекты НИОКР, включенные в подпрограмму, охватывают практически все наиболее актуальные направления развития современного промышленного дизелестроения. При этом по всем направления предусмотрено проведение фундаментальных исследований, из чего следует, что за пять лет предстоит преодолеть двадцатилетнее отставание отрасли от технического уровня, достигнутого в двигателестроении за рубежом, не учитывая при этом, что все это время в России двигателестроение не только не развивалось, а постепенно сдавало свои позиции, утратив научный задел, технологии и квалифицированные кадры как в прикладной науке, так и в производстве. В этом случае широта замаха (в данном случае это наиболее подходящий термин) будет способствовать только распыливанию достаточно скромных средств (примерно восемь миллиардов рублей), отведенных Правительством РФ на решение проблем одной из ключевых отраслей промышленности, что не позволит сосредоточить необходимые материальные, научные, технические и кадровые ресурсы на ключевых направлениях — создании базовых модификаций современных промышленных двигателей.

Очевидно, что проведение поисковых и фундаментальных исследований в области развития конструкций дизелей и газовых двигателей (то есть создание научного задела) должно предшествовать созданию новых двигателей, однако в принятой программе большинство поисковых НИОКР начинается только в 2012–2013 гг., то есть на год позже, чем начало создания собственно двигателей. При таком построении календарного плана реализации мероприятий подпрограммы закономерно возникает, вопрос: На каком научном заделе заводами будут создаваться базовые модификации современных промышленных двигателей, если таковой задел еще даже не создан? Однако хорошо хотя бы то, что наличие проблемы признано на государственном уровне и старт программы развития отечественного промышленного двигателестроения состоялся.

26 октября 2011 г. Министерством промышленности и торговли РФ был объявлен открытый

конкурс на право заключения государственных контрактов на выполнение НИОКР по федеральной целевой программе «Национальная технологическая база» на 2007–2011 гг., подпрограмма «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011–2015 годах дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» (номер извещения 0173100009511000389, уникальный номер закупки 269/05-ДИЗ-26.10ок.) На конкурс были выставлены первые десять лотов, охватывающих все пять разделов мероприятий подпрограммы. Подробную информацию о выставленных на торги лотах, участниках и победителях конкурса можно найти в приложении № 3 мероприятий подпрограммы.

В число первых победителей открытого конкурса вошли ОАО «Пензадизельмаш» (г. Пенза) ОАО «Звезда» (Санкт-Петербург), ФГУП «НПО автоматики» (Екатеринбург), ОАО «Научно-исследовательский институт двигателей» НИИД (Москва), ФГОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» МАДИ (Москва) и пока неизвестная профессиональному сообществу двигателестроителей фирма ООО «Рафф-софт» (Москва). Судя по названию и информации, размещенной в сетевых ресурсах, ООО «Рафф-софт» специализируется на создании программных продуктов, однако это не помешало данной организации выиграть узкоспециализированные «дизельные» лоты № 5 «Создание конструкций и организация промышленного производства поршневых колец и их комплектов для обеспечения разработки базовых образцов дизельных двигателей и их последующей модернизации» и № 8 «Проведение поисковых и экспериментальных исследований по оценке термомеханической выносливости поршней, втулок цилиндра и крышек цилиндра дизелей для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей». Из данных сетевых ресурсов следует, что ООО «Рафф-софт» несмотря на достаточно юный возраст (создана в 2008 г.), стала одним из самых удачливых игроков в части одержания побед в самых разнообразных конкурсах, проекты которых финансируются из госбюджета, и только в 2010 г. выиграла десять госбюджетных проектов, направленных на разработки в областях медицинской техники, энергосбережения, геологоразведки и т. д. Редакция предпримет все необходимые усилия для того, чтобы в самом ближайшем будущем познакомить наших читателей с результатами инновационной деятельности нового игрока на рынке оказания высокотехнологичных услуг в области развития промышленного двигателестроения.

Поздравляем первых победителей конкурса, желаем им успешно реализовать выигранные конкурсные проекты, и предлагаем свои услуги по внеочередной публикации наиболее интересных и значимых промежуточных и заключительных результатов выполняемых НИОКР.

Редакция журнала «Двигателестроение» искренне благодарит Председателя Комитета по науке и наукоемким технологиям Государственной Думы Федерального собрания РФ пятого созыва, д.т.н., проф. В.А. Черешнева за активную и решающую поддержку в Правительстве РФ инициативы ведущих специалистов российской научной школы о необходимости развития отрасли отечественного промышленного двигателестроения.

Главный редактор Л.А. Новиков

ПОДПРОГРАММА «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011–2015 годах дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на 2007–2011 годы

I. Характеристика проблемы, на решение которой направлена подпрограмма

Производство дизельных двигателей является одним из важнейших направлений в машиностроении, оказывающим значительное влияние на решение экономических, социальных, оборонных, экологических, научно-технических проблем в России и других промышленно развитых странах.

Дизельные двигатели используются в качестве привода для наземного (автомобильного и железнодорожного), водного транспорта, тракторного и сельскохозяйственного машиностроения, военной техники, автономных постоянной работы, аварийных и резервных источников электроснабжения. Характеристики дизельных двигателей определяют энергетические, экономические, мас-

согабаритные, экологические показатели конечной техники и показатели надежности, а также значительно влияют на стоимость ее жизненного цикла, которая более чем наполовину определяется затратами на горюче-смазочные материалы в течение всего срока службы.

Производство собственных конструкций дизельных двигателей для вооруженных сил, в том числе для обеспечения подвижности различных видов вооружений и военной техники, мобильной энергетики, возможность развертывания их выпуска в мобилизационный период обеспечивает обороноспособность страны и имеет стратегическое значение.

Анализ современного состояния российского дизелестроения показывает, что отрасль несколько лет находится в кризисе. Неблагополучное состояние предприятий отрасли стало следствием долговременного развития следующих негативных явлений и факторов:

➢ банкротство и перепрофилирование в процессе и после приватизации целого ряда дизелестроительных предприятий и ведущих организаций отраслевой науки;

➢ значительная изношенность основных производственных фондов, достигающая на большинстве сохранившихся заводов 75–85 %;

➢ отсутствие прикладных научных исследований и опытно-конструкторских работ, определяющих прогресс в дизелестроении;

➢ ликвидация как нерентабельных опытно-конструкторских подразделений и производств на дизелестроительных заводах;

➢ отсутствие развития отечественных специализированных производств, низкий технический уровень комплектующих и компонентов дизелей;

➢ утеря квалифицированных кадров конструкторов, исследователей, технологов и рабочих профессий в дизелестроении из-за утраты престижа, социального статуса, неадекватно низкой в сравнении с их квалификацией и отдачей оплаты труда; неуклонно снижающийся уровень подготовки квалифицированных кадров для дизелестроения, ликвидация профильных кафедр в ряде вузов;

➢ разобщенность отдельных собственников дизелестроительных производств, для большинства из которых дизелестроение является непрофильным бизнесом, несовпадение их интересов с интересами и целями государства в развитии стратегических отраслей экономики.

Немаловажным является и то, что дизелестроение отличается значительными объемами инвестиций и сроками создания новых конструкций и их внедрения в производство. При этом базовые модификации семейств дизелей, как правило, создаются для производства в течение 30–50 лет с последующей многократной модернизацией. Инвестиции только в создание новых конструкций могут составлять до 100–300 млн евро, а по некоторым проектам – достигать 1 млрд евро. При этом существуют значительные технические и технологические риски на этапах освоения производства. Ни один из производителей дизелей в России не имеет возможности инвестировать в разработку и освоение новых двигателей самостоятельно.

Создание конструкций и организация производства современных дизельных двигателей для железнодорожного подвижного состава, судов и кораблей гражданского и военно-морского флотов, установок малой энергетики и технологических установок — важнейшая государственная задача.

Проблемой, на решение которой направлена подпрограмма «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011– 2015 годах дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» (далее — подпрограмма), является недостаточный уровень конкурентоспособности производимых в Российской Федерации дизельных двигателей и их компонентов, а также современных отечественных разработок в этой области.

Основными составляющими этой проблемы являются:

➢ неполное удовлетворение потребности потребителей в мощных дизельных двигателях, а также их требований к конструкции дизельных двигателей, сдерживающее развитие российского транспортного машиностроения и других отраслей промышленности;

➢ неразвитая система качественного сервисного обслуживания;

➢ ограничение перспективы возможного экспорта дизельных двигателей;

➢ отсутствие потенциала в конструкциях и технологиях для соответствия международным экологическим требованиям в ближайшей перспективе, которое создаст серьезные проблемы в отношении возможности поставки на традиционные зарубежные рынки транспортных средств, оснащаемых дизельными силовыми установками российского производства;

➢ сравнительно высокое соотношение цена–качество, снижающее возможности выхода на зарубежные рынки и способствующее полному вытеснению продукции российского производства с внутреннего рынка и зависимости от зарубежных производителей;

➢ низкие ресурсные показатели дизельных установок, снижающие их привлекательность для потенциальных потребителей.

Указанные факторы приводят к малому объему производства и продаж дизельных двигателей, что

не позволяет тратить необходимые средства на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы и подготовку производства.

От решения указанной проблемы зависит эффективное обеспечение промышленной безопасности страны, укрепление ее обороноспособности, экономический подъем и повышение конкурентоспособности российского двигателестроения, а также рост благосостояния населения страны.

Устранение препятствий, сдерживающих развитие российского дизелестроения, требует применения адекватных комплексных методов и механизмов решения. Необходимость применения программно-целевого метода объясняется рядом факторов, в том числе масштабностью и государственной значимостью проблемы, ресурсоемкостью решения проблемы, необходимостью согласования мероприятий по развитию дизелестроения с текущими и перспективными задачами реализации других государственных программ.

Под общим наименованием «дизелестроение» понимается широкий спектр разнородных промышленных предприятий. Компоненты дизельных двигателей, необходимые для создания перспективных типоразмерных рядов дизелей, производятся не только на предприятиях дизелестроения, но и в других отраслях российской промышленности. Производители дизельных двигателей также имеют свою специализацию. Кроме того, потребители дизельных двигателей и промышленной продукции с их применением не консолидированы и относятся к разным отраслям — судостроение, автомобилестроение, тяжелое транспортное машиностроение, машиностроение средств энергетики, атомная энергетика, топливно-энергетический комплекс.

Мировой опыт дизелестроения показывает, что технический уровень выпускаемых дизельных двигателей, их многообразие по размерности, эффективным показателям, а также качество и удешевление продукции зависят существенным образом от развития производства комплектующих и компонентов. За последние годы наметилась явная тенденция опережающего совершенствования и развития компонентов, которые зачастую стимулируют развитие комплектных дизелей.

Таким образом, в рамках подпрограммы будут не только разработаны базовые модификации дизельных двигателей и на их основе типоразмерные ряды дизельных двигателей для отдельных видов техники, но обеспечена подготовка производства выпуска современных компонентов и систем, в том числе:

➢ деталей цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма;

➢ высокоэффективных турбокомпрессоров и систем турбонаддува с электронным управлением воздухоснабжением двигателя;

➢ топливной аппаратуры и систем топливоподачи с электронным управлением, обеспечивающих гибкое управление законом топливоподачи и высокие энергии впрыска топлива;

➢ элементов систем рециркуляции и каталитической очистки отработавших газов;

➢ систем управления и диагностики.

Отдельной проблемой является сложившееся отставание российских предприятий по широкому спектру технологий для получения сложных заготовок дизельного производства, таких как литье из высокопрочных чугунов и чугунов с вермикулярным графитом, стальное литье, биметаллическое литье, а также обработка поверхностей деталей химико-термическим, лазерным, плазменным методами.

В целом подпрограмма обладает значительным мультипликативным эффектом, а направления ее реализации в значительной мере соответствуют приоритетным задачам социально-экономического развития Российской Федерации.

II. Основные цели и задачи подпрограммы, сроки и этапы ее реализации, целевые индикаторы и показатели

Целью подпрограммы является разработка и освоение производства конкурентоспособных типоразмерных рядов дизельных двигателей новой конструкции, а также создание задела научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для сохранения конкурентоспособности российского дизелестроения в долгосрочной перспективе.

Ключевыми показателями реализации подпрограммы являются доля прироста продукции российского дизелестроения на внутреннем рынке в результате реализации подпрограммы — 80 % к 2015 году и годовой объем реализуемой продукции отрасли, выпущенной в результате реализации подпрограммы, — 22 368,5 млн рублей к 2015 году.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

➢ проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на разработку ряда перспективных дизельных двигателей;

➢ организация научно-экспериментальной и стендовой базы для отработки новых конструктивных решений в области дизелестроения;

➢ организация серийного производства новых дизельных двигателей разработанной конструкции, освоение и разработка новых высокотехнологических процессов производства деталей дизелей, а также решение вопросов кооперации со смежными отраслями.

Выполнение подпрограммы предусматривается в 2011–2015 годах в 1 этап.

Риски реализации подпрограммы в значительной мере определяются:

➢ конъюнктурой мирового рынка, влияющей на объем и доходность продаж дизельных двигателей и их компонентов;

➢ развитием конкурирующих научно-исследовательских работ и технологий за рубежом, влияющим на возможность патентования и продажи лицензий на результаты интеллектуальной деятельности;

➢ сокращением уровня внебюджетных расходов, направленных на реализацию мероприятий подпрограммы;

➢ инвестиционным климатом, влияющим на возможности привлечения инвестиций в дизелестроительные производства.

Целевыми индикаторами и показателями подпрограммы являются:

➢ количество внедренных в производство технологий, разработанных в рамках подпрограммы;

➢ количество внедренных технологий, разработанных в рамках выполнения поисковых и фундаментальных исследований;

➢ количество патентов и других документов, удостоверяющих новизну технологических решений;

➢ количество типов (видов) созданных ключевых компонентов;

➢ количество разработанных и запущенных в производство базовых модификаций дизельных двигателей;

➢ доля прироста продукции российского дизелестроения на внутреннем рынке в результате реализации подпрограммы;

➢ годовой объем реализуемой продукции отрасли, выпущенной в результате реализации подпрограммы.

Прекращение действия подпрограммы наступает в случае завершения ее реализации, а досрочное прекращение — в соответствии с решением Правительства Российской Федерации и порядком разработки и реализации федеральных целевых программ и межгосударственных целевых программ, в осуществлении которых участвует Российская Федерация, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 26 июня 1995 г. № 594.

III. Мероприятия подпрограммы

Реализация подпрограммы в течение 2011–2015 годов включает в себя разработку конструкции и опытных образцов базовых модификаций современных дизельных двигателей для различных применений, укомплектованных современными системами и компонентами, а также развитие экспериментальной базы для отработки новых конструктивных решений в области дизелестроения. Научное сопровождение разработок обеспечит их высокий технический уровень.

Структура подпрограммы включает в себя следующие направления:

➢ разработка базовых образцов рядных и V-образных среднеоборотных дизелей и дизель-генераторных установок в мощностном диапазоне 500–7500 кВт (450–1500 об/мин) для магистральных грузовых и пассажирских, маневровых, маневрово-вывозных и горочных локомотивов, дизель-редукторных агрегатов пропульсивных комплексов судов и кораблей Военно-морского флота, электростанций малой энергетики и стационарных технологических средств, специальных проектов резервных энергетических установок атомной энергетики;

➢ разработка базовых образцов высокооборотных дизелей в мощностном диапазоне 400–3000 кВт (1500–3000 об/мин) для самоходного подвижного железнодорожного состава, для маневровых тепловозов малой мощности, пропульсивных комплексов судов внутреннего и прибрежного плавания, катеров Военно-морского флота, транспортно-технологических средств, контейнерных электростанций малой энергетики и др.;

➢ создание конструкций и организация промышленного производства компонентов дизельных двигателей;

➢ развитие исследовательской и экспериментальной базы для отработки новых конструктивных решений в области промышленного дизелестроения;

➢ выполнение поисковых и фундаментальных исследований.

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области дизелестроения будут вестись по следующим основным направлениям:

➢ совершенствование рабочих процессов, улучшение экологических показателей дизелей;

➢ снижение расхода топлива;

➢ повышение показателей надежности дизелей;

➢ применение микропроцессорных систем управления;

➢ применение газовых, тяжелых нефтяных, альтернативных видов топлива и их композиций.

Реализация указанных направлений позволит разработать и освоить производство конкурентоспособных типоразмерных рядов дизельных двигателей новой конструкции и обеспечит достижение целевых индикаторов и показателей реализации подпрограммы.

Перечень мероприятий подпрограммы приведен в приложении № 3.

IV. Обоснование ресурсного обеспечения подпрограммы

Финансовое обеспечение подпрограммы предусматривает привлечение средств федерального бюджета и внебюджетных средств, формируемых за счет собственных средств организаций — исполнителей мероприятий подпрограммы с возможным привлечением российских и иностранных инвесторов, займов и кредитов.

Предельный (прогнозный) общий объем финансирования мероприятий подпрограммы в 2011—2015 годах оценивается в размере 16 067 млн рублей (в ценах соответствующих лет).

Около 49 % средств, предусмотренных на реализацию подпрограммы, составят средства федерального бюджета и 51 % — внебюджетные средства.

Объем ресурсного обеспечения подпрограммы в части научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ определялся по результатам оценки трудовых и материальных затрат, необходимых для выполнения мероприятий подпрограммы (с учетом действующих нормативов и показателей в сфере финансово-экономической деятельности организаций — исполнителей мероприятий подпрограммы).

Средства федерального бюджета будут использоваться в первую очередь на создание научно-технической продукции. Распределение прав собственности на результаты выполнения работ будет осуществляться в соответствии с законодательством Российской Федерации в сфере интеллектуальной собственности.

Привлечение внебюджетного финансирования предусматривается в рамках действующего законодательства организациями — исполнителями мероприятий подпрограммы. Источниками финансирования могут выступать как собственные, так и привлеченные средства указанных организаций.

Координация и контроль деятельности организаций — исполнителей мероприятий подпрограммы по привлечению и использованию средств внебюджетных источников будут осуществляться государственным заказчиком подпрограммы.

Замещение средств внебюджетных источников средствами федерального бюджета не допускается.

V. Механизм реализации подпрограммы

Ответственным за формирование и реализацию подпрограммы является Министерство промышленности и торговли Российской Федерации, которое выступает государственным заказчиком.

Управление реализацией подпрограммы будет осуществляться в соответствии с порядком разработки и реализации федеральных целевых программ и межгосударственных целевых программ, в осуществлении которых участвует Российская Федерация, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 26 июня 1995 г. № 594.

Для подготовки рекомендаций по тематике работ может быть создан постоянно действующий научно-экспертный совет по сопровождению подпрограммы, в состав которого могут включаться ведущие ученые и специалисты дизелестроения и смежных отраслей по основным направлениям мероприятий подпрограммы.

Головные исполнители (исполнители) мероприятий подпрограммы определяются в соответствии с законодательством Российской Федерации и обеспечивают в соответствии с государственными контрактами выполнение проектов, необходимых для реализации подпрограммы, а также организуют кооперацию соисполнителей.

Управление реализацией подпрограммы, а также контроль ее выполнения и эффективности расходования бюджетных средств в установленном порядке осуществляет государственный заказчик подпрограммы, а также Министерство экономического развития Российской Федерации и другие федеральные органы исполнительной власти в соответствии с их компетенцией.

Реализация подпрограммы осуществляется на основе государственных контрактов на поставки товаров, выполнение работ и оказание услуг для государственных нужд, а также на основе иных гражданско-правовых договоров.

Государственный заказчик сообщает в Министерство экономического развития Российской Федерации о заключенных государственных контрактах на поставки товаров, выполнение работ и оказание услуг для государственных нужд, а также иных гражданско-правовых договорах в рамках ресурсного обеспечения подпрограммы за счет средств федерального бюджета и внебюджетных источников.

Федеральная служба государственной статистики совместно с государственным заказчиком подпрограммы организует ведение ежеквартальной статистической отчетности о реализации подпрограммы. Порядок представления отчетности устанавливается Федеральной службой государственной статистики по согласованию с Министерством экономического развития Российской Федерации. Требования к представляемой статистической отчетности о реализации подпрограммы являются обязательными для всех отчитывающихся субъектов.

VI. Оценка социально-экономической и экологической эффективности подпрограммы

Подпрограмма обладает значительным мультипликативным эффектом. Реализация подпрограммы укрепит конструкторско-технологический потенциал, позволит не только развить разработку и производство компонентов и создать на их базе

новые модели дизельных двигателей, но и освоить передовые производственные технологии, которые затем будут вовлечены в промышленную кооперацию. Развитие современной, ориентированной на рынок сети специализированных производств компонентов и систем будет способствовать росту уровня конкурентоспособности российского машиностроения в целом. Специализированные производства могут быстрее интегрироваться в мировую сеть поставщиков комплектующих и оказаться более привлекательными для иностранных инвестиций.

Объем производства продукции дизелестроения, за исключением автотракторных дизелей, в России в настоящее время составляет около 20 млрд рублей, а с учетом импорта рынок оценивается в 35–40 млрд рублей в год. В натуральном выражении потребности российского рынка в рассматриваемых дизельных двигателях составляют 2,5–3 тыс. дизелей. В связи с реализацией программ развития судостроения и обновления подвижного состава на железнодорожном транспорте, а также с увеличением работ в области резервной энергетики, в том числе для атомных станций, к 2015 году ожидается увеличение объема рынка до 45 млрд рублей в ценах соответствующих лет. Увеличение рынка связано также с ростом спроса, постепенным импортозамещением и увеличением производства дизелей нового поколения.

Социально-экономическая эффективность реализации подпрограммы характеризуется следующими показателями:

➢ показатели коммерческой эффективности:

— объем реализуемой продукции отрасли (прогноз объема продаж) — 45 379 млн рублей;

— чистая прибыль предприятий — 1981 млн рублей;

— чистый дисконтированный доход — 1209 млн рублей;

— индекс доходности (рентабельность) инвестиций по чистому доходу предприятий — 1,149;

— срок окупаемости (период возврата) инвестиций за счет всех источников финансирования по чистому доходу предприятий — 9 лет;

— внутренняя норма доходности инвестиций — 4 процента;

➢ показатели бюджетной эффективности:

— налоги, поступающие в бюджет, — 3361 млн рублей;

— бюджетный эффект (к 2016 году) — 210 млн рублей;

— срок окупаемости (период возврата) бюджетных средств по налоговым поступлениям — 6 лет;

— индекс доходности (рентабельность) бюджетных средств по налоговым поступлениям — 1,4;

— удельный вес средств федерального бюджета (степень участия государства) в общем объеме финансирования — 0,49.

Дизельный двигатель составляет основу широкого ряда промышленных изделий, таких как тепловозы, суда, многоосная специальная колесная и гусеничная техника, для которых дизельные двигатели являются практически безальтернативной энергетической установкой.

Покупка зарубежных двигателей на комплектацию такой техники крайне нежелательна или невозможна. При этом иностранные компании, как правило, соглашаются только на поставку комплектной продукции.

Потеря производства конкурентоспособных российских дизельных двигателей фактически будет означать прекращение производства в России указанных промышленных изделий, совокупный рынок которых составляет в настоящее время более 200 млрд рублей ежегодно, а при реализации масштабных программ развития отраслей — потребителей дизельных двигателей (судостроения, транспортного машиностроения, атомной энергетики и др.) к 2015 году будет увеличиваться. При отсутствии производства в Российской Федерации конкурентоспособных дизельных двигателей реализация указанных программ будет существенно затруднена или остановлена.

Экологический эффект от выполнения мероприятий подпрограммы обусловлен устанавливаемыми для разрабатываемых дизельных двигателей требованиями по топливной экономичности и современными и перспективными нормами выброса вредных веществ (NO_x, CO, CH, HC). Уровень негативного воздействия на окружающую среду будет уменьшен не менее чем на 20 % за счет современной конструкции двигателей и вследствие использования систем, обеспечивающих более полное сгорание топлива.

Реализация подпрограммы в полной мере соответствует приоритетным задачам социально-экономического развития Российской Федерации.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 3
к подпрограмме «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011–2015 годах дизельных двигателей и их компонентов нового поколения»
федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на 2007–2011 годы

ПЕРЕЧЕНЬ

мероприятий (научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ) подпрограммы «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011–2015 годах дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на 2007–2011 годы

(млн рублей, в ценах соответствующих лет)

		Срок реализации, годы	Объем финансирования (в числителе указан общий объем финансирования, в знаменателе — объем финансирования за счет средств федерального бюджета)						Ожидаемые результаты
			2011–2015 всего	2011	2012	2013	2014	2015	
Направление 1. Разработка базовых образцов рядных и V-образных среднеоборотных дизельных двигателей и дизель-генераторных установок в мощностном диапазоне 500–7500 кВт (450–1500 об/мин) для магистральных грузовых и пассажирских, маневровых, маневрово-вывозных и горочных локомотивов, дизель-редукторных агрегатов пропульсивных комплексов судов и кораблей Военно-морского флота, электростанций малой энергетики и стационарных технологических средств, специальных проектов резервных энергетических установок атомной энергетики									
1.1	Разработка базовых образцов модельного ряда среднеоборотных рядных дизельных двигателей и дизель-генераторных установок для пропульсивных комплексов судов, маневровых, маневрово-вывозных и горочных тепловозов, электростанций малой энергетики и стационарных технологических средств в мощностном диапазоне 500– 1500 кВт	2011–2014	920 460	350 175	290 145	200 100	80 40	—	Образцы дизельных двигателей и дизель-генераторных установок в мощностном диапазоне 500–1500 кВт для применения в малом судостроении, энергетике и тепловозостроении с планируемыми показателями: удельный расход топлива (по ISO 3046-1) — не более 183 г/кВт·ч; удельный расход масла на угар на режиме полной мощности — не более 0,35 г/кВт·ч; назначенный ресурс дизеля до капитального ремонта — не менее 60 000 моточасов Планируемые индикаторы: внедрение в производство 3-х технологий; запуск в производство 1 базовой модификации дизельного двигателя; доля прироста продукции — 10 %; объем реализуемой продукции отрасли — 3200 млн рублей
		Уникальный номер закупки 269/05-ДИЗ-26.10ок Лот № 1. Поданы заявки от: 1. ОАО РУМО — отказано в допуске к участию в открытом конкурсе. **2. ОАО «Пензадизельмаш» — участник конкурса, с которым заключается госконтракт на выполнение работы.** 3. ОАО «Волжский дизель имени Маминых» — отказано в допуске к участию в открытом конкурсе.							
1.2	Разработка базовых образцов модельного ряда среднеоборотных рядных дизельных двигателей и дизель-генераторных установок маневровых тепловозов, самоходного железнодорожного подвижного состава и строительной техники в мощностном диапазоне 1500–3000 кВт	2013–2015	770 385	—	—	200 100	220 110	350 175	Образцы дизельных двигателей и дизель-генераторных установок в мощностном диапазоне 1500–3000 кВт для маневровых тепловозов, самоходного железнодорожного подвижного состава и строительной техники с планируемыми показателями: удельный расход топлива (по ISO 3046-1) — не более 183 г/кВт·ч; удельный расход масла на угар на режиме полной мощности — не более 0,35 г/кВт·ч; назначенный ресурс дизеля до капитального ремонта — не менее 60 000 моточасов Планируемые индикаторы: внедрение в производство 1-й технологии; запуск в производство 1 базовой модификации дизельного двигателя; доля прироста продукции — 10 %; объем реализуемой продукции отрасли — 2800 млн рублей
1.3	Разработка базовых образцов модельного ряда среднеоборотных V-образных дизельных двигателей и дизель-генераторных установок магистральных грузовых и пассажирских локомотивов в мощностном диапазоне 2000–4500 кВт	2011–2014	1302 650	532 265	350 175	300 150	120 60	—	Образцы дизельных двигателей и дизель-генераторных установок в мощностном диапазоне 2000–4500 кВт для магистральных локомотивов с планируемыми показателями: удельный расход топлива (по ISO 3046-1) – не более 185 г/кВт·ч; удельный расход масла на угар на режиме полной мощности — не более 0,35 г/кВт·ч; назначенный ресурс дизеля до капитального ремонта — не менее 60 000 моточасов Планируемые индикаторы: внедрение в производство 1-й технологии; запуск в производство 1 базовой модификации дизельного двигателя; доля прироста продукции — 10 %; объем реализуемой продукции отрасли — 2800 млн рублей
		Уникальный номер закупки 269/05-ДИЗ-26.10ок Лот № 2. Поданы заявки от: 1. ООО УДМЗ — отказано в допуске к участию в открытом конкурсе. 2. ОАО «Коломенский завод» — отказано в допуске к участию в открытом конкурсе. **3. ОАО «Пензадизельмаш» — победитель конкурса.** 4. ООО «Энкол» — участник конкурса.							

Продолжение Приложения 3

		Срок реализации, годы	Объем финансирования (в числителе указан общий объем финансирования, в знаменателе — объем финансирования за счет средств федерального бюджета)						Ожидаемые результаты
			2011–2015 всего	2011	2012	2013	2014	2015	
1.4	Разработка базовых образцов модельного ряда среднеоборотных V-образных дизельных двигателей для дизель-редукторных агрегатов пропульсивных комплексов судов и кораблей Военно-морского флота и дизель-генераторных установок малой энергетики в мощностном диапазоне 4500–7500 кВт	2013–2015	946 467	—	—	240 120	243 120	463 227	Образцы дизельных двигателей и дизель-генераторных установок в мощностном диапазоне 4500–7500 кВт для судового применения, а также обеспечения электроэнергией отдаленных районов, в том числе в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций с планируемыми показателями: удельный расход топлива (по ISO 3046-1) — не более 185 г/кВт·ч; удельный расход масла на угар на режиме полной мощности — не более 0,35 г/ кВт·ч; назначенный ресурс дизеля до капитального ремонта — не менее 60 000 моточасов Планируемые индикаторы: внедрение в производство 1-й технологии; запуск в производство 1 базовой модификации дизельного двигателя; доля прироста продукции — 10 %; объем реализуемой продукции отрасли — 2400 млн рублей
1.5	Разработка базовых образцов модельного ряда V-образных дизельных двигателей для специальных проектов резервных стационарных энергетических установок атомной энергетики в мощностном диапазоне не менее 3000 кВт	2012–2014	1044 519	—	374 187	300 148	370 184	—	Образцы дизельных двигателей и дизель-генераторных установок в мощностном диапазоне выше 3000 кВт для применения в качестве резервных установок энергоснабжения на атомных электростанциях, в том числе в условиях повышенной сейсмичности, с планируемыми показателями: удельный расход топлива (по ISO 3046-1) — не более 185 г/кВт·ч; удельный расход масла на угар на режиме полной мощности — не более 0,35 г/кВт·ч; назначенный ресурс дизеля до капитального ремонта — не менее 60 000 моточасов Планируемые индикаторы: внедрение в производство 1-й технологии; запуск в производство 1 базовой модификации дизельного двигателя; доля прироста продукции — 10 %; объем реализуемой продукции отрасли — 2900 млн рублей
Направление 2. Разработка базовых образцов высокооборотных дизельных двигателей в мощностном диапазоне 400–3000 кВт (1500–3000 об/мин) для самоходного подвижного железнодорожного состава, для маневровых тепловозов малой мощности, пропульсивных комплексов судов внутреннего и прибрежного плавания, катеров Военно-морского флота, транспортно-технологических средств, контейнерных электростанций малой энергетики и др.									
2.1	Разработка базовых образцов модельного ряда высокооборотных дизельных двигателей для дизель-генераторных установок самоходного подвижного железнодорожного состава, маневровых тепловозов малой мощности, строительной техники, пропульсивных комплексов судов внутреннего и прибрежного плавания, катеров Военно-морского флота в мощностном диапазоне 400–1700 кВт	2011–2014	1589 794	542 271	404 201	423 210	220 112	—	Образцы дизельных двигателей в мощностном диапазоне 400–1700 кВт для самоходного подвижного железнодорожного состава, маневровых тепловозов малой мощности, строительной техники, пропульсивных комплексов судов внутреннего и прибрежного плавания, катеров Военно-морского флота с планируемыми показателями: удельный расход топлива (по ISO 3046-1) — не более 195 г/кВт·ч; удельный расход масла на угар на режиме полной мощности — не более 0,5 г/кВт·ч; назначенный ресурс дизеля до капитального ремонта — не менее 36 000 моточасов Планируемые индикаторы: внедрение в производство 1-й технологии; запуск в производство 1 базовой модификации дизельного двигателя; доля прироста продукции — 10 %; объем реализуемой продукции отрасли — 2400 млн рублей
			Уникальный номер закупки 269/05-ДИЗ-26.10ок **Лот № 3. Поданы заявки от:** **1. ОАО «Звезда» — участник конкурса, с которым заключается госконтракт на выполнение работы.** 2. ООО УДМЗ — отказано в допуске к участию в открытом конкурсе. 3. ОАО «Тутаевский моторный завод» — отказано в допуске к участию в открытом конкурсе. 4. ООО ЧТЗ-УРАЛТРАК — отказано в допуске к участию в открытом конкурсе.						
2.2	Разработка базовых образцов модельного ряда высокооборотных V-образных дизельных двигателей для дизель-генераторных установок магистральных тепловоз-	2012–2015	1497 742	—	222 111	341 171	431 209	503 251	Образцы дизельных двигателей в мощностном диапазоне 1000–3000 кВт для магистральных тепловозов, пропульсивных комплексов морских судов, кораблей Военно-морского флота, транспортно-технологических средств, электростанций малой энергетики с планируемыми показателями: удельный расход топлива (по ISO 3046-1) — не более 205 г/кВт·ч; удельный расход масла на угар на режиме полной мощности — не более

		Срок реализации, годы	Объем финансирования (в числителе указан общий объем финансирования, в знаменателе — объем финансирования за счет средств федерального бюджета)						Ожидаемые результаты
			2011–2015	2011	2012	2013	2014	2015	
2.2	зов, пропульсивных комплексов морских и океанских судов, кораблей Военно-морского флота, транспортно-технологических средств, контейнерных электростанций малой энергетики в мощностном диапазоне 1000– 3000 кВт	2012–2015	1497 742	—	222 111	341 171	431 209	503 251	0,4 г/кВт·ч; назначенный ресурс дизеля до капитального ремонта — не менее 36 000 моточасов Планируемые индикаторы:внедрение в производство 1-й технологии; запуск в производство 1 базовой модификации дизельного двигателя; доля прироста продукции — 10 %; объем реализуемой продукции отрасли — 2100 млн рублей
Направление 3. Создание конструкций и организация промышленного производства компонентов дизельных двигателей									
3.1	Создание конструкций и промышленного производства прогрессивных систем турбонаддува для обеспечения разработки базовых образцов дизельных двигателей и их последующей модернизации	2013–2015	127 63	—	—	35 17	12 6	80 40	Образцы систем турбонаддува (не менее 3-х модификаций турбокомпрессоров, перепускные клапаны, датчики, системы управления, программное обеспечение) для вновь создаваемых российских двигателей, а также для ремонта и модернизации существующих российских дизельных двигателей с планируемыми показателями: коэффициент полезного действия турбокомпрессора — 0,55...0,6; срок службы до капитального ремонта — не менее 30 000 моточасов Планируемые индикаторы: внедрение в производство 1-й технологии; создание ключевых компонентов — 6 единиц; доля прироста продукции — 3 %; объем реализуемой продукции отрасли — 500 млн рублей
3.2	Создание конструкций и организация промышленного производства поршневых колец и их комплектов для обеспечения разработки базовых образцов дизельных двигателей и их последующей модернизации	2011–2014	92 46	30 15	26 13	24 12	12 6	—	Образцы поршневых колец (не менее 3-х типоразмерных рядов для высокоформсированных дизельных двигателей) с нанесенным на рабочие пояски маслосъемных колец нанокомпозитного покрытия (Tial бронза) Планируемые индикаторы: внедрение в производство 1-й технологии; создание ключевых компонентов — 6 единиц; доля прироста продукции — 3 %; объем реализуемой продукции отрасли — 600 млн рублей
			Уникальный номер закупки 269/05-ДИЗ-26.10ок Лот № 5. Поданы заявки от: 1. ООО «Рафф-софт»— единственный участник конкурса, с которым заключается госконтракт.						
3.3	Создание конструкций и организация промышленного производства подшипников коленчатого вала для обеспечения разработки базовых образцов дизельных двигателей и их последующей модернизации	2013–2015	67 33	—	—	30 15	21 10	16 8	Образцы подшипников скольжения (не менее 8 моделей), работающие при температурах выше 95 °С, для высокоформсированных дизельных двигателей с планируемыми показателями: максимально допустимая температура подшипника — 200 °С; срок службы — не менее 100 000 моточасов Планируемые индикаторы: внедрение в производство 1-й технологии; создание ключевых компонентов — 4 единицы; доля прироста продукции — 2 %; объем реализуемой продукции отрасли — 500 млн рублей
3.4	Создание конструкций и организация промышленного производства систем топливоподачи с микропроцессорным управлением и их компонентов для обеспечения разработки базовых образцов дизельных двигателей и их последующей модернизации	2012–2014	159 78	—	46 23	44 22	69 33	—	Образцы систем топливоподачи, включающие топливные насосы высокого давления, форсунки, системы микропроцессорного управления, трубопроводы высокого давления повышенной прочности для новых и модернизируемых двигателей (2–3 модельных ряда) с планируемыми показателями: максимальное давление впрыскивания топлива — 2000 бар; моторесурс — не менее 15 000 моточасов Планируемые индикаторы: внедрение в производство 1-й технологии; создание ключевых компонентов — 6 единиц; доля прироста продукции — 4 %; объем реализуемой продукции отрасли — 568,5 млн рублей

Продолжение Приложения 3

		Срок реализации, годы	Объем финансирования (в числителе указан общий объем финансирования, в знаменателе — объем финансирования за счет средств федерального бюджета)						Ожидаемые результаты
			2011–2015	2011	2012	2013	2014	2015	
3.5	Создание конструкций и организация промышленного производства программно-аппаратных средств управления дизельным двигателем для обеспечения разработки базовых образцов дизельных двигателей и их последующей модернизации	2011–2014	141 70	72 36	44 22	10 5	15 7	—	Образцы программно-аппаратных средств управления дизельным двигателем, включая датчики, системы цифрового сбора и анализа данных для управления, мониторинга состояния дизеля и эффективного планирования межремонтного эксплуатационного обслуживания (2–3 модельных ряда), с планируемыми показателями: количество управляемых цилиндров двигателя — 1...16 шт.; срок службы до капитального ремонта — 30 000 моточасов Планируемые индикаторы: внедрение в производство 1-й технологии; создание ключевых компонентов — 4 единицы; доля прироста продукции — 3 %; объем реализуемой продукции отрасли — 300 млн рублей
			Уникальный номер закупки 269/05-ДИЗ-26.10ок **Лот № 4. Поданы заявки от:** 1. ООО «Рафф-софт»— участник конкурса. **2. ФГУП «НПО автоматики» — победитель конкурса.**						
Направление 4. Развитие исследовательской и экспериментальной базы для отработки новых конструктивных решений в области промышленного дизелестроения									
4.1	Создание конструкций специализированных экспериментальных стендов для среднеоборотных дизельных двигателей с частотой вращения от 450 до 1500 об/мин дизелестроительных производств	2011–2014	414 204	212 105	70 35	90 44	42 20	—	Экспериментальные, доводочные и сертификационные испытательные стенды для среднеоборотных дизельных двигателей с частотой вращения от 450 до 1500 об/мин (не менее 3-х стендов) Планируемые индикаторы: внедрение в производство 1-й технологии; доля прироста продукции — 1 %; объем реализуемой продукции отрасли — 200 млн рублей
			Уникальный номер закупки 269/05-ДИЗ-26.10ок **Лот № 6. Поданы заявки от:** 1. ОАО «Коломенский завод» — отказано в допуске к участию в открытом конкурсе. **2. ОАО «Пензадизельмаш» — победитель конкурса.** 3. ООО «Энкол» — участник конкурса.						
4.2	Создание конструкций специализированных экспериментальных стендов для высокооборотных дизельных двигателей с частотой вращения от 1500 до 3000 об/мин дизелестроительных производств	2012–2014	228 114	—	95 48	77 38	56 28	—	Экспериментальные, доводочные и сертификационные испытательные стенды для высокооборотных дизельных двигателей с частотой вращения от 1500 до 3000 об/мин (не менее 3-х стендов) Планируемые индикаторы:доля прироста продукции — 1 %; объем реализуемой продукции отрасли — 500 млн рублей
4.3	Создание конструкций специализированных экспериментальных стендов для систем турбонаддува дизельных двигателей	2012–2014	192 95	—	78 38	70 35	44 22	—	Экспериментальные, доводочные и сертификационные испытательные стенды для систем турбонаддува (не менее 3-х стендов) Планируемые индикаторы:объем реализуемой продукции отрасли — 100 млн рублей
4.4	Создание конструкций специализированных экспериментальных стендов систем топливоподачи дизельных двигателей с микропроцессорным управлением, в том числе аккумуляторных	2013–2015	271 135	—	—	60 30	55 28	156 77	Экспериментальные, доводочные и сертификационные испытательные стенды систем топливоподачи (не менее 3-х стендов) Планируемые индикаторы: объем реализуемой продукции отрасли — 500 млн рублей
Направление 5. Проведение поисковых и фундаментальных исследований									
5.1	Проведение поисковых и фундаментальных исследований по разработке технологий оптимизации топливоподачи и рабочих процессов двигателей для создаваемых семейств средне- и высокооборотных дизельных двигателей мощностью более 400 кВт	2011–2014	203 101	96 48	54 27	15 7	38 19	—	Экспериментальное подтверждение разработанных технологий на стендах и опытных образцах дизельных двигателей; инновационные методики оптимизации формы камеры сгорания, процесса топливоподачи, смесеобразования и сгорания; рекомендации по созданию камер сгорания и регулировочным параметрам топливной аппаратуры Планируемые индикаторы: внедрение в производство в рамках подпрограммы 1-й технологии; внедрение в производство в рамках поисковых и фундаментальных исследований 1-й технологии; количество патентов — 1 единица
			Уникальный номер закупки 269/05-ДИЗ-26.10ок **Лот № 10. Поданы заявки от:** **1. ОАО «Научно-исследовательский институт двигателей» (ОАО НИИД) — единственный участник конкурса, с которым заключается госконтракт.**						

		Срок реализации, годы	Объем финансирования (в числителе указан общий объем финансирования, в знаменателе — объем финансирования за счет средств федерального бюджета)						Ожидаемые результаты
			2011–2015	2011	2012	2013	2014	2015	
5.2	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по совершенствованию конструкций агрегатов наддува, отработке проточных частей компрессора и турбины для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2011–2014	187 93	86 43	52 26	17 8	32 16	—	Экспериментальные образцы регулируемых систем турбонаддува, в том числе инверторного привода турбокомпрессора для реализации режима работы силовой турбины; инновационные методики расчета и проектирования, а также рекомендации по созданию и технические предложения Планируемые индикаторы: внедрение в производство в рамках поисковых и фундаментальных исследований 1-й технологии; количество патентов — 1 единица
			Уникальный номер закупки 269/05-ДИЗ-26.10ок Лот № 9. Поданы заявки от: 1. ЗАО «Научно-производственное объединение "Турботехника"» — участник конкурса. **2. ОАО «Пензадизельмаш» — победитель конкурса.**						
5.3	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по оценке термомеханической выносливости поршней, втулок цилиндра и крышек цилиндра дизелей для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2011–2014	187 91	95 46	46 22	18 9	28 14	—	Экспериментальные образцы поршней и крышек цилиндров дизельных двигателей; методики выбора критериев прочности, модели повреждаемости материала и оценки циклической прочности; проверка предложенных методик на статических тепловых и динамических стендах; рекомендации по конструированию поршней, втулок и крышек цилиндров дизелей с повышенной термомеханической выносливостью и выбора материалов Планируемые индикаторы: внедрение в производство в рамках подпрограммы 1-й технологии; внедрение и производство в рамках поисковых и фундаментальных исследований 1-й технологии; количество патентов — 1 единица
			Уникальный номер закупки 269/05-ДИЗ-26.10ок Лот № 8. Поданы заявки от: **1. ООО «Рафф-софт»— единственный участник конкурса, с которым заключается госконтракт.**						
5.4	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по разработке систем подачи и воспламенения газовых (на природном газе) и газодизельных моделей для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2011–2014	202 101	98 49	60 30	22 11	22 11	—	Экспериментальные образцы систем топливоподачи; инновационные методики расчета и проектирования систем подачи и воспламенения газовых (на природном газе) и газодизельных моделей; рекомендации по созданию систем топливоподачи Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
			Уникальный номер закупки 269/05-ДИЗ-26.10ок Лот № 7. Поданы заявки от: **1. «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» — единственный участник конкурса, с которым заключается госконтракт.**						
5.5	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по оптимизации профиля элементов цилиндропоршневой группы, конструкции комплекта поршневых колец, применению новых материалов и покрытий поршня, колец, гильзы цилиндров с целью снижения потерь на трение в цилиндропоршневой группе, снижению расхода масла на угар и эмиссии твердых частиц для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2012–2014	166 83	—	64 32	18 9	84 42	—	Экспериментальные образцы деталей цилиндропоршневой группы; инновационные методики микро- и макропрофилирования поверхностей поршней, поршневых колец, втулок цилиндров дизельных двигателей; экспериментальная проверка новых материалов и созданных профилей на машинах трения и моторных стендах; рекомендации по конструированию узлов трения деталей дизельных двигателей с пониженным уровнем потерь на трение Планируемые индикаторы:внедрение в производство в рамках подпрограммы 1-й технологии; количество патентов — 1 единица
5.6	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по разработке опережающих технических решений и технологий мирового уровня для проектирования и оптимизации топливных	2012–2014	160 80	—	48 24	20 10	92 46	—	Экспериментальный образец системы топливоподачи; методики расчета и проектирования электронно-управляемого впрыскивания топлива с повышенными давлениями впрыскивания; рекомендации по созданию и технические предложения; результаты испытания разработанной системы на топливных стендах

Продолжение Приложения 3

		Срок реализации, годы	**Объем финансирования** (в числителе указан общий объем финансирования, в знаменателе — объем финансирования за счет средств федерального бюджета)						Ожидаемые результаты
			2011–2015	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	
5.6	систем с электронно-управляемым впрыскиванием топлива и давлениями до 300–400 МПа для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей								Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.7	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по разработке композитных материалов для теплонапряженных деталей дизелей, разработка и внедрение тиксотехнологии для изготовления поршней форсированных дизелей из кремний-алюминиевых сплавов и композитов на их основе для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2012–2014	170 85	—	50 25	18 9	102 51	—	Экспериментальные образцы клапанов, поршней, изготовленных по разработанным технологиям, их расчеты и проектирование; инновационные методики применения гранульной технологии создания композитных материалов, обладающих повышенной пластичностью, пониженной пористостью структуры и высокими технологическими свойствами для теплонапряженных деталей дизельных двигателей и тиксотехнологии для изготовления поршней дизельных двигателей из легких сплавов; результаты испытаний образцов материалов и экспериментальных образцов деталей; рекомендации по конструированию деталей дизельных двигателей Планируемые индикаторы: внедрение в производство в рамках подпрограммы 1-й технологии; количество патентов — 1 единица
5.8	Проведение поисковых и экспериментальных исследований с целью повышения эффективности и надежности комплекса гребной винт–судовой главный двигатель для создания перспективных среднеоборотных и высокооборотных дизельных двигателей	2012–2014	168 84	—	56 28	16 8	96 48	—	Экспериментальный образец пропульсивного комплекса; система автоматизированного проектирования дизельных двигателей и элементов пропульсивного комплекса; инновационные методики расчета и проектирования судовых среднеоборотных и высокооборотных дизельных двигателей, работающих в составе пропульсивных комплексов; рекомендации по созданию дизеля в составе комплекса; техническая документация на разработанную систему автоматизированного проектирования Планируемые индикаторы: внедрение в производство в рамках подпрограммы 1-й технологии; количество патентов — 1 единица
5.9	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по разработке систем управления параметрами воздухоснабжения с использованием регулируемых высокоэффективных турбокомпрессоров и охладителей наддувочного воздуха для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2013–2015	214 105	—	—	22 11	85 42	107 52	Экспериментальные образцы систем воздухоснабжения; методики расчета и проектирования системы гибкого управления параметрами воздухоснабжения; рекомендации по созданию систем, технические предложения по их конструированию Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.10	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по созданию адаптивной системы управления рабочим процессом с обратной связью по параметрам внутрицилиндровых процессов для разрабатываемых базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей	2013–2015	224 111	—	—	18 9	92 46	114 56	Экспериментальный образец системы управления рабочим процессом; инновационные методики моделирования для прогнозирования облика новых рабочих процессов в дизельных двигателях, обеспечивающих снижение выброса оксидов азота до 20–50 ppm; отработка процессов на экспериментальной установке; рекомендации по реализации разработанных процессов на дизельных двигателях разрабатываемых семейств. Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица

		Срок реализации, годы	**Объем финансирования** (в числителе указан общий объем финансирования, в знаменателе — объем финансирования за счет средств федерального бюджета)						**Ожидаемые результаты**
			2011–2015	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	
5.11	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по созданию рациональных силовых схем остовов и конструкций поршней дизелей со средним эффективным давлением 30–35 бар и максимальным давлением сгорания 250–300 бар для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2013–2015	222 110	—	—	18 9	94 47	110 54	Образцы поршней и остовов; методики расчета и проектирования рациональных силовых схем остовов дизельных двигателей; рекомендации по созданию и технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.12	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по созданию и отработке электронной системы комплексного адаптивного управления топливоподачей, воздухоснабжением, охлаждением, рециркуляцией отработавших и картерных газов, нейтрализацией выпускных газов и диагностикой дизеля для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2013–2015	221 109	—	—	16 8	87 43	118 58	Экспериментальные образцы систем двигателя; инновационные методики расчета адаптивного управления системами дизельного двигателя; рекомендации по созданию и технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.13	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по созданию информационно-измерительных комплексов для испытаний двигателей, работающих в газовом, газодизельном, газонефтяном, нефтяном циклах	2013–2015	211 103	—	—	15 7	91 45	105 51	Экспериментальный образец информативно-измерительного комплекса для двигателей, работающих по газовому циклу; инновационные методики стендовых испытаний двигателей; рекомендации по созданию информационно-измерительных комплексов, технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.14	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по разработке программных средств для моделирования газодинамических процессов в элементах базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и перспективных дизельных двигателях	2013–2015	224 111	—	—	18 9	98 49	108 53	Экспериментальные образцы крышек цилиндров, впускных и выхлопных коллекторов, направляющих аппаратов системы турбонаддува; методики численного моделирования газодинамических процессов в элементах впускного и выпускного трактов для снижения газодинамических потерь, организации вихревого движения заряда в цилиндрах, улучшения наполнения и очистки цилиндров, повышения располагаемой работы газа перед турбиной, улучшения равномерности наполнения цилиндрови использования волновых явлений в газовоздушном тракте; математические модели и программные комплексы; подтверждение разработанных математических моделей и программных комплексов; техническая документация на разработанные комплексы, рекомендации по их созданию и технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.15	Поисковые и экспериментальные исследования по созданию систем наддува для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2013–2015	234 116	—	—	16 8	102 51	116 57	Экспериментальные образцы турбокомпрессоров для ряда двигателей нового поколения в мощностном диапазоне 500–7500 кВт; методики расчета и программные продукты для расчета турбокомпрессоров, рекомендации по созданию и технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица

Продолжение Приложения 3

		Срок реализации, годы	**Объем финансирования** (в числителе указан общий объем финансирования, в знаменателе — объем финансирования за счет средств федерального бюджета)						Ожидаемые результаты
			2011–2015	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	
5.16	Поисковые исследования по повышению надежности и сроков службы основных узлов дизельного двигателя, работающих в течение всего жизненного цикла двигателя	2013–2015	230 114	—	—	18 9	106 53	106 52	Экспериментальные образцы коленчатых валов, шатунов, корпусных деталей, прошедших циклические и термоциклические испытания; методики оценки механической выносливости деталей дизельных двигателей; испытания образцов материалов; обоснование критериев прочности, моделей повреждаемости; экспериментальная проверка методики оценки циклической прочности на вибростендах; рекомендации по применению разработанной методики при проектировании двигателей Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.17	Поисковые исследования по созданию технологий формирования программ управления для систем микропроцессорного управления дизельного двигателя по заданным требованиям для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2013–2015	216 107	—	—	20 10	88 44	108 53	Методики ускоренного формирования программ управления для систем микропроцессорного управления; методика и результаты оптимизационного поиска с получением законов оптимального управления для двигателя, работающего по тепловозной или винтовой характеристике; тестирование созданного программного обеспечения на базе образцов дизельных двигателей различного назначения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.18	Поисковые и экспериментальные исследования по организации работы многоцилиндрового двигателя с микропроцессорным управлением на частичных режимах с последовательным отключением цилиндров для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2013–2015	233 115	—	—	22 11	104 52	107 52	Экспериментальные образцы исполнительных механизмов для отключения цилиндров; инновационные технологии организации управления режимами работы многоцилиндрового дизельного двигателя с микропроцессорным управлением отключения цилиндров; создание и испытания исполнительных механизмов, рекомендации по созданию и технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.19	Поисковые и экспериментальные исследования по оптимизации системы регулируемой рециркуляции отработавших газов с промежуточным охлаждением с целью снижения выбросов оксидов азота для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2013–2015	225 111	—	—	20 10	87 43	118 58	Экспериментальные образцы систем с регулируемой рециркуляцией выпускных газов; методики оптимизации системы регулируемой рециркуляции отработавших газов; создание и испытания системы регулируемой рециркуляции выпускных газов; рекомендации по проектированию систем для создаваемых семейств двигателей, технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.20	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по снижению вредных выбросов NO_x, CO, HC и твердых частиц для базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и перспективных дизельных двигателей мощностью более 400 кВт	2013–2015	219 108	—	—	18 9	95 47	106 52	Экспериментальные образцы камер сгорания; экспериментальное подтверждение разработанных методик; методики по моделированию внутрицилиндровых процессов дизеля с целью снижения вредных выбросов NO_x, CO, HC и твердых частиц, удовлетворяющих нормам директивы Евросоюза 2004/26/ЕС IIIB 2012–2015 гг.; оптимальные значения конструктивных (форма камеры сгорания и впускного канала, интенсивность вихревого движения заряда, генерируемого каналом) и регулировочных параметров, обеспечивающих заданные значения эффективных и экологических показателей двигателя; рекомендации по созданию малотоксичных рабочих процессов, технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица

		Срок реализации, годы	**Объем финансирования** (в числителе указан общий объем финансирования, в знаменателе — объем финансирования за счет средств федерального бюджета)						**Ожидаемые результаты**
			2011–2015	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	
5.21	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по разработке базовых моделей топливоподающих систем импульсного впрыскивания с индивидуальными насосами и аккумуляторных топливных систем для малотоксичных форсированных перспективных дизельных двигателей	2013–2015	225 111	—	—	16 8	93 46	116 57	Экспериментальные образцы систем импульсного впрыскивания; методики разработки базовых моделей топливоподающих систем импульсного впрыскивания, их экспериментальное исследование, рекомендации по созданию и технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.22	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по созданию коренных и шатунных подшипников с повышенной несущей способностью для дизелей с высоким максимальным давлением (до 250 бар) для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2013–2015	218 108	—	—	17 9	91 45	110 54	Образцы подшипников; разработка инновационной методики расчета и проектирования коренных и шатунных подшипников дизелей с повышенной несущей способностью; экспериментальная проверка работоспособности созданных подшипников дизельных двигателей; рекомендации по их созданию и технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.23	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по разработке стендов и инструментальных средств для обеспечения полунатурного моделирования дизелей для отработки микропроцессорных программ управления дизелем при проведении модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создании перспективных дизельных двигателей	2013–2015	234 115	—	—	15 7	99 49	120 59	Образец стенда для полунатурного моделирования; инновационные методики расчета и проектирования полунатурного моделирования дизелей для отработки микропроцессорных программ управления дизелем; рекомендации по созданию стендов, технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.24	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по разработке системы двухступенчатого наддува для среднеоборотного дизеля с высоким уровнем наддува и максимальным давлением сгорания до 250 бар и выше для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2013–2015	211 104	—	—	22 11	84 42	105 51	Экспериментальный образец системы наддува; инновационные методики расчета и проектирования системы двухступенчатого наддува для среднеоборотных дизелей; стендовые испытания образца; рекомендации по созданию двухступенчатых систем наддува, технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.25	Поисковые и экспериментальные исследования по разработке топливных систем с микропроцессорным управлением и давлением впрыскивания топлива до 200 МПа для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2013–2015	221 108	—	—	20 9	95 47	106 52	Экспериментальные образцы топливных систем; методики и программные продукты для расчета перспективных топливных систем и их проектирования; экспериментальное подтверждение разработанных методик; рекомендации по созданию перспективных топливных систем, технические предложения. Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица

Продолжение Приложения 3

		Срок реализации, годы	**Объем финансирования** (в числителе указан общий объем финансирования, в знаменателе — объем финансирования за счет средств федерального бюджета)						**Ожидаемые результаты**
			2011–2015	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	
5.26	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по адаптации конструкций высокооборотных дизелей для работы на биотопливах, диметиловом эфире, других альтернативных видах топлив и их композициях с традиционным топливом с целью улучшения экологических характеристик и экономии дизельного топлива для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2013–2015	227 112	—	—	17 8	102 51	108 53	Экспериментальные образцы топливных систем для работы на биотопливах, диметиловом эфире и смесевых топливах; инновационные решения по адаптации конструкций высокооборотных дизелей для работы на биотопливах, диметиловом эфире и смесевых топливах; рекомендации по адаптации дизелей для работы на биотопливах, диметиловом эфире и их композициях, технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.27	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по созданию систем нейтрализации токсичных веществ выпускных газов дизеля с высоким уровнем форсирования, обеспечивающих выполнение перспективных норм по токсичности выпускных газов для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2013–2015	211 104	—	—	19 9	86 43	106 52	Образцы систем нейтрализации; инновационные методики расчета и проектирования систем нейтрализации выпускных газов дизеля; рекомендации по созданию систем нейтрализации для дизелей различного назначения, технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.28	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по разработке технологии проектирования и создания малорасходной системы охлаждения дизелей, обеспечивающей снижение температуры воздуха на впуске для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2013–2015	218 107	—	—	17 8	91 45	110 54	Образцы малорасходных систем охлаждения; инновационные технологии проектирования и создания малорасходной системы охлаждения дизелей, рекомендации по созданию и технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.29	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по созданию топливоподающей системы аккумуляторного типа с электрогидравлическими форсунками и микропроцессорной системой управления подачей топлива для модернизации базовых образцов высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей мощностью более 400 кВт	2013–2015	210 103	—	—	15 7	89 44	106 52	Образцы топливоподкачивающих систем; инновационные методики расчета и проектирования топливоподающей системы аккумуляторного типа с электрогидравлическими форсунками, рекомендации по созданию и технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица
5.30	Проведение поисковых и экспериментальных исследований по снижению потерь на привод вспомогательных агрегатов для модернизации базовых образцов средне- и высокооборотных дизельных двигателей и создания перспективных дизельных двигателей	2013–2015	217 107	—	—	13 6	96 48	108 53	Образцы приводов вспомогательных агрегатов; инновационные методики снижения потерь на привод вспомогательных агрегатов дизеля, рекомендации по созданию и технические предложения Планируемые индикаторы: количество патентов — 1 единица

УДК 621.436

СНИЖЕНИЕ РЕАКЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ КИСЛОРОДА ИНЕРТНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ В ДВИГАТЕЛЯХ С ВОСПЛАМЕНЕНИЕМ ОТ СЖАТИЯ

В.Г. Камалтдинов, к.т.н.
ФГБОУ ВПО Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

Предложено выражение для определения коэффициента реакционной активности кислорода, с помощью которого учитывается влияние инертных компонентов горючей смеси на скорость сгорания. Определены величины этого коэффициента при сгорании диметилового эфира в смеси воздуха с отработавшими газами. Показано снижение скорости сгорания в результате влияния инертных компонентов смеси.

В настоящее время рециркуляция отработавших газов (ОГ) рассматривается в качестве одного из наиболее эффективных методов снижения выбросов оксидов азота с отработавшими газами ДВС. Для перспективных двигателей с воспламенением от сжатия, работающих на гомогенной рабочей смеси, то есть при реализации рабочего цикла HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), в России и за рубежом выполнен целый ряд исследований по математическому и экспериментальному моделированию рабочего процесса, в том числе и с рециркуляцией ОГ [1–5 и др.]. Однако вопрос о влиянии содержания инертных компонентов (азота, углекислого газа и водяного пара) в рабочей смеси на процесс сгорания остается недостаточно изученным. Одной из причин этого является отсутствие в применяемых математических моделях количественной оценки содержания данных компонентов в горючей смеси.

Для проведения такого аналитического исследования использована математическая модель горения топлива в ДВС [6–8], которая успешно применялась при моделировании рабочего цикла HCCI двигателей [9–14 и др.]. Предложенная математическая модель отличается от известных тем, что позволяет количественно оценить влияние на скорость сгорания не только снижения содержания кислорода, но и увеличения содержания инертных компонентов, которое имеет место в реальном процессе сгорания.

Скорость сгорания топлива в модели определяется по выражению:

$$w = \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}\tau} = \frac{Z_E}{\tau_y}, \qquad (1)$$

где $\mathrm{d}N$ — изменение количества вещества в результате реакции; $\mathrm{d}\tau$ — интервал времени; Z_E — количество активных молекул топлива, энергия которых выше энергии активации, составляющих группу одновременно реагирующих молекул; τ_y — условная продолжительность реакции окисления группы активных молекул топлива. Количество активных молекул топлива определяется по известному закону Аррениуса:

$$Z_E = Z_\mathrm{T} \cdot e^{-\frac{E_A}{RT}}, \qquad (2)$$

где Z_T — общее количество молекул топлива в рассматриваемом объеме V цилиндра двигателя; E_A — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; T — температура смеси.

Условная продолжительность реакции окисления группы активных молекул топлива τ_y определяется по выражению:

$$\tau_y = \frac{Z_\mathrm{T}}{\mathrm{const} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot V \cdot C_\mathrm{T}^p \cdot C_{\mathrm{O2}}^q} = \frac{V}{\mathrm{const} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot Z_T^{\mathrm{p}-1} \cdot Z_{\mathrm{O2}}^q}, \qquad (3)$$

где const — константа, учитывающая количество активных соударений молекул реагирующих веществ в единицу времени в единице объема; K_1 — коэффициент реакционной активности кислорода, учитывающий влияние инертных составляющих рабочего тела (азота и продуктов сгорания); K_2 — коэффициент, учитывающий турбулентность внутри камеры сгорания, $K_2 \geq 1$; $C_\mathrm{T} = Z_\mathrm{T}/V$ и $C_{\mathrm{O2}} = Z_{\mathrm{O2}}/V$ — концентрации всех молекул топлива Z_T и кислорода Z_{O2} в объеме V соответственно; p, q — показатели степени, причем $p + q = n$ — кинетический порядок реакции, $n = 2$.

Для получения численного значения скорости сгорания в любой момент времени достаточно определить количество одновременно реагирующих активных молекул топлива и разделить его на условную продолжительность реакции их окисления.

В модель процесса сгорания введено понятие реакционной активности кислорода, которым характеризуется способность молекул кислорода вступать в реакцию окисления с молекулами топлива. Из моделирования процесса сгорания топлива как результата активных столкновений молекул топлива и кислорода естественным образом следует, что при наличии в горючей смеси инертных примесей частота этих столкновений будет ниже, чем без примесей, из-за нахождения между ними молекул инертных компонентов, которые участвуют в столкновениях. Скорость реакции окисления топлива также будет уменьшаться, что можно рассматривать как снижение реакционной активности кислорода. Максимальная реакционная активность кислорода соответствует коэффициенту $K_1 = 1$, когда инертных компонентов в горючей смеси нет, и условная продолжительность реакции окисления активных молекул топлива τ_y будет наименьшая, а скорость окисления — наибольшая.

Коэффициент реакционной активности кислорода K_1 определяется из выражения, описывающего зависимость относительной величины периода задержки воспламенения (ПЗВ) топлива $\tau_{зв}$ от массовой доли кислорода в окислителе в смеси с азотом ψ [15], представленную на рис. 1:

$$K_1 = 1 - \left(1 - \frac{Z_{O2}}{Z_{O2} + Z_{N2} + Z_{CO2} + Z_{H2O} + Z_{CO}}\right)^6, \quad (4)$$

где Z_{N2}, Z_{CO2}, Z_{H2O} и Z_{CO} — соответственно количества молекул азота, диоксида углерода, воды и оксида углерода в расчетном объеме V.

Коэффициент турбулентности K_2 введен для моделирования влияния скорости движения горючей смеси на процесс ее сгорания. При моделировании HCCI процесса сгорания принималось $K_2 = 1$.

На рис. 1 приведены результаты расчетов процесса воспламенения дизельного топлива в окислителе, состоящем из кислорода и азота. При снижении массовой доли кислорода в окислителе ψ от 1 до 0,2 начальное значение коэффициента реакционной активности кислорода K_1 уменьшается от 1 до 0,69. Увеличение относительной величины периода задержки воспламенения при этих условиях составляет ~2,8 раза (пунктирные линии на рис. 1), что согласуется с известными экспериментальными данными [15] как по величине, так и по характеру изменения. Это подтверждает правомочность применения принятого подхода к учету влияния инертных компонентов в горючей смеси на процессы ее воспламенения и сгорания коэффициентом K_1.

С помощью разработанной модели выполнены расчетные исследования процесса сгорания гомогенной воздушной смеси диметилового эфира (ДМЭ) при объемном ее самовоспламенении в камере сгорания (КС) постоянного объема при следующих начальных условиях: давление $p = 1{,}5$ МПа, температура $T = 700$ К. Для исключения влияния количества топлива цикловая подача ДМЭ принималась постоянной, равной $0{,}053 \cdot 10^{-3}$ кг. Изменение содержания инертных компонентов моделировалось величиной коэффициента остаточных газов $\gamma_{ост}$ в диапазоне от 0 до 0,5.

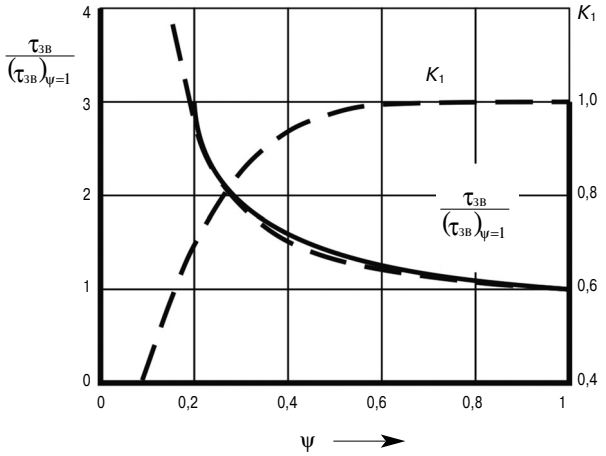


Рис. 1. Зависимость относительной величины периода задержки воспламенения и коэффициента реакционной активности кислорода от массовой доли кислорода в окислителе ψ:
– – – – расчет по модели для дизельного топлива;
—— эксперимент [15]

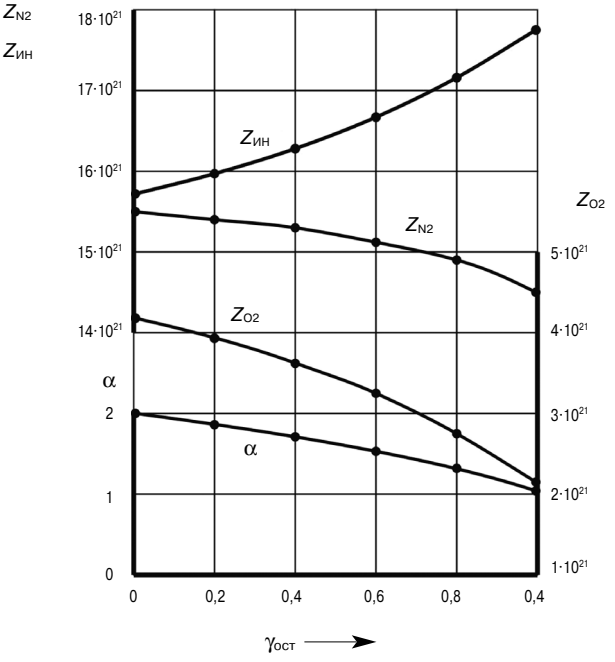


Рис. 2. Влияние коэффициента остаточных газов на начальный состав воздушной смеси ДМЭ в КС постоянного объема при $p = 1{,}5$ МПа, $T = 700$ К

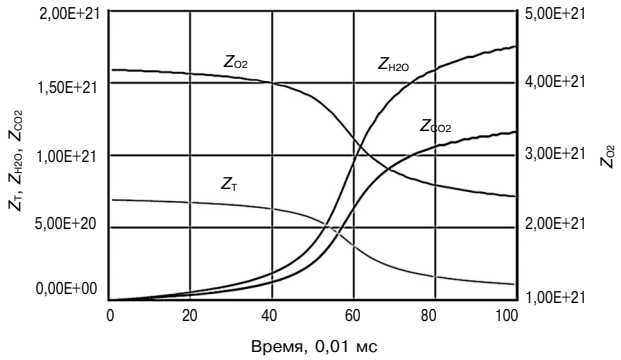


Рис. 3. Изменение в процессе сгорания воздушной смеси ДМЭ количеств молекул топлива Z_T, кислорода Z_{O2}, воды Z_{H2O} и диоксида углерода Z_{CO2} в КС постоянного объема при $\alpha_в = 2{,}0$; $p = 1{,}5$ МПа; $T = 700$ К; $\gamma_{ост} = 0$; $K_1 = var$ [8]

Изменение начального состава рабочей смеси в зависимости от коэффициента остаточных газов представлено на рис. 2. Здесь видно, что при увеличении $\gamma_{ост}$ от 0 до 0,5 уменьшается начальное количество молекул кислорода в смеси в 1,94 раза и, соответственно, коэффициент избытка воздуха $\alpha_в$ в пересчете на кислород также снижается в 1,94 раза. Количество молекул инертных компонентов $Z_{ин}$, включая азот, диоксид углерода и воду, увеличивается на 13 %, азота — уменьшается на 6 %. Причем если при $\gamma_{ост} = 0$ количество молекул инертных компонентов превышает количество молекул кислорода в 3,76 раза, то при $\gamma_{ост} = 0{,}5$ превышение достигает 8,26 раз.

На рис. 3 приведено расчетное изменение состава воздушной смеси ДМЭ в процессе сгорания при отсутствии остаточных газов [8]. Здесь видно, что количество молекул кислорода за 1 мс уменьшается в ~1,71 раза. В то же время количество молекул инертных компонентов увеличивается на большую величину частично за счет диоксида углерода (Z_{CO2}) и частично за счет воды (Z_{H2O}). С учетом первоначального количества молекул азота и аргона увеличение составляет 19 %.

По результатам расчетов скорости сгорания, описываемой выражением (1), с учетом влияния инертных составляющих рабочего тела коэффициентом реакционной активности кислорода K_1, получаемого по выражению (4) и без его учета ($K_1 = 1$), построены графики при различных значениях коэффициента остаточных газов (рис. 4, *а*). В случае исключения влияния инертных компонентов на условную продолжительность реакции окисления τ_y ($K_1 = 1$) максимальные значения скорости сгорания и моменты ее достижения изменяются незначительно (пунктирные линии на рис. 4, *а*). А при одновременном учете влияния реагирующих и инертных компонентов с помощью коэффициента K_1 выявлено существенное замедление процесса сгорания (сплошные линии на рис. 4, *а*).

В случае отсутствия остаточных газов расчетная максимальная скорость сгорания уменьшилась в 1,59 раза в сравнении с расчетами при $K_1 = 1$, а время ее достижения увеличилось в 1,37 раза. При повышении количества остаточных газов отличия в величине и времени достижения максимальной скорости сгорания становятся еще больше. При $\gamma_{ост} = 0{,}3$ и 0,5 максимальная скорость сгорания снижается в 2 и 3,08 раз, а время увеличивается в 1,58 и 2,1 раза соответственно.

Для выяснения причины снижения скорости сгорания согласно выражению (1) проанализированы закономерности изменения количества активных молекул топлива Z_E и условной продолжительности реакции их окисления τ_y, вычисляемые по выражениям (2) и (3). Увеличение содержания остаточных газов в рабочей смеси при $K_1 = 1$ приводит к некоторому уменьшению

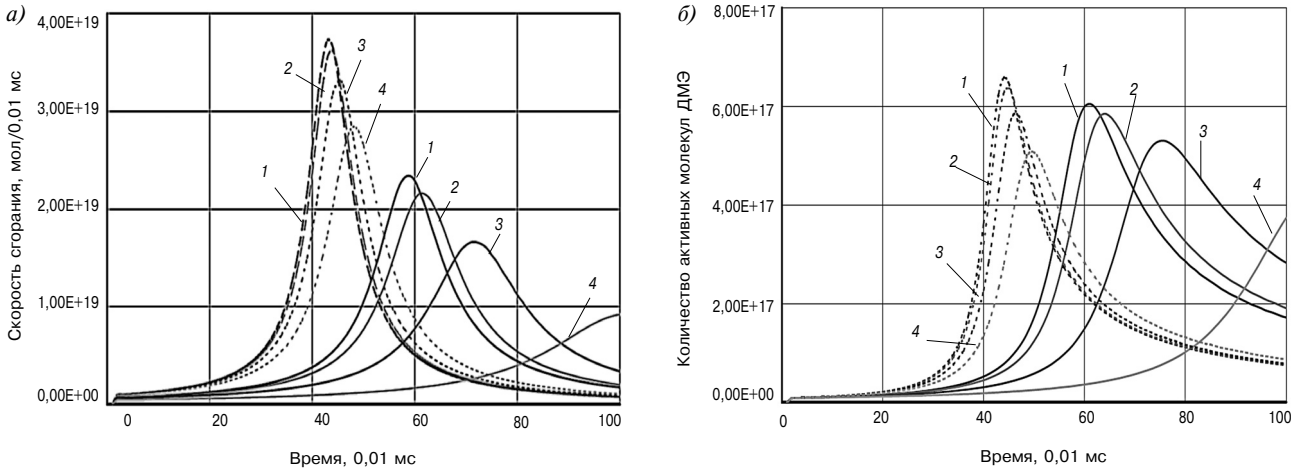


Рис. 4. Результаты расчета сгорания воздушной смеси ДМЭ в КС постоянного объема:
$p = 1{,}5$ МПа, $T = 700$ К; *а* — изменение скорости сгорания ДМЭ; *б* — изменение количества активных молекул ДМЭ; 1 — $\gamma_{ост} = 0$; 2 — $\gamma_{ост} = 0{,}1$; 3 — $\gamma_{ост} = 0{,}3$; 4 — $\gamma_{ост} = 0{,}5$; сплошные линии — $K_1 = var$, пунктирные линии — $K_1 = 1$

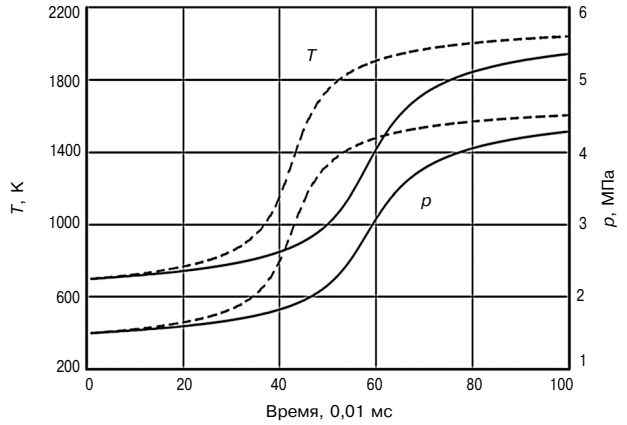


Рис. 5. Изменение давления *p* и температуры *T* при сгорании воздушной смеси ДМЭ в КС постоянного объема: $\alpha_в = 2{,}0$, $p = 1{,}5$ МПа; $T = 700$ К; $\gamma_{ост} = 0$; —— — K_1 = var; ---- — $K_1 = 1$

текущего количества активных молекул топлива (пунктирные линии на рис. 4, *б*). Однако при учете влияния инертных компонентов коэффициентом реакционной активности кислорода (K_1 = var) текущее количество активных молекул и особенно момент достижения его максимума изменяются значительно больше (сплошные линии на рис. 4, *б*). Согласно уравнению (2) в начальной фазе сгорания увеличение количества активных молекул Z_E согласуется с ростом температуры смеси (рис. 5) при $\gamma_{ост} = 0$. По мере выгорания ДМЭ (уменьшения $Z_Т$) количество его активных молекул снижается, несмотря на продолжающийся рост температуры. Без учета инертных компонентов ($K_1 = 1$) за счет большей интенсивности тепловыделения давление и температура в КС возрастают быстрее и до более высокого уровня (см. рис. 5).

По результатам расчетов построены графики изменения коэффициента реакционной активности кислорода и условной продолжительности окисления активных молекул ДМЭ при различных коэффициентах остаточных газов (рис. 6).

Без учета влияния инертных компонентов ($K_1 = 1$) условная продолжительность окисления активных молекул топлива (пунктирные линии) в период задержки воспламенения на 26 % меньше, чем при учете влияния (сплошные линии) (рис. 6, *б*). Это приводит к повышению частоты образования и окисления активных молекул топлива, и, соответственно, увеличению скорости сгорания ДМЭ в начальный период продолжительностью 0,4 мс.

Применение коэффициента K_1 позволяет моделировать замедление образования и продолжительности окисления активных молекул топлива в процессе сгорания по мере изменения состава горючей смеси при различных значениях коэффициента остаточных газов. Например, в случае отсутствия остаточных газов ($\gamma_{ост} = 0$) начальное значение коэффициента реакционной активности кислорода K_1 в течение продолжительности сгорания 1 мс уменьшается в 1,46 раза (рис. 6, *а*). Это увеличивает условную продолжительность окисления активных молекул топлива (рис. 6, *б*) и, соответственно, снижает скорость сгорания (рис. 4, *а*) по сравнению с отсутствием инертных компонентов в 1,32 раза в начале сгорания и в 1,92 раза в конце процесса сгорания (на рис. 6, *б* окончание сгорания при K_1 = var не показано).

В результате условная продолжительность реакции окисления активных молекул топлива, определенная с учетом коэффициента K_1, не

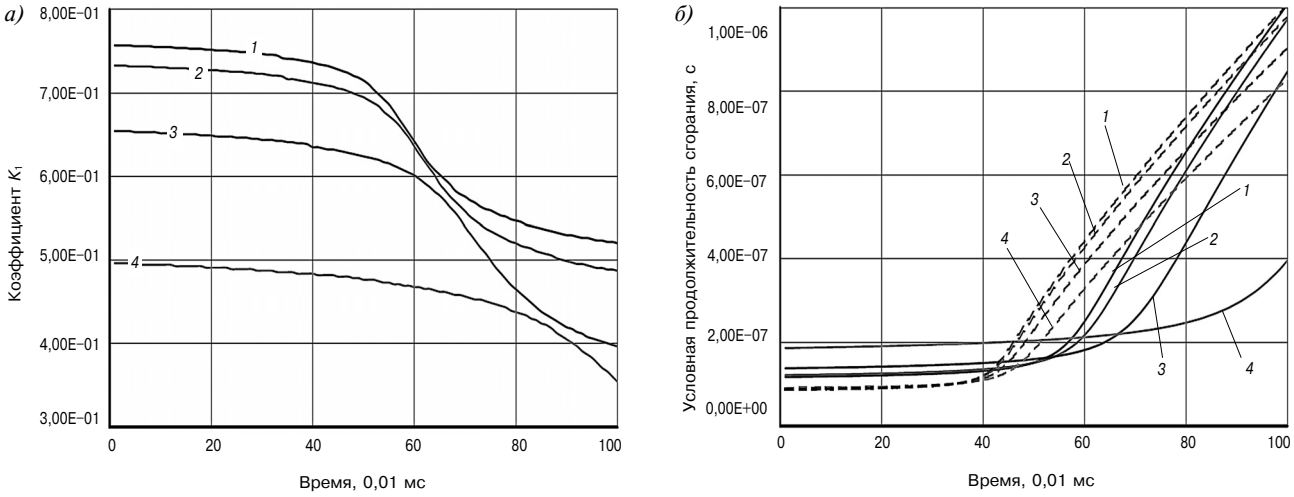


Рис. 6. Результаты расчета сгорания воздушной смеси ДМЭ в КС постоянного объема:
$p = 1{,}5$ МПа, $T = 700$ К; *а* — изменение коэффициента реакционной активности кислорода K_1; *б* — изменение условной продолжительности окисления активных молекул ДМЭ τ_y: 1 — $\gamma_{ост} = 0$; 2 — $\gamma_{ост} = 0{,}1$; 3 — $\gamma_{ост} = 0{,}3$; 4 — $\gamma_{ост} = 0{,}5$; —— — K_1 = var, ---- — $K_1 = 1$

только больше на 26 % в ПЗВ, но и в процессе сгорания увеличивается быстрее, чем без учета инертных компонентов (рис. 6, *б*). При максимальном исследованном коэффициенте остаточных газов 0,5 коэффициент реакционной активности кислорода K_1 уменьшается от начального значения 0,496 до менее 0,1, то есть более чем в 5 раз (на рис. 6, *а* окончание сгорания не показано). Это приводит к значительному затормаживанию процесса сгорания, несмотря на обогащение смеси до $\alpha_в = 1{,}03$ (см. рис. 2).

После достижения максимального значения скорость сгорания снижается (рис. 4, *а*), как в случае учета влияния инертных компонентов коэффициентом K_1 (K_1 = var на рис. 6, *а*), так и без его учета ($K_1 = 1$). Это происходит вследствие увеличения условной продолжительности реакции окисления активных молекул топлива τ_y (рис. 6, *б*) и снижения количества активных молекул ДМЭ (рис. 4, *б*), несмотря на продолжающийся рост температуры (рис. 5, *б*).

Таким образом, введение коэффициента реакционной активности кислорода K_1 в выражение для определения условной продолжительности реакции окисления активных молекул топлива τ_y позволило моделировать изменение количества активных соударений молекул реагирующих веществ (в единицу времени в единице объема), вызванное увеличением количества инертных молекул, образующихся в процессе сгорания. В результате расчетный процесс сгорания при учете влияния инертных компонентов стал более «мягким» и протяженным во времени. Например, при $\gamma_{ост} = 0$ расчетный максимум скорости сгорания уменьшился в ~1,6 раза и сместился по времени на ~37 %.

Обобщенные результаты влияния коэффициента остаточных газов на показатели процесса сгорания гомогенной воздушной смеси ДМЭ в КС постоянного объема приведены на рис. 7. Здесь видно, что с увеличением коэффициента остаточных газов $\gamma_{ост}$ максимальные значения скорости сгорания, количества активных молекул топлива, а также давления и температуры в КС уменьшаются, а временные параметры, наоборот, увеличиваются. Учет влияния инертных компонентов коэффициентом реакционной активности кислорода K_1 сделал зависимость этих параметров от содержания остаточных газов в горючей смеси более выраженной, что согласуется с известными данными об их влиянии на процессы воспламенения и сгорания [15].

На основании выполненных расчетных исследований сгорания ДМЭ в КС постоянного объема можно сделать следующие выводы.

1. Применение коэффициента реакционной активности кислорода K_1 позволяет моделировать замедление образования и продолжительности окисления активных молекул топлива при балластировке окислителя азотом, а также в процессе сгорания по мере изменения состава горючей смеси при различных коэффициентах остаточных газов.

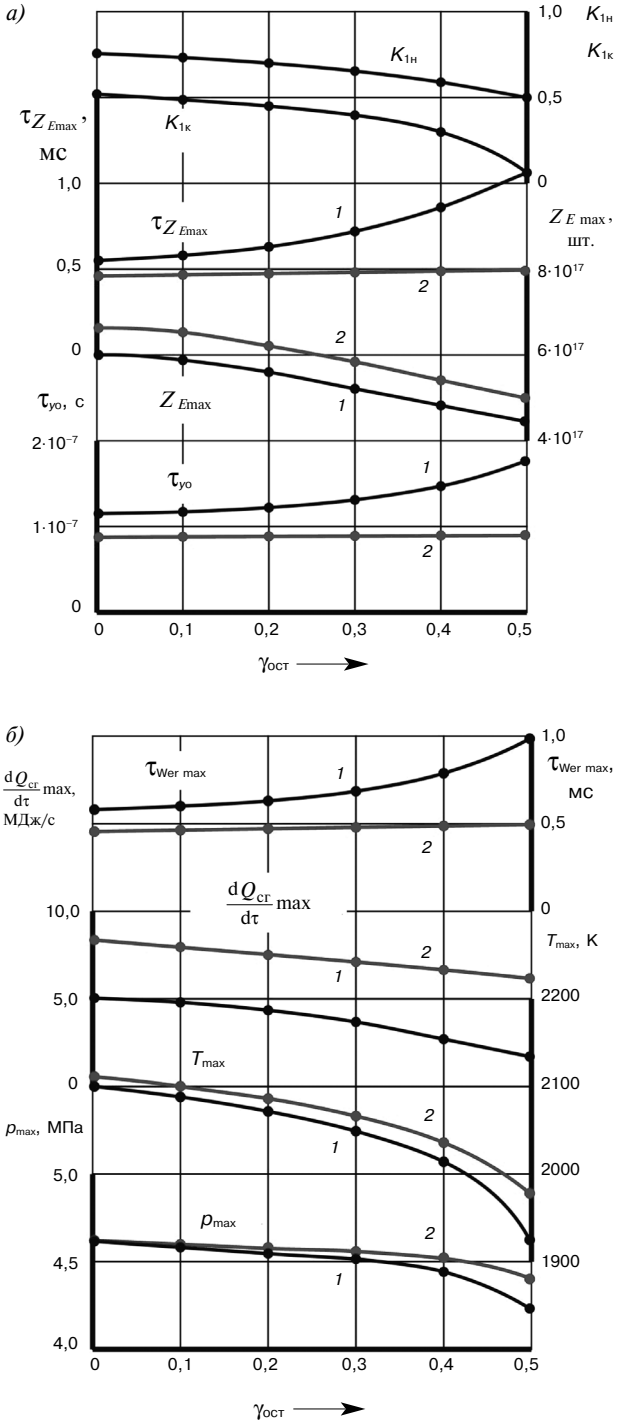


Рис. 7. Влияние коэффициента остаточных газов $\alpha_{ост}$ на составляющие скорости сгорания (*а*) и показатели процесса сгорания (*б*):
1 — K_1 = var (рис. 6, *а*); *2* — $K_1 = 1$; начальный состав смеси соответствует рис. 2

2. В процессе сгорания смеси при $\alpha_в = 2,0$ и $\gamma_{ост} = 0$ коэффициент реакционной активности кислорода снижается от начального значения 0,757, определяемого наличием азота воздуха, до 0,52 (в 1,46 раза) в конце процесса за счет образования продуктов сгорания. Это приводит к уменьшению расчетной скорости сгорания только под действием инертных компонентов в начальный период в 1,32 раза, а в конце сгорания в 1,92 раза.

3. Увеличение содержания инертных компонентов в горючей смеси при повышении коэффициента остаточных газов от 0 до 0,5 приводит к снижению начальной реакционной активности кислорода в 1,53 раза. Одновременное снижение $\alpha_в$ (от 2,0 до 1,03) приводит к уменьшению начального количества молекул кислорода в 1,94 раза. В процессе сгорания количество кислорода и коэффициент его реакционной активности уменьшаются в несколько раз. В результате чего максимальная скорость тепловыделения снижается в 2,53 раза, а время ее достижения увеличивается в 1,71 раза.

4. Разработанная математическая модель влияния инертных компонентов топливно-воздушной смеси на процесс ее сгорания полнее отражает физику этого процесса, что позволяет точнее моделировать его динамику и рабочий цикл HCCI двигателей и исследовать возможные способы их улучшения.

Литература

1. *Гусаков С.В., Махмуд Мохамед Эль Гобаши Эль Хагар.* Опыт моделирования рабочего процесса ДВС с воспламенением гомогенного заряда от сжатия // Вестник Российского университета дружбы народов. — 2004. — № 2. — С. 25–28. (Сер.: «Инженерные исследования»).

2. *Злотин Г.Н., Федянов Е.А., Иткис Е.М., Кузьмин В.Н.* Математическое моделирование индикаторного процесса в двигателе с самовоспламенением от сжатия гомогенной метановоздушной смеси / Г.Н. Злотин, // Сборник научных трудов по материалам Международной конференции Двигатель-2007, посвященной 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. — М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, — 2007. — С. 57–61.

3. *Chen Z., Konno M., Oguma M., Yanai T.* Experimental Study of CI Natural-Gas / DME Homogeneous Charge Engine // SAE Paper 2000-01-0329. — 10 p.

4. *Kong S.C.* A study of natural gas/DME combustion in HCCI engines using CFD with detailed chemical kinetics // Fuel 86. — 2007. — P. 1483–1489.

5. *Flowers D., Aceves S., Smith R.* et al. HCCI in a CRF Engine: Experiments and Detailed Kinetic Modeling // SAE Paper 2000-01-0328. — 13 p.

6. *Камалтдинов В.Г., Абелиович Е.В., Теребов А.С.* Моделирование процесса сгорания в двигателях внутреннего сгорания с воспламенением гомогенного заряда от сжатия // Вестник ЮУрГУ. — 2007. — Вып. 10 — № 25(97). — С. 44–47. (Сер.: «Машиностроение»).

7. *Камалтдинов В.Г.* Новая модель процесса горения топлива в ДВС // Двигателестроение. — 2008. — № 3 (233). — С. 17–20.

8. *Kamaltdinov V.* Combustion process modeling in HCCI engine // SAE Paper 2011-01-1789. — 10 p.

9. *Камалтдинов В.Г., Абелиович Е.В.* Влияние состава двухкомпонентного топлива на процесс сгорания в двигателе с объемным самовоспламенением от сжатия // Вестник ЮУрГУ. — 2008. — Вып. 12 — № 23 (123). — С. 46–53. (Сер.: «Машиностроение»).

10. *Камалтдинов В.Г., Никифоров С.С.* Управление рабочим процессом в HCCI двигателе // Двигателестроение. — 2010. — № 3 (241). — С. 3–9.

11. *Камалтдинов В.Г., Марков В.А.* Расчетное исследование процесса сгорания и показателей рабочего цикла HCCI двигателя, работающего на смеси природного газа и диметилового эфира // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. — 2010. — № 6 (54). — С. 8–15.

12. *Камалтдинов В.Г., Марков В.А.* Влияние температуры огневой поверхности цилиндра на процесс сгорания и показатели рабочего цикла HCCI двигателя // Грузовик. — 2010. — № 12. — С. 38–47.

13. *Камалтдинов В.Г., Марков В.А.* Влияние параметров свежего заряда на показатели рабочего цикла HCCI двигателя с наддувом // Известия вузов. — 2011. — № 6. — С. 31–37. (Сер.: «Машиностроение»).

14. *Камалтдинов В.Г., Марков В.А.* Геометрическая степень сжатия, угол закрытия впускных клапанов и показатели рабочего цикла HCCI // Автомобильная промышленность. — 2011. — № 9. — С. 10–14.

15. *Дубовкин Н.Ф.* Справочник по теплофизическим свойствам углеводородных топлив и их продуктам сгорания. — М.–Л. : Госэнергоиздат, — 1962. — 288 с.

ПРЕДЛАГАЕМ РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМЫ
Ориентировочные тарифы на 1 полугодие 2012 г.

Первая страница обложки	Полноцветная	40 000 руб.
Вторая и третья страницы обложки	Полноцветная	36 000 руб.
Четвертая страница обложки	Полноцветная	38 000 руб.
Внутри журнала из расчета одна страница формата А4	Полноцветная	36 000 руб.
	Черно-белая	30 000 руб.

УДК 643.431.74

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СУДОВОЙ ПРОПУЛЬСИВНОЙ УСТАНОВКЕ С ДВС

В.К. Румб, к.т.н., проф. СПбГМТУ,
В.И. Паюсов, к.т.н., главный конструктор,
Е.В. Чихачев, директор филиала НПО «Сатурн»

Рассмотрены судовые пропульсивные установки, состоящие из дизеля, передачи и гребного винта регулируемого шага. Для перечисленных элементов приведены уравнения динамики. Их решение выполнено методом Рунге–Кутта четвертого порядка, который позволяет на каждом шаге интегрирования учитывать изменяющиеся значения коэффициентов уравнений. Такое изменение характерно для продолжительных переходных процессов. Приведены переходные процессы при воздействии на топливоподачу дизеля и на шаг винта.

Подавляющая часть ходового времени транспортного судна приходится на установившиеся режимы работы пропульсивной установки. Во время этих режимов соблюдается баланс между энергией, вырабатываемой двигателем, и энергией, поглощаемой гребным винтом. Внешним проявлением установившегося режима является постоянство скорости судна. Анализ установившихся режимов работы дизельной пропульсивной установки (ДПУ) относится к обязательной процедуре, которую выполняют при проектировании энергетической установки. По сути, данный анализ сводится к совместному рассмотрению характеристик элементов ДПУ, а проще говоря, к наложению характеристик друг на друга, так как они обычно представлены в виде графических зависимостей в одинаковых координатах.

Неустановившиеся режимы, свойственные движению судна в период разгона, реверсирования, остановки хотя и занимают небольшую часть ходового времени, однако они в основном определяют маневренные качества судна. Внешним проявлением неустановившегося режима является увеличение или уменьшение частоты вращения гребного винта из-за того, что дизель развивает избыточный или недостаточный крутящий момент. На колебания частоты вращения реагирует регулятор частоты вращения двигателя, который своим воздействием на топливоподачу стремится восстановить статическое равновесие на новом уровне. Закономерности изменения параметров ДПУ от начала возмущения до нового статического равновесия представляют собой переходный процесс, отражающий реакцию ДПУ на конкретное внешнее воздействие. Наибольший интерес представляют так называемые управляющие воздействия, обусловленные действием оператора, например изменение положения рукоятки управления двигателем, шага гребного винта и т. п.

Определение показателей переходных процессов становится еще более актуальным из-за того, что ими на стадии проектирования ДПУ можно управлять. Иначе говоря, соответствующим подбором расчетных параметров удается получить желаемые форму и показатели переходного процесса и на этом сформулировать требования к системе управления установкой в целом. Таким образом, построение переходных процессов позволяет не только анализировать поведение ДПУ на неустановившихся режимах, но и облегчает нахождения путей улучшения ее динамических свойств. Несмотря на это переходные процессы исследуют крайне редко и только в рамках гипотезы квазистационарности. Данная гипотеза исходит из предположения, что переход ДПУ от одного рабочего режима к другому протекает очень медленно, и, следовательно, в каждой точке этого процесса выполняется условие статического баланса между подведенной и отведенной энергией. Изучение переходных процессов в виде последовательной совокупности установившихся режимов существенно облегчает понимания их сути, однако не дает оснований для строго теоретического описания работы ДПУ на переходных режимах.

Между тем построение реальных переходных процессов не относится к тривиальной процедуре, поскольку она требует решения дифференциальных уравнений динамики элементов ДПУ. Такие уравнения устанавливают связь между входными и входными параметрами каждого элемента ДПУ с учетом их инерционности. В общем случае уравнения являются нелинейными. Принципы их получения, способы линеаризации и методы решения подробно изложены в теории автоматического регулирования [1]. В частности, для нахождения интегралов дифференциальных уравнений эта теория ориентирована на преобразования Лапласа — по сути, промежуточную операцию, позволяющую обойти известные трудности при решении уравнений. Однако при массовой доступности компьютерной техники

решать дифференциальные уравнения любого порядка и системы, составленные из них, удобнее и быстрее численными методами. При этом отпадает необходимость приведения уравнений к канонической форме и что, более важно, физическая сущность решаемой задачи не подменяется математическим приоритетом. Из отмеченного следует, что характер протекания переходных процессов ДПУ определяется взаимодействием составляющих ее элементов и их уравнениями динамики.

Динамические свойства судна проявляются в изменении его скорости. Применительно к прямолинейному движению судна уравнение этого изменения может быть получено на основании 2-го закона Ньютона. Согласно ему

$$M_{\text{с}} \frac{\mathrm{d}\,\vartheta}{\mathrm{d}\,t} = P_e - R, \qquad (1)$$

где $M_{\text{с}}$ — масса судна с учетом присоединенной массы воды, кг; P_e — движущая сила (полезный упор) гребного винта, Н; R — полная сила сопротивления движению судна, Н.

Упор гребного винта, работающего за корпусом судна, подсчитывается по формуле

$$P_e = (1 - t) K_P \cdot \rho \cdot n_z^2 \cdot D_z^4, \qquad (2)$$

где t — коэффициент засасывания; ρ — плотность воды, кг/м^3; n_z — частота вращения гребного винта, с$^{-1}$; D_z — диаметр винта, м; K_p — коэффициент упора, определяемый по кривым действия в функции от относительной поступи λ_P

$$\lambda_P = (1 - \psi) \frac{\vartheta}{n_z \cdot D_z}, \qquad (3)$$

где ψ — коэффициент попутного потока.

Для ВРШ коэффициент упора дополнительно должен учитывать шаговое отношение H/D_z. На основании изложенного упор гребного винта является сложной функцией от скорости судна, частоты вращения и шага, т. е. $P_e = f(\vartheta, n_z, H)$.

Силу сопротивления движению для водоизмещающих судов в теории корабля принято представлять в виде уравнения

$$R = \varsigma \frac{\rho \cdot \vartheta^2}{2} \Omega = f(\vartheta, \Phi),$$

где ζ — коэффициент полного сопротивления, по опытным данным $\zeta = 0{,}02 \div 0{,}12$; Ω — смоченная поверхность судна, м^2; Φ — внешние факторы, влияющие на сопротивление движению судна.

После стандартной процедуры линеаризации с разложением в ряд Тейлора выражений для P_e и R уравнение (1) принимает вид

$$M_{\text{с}} \frac{\mathrm{d}\,(\Delta\vartheta)}{\mathrm{d}\,t} + F_{\text{с}} \cdot \Delta\vartheta = \\ = K_{pn} \Delta n_z + K_{pH} \Delta H - K_{R\Phi} \Delta\Phi, \qquad (4)$$

где $F_{\text{с}}$ — фактор устойчивости судна; K_{pn}, K_{pH} и $K_{R\Phi}$ — угловые коэффициенты соответствующих статических характеристик.

Фактор устойчивости судна определяется взаимным протеканием зависимостей сопротивления и упора винта от скорости судна. Численное значение $F_{\text{с}}$ удобно определять по формуле

$$F_{\text{с}} = \operatorname{tg}\alpha_1 - \operatorname{tg}\alpha_2,$$

где α_1 и α_2 — углы наклона касательных, проведенных к кривым $R = f(\vartheta)$ и $P_e = f(\vartheta)$ (рис. 1).

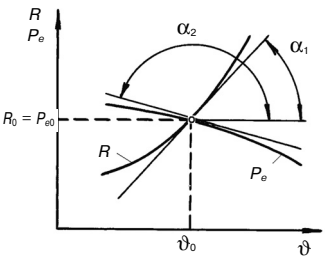


Рис. 1. Схема, поясняющая определение фактора устойчивости судна

Эти кривые могут быть построены на основании теоретических положений, рассмотренных в [2].

Перейдем теперь к уравнению динамики судового двигателя. По имеющимся рекомендациям его целесообразно рассматривать, состоящим из следующих элементов:

➢ собственно двигатель, состоящий из деталей остова и кривошипно-шатунных механизмов;

➢ всережимный регулятор частоты вращения (механический или электронный), с помощью которого поддерживается заданная частота вращения двигателя;

➢ турбокомпрессор, объединяющий в одном агрегате газовую турбину и воздушный компрессор, который обеспечивает подачу воздуха повышенного давления;

➢ газовоздушный тракт, с помощью которого осуществляется связь турбокомпрессора с двигателем; состоит из выпускного коллектора и впускного ресивера.

Уравнения этих элементов дизеля подробно рассмотрены в [3, 4], поэтому приведем их без комментарий.

Уравнение собственно двигателя:

$$\theta \frac{\mathrm{d}(\Delta\omega)}{\mathrm{d}t} + F_{\text{д}} \cdot \Delta\omega = K_{\text{д}h} \Delta h - K_{\text{д}N} \Delta N.$$

Уравнение турбокомпрессора:

$$\theta_k \frac{\mathrm{d}(\Delta\omega_k)}{\mathrm{d}t} + F_k(\Delta\omega_k) = K_{Tp} \Delta p_T + K_{Th} \Delta h - K_{kp} \Delta p_k.$$

Уравнение впускного ресивера:

$$F_B \cdot \Delta p_k = K_{B\omega_k} \cdot \Delta\omega_k - K_{B\omega} \cdot \Delta\omega.$$

Уравнение выпускного коллектора:

$$F_{\text{г}} \cdot \Delta p_{\text{г}} = K_{\text{г}\omega} \cdot \Delta\omega + K_{\text{г}p} \cdot \Delta p_k - K_{\text{г}h} \cdot \Delta h.$$

Уравнение регулятора частоты вращения:

$$\nu \frac{\mathrm{d}(\Delta z)}{\mathrm{d}t} + F_p \cdot \Delta z = K_{p\omega} \cdot \Delta\omega_p - K_{p\psi} \cdot \Delta\psi.$$

Уравнение сервомотора регулятора частоты вращения:

$$T_c \frac{d(\Delta Y)}{dt} + \Delta Y = \Delta z.$$

Таким образом, динамические свойства рассматриваемой ДПУ, структурная схема которой показана на рис. 2, определяются в результате совместного решения уравнений судна (4) и шести уравнений двигателя. Чтобы система, составленная из приведенных уравнений, была замкнутой и соответственно взаимосвязанной, необходимо дополнить ее двумя уравнениями связи. Первое уравнение устанавливает связь между частотой вращения гребного винта и угловой скоростью коленчатого вала. Для ДПУ с прямой передачей такая связь выражается зависимостью $\omega = n_z/2\pi$. Другим уравнением выражается зависимость между перемещениями регулирующего органа топливоподачи и штока сервомотора. Если передаточное отношение этой зависимости равно единице, то искомое уравнение связи имеет вид $\Delta h = -\Delta Y$. Представленную систему уравнений можно упростить в результате исключения из нее алгебраических уравнений. Достигается это простой подстановкой уравнений ресивера и коллектора соответственно в уравнения двигателя и турбокомпрессора. После подстановки и учета уравнений связи динамические свойства ДПУ будут описываться системой из пяти дифференциальных уравнений.

Как уже отмечено, в теории автоматического регулирования подобные системы уравнений приводят к операторной форме с помощью преобразований Лапласа. Такая мера вынужденная и связана с облегчением решения практических задач. Однако в современных условиях любые по сложности системы дифференциальных уравнений можно решать численными методами. Поэтому приведенную систему дифференциальных уравнений решали методом Рунге–Кутта четвертого порядка по программе, разработанной на языке TURBO PASCAL специально для этой цели.

Напрашивается еще одно замечание, касающееся приведенных уравнений. Они представлены

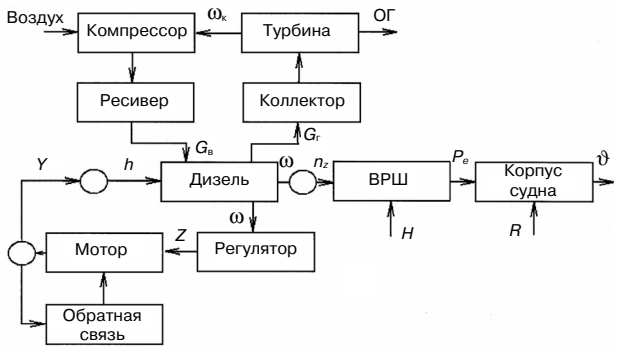


Рис. 2. Структурно-функциональная схема ДПУ

в отклонениях от равновесного состояния и поэтому, строго говоря, справедливы для получения малых переходных процессов, длительность которых исчисляется секундами. В этом случае коэффициенты уравнений допустимо считать постоянными. Однако если требуется смоделировать поведение ДПУ сразу для всего диапазона изменения возмущающего воздействия, то необходимо учитывать тот факт, что численные значения коэффициентов уравнений зависят от режимов работы установки, а они во время переходных процессов постоянно меняются. Изменяется даже масса судна и приведенный момент инерции ДПУ за счет присоединенной массы воды [5]. В этих условиях приходится не только устанавливать функциональные зависимости для коэффициентов уравнений, но и учитывать эти зависимости при пошаговом интегрировании уравнений. Поясним сказанное на примере торможения, связанного с уменьшением скорости судна от начальной ϑ_0 до конечной ϑ_1. Поскольку при торможении ускорение судна $d\vartheta/dt<0$, то согласно (1) данный маневр может быть достигнут только при условии $P_e - R<0$.

Иначе говоря, торможение судна возможно, если заблаговременно уменьшить упор гребного винта. Для установок с ВФШ это можно сделать снижением частоты вращения двигателя в результате перестановки рукоятки управления в сторону меньшей подачи топлива, а в установках с ВРШ еще и за счет разворота лопастей в сторону меньшего шага. Вместе с уменьшением скорости судна меняется сила сопротивления его движению. Текущие значения этой силы можно найти из соотношения

$$\frac{R_x}{R_0} = \left(\frac{\vartheta_x}{\vartheta_0}\right)^2 \text{ или } R_x = R_0\left(\frac{\vartheta_x}{\vartheta_0}\right)^2. \qquad (5)$$

Сложнее обстоит дело с выражением для определения текущего упора гребного винта. Объясняется это тем, что упор, как следует из формулы (2), зависит от коэффициента засасывания t, частоты вращения n_z и коэффициента упора K_P. Для последнего аргументом служит относительная поступь винта λ_p, а она, в свою очередь, является функцией скорости судна, частоты вращения винта и коэффициента попутного потока. При смене режима работы ДПУ все упомянутые коэффициенты будут изменяться, причем это изменение может быть довольно существенным. Несмотря на очевидность указанных зависимостей данных по ним в литературе крайне мало. Более или менее полно описана гидродинамика взаимодействия гребного винта с корпусом судна для установившихся режимов работы ДПУ. Что касается неустановившихся режимов и, в част-

ности, больших переходных процессов, о которых идет речь, то они, по-видимому, изучены пока не до конца и поэтому в настоящее время нет практически проверенных зависимостей, пользуясь которыми можно было бы решать поставленную задачу. В этих условиях, не претендуя на оригинальность, попытаемся выразить упомянутые коэффициенты соответствующими уравнениями.

В теории гребных винтов коэффициент упора находят по кривым действия гребного винта, которые строят по результатам испытаний моделей винтов в свободной воде. Аппроксимация этих кривых дает возможность записать

$$K_P = A_P - \lambda_p \left(\frac{A_P}{H/D_z} \right)^{1,25}.$$

где A_p — коэффициент, который предлагается подсчитывать по формуле $A_p = 0{,}375H/D_z + 0{,}025$.

Полагаясь только на литературные данные, можно утверждать, что коэффициенты t и ψ являются сложными и зачастую нелинейными функциями скорости судна, полного сопротивления его движению, тяги винта и частоты его вращения. Указанные факторы по-разному влияют на каждый из рассматриваемых коэффициентов: с увеличением упора (шага винта) коэффициент засасывания уменьшается, а коэффициент попутного потока растет. В определенной мере подтверждением этих соотношений служит рис. 3, впервые опубликованный Е.Д. Гарбером. На рисунке графики для t и ψ представлены в зависимости от коэффициента k_D , численно равного

$$k_D = \vartheta \cdot D_z \sqrt{\frac{\rho}{P_e}}.$$

Указанные замечания учтены в упомянутой программе, с помощью которой удается получать как быстрые, так и продолжительные переходные процессы при различных возмущениях. К типовым управляемым возмущениям ДПУ относятся изменение подачи топлива и разворот лопастей ВРШ. Результаты этих решений позволили построить переходные процессы, по которым можно судить о динамике установки в целом. Для примера на рис. 4 приведены графики изменения частоты вращения дизеля и скорости судна во времени при переводе рукоятки управления регулятором в сторону уменьшения частоты вращения. Подобное решение получено и при непосредственном воздействии на шаг ВРШ. По сравнению с воздействием на регулятор частоты вращения изменение шага винта ухудшает динамику установки, поскольку приводит к увеличению длительности переходного процесса, хотя его форма остается прежней. Колебательный

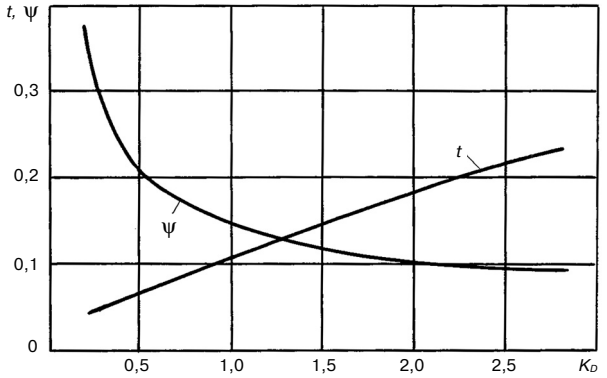


Рис. 3. Графики для определения коэффициентов засасывания и попутного потока

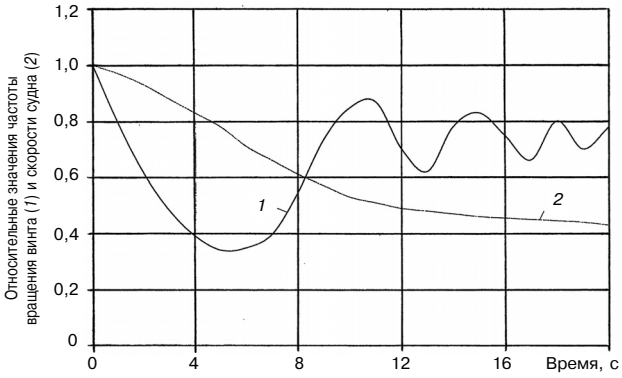


Рис. 4. Изменение частоты вращения двигателя и скорости судна при ступенчатом переводе рукоятки управления регулятора в сторону меньшей частоты вращения

характер переходного процесса двигателя с явным динамическим забросом частоты вращения во многом определяется временем сервомотора T_c. Для другой установки были смоделированы переходные процессы дизеля, работающего отдельно и в составе с гребным винтом, рис. 5. Как видно из рисунка эти переходные процессы отличаются как количественно, так и формой. Для варианта, когда двигатель отсоединен от гребного винта, переходный процесс колебательный с забросом частоты вращения. Переходный процесс того же дизеля, но работающего на гребной винт, апериодический с большой длительностью. Здесь сказывается гидромеханическая инерционность пропульсивной установки; с увеличением массы судна продолжительность переходного процесса растет.

Более детальным исследованиям подвергнута ДПУ танкера водоизмещением $85 \cdot 10^3$ м^3 с мощностью главного двигателя 12 360 кВт при 134 об/мин. В частности, был смоделирован переходный процесс, который будет иметь данная установка при реверсировании танкера разворотом лопастей ВРШ с полного хода «вперед» на полный ход «назад». В практике судовождения подобные маневры не являются редкостью, чаще

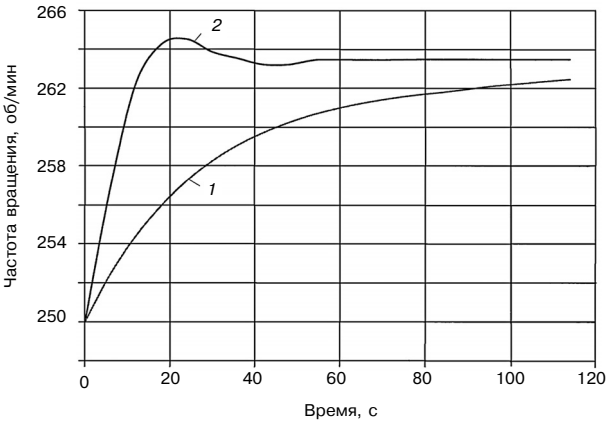


Рис. 5. Скоростные переходные процессы дизеля в составе пропульсивной установки (*1*) и в отдельности от нее (*2*)

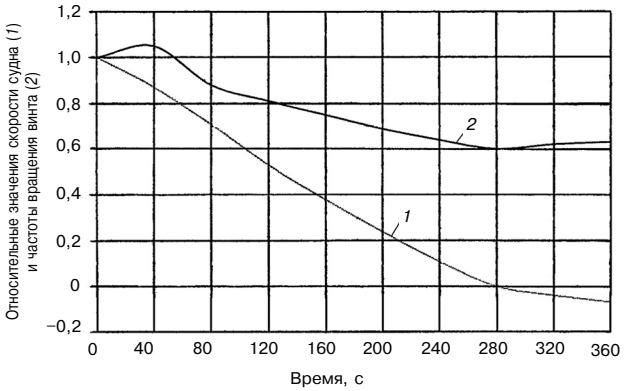


Рис. 6. Изменение скорости судна и частоты вращения гребного винта при реверсировании судна разворотом лопастей ВРШ с полного хода «вперед» до полного хода «назад»

всего ими пользуются для уменьшения выбега судна при его остановке. Данный маневр включает в себя два вида неустановившегося движение: торможение и разгон. При торможении лопасти ВРШ переводят в положение нулевого шага, а затем их разворачивают в противоположное направление. Время выдержки лопастей в нулевом положении влияет на количественные параметры переходного процесса, для процесса, показанного на рис. 6, оно составляет 20 с. Из рисунка следует, что в начальный момент времени (примерно до 40 с) одновременно с плавным уменьшением скорости судна происходит разгон гребного винта, обусловленный тем, что нагрузка со стороны винта уменьшилась, а дизель продолжает работать по номинальной нагрузочной характеристике, следовательно, избыточная работа, развиваемая двигателем, идет на увеличение кинетической энергии. Частота вращения винта доходит до 1,06 от номинального значения. После разворота лопастей на ход «назад» вместе со скоростью судна уменьшаются обороты винта из-за большого сопротивления движению танкера. Отметим, в рассматриваемые моменты времени судно движется по инерции вперед, а гребной винт уже создает упор заднего хода. Уменьшение частоты вращения ВРШ продолжается до полной остановки судна. В данный момент времени (примерно 280 с) частота вращения винта составляет 80 об/мин.

Моделирование работы ДПУ при том же маневре судна, но при плавном переводе рукоятки управления ВРШ, приводит к более резкому забросу частоты вращения и увеличению длительности переходного процесса. На время переходного процесса существенное влияние оказывает зависимость сопротивления движению судна от его скорости. С учетом (5) продолжительность переходного процесса увеличивается до 370 с. Введение в решаемую систему уравнений регулятора и сервомотора (работа дизеля по регуляторной характеристике) практически не приводит к изменению характера и параметров переходного процесса судна. Сказать то же самое о переходном процессе двигателя нельзя. В данном случае он претерпевает значительные изменения и по форме будет ярко выраженным колебательным с большими забросами и провалами частоты вращения.

Таким образом показано, что использование методологии теории автоматического регулирования позволяет моделировать не только быстрые, но и продолжительные переходные процессы, длительность которых исчисляется минутами. При построении продолжительных переходных процессов необходимо учитывать тот факт, что численные значения коэффициентов уравнений динамики ДПУ во время переходных процессов постоянно меняются. Корректировать значения указанных коэффициентов наиболее просто при пошаговом интегрировании систем дифференциальных уравнений численными методами, например, методом Рунге−Кутта четвертого порядка.

Литература

1. *Куропаткин П.В.* Теория автоматического управления. — М. : Высшая школа, 1973. — 528 с.

2. *Жинкин В.Б.* Теория и устройство корабля. — СПб. : Судостроение, 2010. — 408 с.

3. *Грехов Л.В. Иващенко Н.А., Марков В.А.* Топливная аппаратура и системы управления дизелей. — М. : Легион-Автодата, 2005. — 344 с.

4. *Крутов В.И.* Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания. — М. : Машиностроение, 1989. — 416 с.

5. *Антонович С.А.* Динамические характеристики объектов регулирования судовых дизельных установок. — Л. : Судостроение, 1966. — 234 с.

УДК 621.431

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА МОДЕРНИЗАЦИИ ДИЗЕЛЕЙ СЕМЕЙСТВА ЧН21/21 ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ НОРМ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ

Л.А. Новиков, к.т.н., с.н.с.
ООО «ЦНИДИ-Экосервис»

Методами численного моделирования параметров рабочего процесса и кинетики образования NO_x выполнен анализ потенциала модернизации дизеля ЧН21/21 многоцелевого назначения по снижению выбросов NO_x до уровня, соответствующего действующим зарубежным стандартам, в том числе IMO-Tier 2.

Требуемый объем модернизации двигателя предусматривает замену топливной аппаратуры, включая ТНВД, форсунки и распылители, модернизацию или замену турбокомпрессора на более эффективный, изменение регулировок, влияющих на образование и выход NO_x. Показано, что нормализация показателей выбросов NO_x может быть выполнена без потери топливной экономичности. При этом удельный средневзвешенный выброс NO_x по испытательному циклу Е2 снижается с 13,26 до 7,34 г/кВт·ч, при значении нормы IMO-Tier 2, равной 8,18 г/кВт·ч.

За прошедший год в нашей стране произошло несколько событий, способных изменить, а возможно и переломить многолетнюю устойчивую тенденцию разрушения отрасли отечественного судового, тепловозного и промышленного двигателестроения. Наращивание отставания в технических и технологических производственных процессах привело к интенсивному вытеснению продукции отечественного производства с внутреннего рынка. В настоящее время рассматриваются сценарии использования двигателей зарубежного производства в военной технике и в составе объектов министерства обороны специального назначения и т. д. При этом захват российского рынка зарубежными производителями двигателей сопровождается настолько сильным идеологическим давлением в формировании общественного мнения о невозможности восстановить утраченные позиции отечественного двигателестроения, что не только традиционные потребители, но и многие специалисты отрасли в это уже поверили.

Однако в последнее время появилась надежда на возможность перехода к развитию отрасли. Во-первых, реальность полного разрушения отрасли отечественного двигателестроения была наконец признана, а ее последствия осознаны на государственном уровне, в результате чего была разработана и в декабре 2011 г. стартовала федеральная целевая программа, направленная на развитие двигателей нового поколения и их компонентов. В указанной программе достаточно скромное место отведено работам по достижению перспективных норм вредных выбросов, хотя, как показывает практика, именно уровень экологических показателей современных двигателей является наиболее эффективным инструментом в конкурентной борьбе за рынки сбыта [1].

Во-вторых, постановлением Правительства РФ от 24 марта 2010 г. № 203 Россия присоединилась к Международной конвенции МАРПОЛ 73/78. Приложение VI к конвенции «О предотвращении выбросов с судов» предусматривает ограничение выбросов в атмосферу окислов азота (NO_x) от главных и вспомогательных судовых дизелей с 01.07.2010 г. на уровне IMO-Tier 2, что примерно на 20 % ниже аналогичной нормы по ГОСТ Р 51249 для двигателей, поставленных на производство после 01.01.2000 г., и на 40–50 % ниже нормы для двигателей, поставленных на производство до 01.01.2000 г. С учетом того, что примерно половина выпускаемых в нашей стране модификаций судовых двигателей поставлено на производство до 01.01.2000 г., требования международных стандартов, казавшиеся отдаленной перспективой, сразу же стали суровой реальностью и трудно разрешимой проблемой.

В сложившейся ситуации производители судовых двигателей уже не имеют более никакой возможности уклоняться от модернизации выпускаемой продукции, поскольку в соответствии с законодательством РФ производство продукции, не соответствующей вступившим в силу новым нормативным требованиям, должно быть остановлено.

1. Характеристика объекта модернизации и цели исследования

В качестве предполагаемого объекта модернизации выбран четырехтактный двигатель многоцелевого (в том числе судового) назначения,

тронковый, с открытой камерой сгорания и непосредственным впрыском топлива, газотурбинным наддувом и охлаждением наддувочного воздуха, ТНВД блочного типа и центрально расположенной форсункой закрытого типа в четырехклапанной крышке цилиндров, размерностью $S/D = 210/210$ мм. Судовые двигатели этой размерности, пока нашедшие применение только на кораблях ВМФ, выпускаются в исполнении V-6 и V-8 Уральским дизель-моторным заводом (ООО УДМЗ). Двигатели относятся к классу высокооборотных (n = 1500 об/мин), имеют в своем классе невысокий (относительно зарубежных аналогов), но вполне приемлемый уровень форсировки по среднему эффективному давлению (от 13,5 до 14,8 бар) и достаточно перспективный (по результатам анализа конструкции) потенциал модернизации. Самым существенным недостатком двигателей рассматриваемого класса является сверхнормативный уровень выбросов окислов азота, составляющий, в зависимости от эксплуатационной рабочей характеристики, от 12,6 до 13,3 г/кВт·ч, что примерно на 40 % превышает действующую с 01.07.2010 г. норму IMO-Tier 2.

Технические характеристики наиболее форсированной модификации двигателя семейства ЧН21/21, которые включают основные рабочие параметры, влияющие на уровень выбросов вредных веществ с отработавшими газами, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Техническая характеристика двигателей семейства ЧН21/21

Наименование параметра, размерность	Значение
Наибольшая цилиндровая мощность, кВт	134,5
Среднее эффективное давление, бар	14,82
Геометрическая степень сжатия	13,5
Максимальное давление в цилиндре, бар	158
Давление наддува (избыточное), кПа	168
Температура наддувочного воздуха за охладителем, °С	70
КПД турбокомпрессора, %	52,5
Коэффициент избытка воздуха	2,09
Геометрический угол опережения подачи топлива, град ПКВ до ВМТ	34^{+1}
Давление подъема иглы форсунки (максимальное давление впрыска топлива), бар	260 (680–700)
Максимальная среднемассовая (локальная) температура рабочего тела в камере сгорания, К	1790 (2580–2600)
Количество и диаметр сопловых отверстий распылителя, мм	8 отв. ∅ 0,4
Номинальный удельный эффективный (средневзвешенный по испытательному циклу Е2) расход топлива, г/кВт·ч	210 (213,6)
Номинальный удельный (средневзвешенный по испытательному циклу Е2) выброс NO_x, г/кВт·ч	11,89 (13,26)
Норма выброса NO_x (IMO-Tier 2), г/кВт·ч	8,18

Главная цель настоящего аналитического исследования состоит в оценке принципиальной возможности нормализации показателей вредных выбросов двигателей семейства ЧН21/21 при максимально возможном сохранении конструкции силовых элементов КШМ, деталей камеры сгорания, а также рабочих параметров, определяющих топливную экономичность и ресурсные показатели. Для достижения поставленной цели в условиях, когда у производителя отсутствует необходимая экспериментальная база, имеется единственно возможное средство — численное моделирование рабочего процесса и кинетики образования NO_x в цилиндре дизеля.

С учетом значительных пробелов в типаже судовых высокооборотных двигателей отечественной конструкции и постройки цель исследования представляется крайне актуальной и своевременной. В случае нахождения приемлемого решения по нормализации показателей выбросов NO_x конкурентоспособность двигателей семейства ЧН21/21 может быть значительно повышена, а область применения расширена за счет возможности установки на судах коммерческого морского и рыбопромыслового флота.

2. Анализ параметров рабочего процесса, влияющих на уровень выбросов NO_x

Исходные универсальные характеристики изменения удельного эффективного расхода топлива b_e (г/кВт·ч) и концентрации NO_x (ppm) в поле возможных режимов работы дизеля ЧН21/21 приведены на рис. 1. Универсальные характеристики (приведена только часть из них) позволяют наиболее надежно диагностировать характерные особенности и недостатки рабочего процесса в части организации смесеобразования и сгорания топлива. Применительно к поиску возможных путей решения поставленной задачи, а именно снижения образования NO_x при сохранении топливной экономичности и максимального давления в цилиндре p_z, можно отметить следующие характерные особенности внутрицилиндровых процессов объекта исследований.

В поле универсальных характеристик (см. рис. 1) имеются два характерных и несовпадающих экстремума: минимума удельного эффективного расхода топлива b_e (находится вблизи режима полной мощности) и максимума концентрации NO_x, смещенного в зону минимальных частот вращения и находящегося вблизи границы помпажа турбокомпрессора. Другой особенностью приведенных экспериментальных данных является слабо выраженный рост концентрации NO_x по номинальной нагрузочной характеристике с ростом среднего эффективного давления p_{me} при заметном снижении удельного эффективного расхода топлива b_e. Отмеченные особенности

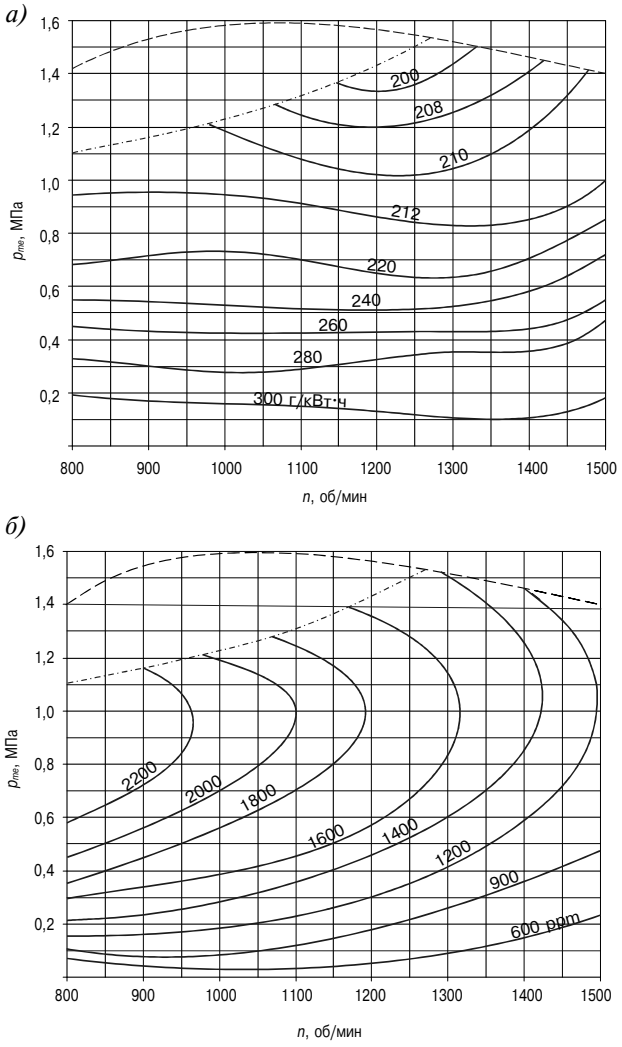


Рис. 1. Универсальные характеристики дизеля ЧН21/21: *а* — b_e, г/кВт·ч; *б* — концентрация NO_x, ppm

нарушают общую закономерность вида $NO_x \rightarrow \eta_e \cdot \text{const}$, природа которой сегодня общеизвестна и обычно строго соблюдается в пределах допустимого изменения рабочих параметров.

Наиболее вероятная причина нарушения закономерности $NO_x \rightarrow \eta_e \cdot \text{const}$ состоит в следующем: неполнота использования располагаемого воздушного заряда; горение топлива в периферийной, наиболее глубокой части камеры сгорания с возможным попаданием части топлива на стенку камеры (частично пленочное смесеобразование). Это подтверждается стабильно высоким уровнем выхода NO_x, а также близким к предельно допустимому значению уровнем дымности отработавших газов. Рассмотренный характер процесса является следствием слишком раннего и растянутого по углу поворота коленчатого вала впрыском топлива, чрезмерной дальнобойностью топливного факела, слабой турбулентностью рабочей смеси в стадиях основного горения и догорания топлива.

Отмеченные особенности рабочего процесса дизелей семейства ЧН21/21 были экспериментально подтверждены физическим моделированием смесеобразования в «холодной бомбе» и визуализацией процесса горения топлива на установке с прозрачными окнами «Призма», моделирующей процесс горения топлива в динамике. С учетом ограниченного объема журнальной публикации приведение всех имеющихся данных нецелесообразно и избыточно для достижения основной цели настоящего исследования.

3. Аппарат математического моделирования

Программный комплекс, разработанный для численного моделирования внутрицилиндровых процессов в дизелях, состоит из трех объединенных программ:

➢ IMPULS — моделирование индикаторных эффективных показателей рабочего процесса;

➢ FAKEL — моделирование динамики развития топливного факела, распределения топлива в объеме камеры сгорания, формирование локальных зон горения топлива;

➢ NO-DIESEL — моделирование неравновесной кинетики образования NO_x при сгорании различных топлив в дизелях по зональной модели.

Наиболее подробно разработанный комплекс программ рассмотрен в работе [2], поэтому здесь ограничимся рассмотрением только тех его фрагментов, которые необходимы для понимания процедуры расчета и анализа полученных результатов.

Первая из программ широко известна. Основана она на классической термодинамической теории ДВС и используется во многих научных школах, различаясь лишь в деталях, касающихся в основном способов задания закона тепловыделения при горении топлива.

Моделирование неравновесной кинетики образования NO в дизелях при горении газообразных углеводородных топлив описываются с помощью расширенного механизма Я.Б. Зельдовича [3]:

$$O + N_2 \Leftrightarrow NO + N \quad (1)$$

$$N + O_2 \Leftrightarrow NO + O \quad (2)$$

$$N + OH \Leftrightarrow NO + H \quad (3)$$

который при условии квазистационарности концентрации атомарного кислорода приводит к следующему выражению для скорости образования NO:

$$W_{NO} = \frac{2 \cdot k_1[O] \cdot [N_2]}{1 + k_{-1}[NO] \cdot b/(k_{-2}[O_{-2}])} - \frac{2 \cdot k_2[NO] \cdot [O]}{1 + k_{-2}[O_2]/(k_{-1}[NO] \cdot b)}, \quad (4)$$

где k_i, k_{-i} — константы скоростей прямой и обратной i-й реакции;

$$b = \left\{1 + \frac{k_3[\mathrm{OH}]}{k_{-2}[\mathrm{O_2}]}\right\}^{-1}. \qquad (5)$$

Из-за большой энергии активации окисление азота идет намного медленнее, чем окисление горючего. Поэтому при проведении практических расчетов для нахождения концентраций, входящих в формулы (4), (5), и температуры, определяющей значения констант скоростей, привлекается предположение о том, что окись азота образуется в термодинамически равновесных (за исключением NO и N) продуктах сгорания, т. е. в условиях, когда все основные химические реакции, кроме реакций (1)−(3) приходят в состояние равновесия.

Опираясь на расширенный механизм Я.Б. Зельдовича, задачу вычисления концентрации окиси азота в фиксированный момент времени t пребывания пробы газа в высокотемпературных продуктах сгорания углеводородных топлив целесообразно разбить на два этапа.

Первый этап состоит в расчете состава термодинамически равновесных (за исключением NO и N) продуктов сгорания, а затем полученные концентрации компонентов и температура используются при численном интегрировании уравнения первого порядка:

$$\frac{\mathrm{d[NO]}}{\mathrm{d}t} = W_{\mathrm{NO}}, \qquad (6)$$

где W_{NO} задается выражениями (4), (5).

Кинетика образования окислов азота в цилиндре дизеля по приведенной выше модели рассчитывается с учетом развития топливного факела во времени и пространстве с разбивкой заряда на характерные зоны горения топлива, отличающиеся коэффициентом избытка воздуха.

Расчет количества и объема характерных зон горения, сформированных за период задержки самовоспламенения, а также соотношения в этих зонах воздуха и топлива выполняется на основе современных представлений о развитии топливных струй с учетом следующих допущений.

При впрыске в камеру сгорания дизеля струи топлива она распадается на мелкие капли, которые быстро испаряются. Подготовленная горючая смесь разбивается на зоны, в пределах которых состав смеси приблизительно постоянный. Воспламенение носит многоочаговый характер и охватывает все подготовленное для сгорания топливо (рис. 2).

В предлагаемой модели струя топлива рассматривается как струя пара. При возникновении воспламенения камера разделена на зоны: свободная зона A (воздух и остаточные газы); богатое топливом ядро струи C; несколько (достаточно 10 для каждого факела) промежуточных зон B_i, отличающихся между собой соотношением

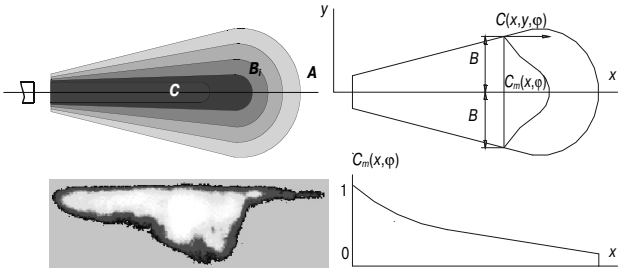


Рис. 2. Схема развития струи топлива для расчета образования NO по зональной модели

топлива и воздуха. При этом турбулентность в процессе горения учитывается коэффициентом частичного взаимного перемешивания промежуточных зон B_i.

Смесь воспламеняется и выгорает при различных температурах, определяемых локальным соотношением воздуха и топлива. В качестве примера, подтверждающего адекватность принятых допущений, на рис. 2 приведен фрагмент скоростной кинограммы процесса горения топлива в камере сгорания экспериментального двигателя «Призма» с прозрачными окнами широкого обзора.

В модели топливо-воздушной струи используются эмпирические уравнения для глубины проникновения струи (L_{c}) и скорости расширения струи (B_i). Принимается нормальное распределение отношение топлива к воздуху в поперечном сечении струи и гиперболическая зависимость распределения топлива вдоль струи. Поскольку общее количество впрыснутого топлива сохраняется в струях, то в соответствии с указанным выше временным и пространственным распределением топлива в струе определяются границы зон горения.

Длина струи описывается следующим уравнением:

$$L_{\mathrm{c}} = F\,[(\varphi - \varphi_{\mathrm{оп}})/6n]^{0,8}, \qquad (7)$$

$$F = \frac{450 \cdot d_{\mathrm{c}}^{0,5} \cdot \left(\frac{\rho_b}{\rho_d}\right)^{0,4} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_a}\right)^{0,5} \cdot (p_j - p)^{0,25}}{\left(1 + \frac{\rho}{\rho_a}\right)^{0,85}},$$

где d_{c} — диаметр соплового отверстия; ρ_b, ρ_d — плотность эталонного и дизельного топлива; ρ_a — плотность газа в цилиндре и атмосферного воздуха; p, p_j — давления газа в цилиндре и топлива перед сопловым отверстием; φ, $\varphi_{\mathrm{оп}}$ — текущий угол ПКВ и угол опережения подачи топлива; n — частота вращения.

Интенсивность расширения струи описывается следующим уравнением:

$$dB/dx = \frac{K}{2} \cdot \left(1 + \frac{p}{p_j}\right), \qquad (8)$$

где K — постоянная, зависящая от формы камеры сгорания.

В модели предполагается, что в период высокотемпературной стадии процесс горения слабо влияет на траекторию и форму струи.

4. Результаты моделирования

Первый этап моделирования параметров рабочего процесса и кинетики образования NO_x в камере сгорания дизеля предусматривает настройку модели и оценку ее адекватности исследуемому объекту. Расчетная индикаторная диаграмма и суммарный расчетный выход NO_x на режиме максимальной длительной мощности дизеля ЧН21/21 при значениях исходных данных, обозначенных в табл. 1, приведен на рис. 3.

Результаты моделирования показывают, что при характерном для дизеля ЧН21/21 раннем впрыске топлива процесс активного окисления азота начинается примерно за 20 град до ВМТ в период основного сгорания, что позволяет значительно разогнать прямую реакцию образования NO с достижением максимального значения скорости вблизи ВМТ. При этих условиях диссоциация хотя и имеет место после прохождения пика давления, но к моменту «закалки» наработанное количество NO остается на очень высоком уровне.

Дифференциальные составляющие интегральной характеристики процесса образования NO_x приведены на рис. 4.

Выходным параметром моделирования является абсолютная масса NO, выраженная в мг, и наработанная за рабочий цикл в каждой локальной зоне, а общая наработанная в объеме цилиндра масса (24 мг/цикл) суммируется по зонам (рис. 4, *а*). Локальная объемная концентрация NO, выраженная в ppm, находится как частное

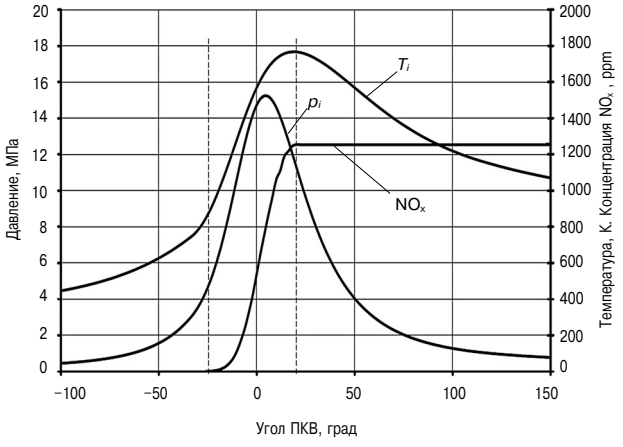
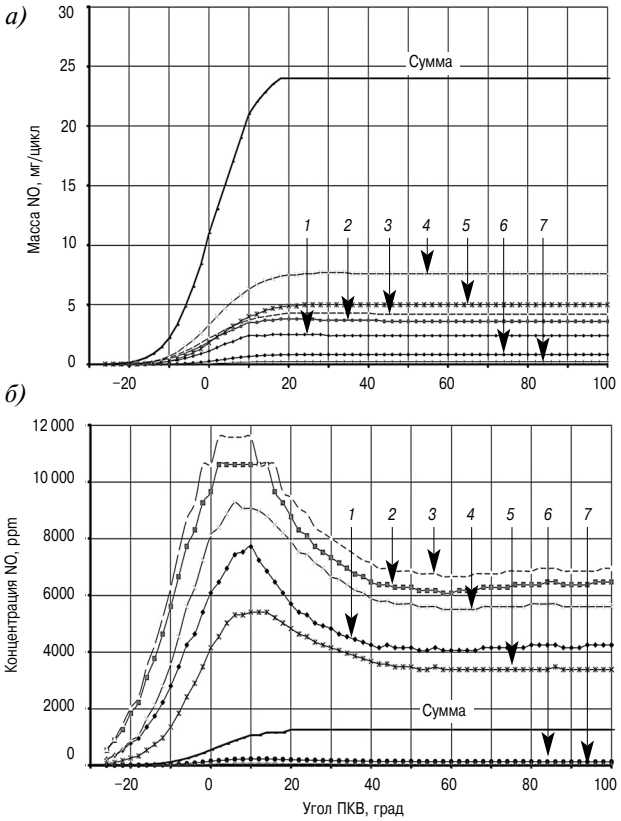


Рис. 3. Процесс образования NO_x в цилиндре серийного дизеля ЧН21/21 (p_{me} =14,8 бар; n = 1500 об/мин)



№ зоны	1	2	3	4	5	6	7
Объем, V_i/V	0,040	0,055	0,075	0,120	0,175	0,235	0,305
α	0,85	1,00	1,15	1,30	1,45	2,00	3,00

Рис. 4. Образование NO в локальных зонах камеры сгорания серийного дизеля ЧН 21/21 (p_{me} =14,8 бар; n = 1500 об/мин)

от деления наработанной массы на соответствующий объем локальной зоны (рис. 4, *б*).

Анализ результатов моделирования с использованием абсолютных величин (наработанных масс NO) позволяет избавиться от некоторых заблуждений, согласно которым для радикального снижения выбросов NO_x достаточно ликвидировать (размыть) за счет турбулизации заряда только локальные высокотемпературные зоны горения с коэффициентом избытка воздуха α, близким к стехиометрическому (в нашем случае это зоны с 1 по 3). Действительно, в этих зонах, занимающих объем примерно 16,5 %, наблюдается наиболее высокая локальная температура, достигающая 2450–2600 K, и создается объемная концентрация NO, многократно превышающая среднюю по цилиндру (1265 ppm). Однако масса NO, наработанная суммарно в этих трех зонах, составляет 10,5 мг, в то время как в зонах 4 и 5, с более низкой температурой, но имеющих почти вдвое больший объем, нарабатывается 12,5 мг NO, т. е. более половины от общей массы. Анализ условий горения показывает, что наибольший массовый выход NO наблюдается именно в зонах с локальным коэффициентом из-

бытка воздуха α в диапазоне от 1,15 до 1,45, объем которых превышает половину объема камеры сгорания. Если для снижения локальных высокотемпературных зон горения попытаться использовать вращение заряда в камере сгорания, то за счет снижения объема локальных зон стехиометрического состава прежде всего увеличивается объем локальных зон с наибольшим выходом NO, в результате чего суммарный выход NO только увеличивается, что неоднократно подтверждалось на практике.

Для оценки адекватности разработанной модели исследуемому объекту, на рис. 5 представлена экспериментальная номинальная нагрузочная характеристика дизеля ЧН21/21 в сравнении с результатами математического моделирования. На основных нагрузочных режимах максимальная относительная погрешность совпадения результатов моделирования выхода NO_x с экспериментальными данными не превышает ±6 %, что достаточно точно соответствует реальному объекту, учитывая что относительная погрешность измерения выбросов NO_x современными автоматическими газоанализаторами составляет ±5 %.

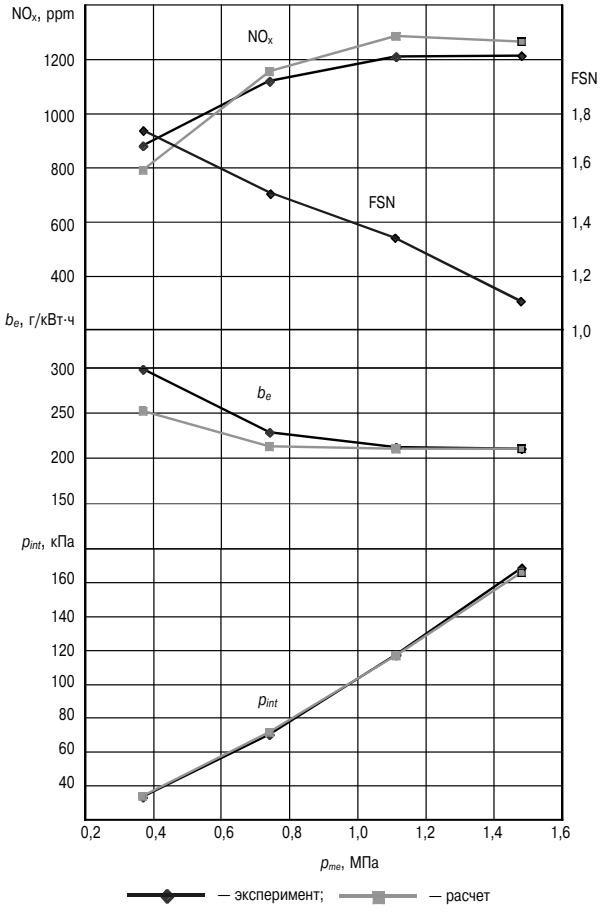


Рис. 5. Нагрузочная характеристика серийного дизеля ЧН21/21

Некоторое расхождение в значениях удельного эффективного расхода топлива на режиме с нагрузкой 25 % от номинальной (p_{me} = 0,37 МПа) объясняется тем, что моделирование параметров рабочего процесса осуществляется исходя из предположения объемного смесеобразования, в то время как при снижении нагрузки в реальном объекте присутствует объемно-пленочного смесеобразование, что подтверждается ростом дымности отработавших газов при снижении нагрузки до максимального значения FSN = 1,75. Все остальные параметры моделирования имеют достаточно высокую степень сходимости с данными эксперимента.

5. Основные направления и ожидаемый результат модернизации

Для нормализации показателей выбросов дизелей семейства ЧН21/21 с достижением уровня IMO-Tier 2 (т. е. снижение не менее чем на 40%), требуется существенное изменение регулировок, рабочих параметров и компонентов, влияющих на образование и выход NO_x. При этом воздействие на кинетику образования NO должно быть направлено на снижение общего температурного уровня рабочего процесса и температурного градиента в камере сгорания за счет целенаправленного воздействия топлива на процесс горения в следующих основных направлениях:

- сокращение продолжительности подачи топлива и улучшение качества его распыливания за счет повышения давления впрыска до значения не менее 1200 бар при смещении начала подачи ближе к ВМТ не менее чем на 10 градусов;
- повышение качества распыливания топлива за счет уменьшения диаметра, но при сохранении калибра и суммарной эффективной площади сечения сопловых отверстий распылителя;
- снижение степени сжатия до 13 (в том числе за счет изменения формы камеры сгорания) при одновременном повышении давления наддува и КПД турбокомпрессора до 62−65 %;
- повышение охлаждения воздушного заряда за счет расширения при впуске и наполнении цилиндра при более высоком наддуве и с более поздним закрытием впускных клапанов.

Необходимый объем модернизации в вышеперечисленных направлениях был определен на основании предварительно выполненных промежуточных расчетов, результаты которых позволили выявить критичные компоненты, требующие коренной модернизации или замены на более эффективные.

Топливный насос высокого давления (ТНВД) блочного типа требуемой производительности с давлением впрыска не менее 1200 бар подобрать достаточно сложно даже в номенклатуре изделий зарубежного производства. Поэтому его целесо-

образно заменить на индивидуальные ТНВД, что более соответствует традициям проектирования судовых и промышленных дизелей. Выбор форсунок и распылителей на расчетное давление с числом сопловых отверстий не менее 10 и ∅ 0,32–0,34 мм достаточно широко представлен в номенклатуре продукции фирм «Bosch» или «L'orange». Снижение степени сжатия на первом этапе может быть выполнено без изменения конфигурации камеры сгорания, хотя ее периферийная зона представляется излишне глубокой. В случае невозможности повышения КПД серийного базового турбокомпрессора как минимум до 62 % его также целесообразно заменить на более эффективный агрегат зарубежного производства.

Реализация планируемых конструктивных изменений для нормализации показателей выбросов NO_x, как было показано выше, может быть выполнена за счет замены комплектующих элементов при минимальных изменениях, вносимых в базовую конструкцию двигателя ЧН21/21. В процессе первоначальной модернизации топливной системы предпочтение, на наш взгляд, может быть отдано использованию механических систем топливоподачи с учетом возможной области специального применения двигателей семейства ЧН 21/21, допускающей воздействие мощного электромагнитного импульса.

Заключительный этап моделирования параметров рабочего процесса и кинетики образования NO_x в камере сгорания модернизированного дизеля предусматривает получение расчетных нагрузочных характеристик с учетом внесенных конструктивных изменений и новых регулировок (табл. 2)

Расчетная индикаторная диаграмма и суммарный расчетный выход NO_x на режиме максимальной длительной мощности модернизированного дизеля ЧН21/21 при значениях рабочих параметров, полученных в результате моделирования и сведенных в табл. 2, приведен на рис. 6.

Результаты моделирования демонстрируют кардинальное количественное изменение параметров рабочего процесса и кинетики образования NO_x в дизеле после его модернизации. Параметры рабочего процесса были выбраны таким образом, чтобы максимальное давление в цилиндре p_z осталось на прежнем уровне (153 бар). Более поздний интенсивный впрыск топлива обеспечивает снижение максимальной температуры цикла T_z с 1790 до 1455 К и смещает процесс активного окисления азота за ВМТ. При этом высокотемпературная стадия процесса сгорания топлива, при которой сохраняется подвижность реакции образования NO, заканчивается к 30 град

Таблица 2

Расчетные показатели модернизированного дизеля ЧН21/21

Наименование параметра, размерность	Значение
Наибольшая цилиндровая мощность, кВт	134,5
Среднее эффективное давление, бар	14,82
Геометрическая степень сжатия	13,0
Максимальное давление в цилиндре, бар	155
Давление наддува (избыточное), кПа	235
Температура наддувочного воздуха за охладителем, °С	65
КПД турбокомпрессора, %	62,5
Коэффициент избытка воздуха	2,36
Геометрический угол опережения подачи топлива, град ПКВ до ВМТ	23^{+1}
Давление подъема иглы форсунки (максимальное давление впрыска топлива) бар	280 (1200)
Количество и диаметр сопловых отверстий распылителя, мм	10 отв. ∅ 0,35
Максимальная среднемассовая (локальная) температура рабочего тела в камере сгорания, К	1455 (2320)
Номинальный удельный эффективный (средневзвешенный по испытательному циклу Е2) расход топлива, г/кВт·ч	208 (211,6)
Номинальный удельный (средневзвешенный по испытательному циклу Е2) выброс NO_x, г/кВт·ч	6,86 (7,34)

ПКВ за ВМТ, т. е. после прохождения пиков давления и температуры. Наработанное количество NO снижается с 24 до 15 мг/цикл, а объемная среднемассовая концентрация NO_x не превышает 600 ppm.

Рабочие параметры расчетной нагрузочной характеристики модернизированного дизеля ЧН21/21 приведены на рис. 7, который убедительно демонстрирует реальность достижения поставленной цели аналитического исследования — соответствие двигателя значению нормы выбросов NO_x IMO-Tier 2.

Удельный средневзвешенный выброс NO_x по испытательному циклу Е2 (цикл испытаний главных судовых двигателей) составляет 7,34 г/кВт·ч при значении нормы IMO-Tier 2, равной 8,18 г/кВт·ч. Показано, что нормализация показателей выбросов NO_x может быть выполнена без потери топливной экономичности, которая в результате модернизации имеет тенденцию к улучшению в сравнении с экономичностью серийного двигателя. Расчеты показывают, что при достигнутом уровне рабочих параметров норма выбросов NO_x не будет превышена также при испытаниях двигателя по циклу D2, применяемому в испытательной процедуре для промышленных и судовых дизель-генераторов.

Безусловно, при проведении реальной модернизации, экспериментально полученные значения рабочих параметров могут не в полной мере соответствовать их расчетным значениям, полученным средствами математического моде-

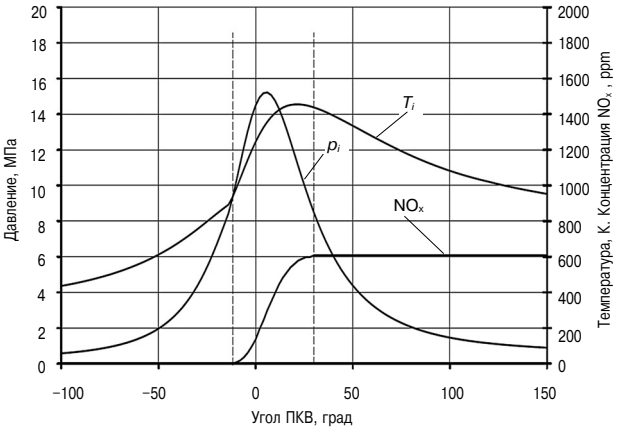


Рис. 6. Процесс образования NO_x в цилиндре модернизированного дизеля ЧН21/21 (p_{me} =14,8 бар; n = 1500 об/мин)

лирования. В конечном итоге целью аналитического исследования является выбор направления и расчетная оценка потенциала модернизации уже созданной и надежно работающей конструкции. При этом необходимо принимать во внимание, что для дальнейшего снижения выбросов NO_x имеются и другие пока не задействованные резервы, такие как повышение глубины охлаждения наддувочного воздуха, изменение фаз газораспределения, оптимизация формы камеры сгорания и в конечном итоге применение электронно-управляемой системы common rail с опцией многофазного впрыска топлива.

6. Заключение

Методами численного моделирования параметров рабочего процесса и кинетики образования NO_x выполнен анализ потенциала модернизации дизеля ЧН21/21 многоцелевого назначения по снижению выбросов NO_x до уровня, соответствующего действующим зарубежным стандартам, в том числе IMO-Tier 2.

Показана принципиальная возможность нормализации показателей вредных выбросов двигателей семейства ЧН21/21 при максимально возможном сохранении конструкции силовых элементов кривошипно-шатунного механизма, деталей камеры сгорания, а также рабочих параметров, определяющих топливную экономичность и ресурсные показатели.

Требуемый объем модернизации двигателя предусматривает необходимость замены топливной аппаратуры, включая ТНВД, форсунки и распылители, модернизацию или замену турбокомпрессора на более эффективный, изменение регулировок, влияющих на образование и выход NO_x.

Показано, что нормализация показателей выбросов NO_x может быть выполнена без потери топливной экономичности, которая в результате модернизации имеет тенденцию к улучшению,

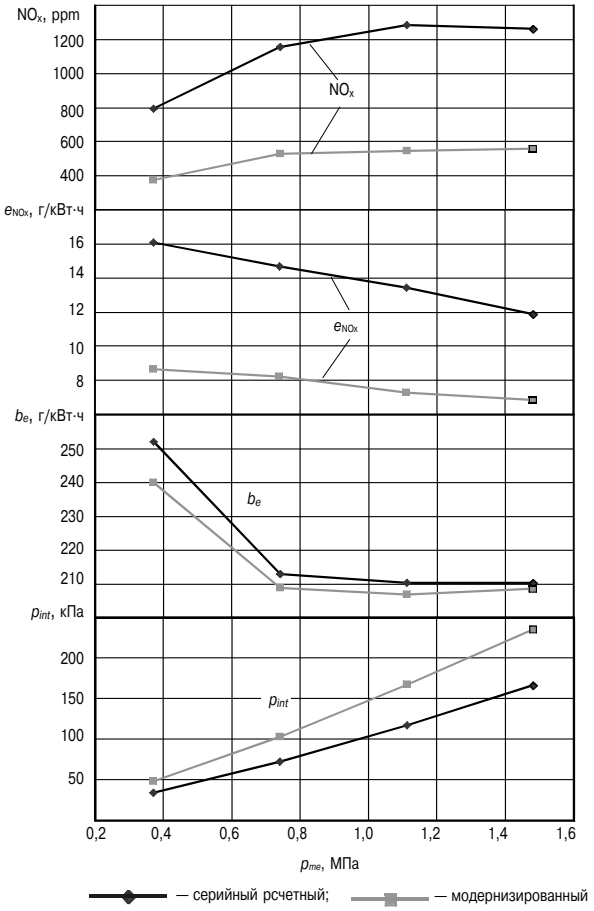


Рис. 7. Расчетные нагрузочные характеристики серийного и модернизированного дизеля ЧН21/21

в сравнении с экономичностью серийного двигателя. При этом удельный средневзвешенный выброс NO_x по испытательному циклу Е2 снижается с 13,26 до 7,34 г/кВт·ч при значении нормы IMO-Tier 2, равной 8,18 г/кВт·ч.

С учетом значительных пробелов в типаже судовых высокооборотных двигателей отечественной конструкции и постройки, конкурентоспособность модернизированных двигателей семейства ЧН21/21 может быть значительно повышена как на внутреннем, так и на зарубежных рынках, а область их применения расширена за счет возможности установки на судах коммерческого морского и рыбопромыслового флота.

Литература

1. *Новиков Л.А.* Показатели вредных выбросов как средство конкурентной борьбы за рынок судовых и промышленных дизелей // Двигателестроение. — 2010. — № 3 (241). — С. 18–21.

2. *Новиков Л.А.* Экономические проблемы создания малотоксичных транспортных двигателей // Жизнь и безопасность. — 2000. — № 3–4. — С. 155–177.

3. *Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А.* Окисление азота при горении. — М. : Изд. АН СССР, 1947. — 147 с.

УДК 621.56/59

ПРОИЗВОДСТВО МОТОРНЫХ ТОПЛИВ ИЗ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ НА АВТОНОМНОЙ МОДУЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

А.Н. Лазарев, к.т.н., В.Н. Косенков, к.т.н., В.А. Путятинский, д.т.н., проф.
Военный инженерно-технический институт

Рассмотрены технические и технологические вопросы создания автономной модульной установки по производству моторного топлива из природного газа, отбираемого из магистрального газопровода. В установке используется современная технология сжижения газа в вихревых аппаратах, работающих на принципе редуцирования высокого давления газа в магистральном газопроводе, до давления в товарных криогенных емкостях.

Магистральные газопроводы, например газопровод Средняя Азия–Центр (САЦ) и другие проходят по значительной территории России, а потому перекачиваемый по ним природный газ может использоваться как альтернативный источник моторного топлива наравне с традиционными видами — бензином и дизельным топливом, являющимися продуктами переработки нефти [1, 2].

Существующие магистральные газопроводы позволяют осуществить доставку исходного сырья и его переработку практически в любой регион. При этом имеется возможность применения современных методов сжижения природного газа в вихревых аппаратах, работающих за счет использования давления в магистральном газопроводе.

Как известно [1], ведущие страны США и Европы вкладывают громадные средства в научные исследования и опытно-конструкторские работы, направленные на разработку промышленной технологии сжижения газов с последующим их использованием в качестве моторных топлив. Особую актуальность приобретает вопрос производства сжиженных природных газов (СПГ) на мини-заводах, технологически совмещенных с пунктами заправки автомобильного и других видов транспорта. В настоящее время за рубежом введено в эксплуатацию около 1000 установок по производству и хранению СПГ производительностью от 3 до 40 т/ч.

Сжиженный природный газ обладает рядом преимуществ по сравнению с бензиновым и дизельным топливом. Например, октановое число СПГ составляет величину 104–110 в зависимости от содержания в нем низкомолекулярных углеводородов (метана, пропана и бутана), в то время как у бензинов октановое число не превышает 80–98. Это обусловлено тем, что основным способом производства высокооктановых бензинов является процесс каталитического риформинга прямогонных бензиновых фракций 30–180 — 180 °С. Существующие типовые установки не позволяют получать риформат (высокооктановый компонент бензина) с октановым числом свыше 95 (по исследовательскому методу — ИОЧ). Переход на выпуск высокооктановых бензинов АИ-95 и АИ-98 для многих нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) является трудноразрешимой задачей, поскольку требует больших материальных затрат.

Другим преимуществом газового моторного топлива является их бо́льшая экологическая безопасность, поскольку содержание вредных примесей (азота, сернистых соединений, углекислоты и др.) в несколько раз ниже или полностью отсутствуют. Примеси в бензине образуются при высокотемпературных процессах (каталитического риформинга, крекинга, изомеризации и других), входящих в производственный процесс получения данного вида топлив. Имеются и другие преимущества газового моторного топлива, например, повышенная теплота сгорания, более низкий уровень токсичности отработавших газов.

Для подтверждения возможности практического применения СПГ в НАМИ были проведены испытания 50 автомобилей с использованием в качестве моторного топлива жидкой метановой фракции. Испытания показали перспективность этого направления. Наиболее важной проблемой является совершенствование параметров системы хранения сжиженного газа на автомобиле. Поэтому была использована партия автомобилей с криогенной системой хранения жидкого метана при температуре −162 °С емкостью $V = 180$ л, изготовленной из специального материала с изоляцией.

Опытная эксплуатация показала практическую возможность широкого внедрения данной системы хранения криогенного топлива при определенной доработке.

Приведенные преимущества использования сжиженных газов в качестве моторных топлив по сравнению с существующим производством традиционных видов топлив — бензина и дизельного топлива, доказывает целесообразность его использования в качестве сжиженного моторного топлива.

Для производства СПГ был разработан проект модульной установки, основанной на новом принципе действия. В ней используется современная технология сжижения природного газа с использованием вихревых аппаратов типа «вихревая труба» [3, 4], работающих на принципе редуцирования высокого давления газа в магистральном газопроводе, до давления в криогенных емкостях с готовым продуктом — сжиженным газом, отгружаемым потребителю.

Основной процесс сжижения происходит в вихревом газоохладителе — «вихревой трубе» в результате сложных газодинамических и энергетических процессов, известных как эффект Ранка–Хильша [3, 4]. В данном случае для осуществления процесса сжижения природного газа, проходящего по магистральному газопроводу, приняты значения давления $p_г$ в диапазоне от 30 до 70 ат, а в криогенных продуктовых емкостях сжиженного газа $p_г$ = 3–6 ат.

Для решения поставленной задачи была выбрана автономная модульная установка блочного типа, которая может стать типовым решением с определенной единичной мощностью производства газового моторного топлива, а следовательно может быть получена любая заданная мощность путем параллельного набора указанных блоков

Выбор производительности установки зависит от источника газа — магистрального газопровода, состава газа, его параметров (p, T).

Создаваемая установка предусматривает не только получение сжиженного газа, используемого в качестве моторного автомобильного топлива, но и возможность его хранения и заправки автомобилей. Хотя это должно быть организовано на специализированной площадке — автоматизированной газонаполнительной станции (АГНК).

Исходные данные по газу и параметры на входе в установку

Выбор единичной производительности установки по сжижению природного газа определен исходя из пропускной способности одного вихревого газоохладителя, которое составляет 10 000 м^3/ч (0,08 млрд м^3/год). Данные по расходу газа здесь и далее будут указаны при давлении p = 0,1 МПа (абсолютное) и температуре 273 К.

Расчеты выполнены для усредненного состава газа (табл. 1) товарного газоперерабатывающего завода (ГПЗ).

Таблица 1

Усредненный состав исходного газа

Компонент	Формула	Содержание, %об.
Азот	N_2	0,81
Метан	CH_4	95,55
Этан	C_2H_6	2,68
Пропан	C_3H_8	0,6
Бутан	C_4H_{10}	0,2
Пентан	C_5H_{12}	0,16

Содержание влаги соответствует точке росы 268 К. Температура газа на входе в установку 303 К. Давление природного газа, возвращаемого потребителю (в дальнейшем называемого метановой фракцией), принято p = 0,6 МПа (абсолютное).

Выбор расчетных данных по давлению исходного природного газа на входе в установку и выхода с нее обусловлен технологией сжижения газа в вихревом газоохладителе. Расчеты выполнены для значения p = 5,0 МПа (среднее) и p = = 3,0 МПа (минимальное) — не ниже.

Состав перерабатываемого газа должен соответствовать кондиционному газу, транспортируемому по магистральным газопроводам, включая содержание вредных примесей и влаги. Колебания состава природного газа по углеводородам не регламентируется. Установки могут применяться для переработки газа любого месторождения, однако от состава газа зависит производительность по сжиженному газу и октановое число полученного топлива.

Основные технические решения

Низкотемпературная переработка газа требует более глубокой его осушки, чем допускается при транспортировке по магистральным газопроводам [5]. Поступающий на установку газ осушается до точки росы по влаге 203 К адсорбционным методом на синтетических цеолитах NaA. Низкое влагосодержание исходного газа позволяет применить для осушки два адсорбера (один адсорбер в работе, второй — на регенерации). Регенерация сорбента ведется частью обратного потока природного газа, расход которого определяется из условия сохранения допустимой точки росы по влаге для газа, направляемого в газопровод.

Процесс сжижения части природного газа основан на эффекте Ранка–Хильша [4, 6], получаемом при наличии перепада давления охлажденного исходного газа в вихревом газоохладителе. Теплообменник природного газа вертикальный, витой. Охлаждение прямого потока (трубное пространство аппарата) осуществляется за счет рекуперации холода обратного газового потока (межтрубное пространство). Образовавшаяся в

охладителе жидкость отделяется в сепараторе и выводится из установки в криогенные резервуары.

Потребность в криогенных резервуарах зависит от производительности установки и заданного времени хранения. Количество емкостей может быть рассчитано из следующего условия: опорожнение резервуара ведется в баки автомобилей объемом 180 л. Время переключения от одной машины к следующей принято 15 мин. Таким образом, из одного резервуара обеспечивается заполнение баков 300 автомобилей в течение трех суток. Дополнительно предусмотрены резервуары для сбора и хранения продукта в течение одних суток.

Описание технологической схемы (рис. 1)

Природный газ поступает по магистральному газопроводу на газораспределительную станцию по давлением p = 3 МПа. Сначала газ подается в блок осушки, где проходит через адсорбер А1 или А2 (один адсорбер в работе, второй — на регенерации) и фильтр Ф для очистки от сорбентной пыли, а затем направляется в низкотемпературный блок. Проходя по трубному пространству теплообменника Т (находится в нижней части емкости Е), природный газ охлаждается до температуры 200−210 К и поступает в вихревой газоохладитель ВГО с вихревой трубой, в которой в результате энергоразделения образуются горячий и холодный потоки.

Выходящий из охладителя холодный поток сжиженного газа под давлением p = 0,7 МПа собирается в низкотемпературной емкости Е, откуда жидкость через клапан КРУ, регулирующий уровень жидкости в сепараторе, направляется в криогенные резервуары Р1 и Р2, а газовая фаза — метановая фракция посредством клапана КРД, поддерживающего заданное давление после охладителя, поступает на рекуперацию холода в межтрубное пространство теплообменника, сюда же поступают образующиеся в криогенном резервуаре пары, а затем выводится в качестве товарного газообразного продукта.

Часть газа, отбираемая из теплообменника, периодически используется для регенерации адсорбера, для чего газ нагревается в электронагревателе (ЭН) до температуры 600 К, поступает в регенерируемый адсорбер, затем охлаждается в воздушном холодильнике ВХ и после отделения образовавшегося водяного конденсата в сепараторе объединяются (за клапаном КРР) с основным потоком газа низкого давления и выводится в качестве газового продукта (метановой фракции). Конденсат из сепаратора С периодически сливается в канализацию.

В табл. 2 приведен материальный баланс разделения природного газа при рабочем давлении исходного газа p = 3 МПа (минимальное), а в табл. 3 при давлении p = 5 МПа (среднее). В табл. 4 приведены основные энергозатраты в установке сжижения природного газа.

Конструктивные особенности аппаратов

Конструкция теплообменной и емкостной аппаратуры — традиционная для отечественных установок низкотемпературной переработки газа.

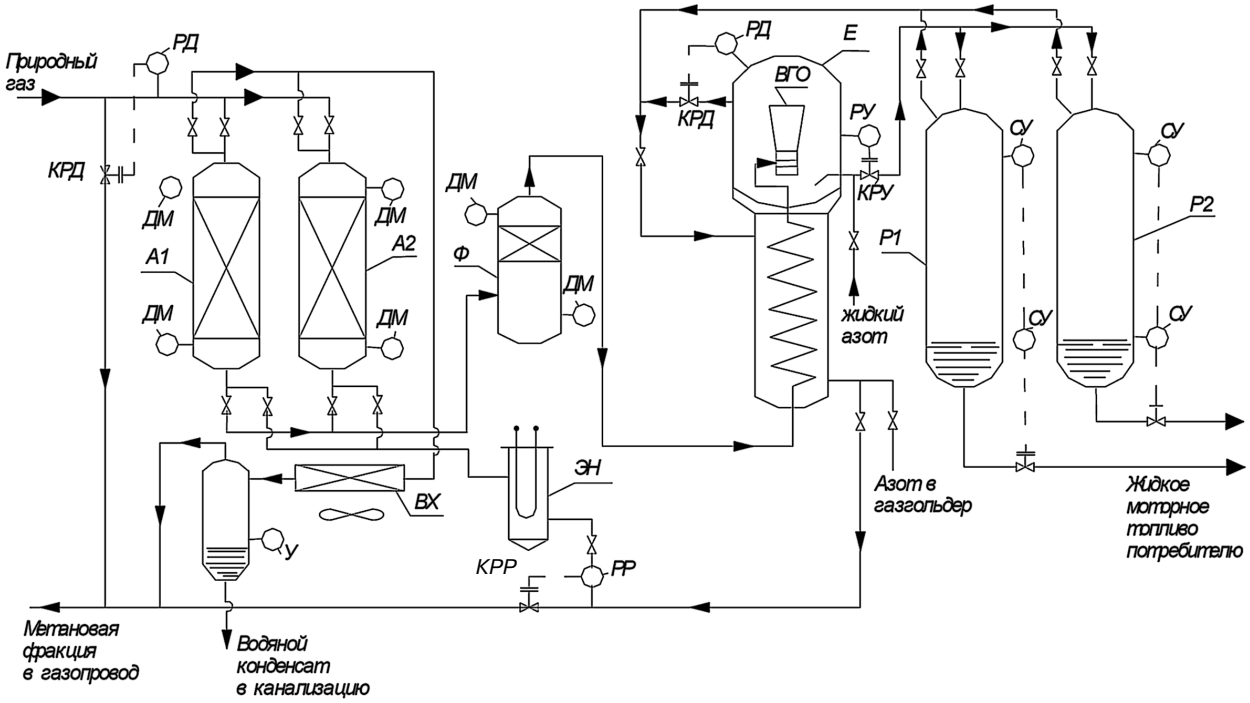


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема установки (с вихревым газоохладителем) для получения моторного топлива

Таблица 2

Материальный баланс разделения природного газа при давлении исходного газа 3 МПа

Компонент	Поступает	Продукты разделения	
	Природный газ	Метановая фракция	Жидкое автомобильное топливо
	Объемная доля		
N_2	0,0081	0,0085	0,0003
CH_4	0,9555	0,9816	0,4436
C_2H_6	0,0268	0,0098	0,3611
C_3H_8	0,006	0,0001	0,1208
C_4H_{10}	0,002	—	0,0412
C_5H_{12}	0,0016	—	0,033
	1,0000	1,0000	1,0000
T, K	303	293	155
p,МПа	3,0	0,6	0,6
$\rho_{раб}$, кг/м^3	22	4,7	546
$V_{усл}$, моль/ч	100	95,16	4,84
*) V_0, м^3	10 000	9516	484
G, кг/ч	7527	6920	607

*) Данные при $T = 0$ °С; $p = 0,1$ МПа.

Таблица 3

Материальный баланс разделения природного газа при давлении исходного газа 5 МПа

Компонент	Поступает	Продукты разделения	
	Природный газ	Метановая фракция	Жидкое автомобильное топливо
	Объемная доля		
N_2	0,0081	0,0088	0,0004
CH_4	0,9555	0,9863	0,6383
C_2H_6	0,0268	0,0048	0,2534
C_3H_8	0,006	0,0001	0,0672
C_4H_{10}	0,002	—	0,0226
C_5H_{12}	0,0016	—	0,0181
	1,0000	1,0000	1,0000
T, K	303	293	149
p,МПа	5,0	0,6	0,6
$\rho_{раб}$, кг/м^3	36,9	4,65	498
$V_{усл}$, моль/ч	100	91,15	8,85
*) V_0, м^3	10 000	9115	885
G, кг/ч	7527	6601	926

Основной теплообменник природного газа — вертикальный, витой с жестким сердечником. Если возможно, по технологическому процессу теплообменник агрегатирован с криостатом и встроенным в него вихревым газоохладителем, что сокращает металлоемкость конструкции и снижает потери холода.

Адсорберы представляют собой вертикальные цилиндрические аппараты на юбочных опорах. Сорбент (цеолит NaA) насыпается на опорную решетку, покрытую металлической сеткой.

Таблица 4

Основные энергозатраты в установке сжижения природного газа

Статьи расхода	
Электроэнергия на разогрев газа регенерации, кВт·ч/год	50 000
Установленная мощность нагревателя, кВт	50
Электроэнергия на привод вентиляторов воздушных холодильников кВт·ч/год	3000
Установленная мощность вентиляторов, кВт	3,0
Всего расход электроэнергии, кВт·ч/год	53 000

Примечание: расчеты в табл. 4 выполнены для среднего давления $p = 5,0$ МПа.

Фильтр для очистки газа от сорбентной пыли — вертикальный цилиндрический сосуд, фильтровальные элементы в котором расположены по концентрическим окружностям с целью повышения компактности и уменьшения габаритов аппарата.

Электронагреватель — цилиндрический сосуд со встроенными U-образными ТЭНами.

Воздушный холодильник — серийно выпускаемый аппарат воздушного охлаждения с оребренными трубами, оснащенный вентилятором.

В качестве емкостей хранения сжиженного продукта приняты вертикальные криогенные резервуары РЦВ-63 /0,8-1 НПО «Криогенмаш» для жидкого азота, аргона, водорода и кислорода. Резервуары представляют собой двустенные аппараты «сосуд в сосуде», в которых межстенное пространство вакуумировано.

Компановка оборудования и обеспечение пожаровзрывобезопасности

Оборудование установки расположено на открытом воздухе.

Аппараты блока подготовки газа — отдельно стоящие, с индивидуальной изоляцией (адсорберы, электронагреватели). Низкотемпературный блок — в кожухе с засыпной изоляцией.

Ориентировочные размеры площадки под установку сжижения 4×8 м. Площадка под криогенные резервуары зависит от расчетного количества резервуаров из расчета 11×7 м на один модуль.

Здание операторской 6×12 м. Расстояние от операторской до установки 25 м, от установки до системы хранения сжиженного продукта — 40 м. Управление производством централизовано и автоматизировано.

Целесообразно модульную установку оснастить блоком разделения воздуха, откуда можно получать сухой воздух для КИПиА и сухой продувочный азот для технических целей. Это позволит ускорить вывод установки на рабочий режим, применив для первичного захолаживания получаемый в блоке жидкий азот. В качестве блока разделения воздуха может быть выбрана установка малой

производительности АК-0,135 с установленной мощностью нагревателя 50 кВт. Общий расход электроэнергии составит 53 000 кВт·ч/год (из расчета времени работы блока разделения воздуха 10 сут/год).

Пожаровзрывобезопасность установки обеспечивается как активными, так и пассивными средствами защиты:

➢ производственное оборудование расположено вне здания;

➢ аппараты в процессе изготовления подвергаются проверкам;

➢ все системы, работающие под давлением, снабжены предохранительными клапанами;

➢ электрооборудование должно соответствовать требованиям взрывобезопасности;

➢ вся металлическая аппаратура и трубопроводы подлежат заземлению;

➢ в случае возникновения пожара должна быть предусмотрена централизованная система пожаротушения с применением углекислоты, воды.

Альтернативным вариантом установки по сжижению природного газа для получения моторного топлива из сжатого природного газа может являться автоматическая газонаполнительная компрессорная станция (АГНКС), на которой для сжатия природного газа до давления 20 МПа используется компрессор 4ГМ2,5-1,2/10-250. Производительность компрессора сопоставима с рассматриваемой установкой.

Подготовка газа к сжижению и компремированию аналогична. Установленная мощность на АГНКС — 185 кВт, а в установке сжижения газа с вихревым охладителем — 123 кВт, расход электроэнергии соответственно 1 077 000 кВт и 70 000 кВт.

Сопоставление данных АГНКС и установки с вихревым охладителем выполнено по расходу электроэнергии, энергозатратам, эксплуатационным расходам и капитальным затратам.

Выводы

➢ Приведенные затраты в установке получения моторного топлива с использованием вихревого газоохладителя в 1,4 раза меньше, чем на газонаполнительной станции (АГНКС). Экономия достигается за счет исключения затрат на компримирование газа.

➢ Установка проста в эксплуатации в связи с отсутствием движущихся частей в механизмах.

➢ Коэффициент сжижения газа и состав моторного топлива зависят от величины давления и состава исходного газа. При давлении обратного потока 0,6 МПа коэффициент сжижения газа составит порядка 4,8–8,8 %.

Вихревые газоохладители, подлежат новой разработке.

➢ Октановое число получаемого моторного топлива — не ниже 105.

➢ Производительность установки 0,08 млрд м^3/год наиболее целесообразна, так как при дальнейшем увеличении производительности возрастают капитальные затраты и производственные площади для системы хранения криогенных продуктов, определяющих общие капитальные затраты.

➢ В целях повышения безопасности эксплуатации установки и ускорения вывода ее на рабочий режим рекомендуется оснастить ее блоком разделения воздуха.

Литература

1. *Кириллов Н.Г., Лазарев А.Н.* Мировой опыт производства и использования сжиженного природного газа как универсального энергоносителя и моторного топлива // Охрана окружающей среды. Атмосфера. — 2011. — № 1. — С. 26–30.

2. *Кириллов Н.Г., Лазарев А.Н.* Патентные исследования в области создания стационарных хранилищ СПГ для транспортных средств в России // Транспорт на альтернативном топливе. — 2011. — № 4 (22). — С. 74–79.

3. *Мещерин В.Н., Журавлев Д.В., Барсук С.Д.* Термодинамический анализ технологий сжижения природного газа // Наука и технология в газовой промышленности. — 2008. — № 1. — С. 90–100.

4. *Косенков В.Н.* Вихревая труба и ее применение в технике разделения газовых смесей. Обзорная информация, сер. ХМ-1. — М. : ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1983.

5. *Горбачев С.П., Логинов А.А.* Особенности производства СПГ на газораспределительных станциях при переменном давлении в магистральном газопроводе // Технические газы. — 2008. — № 2. — С. 31–34.

6. *Столыпин В.И., Молчанов С.А., Сотников О.Б.* Возможности расширения производства жидких и сжатых газов с использованием остаточного низконапорного давления газа // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. — 2007. — № 12. — С. 79–84.

УДК 55.42.31; 55.03.33

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КЛАССА ВЯЗКОСТИ МОТОРНОГО МАСЛА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ПОДШИПНИКАХ СКОЛЬЖЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В.С. Мурзин, директор, главный конструктор
ООО ГСКБ «Трансдизель»
Е.А. Задорожная, к.т.н., доц.; И.Г. Леванов, асс.; Д.Ю. Иванов, к.т.н., доц.
Южно-Уральский государственный университет

Рассмотрена методика расчета триботехнических потерь в тяжелонагруженных подшипниках скольжения, которые работают на современных моторных маслах, обладающих неньютоновскими свойствами. Представлена реологическая модель вязкости масла, отражающая зависимость вязкости от температуры, давления в тонком смазочном слое, скоростей сдвига и релаксации. Коэффициенты реологической модели получены из эксперимента. Выполнен расчет гидромеханических характеристик подшипников коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания.

Современные смазочные жидкости, используемые в тяжелонагруженных узлах трения, загущены различными присадками, что ведет к значительному изменению условий работы подшипников скольжения. В некоторых случаях это приводит к значительному уменьшению толщины смазочной пленки до уровня микрочастиц, находящихся в смазке, или до величины микронеровностей на поверхностях трения. С другой стороны, наличие присадок может способствовать увеличению толщины смазочного слоя и одновременно ведет к повышению затрат мощности на трение в подшипниковом узле. В частности, большое влияние на свойства смазочного материала, в первую очередь на вязкость, оказывают полимерные добавки, твердые частицы порошкообразных присадок или продукты износа, а также микропузырьки, присутствующие в масле. В этом случае масла принято называть неньютоновскими. Поэтому при исследовании работоспособности основных трибосопряжений необходимо учитывать изменение реологических свойств смазочных жидкостей и их влияние на гидромеханические характеристики (ГМХ) сложнонагруженных опор жидкостного трения.

Оценка работоспособности подшипников жидкостного трения осуществляется с использованием гидродинамической теории смазки, в основных уравнениях которой вязкость является ключевым параметром, отражающим свойства смазочной жидкости. Поэтому разработка и совершенствование реологических моделей является принципиально важной задачей. Кроме того, многообразие современных моторных масел и их свойств не позволяет однозначно определить подходящий класс вязкости масла для применения в той или иной конструкции трибосопряжения.

В настоящее время многие исследователи в своих работах, посвященных теоретическим основам расчета подшипников скольжения [1–11], стремятся учитывать различные факторы, влияющие на ГМХ подшипников, и разрабатывают при этом большое количество реологических моделей смазочного материала. Однако возможность учета одновременно нескольких факторов вызывает большие затруднения.

Зависимость вязкости смазки от скорости сдвига обычно аппроксимируется степенным законом Оствальда–Вейла [9]; от температуры — трехконстантной формулой Фогеля [10]; от давления — формулой Баруса [11].

Сложность создания комплексной реологической модели смазочного материала заключается в том, что вязкость одновременно зависит от температуры смазки, гидродинамического давления в тонком смазочном слое, скоростей сдвига, резко меняющихся по толщине слоя, релаксации (запаздывание изменений вязкости при быстром нарастании гидродинамических давлений) и др. Поэтому авторы предложили к использованию следующую модель вязкости (рис. 1) [12]:

$$\mu^*(T,p,\dot\gamma)= \begin{cases} \mu_1 \cdot C_1 e^{(C_2/(T_э+C_3))+\beta(T_э)p}, & 1 \le \dot\gamma \le 10^2; \\ (I_2)^{(n(T_э)-1)/2} \cdot C_1 e^{(C_2/(T_э+C_3))+\beta(T_э)p}, & 10^2 \le \dot\gamma \le 10^6; \\ \mu_2 \cdot C_1 e^{(C_2/(T_э+C_3))+\beta(T_э)p}, & \dot\gamma > 10^6, \end{cases} \quad (1)$$

где $\dot\gamma = \sqrt{I_2}$, $I_2 = \left(\frac{\partial V_x}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial y}\right)^2$.

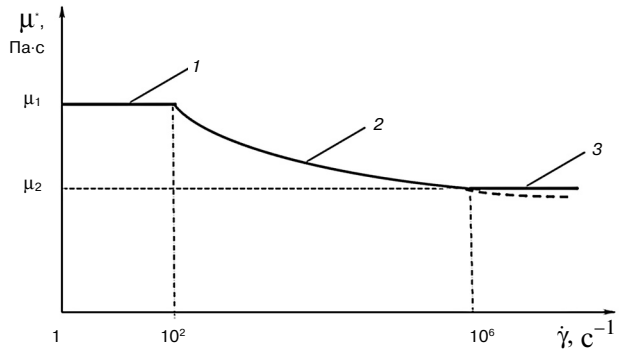


Рис. 1. Комбинированная модель вязкости

На участке *1* в диапазоне скоростей сдвига от 1 до 10^2 $с^{-1}$ масло ведет себя как ньютоновская жидкость с вязкостью μ_1. Для участка *2* в диапазоне скоростей сдвига от 10^2 $с^{-1}$ до 10^6 $с^{-1}$ характерно снижение вязкости по степенному закону. На участке *3* при скорости сдвига больше 10^6 $с^{-1}$ масло ведет себя как ньютоновская жидкость с вязкостью μ_2.

В такой постановке реологическая модель не противоречит представлениям о поведении загущенного моторного масла, не вызывает трудностей при программной реализации.

Постановка задачи расчета динамики и ГМХ тяжелонагруженных подшипников тепловых двигателей, методика и алгоритм расчета представлены в работах авторов [7, 10, 12].

Реологическая модель (1) совместно с уравнениями гидродинамического и теплового расчета [5] реализована в комплексе программ [13], с помощью которого получены представленные ниже результаты.

Таблица 1

Параметры степенного закона

Масло	Параметры	Температура, T °C				
		40	80	100	120	150
Mobil XHP Delvac 10W-40	μ^*, МПа·с	81,84	18,39	11,97	9,07	7,79
	n^{**}	0,977	0,994	0,981	0,964	0,919
Liqui Moly Molygen 5W-50	μ, МПа·с	112,77	23,75	15,24	11,29	8,95
	n	0,969	0,996	0,988	0,968	0,931

* Параметр консистенции (вязкость при низкой скорости сдвига до 10^2 с-1). ** Параметр, характеризующий степень неньютоновского поведения.

Расчеты выполнялись применительно к коренному подшипнику тракторного двигателя 4Т371.03 производства ОАО «ЧТЗ-УРАЛТРАК». У этого подшипника смазка подается через частичную канавку шириной 8 мм, выполненную в верхнем вкладыше (протяженность 160°). Угловая частота вращения коленчатого вала на режиме максимальной мощности принималась равной 209,44 1/с, радиальный зазор 51,5 мкм; температура подачи смазки 90 °С, ширина подшипника 35 мм.

Двигатель 4ЧН13/15 является представителем нового семейства дизелей серии «Т», производство которых в настоящее время организуется на ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК». В качестве смазочного масла для этого двигателя рассматривается возможность применения загущенных масел, в частности, классов 0W-30, 5W-30, 5W-40, 10W-40. В связи с этим представляет практический интерес оценка влияния неньютоновских свойств загущенных масел на гидромеханические ха-

Таблица 2

Результаты расчетов гидромеханических характеристик второго коренного подшипника коленчатого вала двигателя 4ЧН13/15 в обозначениях [12]

Масло	Характеристика						
	inf h_{min}, мкм	sup p_{max}, МПа	N^*, Вт	h^*_{min}, мкм	p^*_{max}, МПа	$Q^*_в$, 10^{-1} л/с	$T_Э$, °С
М8$Г_{2к}$ (SAE 20)	4,563	202,7	697,1	13,73	28,72	0,5414	97,87
Castrol SLX 0W-30	4,764 [1)] 4,115 [2)]	164,9 211,6	718,0 548,4	14,31 12,82	28,13 29,66	0,4940 0,4780	98,88 97,01
GM 5W-30	4,618 [1)] 4,012 [2)]	168,8 213,9	685,5 540,2	13,81 12,47	28,64 30,10	0,5267 0,5131	97,95 96,43
Shell Helix Ultra 5W-40	4,724 [1)] 4,166 [2)]	167,2 210,1	698,9 569,0	13,96 12,76	28,39 29,70	0,5079 0,4974	98,41 96,99
Mobil XHP Delvac 10W-40	4,824 [1)] 4,369 [2)]	165,4 207,0	717,3 614,0	14,22 13,20	28,12 29,15	0,4907 0,4892	98,93 97,67
Shell Rimula R2 15W-40	4,801 [1)] 4,412 [2)]	164,3 205,4	725,4 622,2	14,40 13,41	28,03 28,93	0,4859 0,4791	99,12 97,93
Liqui Moly Molygen 5W-50	5,301 [1)] 4,930 [2)]	190,8 194,4	815,8 717,2	15,13 14,57	27,00 27,57	0,4150 0,4073	102,0 100,8

[1)] Без учета неньютоновских свойств (вязкость-функция температуры и давления). [2)] С учетом неньютоновских свойств (вязкость–функция температуры, давления, скорости сдвига; время релаксации масла $\lambda = 5 \cdot 10^{-4}$ с).

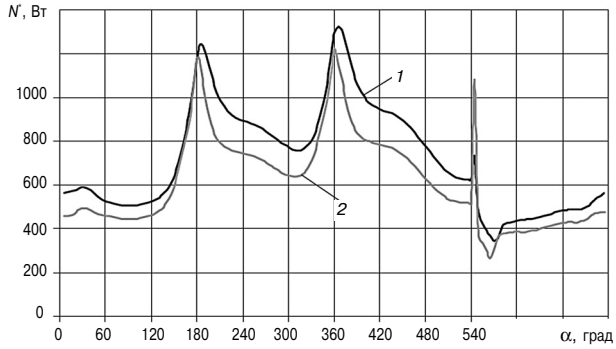


Рис. 2. Зависимости потерь мощности на трение от угла поворота коленчатого вала (масло Mobil XHP Delvac 10W-40)

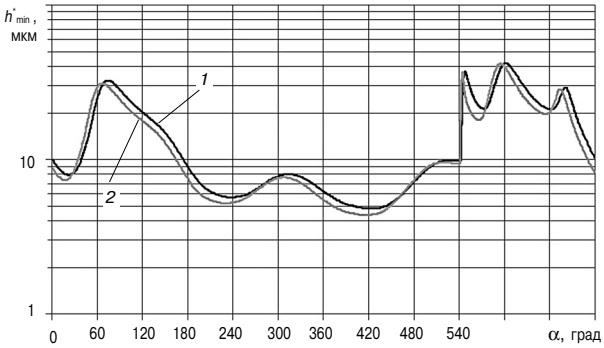


Рис. 3. Зависимость минимальной толщины смазочного слоя от угла поворота коленчатого вала

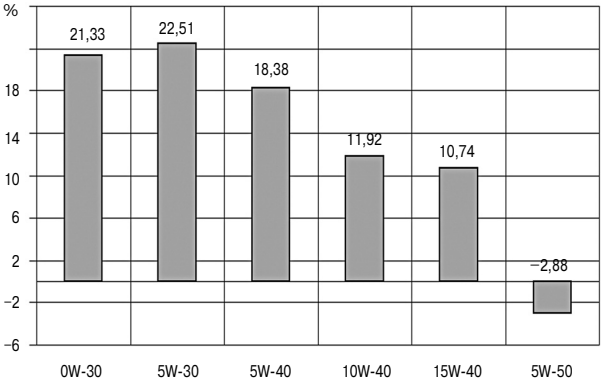


Рис. 4. Снижение потерь мощности на трение во втором коренном подшипнике, работающем на загущенных маслах, относительно потерь, рассчитанных при работе подшипника на масле М8Г$_{2к}$

рактеристики подшипников скольжения коленчатого вала этого двигателя, а также выбор оптимального класса вязкости смазочного масла.

В табл. 1−2 и на рис. 2−4 представлены результаты расчетов указанного подшипника с учетом неньютоновских свойств моторных масел Castrol SLX 0W-30, GM 5+W-30, Shell Helix Ultra 5W-40, Mobil Delvac 10W-40, Shell Rimula R2 15W-40, Liqui Moly 5W-50, а также для масла М8Г2к (SAE 20), являющегося ньютоновской жидкостью. В качестве примера в табл. 1 представлены параметры реологической модели для двух из указанных классов масел, необходимые для расчета.

В ходе выполненных исследований [6] было установлено, что параметр степенного закона, характеризующий степень неньютоновского поведения масел, является функцией температуры.

Определение коэффициентов (параметров) реологических моделей всегда связано с выполнением значительного объема экспериментальных исследований ввиду большого разнообразия современных моторных масел, относящихся к различным классам вязкости.

Результаты расчетных исследований показали, что снижение потерь мощности на трение во втором коренном подшипнике, работающем на загущенных маслах, относительно потерь, рассчитанных при работе подшипника на масле М8Г$_{2к}$, составляет от 10 до 22,5 % (рис. 4).

Полученные результаты позволяют сформулировать рекомендации для выбора класса вязкости моторного масла, обеспечивающего достаточную толщину смазочного слоя при одновременном снижении потерь мощности на трение.

Наиболее предпочтительными с позиции энергосбережения в двигателе 4ЧН13/15 являются масла классов SAE 5W-30, 5W-40, 0W-30, поскольку обеспечивают достаточную минимальную толщину смазочного слоя при наибольшем снижении потерь мощности на трение в коренных подшипниках коленчатого вала.

Применение предложенных моделей и методик расчета на этапе проектирования энергоэффективных тепловых двигателей позволит существенно снизить временные и материальные затраты на их разработку.

В каждом конкретном случае при разработке двигателя требуется индивидуальный подход при выборе смазочного материала, который наряду со снижением трибологических потерь обеспечивает надежную работу подшипников скольжения.

Представленная работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009−2013 годы» и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-08-00424).

Литература

1. *Paranjpe R.S.* Analisis of Non-Newtonian Effects in Dynamically Loaded Finit Journal Bearings Including Mass Conserving Cavitation. ASME Journal of Tribology. — 1992. — Vol. 114. — P. 736−744.

2. *Прокопьев В.Н., Караваев В.Г.* Термогидродинамическая задача смазки сложнонагруженных опор

скольжения неньютоновскими жидкостями // Вестник ЮУрГУ. Челябинск. — 2003. — № 1. — С. 55–66.

3. *Gesim B.A.* Non-Newtonian Effects of Multigrade Oils on Journal Bearings Performence. Tribology Transactions, — 1990. — Vol. 33. — P. 384–394.

4. *Chao Zhang.* TEHD Behavior of Non-Newtonian Dynamically Loaded Journal Bearings in Mixed Lubrication for Direct Problem // Journal of Tribology-transactions of The Asme — J TRIBOL-TRANS ASME. — 2002. — Vol. 124. — № 1. — 8 p.

5. *Прокопьев В.Н., Бояршинова А.К., Задорожная Е.А.* Динамика сложнонагруженного подшипника, смазываемого неньютоновской жидкостью // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2005. — № 6. — С. 108–114.

6. *Леванов И.Г., Задорожная Е.А.* Экспериментальные исследования реологических свойств всесезонных моторных масел // Вестник ЮУрГУ. — 2011. — Вып. 17. — № 11 (228). — С. 70–76. (Сер. : «Машиностроение»).

7. *Прокопьев В.Н., Задорожная Е.А., Леванов И.Г.* Влияние неньютоновских свойств масел на нагруженность шатунных подшипников коленчатого вала // Двигателестроение. — 2008. — № 3. — С. 40–42.

8. *Задорожная Е.А., Мухортов И.В., Леванов И.Г.* Применение неньютоновских моделей смазочных жидкостей при расчете сложнонагруженных узлов трения поршневых и роторных машин // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2011. — № 7. — С. 16–24.

9. *Леванов И.Г.* Обзор реологических моделей моторных масел, используемых при расчетах динамики подшипников скольжения коленчатого вала // Вестник ЮУрГУ. — 2010. — Вып. 15. — № 10 (186). — С. 54–62. (Сер. : «Машиностроение»).

10. *Задорожная Е.А., Караваев В.Г., Леванов И.Г., Чеснов А.В.* Влияние микрополярных свойств масел на динамику сложнонагруженных подшипников скольжения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. — 2009. — № 3 (19). — С. 329–337.

11. *Виссусек Д.* Реологические свойства смазочных масел и их значение для практики / пер. Ф.Я. Гульбиса. — Свердловск. — 1976. — 94 с.

12. *Леванов И.Г.* Методика расчета гидромеханических характеристик сложнонагруженных подшипников скольжения поршневых и роторных машин, смазываемых неньютоновскими маслами // Вестник ЮУрГУ. — 2011. — Вып. 18. — № 31 (248). — С. 34–43. (Сер. : Машиностроение).

13. *Мухортов И.В., Задорожная Е.А., Леванов И.Г.* Программа исследования характеристик статически нагруженных подшипников скольжения «Микрореология» // Зарегистрирован Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам под № 2010612188 от 24.03.2010.

ЮБИЛЕЙ!

Александру Константиновичу Лимонову 50 лет!



8 ноября 2011 года исполнилось 50 лет Лимонову Александру Константиновичу — главному конструктору-директору по разработке и конструированию двигателей и электрических агрегатов ОАО «Русские моторы» (ОАО РУМО), члену редакционной коллегии журнала «Двигателестроение».

Александр Константинович Лимонов окончил Горьковский политехнический институт в 1985 г. по специальности двигатели внутреннего сгорания. После окончания института поступил на работу в бюро автоматики и регулирования завода «Двигатель революции» (сегодня ОАО РУМО), где более 20 лет занимался совершенствованием систем управления и автоматики, регуляторов скорости контрольно-измерительными приборами.

За эти годы был пройден путь профессионального совершенствования и роста, характерный для руководителя современного машиностроительного производства: от инженера до начальника бюро, отдела, департамента. Немаловажную роль в становлении профессиональных навыков создателя новой сложной техники сыграла работа под началом широко известных специалистов в отрасли двигателестроения, главных конструкторов завода В.А. Осадина, А.М. Александрова, Ю.В. Аверкиева.

С 2007 г. А.К. Лимонов работает в должности главного конструктора завода по двигателям и электрическим машинам. Несмотря на сложнейшую экономическую обстановку, характерную для всех дизелестроительных заводов отрасли, под руководством главного конструктора А.К. Лимонова успешно реализуются проекты по созданию новых двигателей четвертого поколения семейств ЧН32/40 и ЧН22/28 (в дизельном и газовом вариантах) с технико-экономическими и экологическими показателями, соответствующими лучшим мировым образцам в своем классе среднеоборотных судовых и промышленных дизелей. Успешной реализации новых проектов способствует развитие кооперации с зарубежными фирмами, производителями компонентов двигателей из Швеции, Германии, Италии и других стран. Благодаря созданию и освоению производства двигателей нового поколения ОАО РУМО планирует в ближайшее время вернуться на зарубежные рынки традиционных потребителей его продукции в таких странах, как Иран, Ирак и Египет.

Редакция журнала «Двигателестроение», Совет Директоров, Правление и коллектив конструкторов ОАО РУМО сердечно поздравляют Александра Константиновича с юбилеем, желают ему крепкого здоровья и успешной реализации задуманных амбициозных проектов

УДК 621.436

ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ДИЗЕЛЕЙ. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ.

ПО МАТЕРИАЛАМ КОНГРЕССА CIMAC 2010

Материал подготовил к.т.н. Г.В. Мельник

Последовательное снижение нормативов выбросов для поршневых двигателей всех назначений стимулирует опережающее развитие природоохранных технологий. В ближайшей перспективе (в течение 4-5 лет) уровень вредных выбросов должен быть снижен не менее чем на 80 %. Разработанные и экспериментально апробированные производителями двигателей технологии подразделяются на «внутренние», основанные на управлении процессами внутри цилиндра и «внешние», основанные на очистке газов после выпуска из цилиндра. Фирма MAN Diesel & Turbo SE предлагает анализ состояния разработанных технологий для выбора стратегии развития своей продукции.

СРЕДНЕОБОРОТНЫЕ ДИЗЕЛИ НА ПУТИ К IMO TIER III. ОЧИСТКА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ИЛИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА — ЧТО ПРЕДПОЧЕСТЬ?

Georg Tinschmann, Dirk Thum, Stephan Schlueter, Petar Pelemis, Gunnar Stiesch,
MAN Diesel & Turbo SE, Германия

Мощные дизели, способные работать на тяжелых топливах (Heavy Fuel Oil — HFO), не знают себе равных по таким показателям, как топливная экономичность и ресурс работы. Именно поэтому они используются в качестве главных двигателей на 95 % судов мирового гражданского флота. Морские суда представляют собой наиболее экономичный и экологически чистый вид транспорта. Тем не менее, количество выбросов окислов азота (NO_x) и серы (SO_x) от двигателей морских судов непрерывно растет, особенно в зонах наиболее интенсивного судоходства и в портах.

Первый международный нормативный документ, ограничивающий вредные выбросы от судовых дизелей, был выпущен Международной Морской Организацией (IMO) в виде Приложения VI к конвенции MARPOL 73/78. Действие этого документа вступило в силу в 2005 г., распространялось на все суда, построенные после 1 января 2000 г. и ограничивало выбросы NO_x на уровне IMO Tier 1. С 01.07.2010 г. введен в действие норматив IMO Tier 2, предусматривающий снижение выбросов NO_x на 15–22 %. На 2016 г. намечено введение в действие норматива IMO Tier 3, который предусматривает снижение выбросов NO_x на 80 % (по сравнению с IMO Tier 1) в определенных акваториях, так называемых «зонах регулируемых выбросов» (Emission Control Areas — ECA).

Зоны регулируемых выбросов окислов серы (SO_x Emission Control Areas — SECA) также определены IMO. В этих зонах дизели должны работать на топливе с содержанием серы не более 1,5 %, или должны использоваться эффективные средства очистки отработавших газов (ОГ). Поскольку количество серы в топливе оказывает влияние на содержание частиц в ОГ, содержание серы в топливе судовых дизелей ограничивается не только для зон SECA, но и для других районов плавания.

MAN Diesel активно разрабатывает технологии, которые позволили бы снизить выбросы до действующих и перспективных норм IMO. При этом исследователям MAN Diesel SE предстояло ответить на следующие вопросы:

- Какая технология достижения уровня выбросов NO_x IMO Tier 3 может считаться оптимальной с точки зрения минимизации начальных вложений и эксплуатационных расходов?
- Является ли очистка отработавших газов единственным разумным средством снижения выбросов, или же следует рассматривать и другие методы, например, цикл Миллера и рециркуляция ОГ?
- Есть ли необходимость в перенастройке двигателя при заходе в зону ECA (где требования изменяются от Tier 2 к Tier 3)
- Какие преимущества дает использование скруббера, и какие возникает проблемы, если при входе в зону SECA переключение на другой вид топлива невозможно или нежелательно?
- Какие решения можно считать оптимальными для относительно маломощных дизель-генераторов, и какие — для главных двигателей большой мощности?

1. Введение

Для морских судов, заложенных после 1 января 2011 г., нормативы выбросов NO_x на уровне IMO Tier 2 стали обязательными для флотов

всего мира (табл. 1). Для достижения этого уровня оказывается достаточно одних только «внутренних» средств. Их использование позволило MAN Diesel создать законченный ряд двигателей, удовлетворяющих требованиям IMO Tier 2.

Что же касается нормативов Tier 3, распространяющихся на суда, заложенные после 1 января 2016 г., то они предусматривают дифференциацию в зависимости от района плавания судна. Для плавания в открытом море нормативы Tier 2 остаются в силе и после 2016 г., тогда как для плавания в зонах регулируемых выбросов (ECA) обязательным становится 80-процентное снижение NO_x, по сравнению с Tier 1. Кроме того, в Tier 3 впервые появился пункт, устанавливающий требование «непревышения». Это означает, что среднецикловой предельный уровень NO_x не должен быть превышен более чем на 50 % при любой (частичной) нагрузке двигателя. На сегодняшний день в число ECA уже вошли Балтийское и Северное моря, включая Ла-Манш. В заявку на получение статуса ECA включена береговая зона США и Канады. В настоящее время в IMO обсуждается вопрос о включении в состав ECA Средиземного моря и нескольких крупных мировых портов по перегрузке контейнеров (рис. 1).

Помимо окислов азота, правилами IMO ограничиваются также выбросы окислов серы. Действующие нормативы ограничивают содержание серы в топливе, однако законодательство допускает и другой способ ограничения выбросов серы, устанавливая предельно допустимую концентрацию SO_x в отработавших газах. Следует отметить, что на выбросы SO_x (в отличие от NO_x) процесс сгорания сам по себе никак не влияет. Вся сера, попадающая с топливом в камеру сгорания, уходит в атмосферу в виде SO_x. Это значит, что уменьшить выбросы SO_x можно лишь одним из двух способов: либо за счет использования малосернистого топлива, либо за счет очистки ОГ. На рис. 2 показаны ограничения IMO на содержание SO_x в ОГ (выраженные через ПДК серы в топливе) внутри зон ECA и за их пределами, а также годы вступления соответствующих нормативов в силу. Следует помнить, что,

Таблица 1

Предельные значения IMO NO_x

Номинальная скорость дизеля	$n<130$	$130<n<2000$	$n>2000$
Tier 1 NOx [г/кВт·ч] (2000)	17,0	$45 \cdot n^{-0,2}$	9,84
Tier 2 NOx [г/кВт·ч] (2011)	14,36	$44 \cdot n^{-0,23}$	7,66
Tier 3 NOx [г/кВт·ч] (2016) в пределах ECA	3,4	$9 \cdot n^{-0,2}$	1,97



Рис. 1. Существующие, планируемые и обсуждаемые зоны ограниченных выбросов

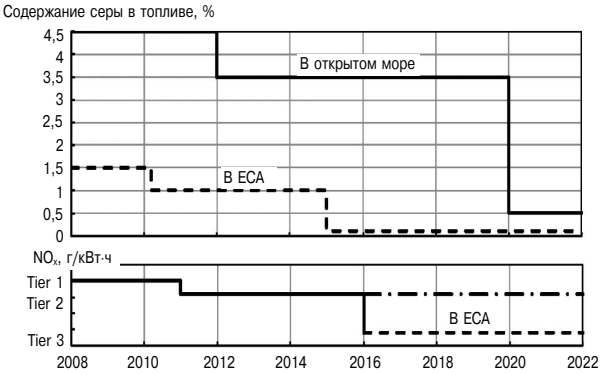


Рис. 2. Ограничения IMO по содержанию серы (SO_x) и NO_x

помимо общих ограничений, установленных IMO, существуют также региональные ограничения. Например, для портов стран Евросоюза установлено предельное содержание серы в топливе 0,1 %.

В настоящем докладе приводится обзор основных методов снижения выбросов NO_x и SO_x и описываются самые интересные и наиболее вероятные сценарии достижения уровня Tier 3 для среднеоборотных двигателей.

2. Технологии снижения выбросов NO_x (рис. 3)

Помимо достаточно известных и проверенных временем решений, в настоящее время все большее внимание конструкторов привлекают такие методы, как оптимизация процесса сгорания, совершенствование систем турбонаддува и впрыска топлива. Дифференциация нормативов в зависимости от района плавания требует создания систем, которые, помимо надежности и эффективности, обладали бы достаточной управляемостью.

«Внутренние средства»

Для достижения уровня IMO Tier 2 (т. е. снижения выбросов NO_x на 20 % и более) используется цикл Миллера в сочетании с высо-

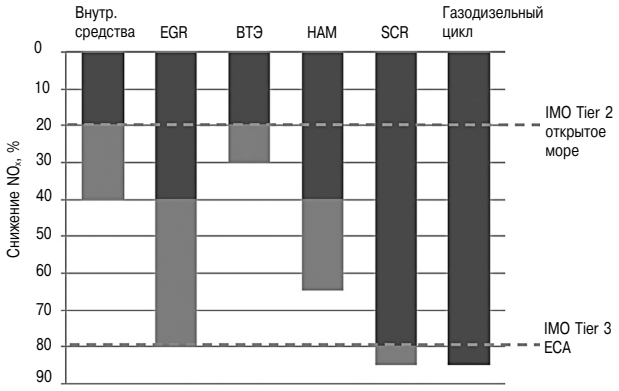


Рис. 3. Эффективность различных способов снижения выбросов NO_x

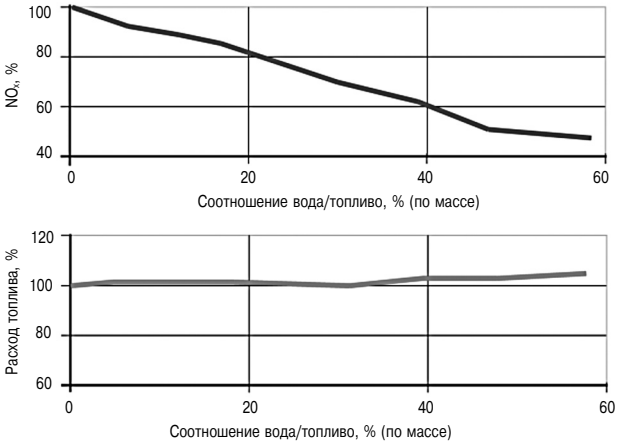


Рис. 4. Влияние ВТЭ на выбросы NO_x и расход топлива

ким наддувом (в одной ступени) и оптимизированной системой впрыска высокого давления. Идея цикла Миллера состоит в понижении температуры сгорания за счет более позднего закрытия впускного клапана, что приводит к охлаждению воздуха в результате его расширения. Высокий наддув в этом случае необходим для того, чтобы избежать потери мощности или снижения КПД. Кроме того, для повышения рабочих параметров при частичных нагрузках применяется регулирование углов открытия клапанов. MAN Diesel уже выпускает подобные оптимизированные системы серийно.

Дальнейшее повышение эффективности возможно за счет применения двухступенчатого наддува, которая позволяет сократить выбросы NO_x на 40 % — цифра, подтвержденная заводскими испытаниями. Поэтому следующим важнейшим шагом является создание управляемой системы двухступенчатого наддува MAN Diesel.

Даже если упомянутые выше мероприятия не смогут обеспечить снижение выбросов NO_x на 80 % (до уровня Tier 3 в зонах ECA), они позволят создать оптимизированную и управляемую систему сгорания, которая может стать основой для всех последующих разработок.

Увлажнение рабочей смеси

Известны несколько способов снижения выбросов NO_x путем добавления воды в камеру сгорания, в том числе:

➢ использование водотопливной эмульсии (ВТЭ);

➢ увлажнение наддувочного воздуха — метод, известный в зарубежной литературе как Humid Air Motor (HAM).

Идея обоих способов состоит в использовании водяного пара для уменьшения максимальной температуры сгорания, что приводит к снижению выбросов NO_x. Прямой впрыск воды в камеру сгорания связан с нежелательными побочными эффектами, такими, как плохая гомогенизация заряда, увеличение расхода топлива, кавитация и коррозия. Поэтому MAN Diesel сразу отказался от его использования.

Идея использования ВТЭ состоит в смешивании топлива с водой перед впрыском. Результат проведенных MAN Diesel испытаний показал, что данный способ может обеспечить снижение выбросов NO_x на величину до 30 %. При содержании воды в эмульсии более 30 % расход топлива увеличивается настолько, что применение ВТЭ становится экономически нецелесообразным. Тем не менее, MAN Diesel уже с конца 1990-х гг. предлагает этот способ как одно из возможных средств выполнения требований Tier 2 для новых и модернизируемых двигателей.

Концепция увлажнения наддувочного воздуха (HAM) основана на насыщении наддувочного воздуха водой. Фирмой разработана так называемая «Патентованная система теплообмена MAN», снижающая, согласно результатам эксплуатационных испытаний, выбросы NO_x до 65 %. Ее идея состоит в подогреве впрыскиваемой воды для повышения степени насыщения. В отличие от ВТЭ система HAM может работать на морской воде. Главный недостаток этого метода заключается в том, что он приводит к росту давления наддувочного воздуха, что, в свою очередь, с учетом ограничения температуры заряда, не позволяет достичь оптимальной степени насыщения (рис. 5). Реализация этого метода связана со значительными вложениями. Кроме того, для размещения модуля HAM требуется дополнительное место в машинном отделении. MAN Diesel с 1999 г. предлагает данный метод, наряду с ВТЭ, в качестве альтернативного средства, применяемого при модернизации существующих двигателей для снижения выбросов NO_x до требований Tier 2 и ниже.

Хотя увлажнение рабочей смеси само по себе не в состоянии обеспечить выполнение требований Tier 3, в определенных случаях есть смысл его

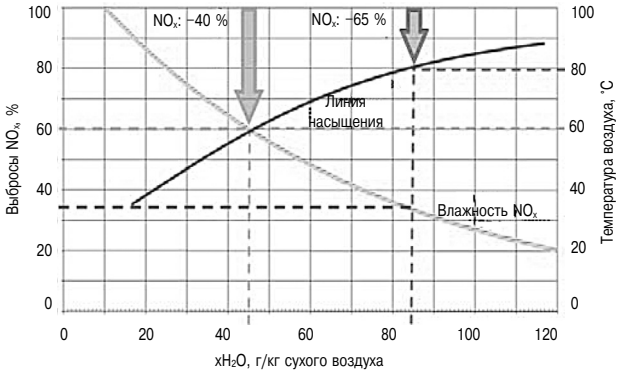


Рис. 5. Кривые насыщения и снижения NO_x

использовать в качестве вспомогательного средства, как в текущих, так и в будущих проектах.

Селективное каталитическое восстановление

Селективное каталитическое восстановление (SCR) на сегодняшний день является самым надежным и проверенным методом, позволяющим снизить выбросы NO_x на величину до 90 %. Целый ряд установок различного назначения с дизелями MAN, оборудованными системой SCR, успешно эксплуатируется уже в течение многих лет. Данный метод основан на впрыске водного раствора мочевины в выпускной тракт дизеля с целью восстановления NO_x до N_2 в присутствии катализаторов. Более подробно данный процесс описан в части 4.

При этом наибольшую сложность представляет согласование работы всех компонентов системы, состоящей из двигателя, агрегата подачи мочевины и модуля SCR. Для предотвращения утечки аммиака в окружающую среду используется устройство интеллектуального управления подачей мочевины, встраиваемое в систему управления двигателя. Оптимизация процесса газоочистки возможна лишь при условии согласованного управления рабочими параметрами двигателя и подачей мочевины.

Рециркуляция отработавших газов (EGR)

Идея рециркуляции ОГ заключается в уменьшении концентрации кислорода в наддувочном воздухе с целью снижения температуры сгорания. Как показали заводские испытания, данный метод в сочетании с «циклом Миллера», двухступенчатым высоким наддувом и топливной системой типа common rail позволяет обеспечить снижение выбросов NO_x до 80 %. В части 5 дается более подробное описание этого процесса и приводится анализ результатов испытаний. Преимуществом метода EGR является отсутствие зависимости от внешних реагентов, таких, как мочевина или вода. Его определенный недостаток — необходимость использования малосернистого топлива или даже дистиллята во избежание коррозии деталей двигателя. Метод EGR следует выбирать в качестве средства выполнения требований Tier 3 только после проведения всестороннего экономического анализа, если такой анализ покажет преимущества данного метода перед SCR для данного конкретного применения.

3. Сравнительная оценка различных методов

Сравнительная оценка наиболее перспективных методов производится путем сопоставления затрат оператора за срок службы оборудования при использовании того или иного метода. При этом учитываются: первоначальная стоимость оборудования, эксплуатационные расходы, а также стоимость всех расходных материалов.

В качестве базового образца для вновь разрабатываемых среднеоборотных машин MAN Diesel был выбран новый двигатель типа 6L32/44CR (соответствует Tier 2). Он оборудован системой впрыска типа common rail и одноступенчатой системой наддува. Вариант (0) принят в качестве базового для анализа расходов за срок службы двигателя конфигурации Tier 2.

Вариант (1) оборудован EGR для достижения уровня Tier 3. Эти две конфигурации сравниваются с вариантом (2), в качестве которого выбран дизель типа 6L32/44CR с двухступенчатым наддувом и SCR. Исходные параметры для расчетов сведены в табл. 2. Характеристики сравниваемых вариантов представлены в табл. 3. Помимо упомянутых выше двигателей IMO Tier 3, к перечню для сравнения добавлен двигатель, соединяющий в себе ряд «внутренних» средств, включая EGR, двухступенчатый наддув и систему common rail с функцией множественных впрысков — вариант (3).

Расчеты затрат за срок службы показывают, что при введении IMO Tier 3 эти затраты по сравнению с Tier 2 скорее всего увеличатся. Ожидаемое увеличение затрат составит от 1,6 до 7,6 %, в зависимости от доли ECA в маршрутах судна и применяемых технологий (рис. 6).

Сравнение вариантов (1) и (2) с SCR по стоимости в течение срока службы (10 лет) показывает, что вариант (2) оказывается дешевле примерно на 4 %. Дополнительные вложения,

Таблица 2

Исходные параметры для расчета

Плановый ресурс	10	лет
Время работы / в год	6000	ч
Доля ECA	0–100	%
Процентная ставка	10	%
Цена тяжелого дизельного топлива (HFO)	320,00	EUR/т
Цена малосернистого топлива (LSFO)	325,00	EUR/т
Цена морского газойля (MGO)	440,00	EUR/т
Цена мочевины	270,00	EUR/т

Таблица 3

Методы достижения IMO Tier 3 (4-тактные двигатели)

Вариант	Исходная конфигурация дизеля	Технология ограничения выбросов	Очистка выпускных газов	Уровень NO_x	Класс топлива	
					внутри ECA	вне ECA
0	Tier 2	Common Rail Одноступенчатый наддув с перепуском	Отсутствует	Tier 2	MGO	HFO
1	Tier 2	Common Rail Одноступенчатый наддув с перепуском	SCR	Tier 3	MGO	HFO
2	Tier 2	Common Rail Двухступенчатый наддув (PTK)	SCR	Tier 3	MGO	HFO
3	Tier 3	Common Rail Двухступенчатый наддув (PTK) Множественный впрыск Рециркуляция отработавших газов	Не требуебся	Tier 3	MGO	HFO

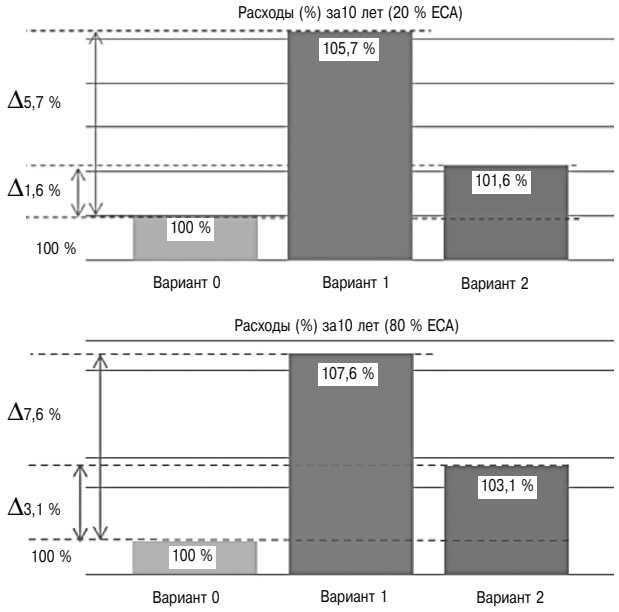


Рис. 6. Сравнительная стоимость IMO Tier 2 (SCR) и IMO Tier 2 (SCR с 2-ступенчатым наддувом)

связанные с применением двухступенчатого наддува, окупаются менее чем за 2,5 года благодаря снижению расхода топлива на 3–5 % (в зависимости от нагрузки). Кроме того, двухступенчатый наддув позволяет повысить мощность двигателя практически без ущерба для его экономичности и показателей выбросов NO_x, что даст возможность приблизить по удельным затратам дизель с двухступенчатым наддувом к исходному варианту (с одноступенчатым наддувом).

Эксплуатационные затраты в обоих случаях (варианты 1 и 2) возрастают из-за необходимости расходовать мочевину при нахождении в зонах ECA. Чем больше относительное время плавания в этих зонах, тем больше расход мочевины. Отсюда ясно, что вариант (3), не требующий расходных материалов, становится наиболее предпочтительным для судов, проводящих в зонах ECA значительную часть времени.

При работе вне зон ECA варианты (3) и (2) с точки зрения расхода топлива равнозначны. Чтобы выбросы внутри зон ECA оставались в пределах норм Tier 3, система EGR должна работать, что приводит к увеличению расхода топлива на 2–4 %.

Для варианта (2) можно непосредственно сравнить стоимость дополнительно израсходованного топлива со стоимостью мочевины. Что касается варианта (3), то, помимо упомянутых выше затрат, потребуются дополнительные начальные вложения на оборудование двигателя системой EGR. С учетом разницы в начальных и эксплуатационных расходах можно с некоторым приближением сказать, что вариант (3) представляет практический интерес в тех случаях, когда относительное время плавания в зонах ECA превышает 50 % (рис. 7).

Во всяком случае, становится понятно, что оба варианта — (2) и (3) — с точки зрения стоимости в течение срока службы достаточно близки, поскольку разница в суммарных затратах в течение 10 лет при 100-процентном нахождении в зонах ECA не превышает 100 000 Евро.

Если говорить об известных на сегодняшний день решениях, простейшим вариантом представляется использование технологий IMO Tier 2 в сочетании с SCR. Дополнительную экономию дает применение двухступенчатого наддува. Для судов, плавающих преимущественно в зонах ECA, целесообразным представляется также исполь-

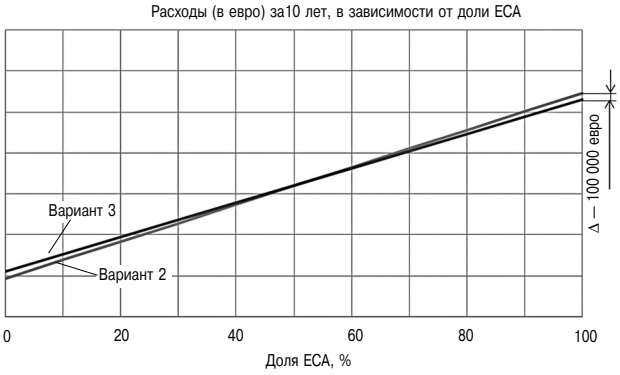


Рис. 7. Сравнение IMO Tier 2, 2-ступенчатый наддув, SCR (вариант 2) и IMO Tier 3, EGR (вариант 3)

зование «внутренних» методов в сочетании с EGR, системами common rail и двухступенчатым наддувом.

4. Селективное каталитическое восстановление

В основе процесса селективного каталитического восстановления (SCR) лежит использование катализатора для преобразования содержащихся в ОГ окислов азота в азот и воду с помощью NH_3. Следует, однако, помнить о том, что NH_3 является вредным веществом, требующем крайне осторожного обращении во избежание серьезного ущерба для здоровья людей и окружающей среды. Поэтому инженеры обратились к использованию мочевины в качестве источника NH_3. Мочевина безвредна, а транспортировка и использование ее водного раствора не требуют особых мер предосторожности. В настоящее время растворы мочевины с концентрацией 32,5 или 40 % успешно используются в системах SCR сухопутных и морских транспортных средств.

Каталитическая реакция протекает в два этапа. На первом этапе мочевина, попадая в поток горячих газов, реагирует с водой, содержащейся в растворе мочевины и в отработавших газах, разлагаясь при этом на аммиак и двуокись углерода:

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow 2NH_3 + CO_2$$

Собственно процесс восстановления NO_x протекает при участии катализатора, где с помощью аммиака окислы азота преобразуются в азот и воду:

$$NO_x + NH_3 \rightarrow N_2 + H_2O$$

Превышение подачи мочевины над стехиометрической нормой вызывает утечку аммиака за пределы системы. Такая утечка экологически опасна и недопустима, поэтому необходимо строго дозировано подавать мочевину. Для того чтобы поддерживать эффективность восстановления NO_x на максимальном уровне, не допуская в то же время утечки аммиака, требуется замкнутая система регулирования, работающая от датчиков концентрации NO_x. К сожалению, необходимое для этого измерительное оборудование весьма чувствительно к внешним воздействиям, поэтому его применение в судовых условиях требует тщательного и достаточно трудоемкого техобслуживания. Альтернативой замкнутой системе является разомкнутая система параметрического регулирования, эффективность которой зависит от точности определения характеристик двигателя.

Почти все существующие системы SCR для самых различных установок основаны на описанных выше реакциях. В отличие от высокооборотных автотракторных, локомотивных и т. п. двигателей, работающих на дистиллятных топливах, применение SCR в среднеоборотных дизелях, работающих на тяжелых топливах,

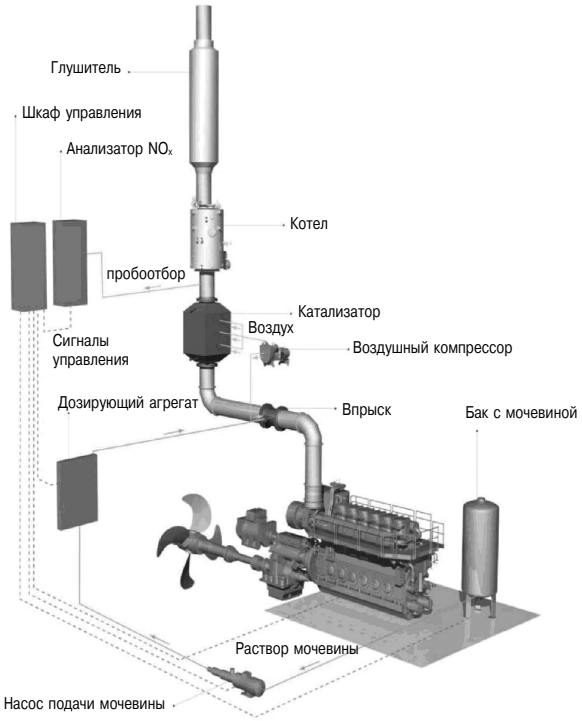


Рис. 8. Стандартная конфигурация среднеоборотного двигателя с SCR

связано с дополнительными проблемами. Во-первых, рабочий процесс среднеоборотных дизелей рассчитан на гораздо более низкие значения противодавления на выпуске. Учитывая типичную для таких дизелей конфигурацию выпускного тракта, включающую, как правило, котел-утилизатор (рис. 8) и глушитель, поддержание противодавления в допустимых пределах оказывается непростой задачей.

Мазут может содержать в своем составе значительное количество золы и серы. Зола загрязняет слои катализатора, поэтому с ней необходимо бороться во избежание засорения каталитического преобразователя. Для этого есть два способа: увеличение зазора между слоями, чтобы он не смог зарасти полностью, или применение воздуходувки для удаления сажи. В последнем случае для каждого слоя используется отдельная воздуходувка, поток воздуха от которой периодически сдувает всю золу и пепел с поверхности катализатора.

Другая проблема заключается в большом содержании серы в топливе, обычно используемом в среднеоборотных дизелях. Если температура газа падает ниже определенного значения, зависящего от содержании серы в топливе, аммиак вступает в реакцию с окислами серы, образуя сульфат аммония (рис. 9). Он представляет собой плотную клейкую массу, покрывающую поверхность катализатора. При этом эффективность восстановления NO_x падает, а противодавление на выпуске растет.

Одним из следствий высокого КПД, свойственного среднеоборотным двигателям, является

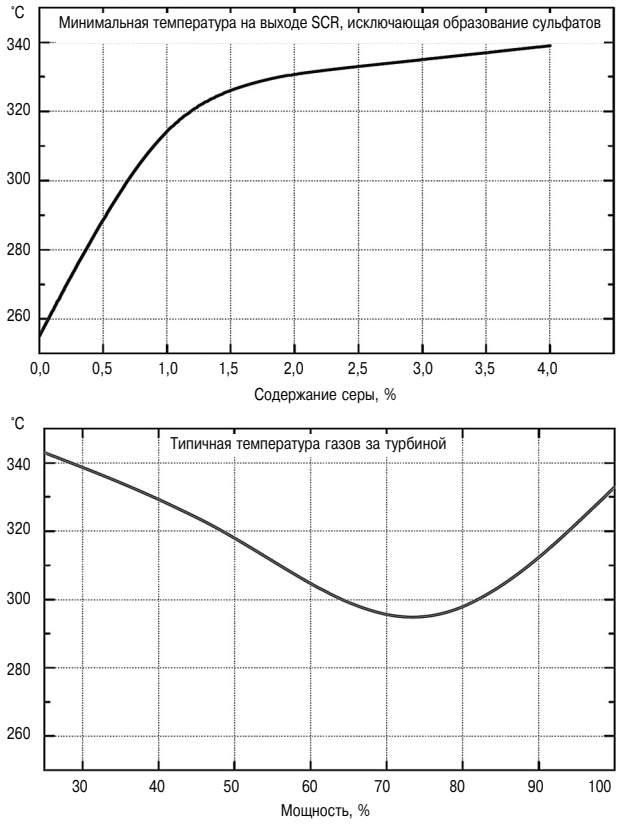


Рис. 9. Необходимое и типичное значения температуры отработавших газов

высокая температура газов после турбины, которая близка к предельно допустимой. Установка катализатора перед турбокомпрессором, практикуемая в малооборотных двигателях, в данном случае не подходит. При температуре свыше 500 °С аммиак, прежде чем вступить в реакцию восстановления NO_x, просто сгорит. Один из способов избежать образования сульфата аммония — отключить подачу мочевины. Сам по себе катализатор в состоянии выдержать присутствие большого количества серы без каких-либо последствий, при условии, что подача мочевины отключена. Такой вариант возможен при нахождении судна вне зон ECA, где нет необходимости в использовании SCR для того, чтобы уложиться в нормы выбросов. При установке SCR за турбиной необходимо принимать меры для повышения температуры газов за турбиной. В судовых дизелях для этого чаще всего используют:

- ➢ сброс части наддувочного воздуха в атмосферу;
- ➢ байпас отработавших газов;
- ➢ регулируемый турбокомпрессор с управляемым сопловым аппаратом турбины.

Сравнительная интегральная оценка перечисленных устройств с учетом начальных вложений, эксплуатационных расходов, трудоемкости проектирования, испытаний и других факторов показывает, что для большинства установок с одноступенчатым наддувом предпочтительным вариантом является байпас отработавших газов. Для определенного класса объектов, таких как, например, суда с винтом фиксированного шага или двигатели с двухступенчатым наддувом, достаточно перспективным вариантом представляется регулируемый ТК.

Размеры среднеоборотных двигателей позволяют встраивать без особого труда модули SCR в выпускной тракт после турбокомпрессора, чтобы не занимать лишнего места в машинном отделении. Уже в проект самого судна может быть включен бак с мочевиной и предусмотрено место для его установки. У SCR есть и другие преимущества, в частности, ее совместимость со всеми известными «внутренними» средствами оптимизации сгорания, а также возможность ее отключения при плавании в открытом море. MAN Diesel уже выпускает стандартный модуль SCR для всех среднеоборотных двигателей.

5. Рециркуляция отработавших газов

Испытания системы EGR проводились на опытном одноцилиндровом отсеке 1L32/44 CR.

Для испытаний с системой EGR отсек был доработан согласно схеме рис. 10. Двигатель имеет наддув, и при испытаниях без EGR газы направляются непосредственно в выпускную трубу через дроссельную заслонку, имитирующую давление перед турбиной в серийной машине.

При испытаниях с EGR газы отводятся из коллектора, охлаждаются, пропускаются через небольшой турбокомпрессор для повышения давления и поступают во всасывающий ресивер. Степень рециркуляции можно регулировать, изменяя расход газа через турбину турбокомпрессора EGR.

На рис. 11 показаны результаты испытаний EGR при номинальной частоте вращения при 75 %-й нагрузке. Двухступенчатый наддув демон-

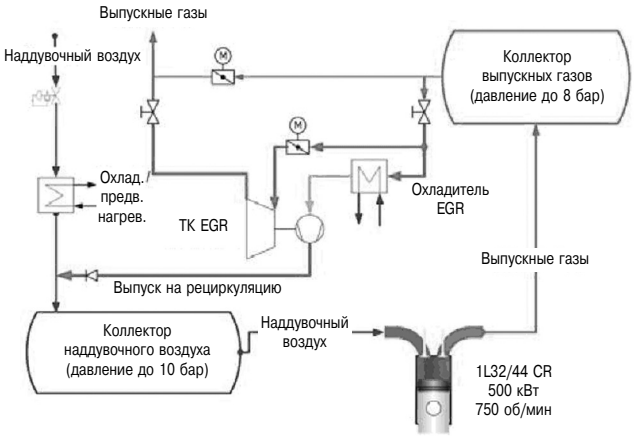


Рис. 10. Система подачи воздуха и EGR двигателя 1L32/44 CR

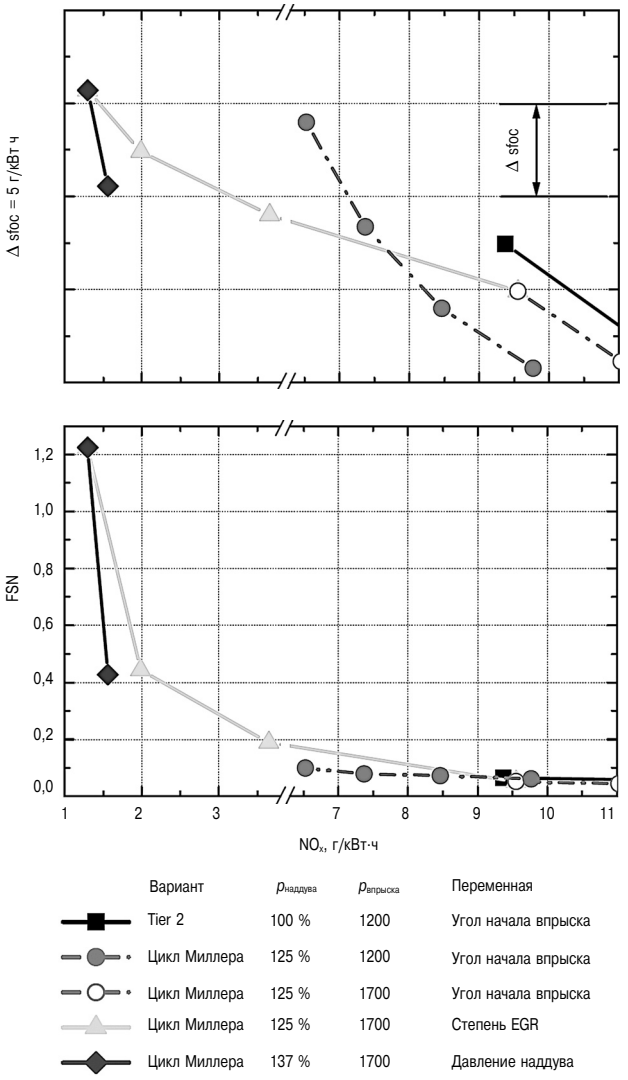


Рис. 11. Первые результаты испытаний отсека 1L32/44 CR с EGR

стрирует очевидное преимущество в смысле экономии топлива. Во избежание дымления двигателя давление впрыска в системе common rail при использовании EGR повышено до 1700 бар, что приводит к повышению расхода топлива при той же величине выбросов NO_x.

EGR позволяет снизить выбросы NO_x до уровня порядка 2 г/кВт·ч при том же давлении наддува, но заметно снижает коэффициент избытка воздуха, тем самым резко увеличивая дымление.

Повышение давления наддува на 10 % позволяет уложиться в требуемый лимит по выбросам NO_x — 2 г/кВт·ч, сохранив приемлемый уровень дымности. Послевпрыск дает возможность снизить показатель дымности еще на 20–40 % при тех же значениях выбросов NO_x и расхода топлива.

Отсюда следует, что EGR в принципе позволяет обеспечить требования Tier 3. Однако это возможно лишь при наличии:

➢ управляемого двухступенчатого наддува, обеспечивающего высокие значения среднего эффективного давления, а также возможности отключения EGR за пределами зон ECA;

➢ системы common rail, обеспечивающей сверхвысокие (до 2200 бар) значения давления впрыска и предусматривающей возможность множественных впрысков для минимизации дымления;

➢ повышенного давления сгорания, позволяющего поддерживать среднее эффективное давление постоянным;

➢ системы и теплообменника EGR, устойчивых к засорению и коррозии.

MAN Diesel продолжает углубленное изучение систем EGR среднеоборотных дизелей.

6. Что делать с серой

На содержание серы в топливе производитель двигателя повлиять не в состоянии. Концентрация окислов серы в отработавших газах зависит исключительно от ее содержания в топливе. Процесс сгорания на это никак не влияет. Тем не менее должны быть предусмотрены меры, позволяющие выполнить требования по ограничению выбросов.

Простейший способ выполнить требования по выбросу окислов серы — работа на малосернистом топливе. Это означает, что судно должно брать на борт исключительно MGO — единственный вид судового топлива, позволяющий выполнить перспективные требования. Однако перевести на MGO двигатель, рассчитанный на флотский мазут, оказывается не так-то просто. Во-первых, при переходе на топливо с более низкими показателями вязкости и смазывающей способности необходимо принять меры для защиты седел клапанов и ТНВД. Впрочем, такие меры уже разработаны и внедрены. Но самый серьезный недостаток MGO по сравнению с мазутом — это гораздо более высокая его стоимость.

Использование мазута позволяет сэкономить на стоимости топлива, но вызывает необходимость в такой системе газоочистки, которая обеспечивала бы нужную степень чистоты ОГ, не принося при этом судовладельцу убытки. В настоящее время в судовых установках применяются системы газоочистки двух видов. На некоторых судах устанавливают скрубберы — агрегаты, в которых ОГ очищаются промывкой пресной или морской водой со щелочью, например, с каустической содой. Другой возможный вариант — это реактор с гранулированным известняком, поглощающим SO_x. Эффективность обоих видов систем газоочистки составляет более 90 %. В обоих случаях для размещения самой установки и емкостей с расходными материалами требуется довольно много места.

В мокром скруббере содержащаяся в морской воде щелочь или каустическая сода используются для перевода SO_x в раствор серной кислоты и ее нейтрализации. Промывочная вода, в свою очередь, требует тщательной очистки от нефтепродуктов, частиц и других посторонних веществ. Она должна отвечать также требованиям IMO по показателю pH. Однако в некоторых странах существует запрет на сброс промывочной воды. В системах с пресной водой количество стоков существенно ниже, что позволяет обеспечить их временное хранение. С другой стороны, для продолжительного плавания требуется большое количество реагента, который тоже надо где-то хранить. Одна из новейших концепций состоит в одновременном использовании пресной и морской воды. Такой подход, сочетая в себе преимущества обоих способов, может открыть путь к повсеместному использованию мазута даже после вступления в силу самых жестких ограничений IMO в части SO_x. Мокрый скруббер может также быть встроен в контур EGR для очистки газов, возвращаемых во всасывающую систему двигателя. Правда, попытка сочетать мокрый скруббер с SCR, чтобы уложиться в лимиты одновременно по NO_x и SO_x, может встретить определенные трудности. Температура газа после мокрого скруббера недостаточна для нормального функционирования SCR, а высокое содержание серы в газах на входе в скруббер затрудняет организацию терморегулирования.

Возможный выход состоит в использовании системы сухой очистки с известняковыми гранулами. Такая система одинаково эффективна при любой температуре ОГ и не мешает нормальному функционированию следующей за ней системы SCR. Кроме того, благодаря высокой температуре в реакторе она может быть размещена в донной части судна, что повышает его остойчивость и не так заметно сокращает располагаемое грузовое пространство. Реактор имеет гранулированную набивку. При прохождении отработавших газов сквозь слои гранул содержащиеся в них окислы серы реагируют с набивкой, образуя гипс. Отработавшие гранулы постепенно выводятся из реактора самотеком, и могут храниться в свободных объемах корпуса судна. При этом высвобождается полезный объем, который можно использовать, например, для дополнительного размещения груза. Первые испытания таких систем на судах дали обнадеживающие результаты.

7. Может быть панацеей станет газовый двигатель?

Еще одна возможность выполнить нормативные требования IMO сразу по NO_x и SO_x состоит в использовании природного газа. Он практически не содержит серы, а выбросы NO_x при работе на бедных смесях оказываются существенно ниже. Это позволяет выполнить нормативные требования IMO Tier 3 по NO_x для среднеоборотных двигателей путем их перевода на газ. Есть лишь одно препятствие — для хранения газового топлива нужно примерно в 2,5–3 раза больше места, чем для мазута. Поэтому возможности использования чисто газовых двигателей на грузовых и пассажирских судах обычного типа достаточно ограничены. Одним из вариантов разумного компромисса с учетом работы в зонах ECA и за их пределами является использование газодизельного цикла. Для снижения объема, занимаемого газовым топливом, рассматриваются варианты использования сжиженного природного газа (СПГ).

9. Заключение

Выполнена оценка различных способов выполнения требований IMO Tier 3 по ограничению выбросов применительно к среднеоборотным двигателям MAN Diesel. Хотя существует несколько способов обеспечить выполнение требований Tier 3 по уровню выбросов, экономический анализ, учитывающий начальные вложения, стоимость расходных материалов и техобслуживания на протяжении всего срока службы показывает, что наиболее перспективными технологиями с этой точки зрения являются очистка ОГ с помощью SCR и рециркуляция отработавших газов (EGR). В качестве основного метода выполнения требований Tier 3 для среднеоборотных двигателей MAN Diesel выбрал применение SCR. Главными преимуществами данного метода являются его управляемость, надежность и высокая степень практической отработки. Предполагается, что весь ряд среднеоборотных двигателей MAN Diesel будет оборудован SCR и обеспечит соответствие требованиям Tier 3 по выбросам NO_x задолго до наступления 2016 г. Параллельно продолжается работа по доводке систем EGR на среднеоборотных двигателях. Эта система также подтвердила свою конкурентоспособность в качестве возможной альтернативы SCR с точки зрения первоначальных вложений, эксплуатационных затрат и надежности. Кроме того, MAN Diesel рассматривает возможность применения скруббера для очистки ОГ от SO_x, поскольку это единственный способ обеспечить выполнение требований IMO Tier 3 по окислам серы при работе на мазуте в зонах SECA после 1 января 2015 г. Продолжается оптимизация существующих систем дизеля, таких, как системы турбонаддува и впрыска топлива, совершенствование процесса сгорания и электронных средств управления, чтобы в итоге создать наиболее совершенную на сегодняшний день систему.