

## ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПРИОРИТЕТЫ РАЗВИТИЯ МИРОВОГО ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ (материалы конгресса CIMAC-2016)

В интервью вновь избранного президента CIMAC Клауса Хайма корреспонденту журнала «Diesel Progress» дана оценка деятельности организации за прошедший период и сформулированы перспективы и приоритеты развития мирового двигателестроения.

Уникальная программа «Геркулес-2» стала продолжением совместных работ двух крупнейших производителей двигателей — MAN и «Wartsila» по исследованию новых технологий, направленных на снижение расхода топлива и уровня вредных выбросов с помощью новейших методов и средств проектирования.

Цель программы — создание полностью адаптивного мощного судового двигателя, способного к оптимизации рабочих параметров при воздействии внешних факторов.

Доклад, подготовленный фирмой АВВ совместно с ОАО «Коломенский завод», посвящен созданию системы наддува для нового двигателя мирового уровня D500. Двигатель разрабатывался главным образом в качестве тепловозного. Планируется разработка модификации судового и дизель-генераторного исполнения. По содержанию вредных выбросов двигатель соответствует действующим и перспективным экологическим нормативам. Система наддува создана на базе турбокомпрессора АВВ типа TPR, который может быть дополнен регулирующим модулем VTG. При этом степень повышения давления в компрессоре (в двухступенчатом варианте) может быть доведена до 5,8.

*Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником*

### ОБ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ НОРМАТИВАХ И НЕ ТОЛЬКО

*По мнению нового президента CIMAC, первоочередной задачей двигателестроения остается снижение вредных выбросов. Забота о репутации и системная интеграция постепенно входят в число главных приоритетов.*

*Роберта Пранди*

На 28-м Конгрессе CIMAC (Международный Совет по двигателям внутреннего сгорания), проходившем в Хельсинки с 6 по 10 июня с.г., президентом CIMAC был избран Клаус Хайм (Klaus Heim), технический директор итальянской компании OMT S.p.A. На этом посту он будет оставаться до окончания работы следующего Конгресса CIMAC, который состоится в 2019 г. Корреспондент журнала «Diesel Progress» встретился с г-ном Хаймом и задал ему несколько вопросов, касающихся деятельности организации в период его предстоящего президентства, а также тенденций и приоритетов развития двигателестроения.

**Вопрос:** На 28-м Конгрессе CIMAC в Хельсинки (Финляндия) Вы были избраны президентом этой организации. Каково наследство, доставшееся Вам от Вашего предшественника, и что Вы намерены предпринять в качестве Президента CIMAC в предстоящий период?

**Ответ:** В течение последних нескольких лет организация CIMAC и ее члены интенсивно



*Клаус Хайм, президент CIMAC*

занимались созданием технологий, способствующих снижению загрязнения атмосферного воздуха. Этим вопросам было посвящено большинство наших мероприятий — совещаний, семинаров и конгрессов.

Следует отметить, что за последние годы нам удалось увеличить число членов CIMAC, при этом финансовая база организации и деятельность, связанная с проведением конгрессов, подверглись реорганизации, позволившей укрепить ее структуру и повысить уровень профессионализма.

В ближайшие годы мы намерены усилить акцент на выбор стратегических направлений, думать над тем, как повысить привлекательность организации для ее членов, укрепить структуру CIMAC таким образом, чтобы мы могли встретить будущие вызовы во всеоружии.

*Вопрос:* Предыдущий президент СИМАС д-р Teetz в 2013 г. заявил, что период подготовки к следующему конгрессу будет в значительной степени посвящен постоянно меняющимся законодательным ограничениям, в частности экологическим нормативам. Считаете ли Вы, что данный тренд сохранится и в будущем? На чем теперь будут сосредоточены усилия СИМАС?

*Ответ:* Изменения в экологическом законодательстве, особенно ввод в действие с 1 января 2016 г. нормативов IMO Tier 3 в специальных зонах, в течение нескольких лет держали производителей крупных двигателей в напряжении. Однако этим дело не кончилось. У меня нет сомнений в том, что тенденция к сокращению вредных выбросов будет существовать и впредь. Хотя уровень выбросов CO<sub>2</sub> (оксида углерода) на тонно-километр от судов, оснащенных крупными дизельными и газовыми двигателями, и так является самым низким. В будущем не придется ожидать снижения давления на нашу отрасль в направлении дальнейшего повышения КПД и снижения выбросов CO<sub>2</sub>.

Но помимо чисто технических аспектов, связанных с внедрением соответствующих технологий, приходится считаться с не менее важным обстоятельством — репутацией судостроительной отрасли в глазах мирового общественного мнения. Люди видят черный дым из труб заходящих в порты судов и читают статьи о загрязнении атмосферы продуктами сгорания тяжелого топлива.

Принятие экологических нормативов IMO было продиктовано необходимостью снижения уровня вредных выбросов и желанием дышать чистым морским воздухом. Однако дискуссия об отсрочке ввода в действие IMO Tier 3, в том числе в части, касающейся ограничения содержания серы в тяжелых топливах, нанесла репутации судостроительной отрасли серьезный ущерб, создав впечатление, что промышленники не слишком-то торопятся сделать атмосферу чище.

Получается, что нам приходится думать не только о технологиях снижения вредных выбросов, но и о том, как информировать об этом общественное мнение. Те, кто не работает в промышленности, в большинстве своем не имеет понятия об огромных усилиях, которые предпринимаются, чтобы сделать флот экологически более чистым, и о том, чего удалось в этом направлении добиться. Представители нашей отрасли встречаются на конгрессах, семинарах, симпозиумах и торговых ярмарках, где происходит обмен опытом в области снижения вредных выбросов и ознакомление прессы с результатами работ в данном направлении. Но нам, по-видимому, следует уделять больше внимания тому, как донести эту ин-

формацию до людей, не связанных непосредственно с двигателе- и судостроением, не надеясь на то, что кто-то сделает это за нас. Информировать людей о том, что делается с нашей стороны для того, чтобы двигатели стали экологически более чистыми — вот задача для наших коллег и та область, где СИМАС должен прилагать больше усилий.

*Вопрос:* «Навстречу будущему поршневых двигателей» — таков был лозунг конгресса в Хельсинки. Каково же это будущее?

*Ответ:* Поршневые двигатели будут экологически более чистыми, чем сегодняшние, и будут выбрасывать меньше CO<sub>2</sub>. Они будут снабжены средствами всестороннего мониторинга и автоматической оптимизации рабочих параметров, что позволит снизить стоимость жизненного цикла и снизить нагрузку на операторов. Такая задача потребует интенсивного использования электронных средств контроля и управления, которые при этом должны быть встроены в общую систему контроля и управления обслуживаемого объекта — электростанции, тепловоза или судна.

*Вопрос:* Еще одна тема, которой члены СИМАС уделяют все больше внимания — это системная интеграция, о которой вы только что упомянули. Насколько важен этот фактор для повышения эффективности современных двигателей внутреннего сгорания?

*Ответ:* На протяжении нескольких десятков лет мощные двигатели, когда речь заходила об их оптимизации с точки зрения КПД и надежности, рассматривались как изолированные объекты. Сегодня мы сталкиваемся с необходимостью сочетать снижение вредных выбросов с требованиями снижения выбросов CO<sub>2</sub>, не жертвуя при этом ни стоимостью жизненного цикла, ни надежностью. С точки зрения техники, все упомянутые выше факторы являются до известной степени взаимоисключающими. Поэтому необходимо стремиться к оптимальному сочетанию всех известных на сегодняшний день технологий, как «внутренних», так и «внешних» по отношению к двигателю с учетом технической и экономической целесообразности.

Где-то лет пятнадцать назад в словаре двигателестроителей появилось новое понятие — «интеллектуальный двигатель», подразумевающее использование электронных средств управления, которые тогда начали как раз входить в моду. Сегодня реальным шагом на пути создания интеллектуальных энергетических систем станет интеграция всех наиболее продвинутых технологий в комплексной системе с интеллектуальным управлением и мониторингом. Подобная комплексная система будет способна реализовать весь свой

потенциал при любых условиях эксплуатации, так что в выигрыше окажутся как операторы, так и окружающая среда.

*Вопрос:* Какие тенденции, на Ваш взгляд, сегодня преобладают в таких областях, как главные судовые двигатели, тепловозные двигатели и двигатель-генераторы, а также газовые и двухтопливные двигатели, гибридные силовые установки и альтернативные методы газоочистки?

*Ответ:* В обозримом будущем усилия двигателестроителей будут сосредоточены, в первую очередь, на снижении вредных выбросов. Нормы предельно допустимых вредных выбросов для двигателей всех применений будут только ужесточаться, и в ближайшем будущем эта тенденция не изменится. Как я уже отметил, мы увидим использование целого спектра современных технологий в таких сочетаниях, которые продиктованы требованиями для каждого конкретного применения.

Газовые и двухтопливные двигатели, несомненно, найдут свое место в тех областях, где экологический эффект от замещения жидкого топлива газовым или смешанным очевиден, и при этом создана надежная структура газоснабжения. Чрезвычайно успешное применение двухтопливных двигателей в качестве преобладающего типа привода пропульсивных установок СПГ-газовозов стало первым шагом на пути превращения газа в общепризнанный вид топлива для судовых двигателей как альтернативы мазуту.

Что касается гибридных установок, то они могут стать альтернативой для таких объектов, как буксиры и паромы с коротким плечом перевозок в тех случаях, когда главным требованием является сверхнизкий уровень вредных выбросов, и при этом обеспечена возможность регулярной подзарядки аккумуляторных батарей. Существуют интересные пилотные проекты установок для газопроводов, и я уверен, что в ближайшем будущем их число будет расти. Однако гибридные установки будут все же переходной технологией до тех пор, пока мы не увидим принципиального прорыва в области создания аккумуляторных батарей высокой емкости.

*Вопрос:* Сегодня мы наблюдаем резкое падение цен на нефть, а также снижение производства газа. Как повлияли эти факторы на рыночные перспективы двигателестроения?

*Ответ:* Падение цен на нефть и привело к резкому смещению многих ориентиров. Спад деловой активности в нефтегазовой отрасли нанес двигателестроению всего мира серьезный удар. Из-за падения нефтяных цен газ в качестве альтернативного топлива до некоторой степени утратил свою привлекательность, что на сегодняшний день привело к снижению как спроса, так и предложения в этой области.

Однако в дальнейшем, я думаю, баланс в пользу газового топлива будет восстанавливаться ввиду несомненных преимуществ последнего с точки зрения выбросов NO<sub>x</sub> (окислов азота), SO<sub>x</sub> (окислов серы) и твердых частиц. Так, процесс постепенного вытеснения жидкого топлива газовым будет продолжаться, хотя и несколько меньшими темпами.

*Вопрос:* Каков Ваш рецепт успеха для двигателестроения на сегодня?

*Ответ:* В нашей отрасли путь к успеху двигателестроителей и их поставщиков основывается на нескольких ключевых факторах. А именно, во главе угла по-прежнему должны оставаться вопросы снижения вредных выбросов с помощью комплексных решений, основанных на современных технологиях, не забывая при этом об интересах заказчиков. Чтобы не снижать при этом эффективность, необходима тесная кооперация с исследовательскими центрами, поставщиками компонентов, заказчиками и коллегами. И наконец, нужно внимательно следить за последними достижениями в области информационных технологий и их связи с современными методами проектирования и производства.

Недалеко то время, когда промышленный интернет будет влиять на развитие нашей отрасли гораздо в большей степени, чем мы это можем представить сегодня.

*Diesel Progress International, July–August 2016*

## ОТ ГЕРКУЛЕСА А-В-С К ГЕРКУЛЕСУ-2: ОБРАЗЦОВАЯ СОВМЕСТНАЯ ПРОГРАММА НИОКР В ОБЛАСТИ МОЩНЫХ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Nikolaos Kyrtatos, Национальный Технический  
Университет, Афины  
Gunnar Stiesch, MAN Diesel & Turbo  
Ilari Kallio, Wartsila*

### Реферат

Масштабный исследовательский проект под названием ГЕРКУЛЕС-2, который стартовал в мае 2015 года, является продолжением завершённой в 2014 году программы ГЕРКУЛЕС, посвящённой НИОКР в области создания современных судовых двигателей. Эта программа, начало которой было положено в 2004 году, стала совместным детищем двух крупнейших производителей двигателей данного класса — MAN и WARTSILA.

В период 2004–2014 годов были последовательно реализованы три подпроекта — ГЕРКУЛЕС-А, -В, и -С, суммарный бюджет которых составил более 80 млн евро. Эти три подпроекта продемонстрировали впечатляющие результаты и получили заслуженное признание в мире.

Сейчас в стадии выполнения находится проект ГЕРКУЛЕС-2, цель которого — создание полностью адаптивного мощного судового двигателя, способного к оптимизации рабочих параметров в зависимости от различных внешних факторов. Цели проекта ГЕРКУЛЕС-2 базируются на достижениях проекта ГЕРКУЛЕС и простираются значительно дальше, ориентируясь на превышение показателей лучших мировых образцов двигателей.

Эти цели можно разделить на следующие категории:

➤ Достижение большей универсальности в отношении применяемых топлив (многотопливность), включая нетрадиционные виды топлива, и возможности легкого перехода с одного вида топлива на другое.

➤ Создание новых материалов, способных противостоять высоким температурам и работать при нарушении режима смазки.

➤ Разработка технологий адаптивного управления, обеспечивающих сохранение исходных показателей качества в течение всего срока службы силовой установки.

➤ Снижение вредных выбросов до практически нулевых значений за счет комбинированной очистки отработавших газов.

Главной целью проекта является существенное снижение расхода топлива и уровня вредных выбросов с помощью новейших методов и средств проектирования, а также применения самых современных технологий производства. В ходе

проекта намечено создание нескольких полномасштабных опытных образцов и действующих макетов, способных работать в составе судовой силовой установки.

Для осуществления проекта был образован консорциум из 32 корпоративных участников, из которых 35 % приходится на промышленные компании, а остальные 65 % — на учебные и научно-исследовательские учреждения.

Настоящий доклад содержит обзор достижений предыдущего проекта ГЕРКУЛЕС, перечень технологических проблем, требующих решения, план перехода к целям и рабочим планам текущего проекта ГЕРКУЛЕС-2 и первые результаты, полученные в каждом из выбранных направлений.

### Введение

1990-е годы — период, когда европейское двигателестроение и поставщики комплектующих изделий достигли впечатляющих успехов на мировом рынке и заметно укрепили свое финансовое положение. По окончании периода консолидации, сопровождавшегося приобретениями, слияниями и поглощениями, возникли две промышленные группы — MAN и WARTSILA — владеющие в общей сложности 90 процентами мирового рынка главных судовых двигателей. В результате значительного экономического роста, эти корпорации оказались способны выполнять НИОКР на собственные средства. Вместе с тем возросшая конкуренция между этими группами означала, что им теперь не приходится рассчитывать на совместные проекты с внешним (со стороны Евросоюза-ЕС) финансированием, к чему давно привыкли автомобильные и аэрокосмические гиганты Европы.

Прежние европейские программы НИОКР, а именно, рамочные Программы FP3, 4 и 5 (1990–2002), не предусматривали возможности включить в их состав исследования, посвященные развитию крупных двигателей ввиду отсутствия у представителей данной отрасли общих позиций. В 1998 году при ЕС была образована группа внешних консультантов (EAG — External Expert Advisory Group) в области технологий сухопутных и морских перевозок, перед которой была поставлена задача определить приоритеты НИОКР в этой области. В окончательном отчете EAG, по транспортной политике признавалась стратегическая важность производства крупных двигателей в Европе, что открывало возможность для включения соответствующих НИОКР в рабочий план ЕС FP6. В этом рабочем плане (2002–2006) впервые появилось понятие «комплексных проектов», большой объем и сложность которых позволяли претендовать на существенное финансирование. Впоследствии была создана

структура для организации взаимосвязанных исследований, посвященных решению проблем в области развития крупных двигателей.

Около середины 90-х годов в предверии предстоящего ужесточения мирового экологического законодательства все двигателестроители в мире уже разработали свои программы по созданию дизельных двигателей с пониженным уровнем вредных выбросов, а некоторые из них успели построить и установить на судах действующие макеты установок по очистке отработавших газов. Идея организации крупномасштабных совместных проектов НИОКР в области судового двигателестроения обсуждалась представителями ведущих фирм, работающих в данной отрасли. В 2001 году на Всемирном Конгрессе CIMAC в Гамбурге за образец был взят проект EEFAE (Efficient & Environmentally Friendly Aircraft Engine), разработанный для аэрокосмической отрасли, с целью создания экологически чистого авиадвигателя. Проект был запущен в 2000 году при участии всех основных авиастроительных фирм с бюджетом 100 млн евро, и финансировался Евросоюзом.

В 2002 году топ-менеджеры MAN и WARTSILA приступили к консультациям по поводу разработки общей тематики для включения в программу совместных НИОКР в области судового двигателестроения, что позволило претендовать на поддержку со стороны Евросоюза. В результате в 2003 году была запущена общая программа с бюджетом в 100 млн евро, рассчитанная на 10 лет, в ходе выполнения которой должны быть созданы новые технологии в области строительства главных судовых двигателей.

Программа ГЕРКУЛЕС родилась как результат общего видения проблем двигателестроения, к которому пришли два крупнейших двигателестроительных концерна Европы — MAN и WARTSILA. Это первый случай, когда обе группы приняли участие в совместном проекте, хотя каждая из них продолжала придерживаться собственной стратегии развития своих изделий.

#### **ПРОГРАММА ГЕРКУЛЕС**

Проект ГЕРКУЛЕС ставил своей целью решить три главные проблемы: увеличение КПД, снижение вредных выбросов и повышение надежности двигателей. В 2004 году стартовал проект ГЕРКУЛЕС-А (НИОКР по созданию главных судовых двигателей с высоким КПД и сверхнизким уровнем вредных выбросов). Этот проект стал первым этапом программы ГЕРКУЛЕС. Проект ГЕРКУЛЕС-А (42 корпоративных участника, представляющих промышленность и университеты) с бюджетом 33 млн евро был частично профинансирован Евросоюзом. Проект отличался широким диапазоном иссле-

довательской тематики по разработке методов повышения КПД и снижения вредных выбросов [1].

Вторым этапом программы стал проект ГЕРКУЛЕС-В, длившийся с 2008 по 2011 год, в котором приняли участие 32 организации. Бюджет проекта в размере 26 млн евро также был частично профинансирован Евросоюзом. Конечными целями проекта по-прежнему оставались повышение КПД двигателей и снижение вредных выбросов. На этом этапе, базируясь на результатах проекта ГЕРКУЛЕС-А и найденных ноу-хау, появилась возможность сузить диапазон поиска с тем, чтобы сосредоточиться на тех направлениях, где можно было ожидать прорывных решений.

Проект ГЕРКУЛЕС-С (2012–2015) с 22 участниками и с бюджетом 17 млн евро, который также был частично профинансирован Евросоюзом, стал третьим этапом программы. Он унаследовал ориентацию на сочетание различных технических решений с интенсивным использованием новых технологий, определенных на предыдущих этапах и направленных на оптимизацию рабочего процесса, системную интеграцию, а также на повышение надежности и долговечности двигателей [3].

Текущий проект ГЕРКУЛЕС-2 (32 участника и с бюджетом 25 млн евро), который также частично профинансирован Евросоюзом, нацелен на создание главного судового двигателя будущего, способного полностью адаптироваться к окружающим условиям. Целевые показатели проекта ГЕРКУЛЕС-2 основываются на достижениях предыдущих проектов и должны обеспечить уровни вредных выбросов с запасом по отношению к предельно допустимым значениям, опубликованным в настоящее время. В ходе реализации проекта намечено создание нескольких полномасштабных опытных образцов и действующих макетов, способных работать в составе судовой силовой установки. Ожидается, что ряд найденных решений сможет быть оперативно запущен в серию [5].

Эволюция тематики программы ГЕРКУЛЕС показана на рис. 1. В проекте Hercules-A был рассмотрен широкий спектр технологий, направленных на снижение расхода топлива, выбросов вредных веществ и повышение надежности. По окончании проекта была проведена экспертиза указанных технологий, в результате которой часть из них была признана бесперспективной, в то время как другая часть была отобрана для дальнейшей разработки. В рамках следующего проекта ГЕРКУЛЕС-В различные технологии, сочетания которых могут быть использованы для достижения поставленных задач, были сгруппированы и вошли в последующий проект

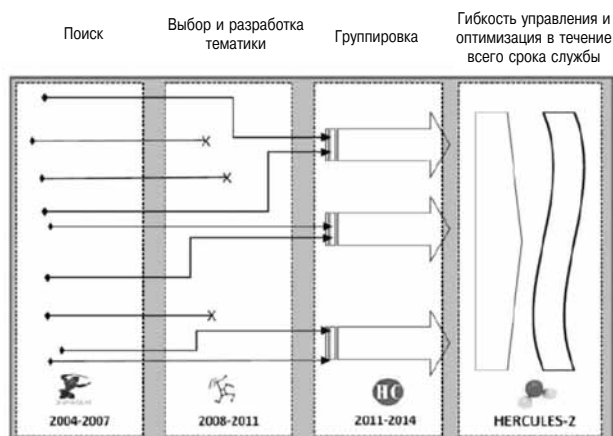


Рис. 1. От HERCULES-A, B, C к HERCULES-2

ГЕРКУЛЕС-С. Текущий проект ГЕРКУЛЕС-2 посвящен вопросам создания адаптивного двигателя при сохранении оптимальных рабочих параметров на протяжении всего срока службы.

**«Социальная инженерия» программы ГЕРКУЛЕС**

Один из важнейших аспектов программы ГЕРКУЛЕС — совместная работа ведущих производителей двигателей, несмотря на их рыночную конкуренцию. Подобная совместная деятельность может рассматриваться как стратегический альянс, или «добровольное соглашение между фирмами об обмене знаниями с целью создания новых технологий или изделий».

Обмен информацией между двумя основными партнерами проекта ГЕРКУЛЕС, представленными постоянной группой топ-менеджеров сначала принял форму совместного определения целей исследований по каждому из отдельных проектов. На этом этапе объединенная группа собирала и рассматривала все предложения исследовательских подразделений обеих компаний. Концепция комплексных проектов, определенная в ЕС-FP6 (Шестая программа Евросоюза для ученых), наилучшим образом подходит для данной цели, поскольку создание двигателей внутреннего сгорания является мультидисциплинарным процессом, охватывающим такие научные направления как термодинамика текущих сред, кинетика горения, материаловедение, автоматизация и управление. При этом предложения различных исследовательских групп внутри одной компании могут быть оптимальным образом объединены в рамках «комплексного проекта». Именно поэтому данная концепция была с готовностью принята фирмами-партнерами, что в немалой степени способствовало успешной реализации проекта. Члены постоянной группы договорились о приоритетных направлениях и собрали предложения исследовательских групп в единый план, сформировав для его финансирования общий бюджет. Далее работа была разбита на

отдельные подпроекты, каждый из которых имел свой бюджет и график выполнения. Постоянная объединенная группа основных партнеров начала поиск внешних соисполнителей по каждому направлению. Поскольку каждый из членов постоянной группы полностью отвечал за работу и полученные результаты, все члены группы были заинтересованы в подборе таких соисполнителей, которые были бы максимально полезны в достижении поставленных целей. Подобный подход гарантирует оптимальную комплектацию рабочих групп и правильность расстановки сил в рамках проекта в целом.

Общее руководство подобным альянсом оказалось непростым делом и потребовало достаточно длительного периода взаимной «притирки». Одной из проблем, с которыми пришлось считаться, были определенные различия в корпоративной культуре основных партнеров. Немалую озабоченность, например, вызывал вопрос, как воспримут коллеги по отрасли явно доминирующее положение создаваемого альянса на рынке. Действительно, в начале совместная работа партнеров сопровождалась определенным дискомфортом. Предметом особых опасений стали права интеллектуальной собственности (IPR — intellectual property rights) в отношении возможных инноваций, а также ряд моментов, связанных с рыночной конкуренцией. Даже на начальном этапе, когда стороны только приступили к определению целей НИОКР и бюджетов, высказывалось беспокойство по поводу возможного разглашения конфиденциальной информации. В конце концов, все подобные проблемы были успешно решены, хотя и не без организационных сложностей. Было составлено соглашение о консорциуме, в котором детально сформулированы правила обращения с IPR. Эти правила обязательны для всех внешних соисполнителей. Все вопросы финансирования, планирования и исполнения работ по программе находятся в ведении координационного комитета, сформированного из членов постоянной объединенной группы. Четко прописанные правила распределения обязанностей и ответственности в большой степени способствовали укреплению доверия к совместному предприятию.

Каждый из проектов сопровождается подробным техническим приложением. После совместного определения целей НИОКР (что для участников само по себе было чрезвычайно важно) оба основных партнера со своими соисполнителями приступали к работе. Несмотря на то что результаты работ по каждой проблеме и по каждому направлению должны быть известны другой группе, в большинстве случаев исследования велись каждым из основных партне-

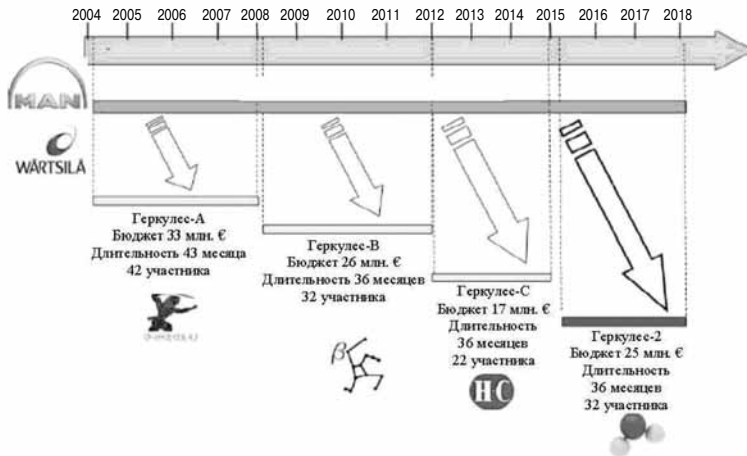


Рис. 2. План-график программы ГЕРКУЛЕС

ров независимо друг от друга. Исключение составили лишь несколько работ в фундаментальных областях, например, трибологии или материаловедении, где было предусмотрено проведение совместных исследований. Таким образом, условие доступности результатов для другого партнера стало очевидным достижением проекта. Подобная прозрачность, а также последующая оценка успеха или неуспеха тех или иных выбранных направлений в значительной степени облегчили для каждого из партнеров долгосрочное бизнес-планирование.

На рис. 2 представлен укрупненный план-график выполнения четырех этапов проекта ГЕРКУЛЕС. Нетрудно заметить, что каждый предыдущий этап естественно перетекает в последующий.

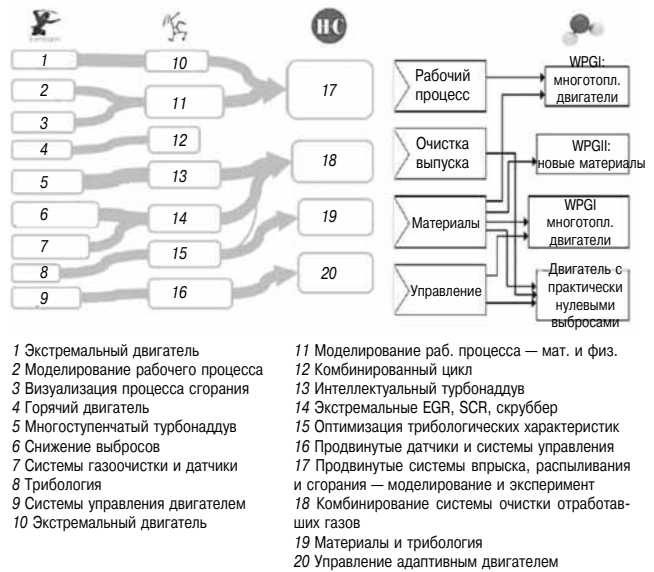
**Проект ГЕРКУЛЕС в цифрах**

Динамика развития проекта ГЕРКУЛЕС и связь между отдельными темами НИОКР проиллюстрированы на рис. 3, из которого видно, что поначалу программа охватывает самый широкий спектр исследовательской тематики, который впоследствии постепенно сужается, в то время как наиболее перспективные направления не только развиваются, но и сочетаются между собой. Далее основные направления исследований, а именно, рабочий процесс, очистка отработавших газов, материалы и системы управления, связываются с теми или иными группами работ по текущему проекту ГЕРКУЛЕС-2.

По результатам трех завершенных этапов — ГЕРКУЛЕС-А, -В, -С - было подано 38 патентных заявок, подготовлена 91 научная публикация. Было создано 49 макетных образцов двигателей и компонентов, часть которых прошла испытания на судах таких крупных операторов, как Nipag-Lloyd, Maersk и Wallenius. В ходе выполнения программы создано 18 продуктов, уже используемых в промышленности и коммерчески поддерживаемых производителям.

Последовательное уменьшение количества макетных образцов (рис. 4) объясняется процессом отбора и консолидации перспективных технологий. На рис. 5 показана эволюция количества работающих образцов. Это количество увеличивается по мере совершенствования созданных новых технологий и их промышленного внедрения. На рис. 6 показана динамика подачи патентных заявок. Большое число заявок, поданных в самом начале, вызвано стремлением своевременно защитить авторские права на разрабатываемые технологии. И наконец, на рис. 7 показано число публикаций по тематике проекта.

Все этапы проекта ГЕРКУЛЕС были частично профинансированы Евросоюзом в рамках программ FP6, FP7 и Horizon H2020, при этом их общий бюджет превысил 100 млн евро. Всего в четырех проектах приняли участие 86 различных организаций. Соотношение партнеров — представителей академических учреждений и промышленности в проекте ГЕРКУЛЕС-А составило 70/30. В проектах ГЕРКУЛЕС-В и ГЕРКУЛЕС-С

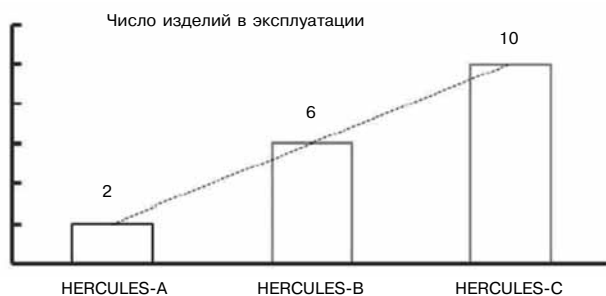


- 1 Экстремальный двигатель
- 2 Моделирование рабочего процесса
- 3 Визуализация процесса сгорания
- 4 Горячий двигатель
- 5 Многоступенчатый турбонаддув
- 6 Снижение выбросов
- 7 Системы газоочистки и датчики
- 8 Трибология
- 9 Системы управления двигателем
- 10 Экстремальный двигатель
- 11 Моделирование раб. процесса — мат. и физ.
- 12 Комбинированный цикл
- 13 Интеллектуальный турбонаддув
- 14 Экстремальные EGR, SCR, скруббер
- 15 Оптимизация трибологических характеристик
- 16 Продвинутое датчики и системы управления
- 17 Продвинутое системы впрыска, распыливания и сгорания — моделирование и эксперимент
- 18 Комбинирование системы очистки отработавших газов
- 19 Материалы и трибология
- 20 Управление адаптивным двигателем

Рис. 3. Связь между НИОКР проекта ГЕРКУЛЕС



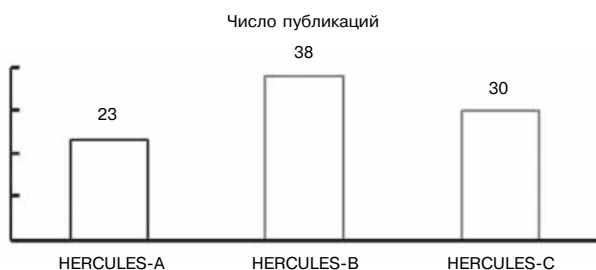
Рис. 4. Количество макетных образцов в проектах ГЕРКУЛЕС



**Рис. 5. Количество изделий, созданных в проектах ГЕРКУЛЕС и находящихся в эксплуатации**



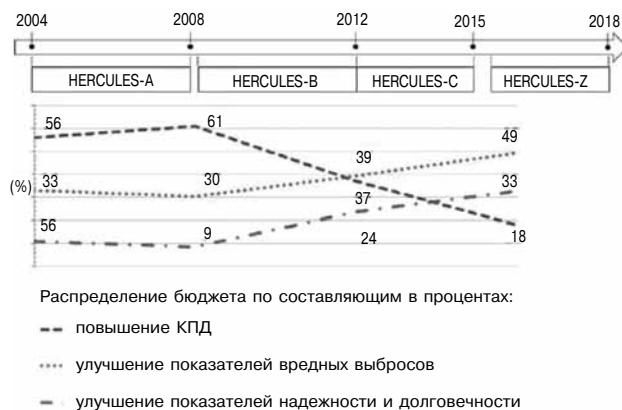
**Рис. 6. Количество патентных заявок, поданных в ходе выполнения проектов ГЕРКУЛЕС**



**Рис. 7. Количество публикаций в ходе выполнения проектов ГЕРКУЛЕС**

это соотношение составило 60/40. Интересно, что в проекте ГЕРКУЛЕС-2 это соотношение вернулось к исходному (70/30), что отражает возросшую роль университетов в данном проекте. Средняя оплата человеко-месяца (общий бюджет, деленный на общее число человеко-месяцев) составила порядка 19,5 тыс. евро для ГЕРКУЛЕС-А, 14,0 тыс. евро для ГЕРКУЛЕС-В и -С, и 12,5 тыс. евро для ГЕРКУЛЕС-2. Подобная динамика отражает начальные затраты на ранних этапах программы, связанных с созданием крупномасштабных опытных стендов и макетированием.

Процентное распределение общего бюджета каждого из четырех проектов программы ГЕРКУЛЕС на весь период 2004–2016 гг. по трем главным темам показано на рис. 8. Процедура распределения бюджета была следующей. Вначале рассматривался подробный бюджет каждого из 189 подпроектов программы, далее рассчитывалось распределение этого бюджета между техническими направлениями каждого подпроекта, затем приближенно оценивался



**Рис. 8. Распределение бюджетных ассигнований по трем основным направлениям НИОКР четырех проектов ГЕРКУЛЕС**

вклад каждого из этих технических направлений в достижение поставленных целей, а именно — требуемых показателей по КПД, вредным выбросам и надежности, и, наконец, подсчитывался суммарный результат по каждому из 4 этапов проекта. Как мы видим, изначально часть бюджета, выделенная на НИОКР, связанных с повышением КПД, была весьма значительной, однако в последующих проектах эта доля постепенно уменьшалась. Последнее было вызвано, главным образом, быстро растущими потребностями в дополнительных ассигнованиях на НИОКР по снижению вредных выбросов, что связано с предстоящим ужесточением экологического законодательства во всем мире. Еще одним фактором, повлиявшим на перераспределение бюджетов, стало уменьшение отдачи от капиталовложений в проект по повышению КПД по мере приближения данного показателя к предельным значениям термодинамического цикла. В последнем проекте программы ГЕРКУЛЕС-2 можно наблюдать рост ассигнований по теме «надежность», что связано с необходимостью интенсификации работ по оптимизации показателей качества двигателя на протяжении срока его службы, вызванной требованиями со стороны конечных пользователей.

#### Достигнутые результаты

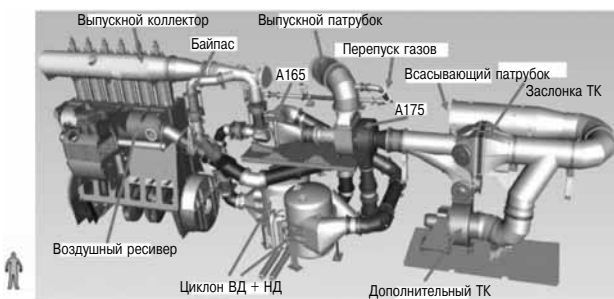
Некоторые из достигнутых к настоящему времени результатов программы ГЕРКУЛЕС выглядят весьма впечатляюще. К 2014 году КПД двигателя увеличился на 3 %, а выбросы  $\text{NO}_x$  снизились на 80 % по сравнению с показателями лучших серийно выпускаемых дизелей; установлен мировой рекорд по уровню максимального давления в цилиндре — 300 бар. Отдельные результаты и достижения завершенных проектов были опубликованы в ряде предыдущих сообщений, например в [4].



Ниже перечислены основные технологии для судовых двигателей будущего, созданные или усовершенствованные в ходе программы ГЕРКУЛЕС:

- многоступенчатый наддув и управляемые фазы газораспределения, что позволяет улучшить параметры рабочего процесса и снизить расход топлива;
- улучшенная приемистость и регулируемый турбокомпрессор с переменной геометрией проточной части, что позволяет повысить экономичность во всем диапазоне рабочих режимов;
- повышение максимального давления в цилиндре и ВМЕР, что позволяет снизить расход топлива;
- автоматическая настройка параметров наполнения цилиндра и оптимизация впрыска с целью улучшения показателей экономичности, надежности и снижения выбросов;
- отключение части цилиндров с целью повышения экономичности;
- регенерация тепла для повышения экономичности;
- селективное каталитическое восстановление (SCR) для очистки отработавших газов от  $\text{NO}_x$ ;
- добавка в топливо воды или впрыск ее в цилиндр для сокращения выбросов  $\text{NO}_x$ ;
- рециркуляция отработавших газов для сокращения выбросов  $\text{NO}_x$ ;
- скрубберы, как средство очистки отработавших газов от  $\text{SO}_2$ ;
- улучшение трибологических характеристик и применение новых материалов для повышения экономичности и надежности.

Построено более 10 стендов для полномасштабных натурных испытаний изделий, реализованных в ходе выполнения проекта ГЕРКУЛЕС. Изображение на рис. 9 позволяет оценить размеры и сложность новых испытательных стендов.



**Рис. 9. Стенд для полномасштабных натурных испытаний полностью регулируемой системы наддува в сочетании с EGR**

**Проект ГЕРКУЛЕС-2**

Приоритеты проекта ГЕРКУЛЕС-2 выбраны с учетом следующих факторов:

- а) растущая доступность альтернативных то-

плив, обеспечивающих улучшение экономических и экологических показателей судов при использовании в многотопливных двигателях;

- б) социальная значимость создания судовых силовых установок с уровнем вредных выбросов, близким к нулю;

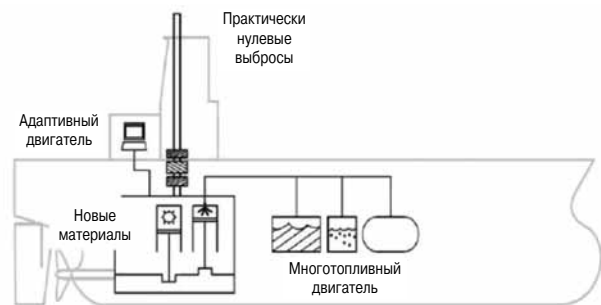
в) важность поддержания оптимальных параметров силовых установок новых судов в течение срока их службы при меняющихся условиях эксплуатации.

Консорциум исполнителей включает 32 участника, из которых 30 % относятся к промышленным компаниям, а остальные 70 % — к учебным и научно-исследовательским учреждениям. Бюджет проекта распределяется между промышленностью и университетами в соотношении 63/37. Две крупнейшие судоходные компании предоставили свои суда для полномасштабных натурных испытаний и в качестве демонстрационных платформ [5].

Проект ГЕРКУЛЕС-2 включает в себя четыре группы НИОКР (WPG):

- WPG I: многотопливный двигатель;
- WPG II: новые материалы (для двигателей);
- WPG III: адаптивная силовая установка, сохраняющая оптимальные параметры двигателя в течение всего срока службы;
- WPG IV: двигатель с практически нулевыми вредными выбросами.

Группы НИОКР схематически представлены на рис. 10.



**Рис. 10. Группы НИОКР программы ГЕРКУЛЕС-2**

Цели проекта ГЕРКУЛЕС-2 представлены в табл. 1. Для каждой группы НИОКР обозначены цели и средства их достижения.

Ниже дается более подробная характеристика каждой из групп НИОКР (WPG — Work Package Groups).

**Группа I. Многотопливный двигатель**

Цель этой группы НИОКР — создание двигателей, способных оперативно переключаться с одного вида топлива на другой. При этом топлива могут быть как обычными, так и альтернативными, различными по качеству и составу. Работа на любом из топлив должна быть мак-

## Программа ГЕРКУЛЕС-2: группы НИОКР (WPG), цели и средства их достижения

WPG	Цель	Средства достижения
Многотопливный двигатель	Плавное и экономичное переключение с одного вида топлива на другой	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Исследование процессов впрыска, воспламенения, сгорания и образования вредных веществ</li> </ul>
	Соответствие всем экологическим нормативам на любом режиме при работе на любом топливе	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Современное испытательное оборудование, включая оптические приборы визуального контроля</li> <li>➤ Новейшие средства измерений — лазерная подсветка, скоростная видеосъемка</li> </ul>
	Уменьшение газообразных и вредных выбросов частиц при работе на определенных видах топлива	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Средства аэрогидродинамического моделирования с учетом кинетики химических реакций</li> <li>➤ Системы топливopодачи с многофазным впрыском и автоматическим управлением</li> </ul>
	Улучшение показателей двигателей при работе на долевых нагрузках	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Полномасштабные испытания и действующие макеты многоцилиндровых двигателей</li> </ul>
Новые материалы	Совершенствование рабочего процесса за счет повышения допустимых тепловых и механических нагрузок	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Изучение свойств новейших интерметаллидов (механических, физических, химических)</li> <li>➤ Повышение термомеханической усталости материалов</li> </ul>
	Обеспечение длительной надежной работы двигателя при меньшей нагрузке/скорости, что позволяет снизить скорость судна в целях экономии топлива	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Совершенствование технологии обработки материалов</li> <li>➤ Изучение процессов термической и механической обработки</li> <li>➤ Выбор наиболее нагруженных компонентов двигателя для испытаний (головка цилиндра, турбокомпрессор)</li> <li>➤ Макетирование опытных компонентов для испытаний</li> </ul>
	Повышение надежности и долговечности двигателя	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Установка опытных компонентов на двигателях для испытаний</li> </ul>
Адаптивная ССУ с оптимальными параметрами в течение всего срока службы	Оптимальные показатели в течение всего срока службы	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Средства управления функциями адаптивности и самообучения на базе прогнозирующих моделей</li> </ul>
	Снижение эксплуатационных расходов за счет оптимизации режимов	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Контроллеры множественных входов/выходов</li> <li>➤ Онлайн-мониторинг с использованием новейших дополнительных датчиков</li> <li>➤ Диагностика в режиме реального времени</li> </ul>
	Снижение расхода топлива в переходных процессах	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Программные средства интеллектуального поиска и анализа отказов</li> <li>➤ Программные средства оценки рабочего состояния и износа компонентов</li> </ul>
	Общая экономия топлива при нормальной работе	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Инструменты для оптимизации рабочих параметров (офлайн) в течение всего срока службы двигателя</li> <li>➤ Датчики для мониторинга трибологических параметров в реальном времени</li> </ul>
	Усовершенствованная система смазки, снижающая расход масла и количество вредных выбросов (HC, CO, PM, NO <sub>x</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Полномасштабные испытания оптимизированных систем смазки цилиндров</li> <li>➤ Электронные исполнительные устройства для модернизации двигателей с механическим управлением</li> <li>➤ Разработка и внедрение программного обеспечения для работы двигателей без обслуживания</li> <li>➤ Создание полномасштабных действующих макетов</li> </ul>
	Встраивание системы очистки отработавших газов в конструкцию сверхкрупных двигателей	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Системы SCR высокого давления</li> <li>➤ Виброустойчивые катализаторы</li> </ul>
Двигатель практически с нулевыми выбросами	Сочетание SCR и DPF для крупных 4-тактных двигателей	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Системы автоматического измерения и контроля выбросов</li> <li>➤ Оптимизация двигателей по расходу топлива и вредным выбросам</li> <li>➤ Макетный образец каталитического покрытия для системы SCR на подложке DPF</li> </ul>
	Встраивание системы улавливания утечек метана в конструкцию 4-тактных двигателей	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Деактивация и регенерация катализаторов</li> <li>➤ Восстановители, оптимальный впрыск, испарение, реформинг, анализ и эксперименты</li> </ul>

симально экономичной, а показатели вредных выбросов должны соответствовать нормативам для всех регионов плавания. Должна быть проверена работа двигателя на различных биотопливах, DME, метаноле, LNG, LPG, а также на стандартных топливах HFO и MDO в сочетании с альтернативными.

Чтобы обеспечить возможность эффективной работы на самых разнообразных топливах, необходимо более глубокое понимание процессов воспламенения, сгорания и образования вредных веществ при горении новых топлив в чистом виде или в смеси. Для этого разработаны специализированные испытательные стенды с визуализацией и оптическим контролем параметров впрыска и горения (см. рис. 11), варьируемых в широких пределах. Эти стенды будут использованы в фундаментальных экспериментальных исследованиях соответствующих систем для мало- и среднеоборотных двигателей.

При проведении исследований будут разработаны и использованы приборы, основанные на применении высокоскоростной видеосъемки с лазерной подсветкой. Одновременно, основываясь на экспериментальных результатах, будут создаваться и/или адаптироваться программные средства, в том числе методы аэрогидродинамического моделирования, предназначенные для углубленного изучения процессов впрыска, развития факела воспламенения и образования вредных веществ. Ставится задача разработки новых способов управления, в том числе с использованием замкнутых систем регулирования, которые позволят в максимальной мере использовать потенциальные преимущества новых топлив и топливных смесей. Разработанные многоцелевые системы впрыска топлива для судовых двигателей вместе с соответствующими системами и алгоритмами управления будут использованы в действующих макетах многоцилиндровых двигателей, при испытаниях на одноцилиндровых отсеках, оборудованных средствами

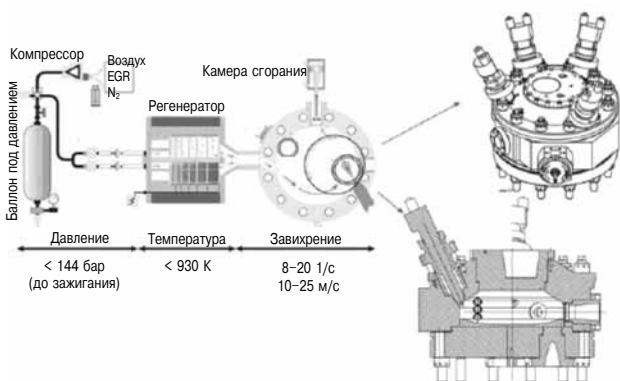


Рис. 11. Стенд для экспериментальных исследований камер сгорания двухтактных двигателей

оптического контроля, а также при испытаниях действующих макетов многоцилиндровых двигателей.

**Группа II. Новые материалы (применение в двигателях)**

Эта группа НИОКР направлена на изучение и использование новых композитов — интерметаллидов и чугунов — в качестве конструкционных материалов для изготовления наиболее ответственных компонентов двигателя, таких как головка цилиндра, блок-картер или корпус турбокомпрессора.

Новые материалы сделают возможным создание компонентов, способных выдерживать высокие температуры и механические нагрузки, что открывает путь к дальнейшему повышению КПД и снижению вредных выбросов за счет более эффективной организации рабочего процесса. Кроме того, расширяются области рабочих режимов судовых двигателей, что увеличивает диапазон выбора скорости плавания для коммерческих судов. Высокая износоустойчивость интерметаллидов позволит увеличить надежность и срок службы этих компонентов.

Работа началась с изучения механических, физических и прочностных характеристик выбранных интерметаллидов и сплавов, а также изучения их усталостной прочности под воздействием тепловых и механических нагрузок, что по-



Рис. 12. Исследование новых конструкционных материалов для головки цилиндра и корпуса турбины

зволит создавать материалы с заданными свойствами. Будут исследованы возможности совмещения различных технологий термической и механической обработки подобных материалов и, при необходимости, доработки этих методов применительно к производству высоконагруженных компонентов двигателя (рис. 12). Компоненты двигателя из новых материалов будут испытаны на лабораторных установках и опытных двигателях.

### Группа III. Оптимизация рабочих параметров двигателя в течение срока службы

Данная группа НИОКР направлена на разработку систем, методов и технологий, обеспечивающих длительную эксплуатацию силовой установки с оптимальными параметрами на протяжении всего срока ее службы, а также снижение эксплуатационных расходов и затрат на техобслуживание. Предполагается расширить диапазон эффективной работы оборудования для снижения вредных выбросов, включая долевые режимы. Разработка инновационных (адаптивных) систем подачи смазки, а также раннее обнаружение потенциальных отказов с помощью новых диагностических методов позволит снизить эксплуатационные расходы и уровень вредных выбросов. Алгоритмы управления, основанные на моделировании прогноза, будут способствовать улучшению динамических характеристик. Можно также ожидать повышения КПД в переходных процессах в течение срока службы двигателя за счет оптимизации параметров адаптивного управления и выбора рабочих точек.

Планируется создание нового контроллера множественных входов/выходов, работающего на основе упреждающего анализа и использующего алгоритмы адаптации и самообучения. Эта задача будет решена с помощью программного обеспечения для обнаружения отказов и анализа/оценки рабочего состояния и износа деталей двигателя. Указанные средства управления бу-

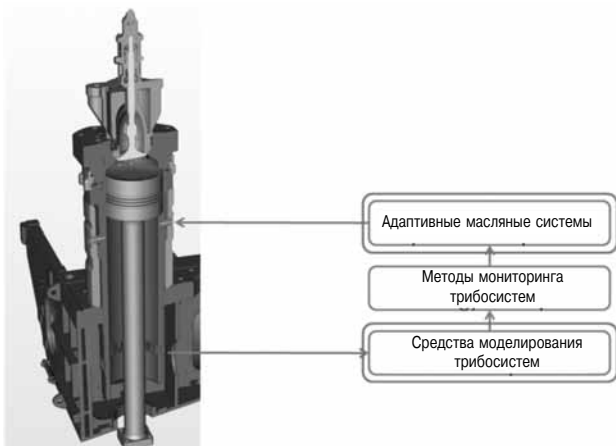


Рис. 13. Разработка гибкой системы смазки

дут использоваться не только на установившихся, но и на переходных режимах, при маневрировании, при работе системы EGR, при изменении качества топлива, и т. д. покрывая таким образом весь возможный диапазон рабочих режимов двигателя.

Применение данной концепции управления к двухтактным двигателям требует дальнейшего развития трибосистем. Исследование и валидация систем подачи смазки на основании моделирования прогноза, а также разработка новых датчиков для мониторинга в реальном времени состояния трибосистем позволит создать новые системы подачи смазки, которые будут протестированы в полном объеме (рис. 13).

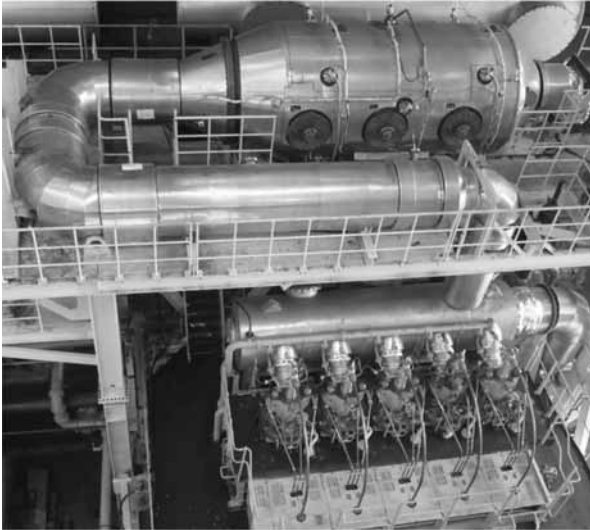
Параллельно в порядке модернизации разрабатывается исполнительное устройство с электронным управлением для замены механического регулятора скорости, что позволит приступить к постепенной модернизации парка существующих дизелей с механическим управлением.

### Группа IV. Двигатель с практически нулевыми выбросами

Цель этой группы НИОКР — радикальное снижение выбросов  $\text{NO}_x$ , твердых частиц (PM) и парниковых газов (GHG — Greenhouse gases) как первый этап создания двигателя практически с нулевыми выбросами («Near-Zero emissions engine»).

Работа по созданию 4-тактных двигателей, оборудованных системами SCR и DPF, включает технико-экономическое обоснование, моделирование процесса подачи восстановителя, его испарение и гидролиз для получения газообразного  $\text{NH}_3$ , разработку алгоритма управления, системы дозирования восстановителя и датчиков для замкнутой системы автоматического регулирования подачи. Будут исследованы возможности создания нового катализатора SCR, который, по сравнению с используемыми в настоящее время, был бы дешевле, эффективнее и не столь чувствителен к присутствию серы и других каталитических ядов. Планируется разработка технологии покрытия подложки DPF-фильтров активными материалами для организации SCR-процесса, а также методы преобразования мочевины в аммиак при повышенном давлении. Экспериментальная проверка данных технологий будет выполнена на специализированных стендах, а именно на стенде, предназначенном для отработки впрыска, испарения и гидролиза мочевины, а также для фильтрации PM и сажи. Данная работа будет проведена с использованием системы измерения выбросов  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NH}_3$  и PM, которая пройдет полномасштабную проверку на дизельных стендах.

Параллельно будет разработана встроенная система сбора утечек метана (с помощью ката-



**Рис. 14. Система SCR высокого давления для экспериментального 2-тактного двигателя, установленная перед турбокомпрессором**

лизатора окисления) для 4-тактного газового двигателя, работающего на бедной смеси.

Для 2-тактных двигателей будет рассматриваться вариант системы SCR высокого давления, установленной перед турбокомпрессором.

Поскольку система SCR высокого давления встроена в конструкцию существующего двигателя, первостепенное значение приобретают вопросы вибростойкости и устойчивости к загрязнению катализаторов частицами. Совместно с поставщиками катализаторов будут проведены исследования по созданию вибростойких каталитических модулей, которые будут затем проверены в работе на двигателях (рис. 14). Сначала будет определен чистый фактический профиль вибрации в судовых условиях, после чего на судах будут испытаны опытные образцы вибростойкого ката-



**Рис. 15. Стенд для испытаний форсунок для впрыска восстановителя и смешивания его с потоком горячих отработавших газов**

лизатора SCR. Будут разработаны и экспериментально проверены датчики выбросов  $\text{NO}_x$  для прецизионного управления впрыском аммиака/мочевины и для исключения утечек аммиака, а также разработаны и экспериментально проверены соответствующие методы измерения.

#### **Заключение**

Свидетельством эффективности любого альянса, как правило, является его долговечность. Проект ГЕРКУЛЕС как альянс, основанный в 2004 году и доживший до наших дней, следует признать весьма успешным. При переходе от предыдущего этапа проекта к последующему область поисков претерпевала определенные изменения, охватывая новые направления. Такие изменения учитывают преобладающие в данный момент тенденции и потребности рынка, а также необходимость дальнейшего развития разработанных ранее технологий. Речь идет о сотрудничестве в области НИОКР между рыночными конкурентами (и их поставщиками), с одной стороны, и университетами, с другой стороны. В то время как первые в силу естественных причин более консервативны и ориентированы, главным образом, на постепенные инновации ограниченного характера, вторые (т. е. учебные заведения), как обладатели специальных знаний в той или иной области, ориентированы на инновации более радикального характера. Организация руководства проектами постоянно совершенствовалась таким образом, чтобы можно было эффективно управлять решением множества исследовательских и административных задач, в то же время не прекращая взаимодействия с грантодателями. Показатели качества завершенных проектов свидетельствуют о том, что работа была весьма продуктивной. Некоторые результаты НИОКР уже реализованы в серийных изделиях, доступных для заказа.

#### **Литература**

1. Kyrtatos N., KLEIMOLA M. & Marquard R. (2007). «The ГЕРКУЛЕС Project: A major R&D effort for marine engines of high efficiency and low emissions», 25th CIMAC Congress, Vienna.
2. Kyrtatos N., Hellberg L. & Poensgen C. (2010). «ГЕРКУЛЕС-B: The continuation of a major R&D effort towards the next — generation marine diesel engines», 26th CIMAC Congress, Bergen.
3. Kyrtatos N., Hellberg L. & Poensgen C. (2013). «Ten Years After: Results from the Major Programme ГЕРКУЛЕС A-B-C on Marine Engine R&D», 27th CIMAC Congress, Shanghai.
4. Kyrtatos N. (2014). «ГЕРКУЛЕС-1: The long term (2004–2014) R&D programme on large engine technologies for ships», 5th Transport Research Arena, Paris.
5. <http://www.hercules-2.com>

## ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТУРБОНАДУВА ДЛЯ НОВОГО ДВИГАТЕЛЯ Д500 ОАО «КОЛОМЕНСКИЙ ЗАВОД»

*Pierre Jacoby, Markus Laaksonen,  
ABB Turbo Systems  
Валерий Рыжов, Василий Кнельц,  
ОАО «Коломенский завод»*

### Реферат

В течение нескольких последних лет ОАО «Коломенский завод», одно из главных предприятий-производителей дизелей в России, работало над созданием совершенно новой платформы Д500, удовлетворяющей требованиям отечественных заказчиков. Двигатель Д500 представляет собой среднеоборотный дизель, работающий на дистиллятном топливе со средним эффективным давлением (ВМЕР) 25,8 бар при 1000 об/мин. Двигатель разрабатывался, главным образом, в качестве тепловозного, однако планируется разработка главного судового и дизель-генераторного вариантов. Двигатель, должен быть поставлен на производство в 2016 г. По содержанию вредных выбросов он соответствует экологическим нормативам ближайшего будущего. Параллельно фирма АВВ вела разработку версии турбокомпрессора типа ТРР, оптимизированной для тепловозного варианта данного двигателя. Турбокомпрессор ТРР является рекордсменом по надежности, термодинамическим и механическим параметрам. Его конструкция может быть дополнена модулем VTG— регулирующим устройством, которое значительно расширяет возможности системы турбонадува. Основная часть доклада посвящена тому, как удалось сбалансировать необходимые технические характеристики двигателя и системы наддува, чтобы обеспечить конкурентоспособность изделий и удовлетворить требования, вытекающие из специфики каждого конкретного применения. В докладе освещены различные этапы выполнения данного проекта, в том числе результаты моделирования, стендовых, заводских и прямо-сдаточных испытаний.

### Введение

Состояние железнодорожного транспорта — один из важнейших показателей экономического развития страны или целого географического региона. Вложения в строительство железных дорог как одного из главных средств коммуникации способны обеспечить экономический рост и процветание огромных территорий. Протяженность железных дорог в мире сегодня составляет порядка 1,3 млн километров. Примерно четверть из них электрифицирована. Остальные три четверти обслуживаются тепловозами. По приблизительным подсчетам [1] мировой тепловозный парк насчитывает около 120 000 ед., несмотря на то что в ряде областей (таких как, например,

внутригородские линии или высокоскоростные магистрали) использование тепловозной тяги, по понятным причинам, исключается. Тем не менее, например, в Северной Америке, России, Китае и Индии на железные дороги приходится от 25 до 50 % грузовых перевозок, причем основная часть большегрузных составов работает на тепловозной тяге.

Необходимым условием существования железных дорог является прибыльность перевозок. Помимо того, что железным дорогам приходится конкурировать с другими видами транспорта, их деятельность регламентируется многочисленными нормативными документами, касающимися, например, вопросов безопасности и экологии. Кроме того, приходится учитывать специфику местного рынка. Действуя в рамках существующего законодательства, в том числе экологического, операторам железных дорог приходится постоянно стремиться к повышению производительности труда. Анализируя рынки четырех крупнейших железнодорожных регионов мира — Северной Америки, России, Китая и Индии — можно отметить, что основные требования к материальной части всюду одинаковы, и сводятся они к следующему:

- надежность и ресурс;
- эффективность и приемистость;
- соответствие действующим нормативным документам;
- эксплуатационная готовность.

В то же время существует ряд условий, продиктованных местной спецификой. К ним, в частности, относятся:

- высота над уровнем и температурный диапазон (табл. 1);
- уровень вредных выбросов (табл. 2);
- регламент техобслуживания;
- нагрузка на ось и ширина колеи;
- работа в тоннелях и в условиях пустыни.

Неизбежные при создании новой техники концептуальные компромиссы, например, силовой установки или турбокомпрессора, будут для одного и того же изделия выглядеть по-разному,

Таблица 1

### Примеры требований по климатике для разных географических регионов

	Китай	Индия	Россия	США
Высота над уровнем моря, макс, м	2500	1000	1700	2500
Максимальная температура окружающей среды, °С	50	50	45	50
Минимальная температура окружающей среды, °С	-45	-10	-50	-10
Типичная максимальная абсолютная влажность, г/кг	20	25	12	15

Таблица 2

**Действующие нормативы вредных выбросов для магистральных тепловозов в ЕС, США и России**

Норматив	Ввод в действие, год	NO <sub>x</sub>	HC	CO	PM
		г/кВт·ч			
UIC II	2003	9,9	0,8	3	0,25
EURO IIIA / UIC III	2009	7,4	0,4	3,5	0,2
EURO IIIB	2012	4*	—	3,5	0,025
EPA Tier 4**	2015	1,3	0,14	—	0,03
ГОСТ (Россия)	2000	12	1	—	—
ГОСТ (Россия)	(не опр.)	Аналогично EURO III			

\* — «NO<sub>x</sub>»= NO<sub>x</sub> + HC;

\*\* — нормы приведены в г/л. с.ч.

Испытательный цикл, программа и методика испытаний — по ИСО 8178-4F, за исключением EPA: 40 CFR 1065

в зависимости от местных условий. Дело в том, что режимы работы тепловоза по-прежнему во многом определяются местной спецификой.

Главная задача настоящего доклада — показать, как на базе существующей серии TPR создается современный турбокомпрессор, отвечающий требованиям применения на новом дизеле Коломенского завода Д500, который предназначен для работы на российских железных дорогах в самых тяжелых условиях.

**Двигатель Д500,**

**разработанный Коломенским заводом**

Двигатель Д500 — это совершенно новая модель, создаваемая в 12-, 16- и 20-цилиндровом исполнении. Двигатель предназначен для использования в качестве тепловозного и судового, а также в составе стационарных дизель-генераторов. 12-цилиндровый вариант (рис. 1) создавался специально для тяжелых магистральных тепловозов с большой тягой, рассчитанный на вождение составов весом до 12 000 тонн по железным дорогам Сибири и Дальнего Востока, а также по



Рис. 1. Двигатель 12Д500

Таблица 3

**Основные параметры двигателя Д500**

Параметр	Значение	
Цилиндровая мощность, кВт	368	
Рабочий объем цилиндра, л	17,09	
Номинальная мощность двигателя, кВт	12 (V)	4416
	16 (V)	6200
	20 (V)	7360
Скорость двигателя, об/мин	1000	
Средняя скорость поршня, м/с	10,3	
Среднее эффективное тормозное давление, бар	25,8	
Межремонтный интервал (с переборкой двигателя), ч	30 000	
Межремонтный интервал (капитальный ремонт), ч	60 000	

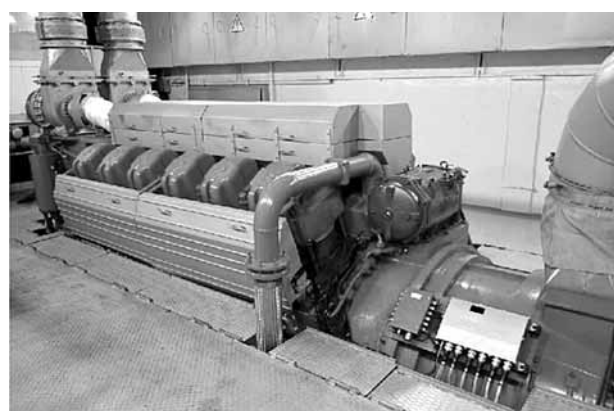


Рис. 2. Дизель-генератор 12LDG500 с двумя турбокомпрессорами TPR56-F на стенде Коломенского завода

участкам со сложным профилем пути. Высокие значения мощности и тяги позволят увеличить среднюю эксплуатационную скорость тяжелых локомотивов на 30–50 %. Новый двигатель отличается модульной конструкцией, компактностью и высокой удельной мощностью. Еще одна характерная его особенность — исключительно высокое для тепловозной машины значение среднего эффективного давления (BMEP), что должно обеспечить возможность работы практически при любых внешних условиях. Последнее условие, с учетом необходимости работы в широком диапазоне скорости при любых значениях крутящего момента, означает особо высокие требования к параметрам модуля турбонаддува. Поэтому в турбокомпрессоре использована турбина переменной геометрии (VTG), которая, как показала практика, способна обеспечить выполнение этих требований.

Основные параметры двигателя приведены в табл. 3. На рис. 2 показан один из первых опытных двигателей. В нем используются два турбокомпрессора АВВ типа TPR56-F с VTG, тогда

как в 16- и 20-цилиндровом вариантах в настоящее время используются по два турбокомпрессора АВВ типа ТРР61-F с фиксированной геометрией проточной части.

#### Турбокомпрессор АВВ серии ТРР

Турбокомпрессор АВВ серии ТРР предназначен специально для тепловозных двигателей. Турбокомпрессор выпускается в двух типоразмерах — ТРР 56-F и ТРР 61-F, которые вместе покрывают весь диапазон мощности тяжелых среднеоборотных дизелей для тепловозов, обычно применяемых для магистральных перевозок. В агрегате используется сплошное (без центрального отверстия) колесо компрессора, подшипник скольжения и турбинное колесо с монолитным облопачиванием, заключенное в жесткий и прочный корпус. Более подробно конструкция турбокомпрессора описана в [2]. Серия ТРР была поставлена на производство в 2001 г. и с тех пор неоднократно обновлялась с целью расширения области применения. Модернизация турбокомпрессоров была направлена на:

- повышение их надежности;
- улучшение технических показателей;
- повышение универсальности.

#### Надежность

Исходя из опыта эксплуатации различных типов турбокомпрессоров во всевозможных условиях, фирма АВВ при создании платформы ТРР стремилась прежде всего обеспечить ее надежность при длительных циклических нагрузках, свойственных работе тепловозного двигателя. Несмотря на то, что при постановке каждого нового изделия на производство проводятся самые тщательные и всесторонние испытания, самым убедительным доказательством правильности выбранных решений являются результаты интенсивной эксплуатации в реальных условиях. На рис. 3 и 4 показаны результаты работы турбокомпрессоров ТРР61-F на дальнемагистральных тепловозах за все время их эксплуатации в Индии. Общий пробег тепловозного парка в этой стране, насчитывающего более 2200 ед., составляет несколько тысяч лет. При этом наработка некоторых турбокомпрессоров серии ТРР превысила 60 000 часов без замены узлов и деталей. Стоит отметить, что сами турбокомпрессоры не претерпели сколько-нибудь серьезных конструктивных изменений, а единственным видом техобслуживания для них была плановая профилактика.

Обширный опыт эксплуатации турбокомпрессоров был накоплен за время работы на двигателях АLCO 16V. Этими двигателями оборудованы тепловозы, используемые в Индии в качестве как грузовых, так и пассажирских, работающие в типичных для этой страны условиях — преимуще-

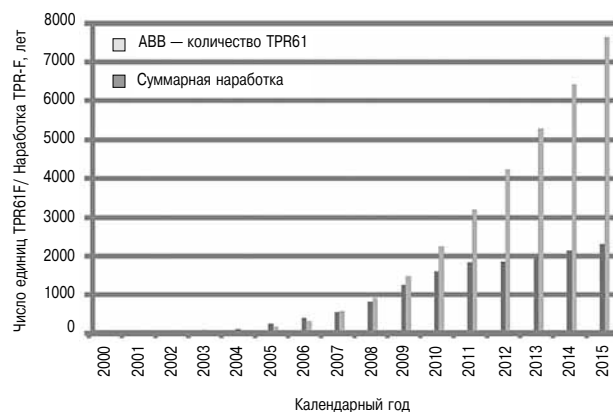


Рис. 3. Сводные данные по результатам эксплуатации парка ТРР61-F в Индии

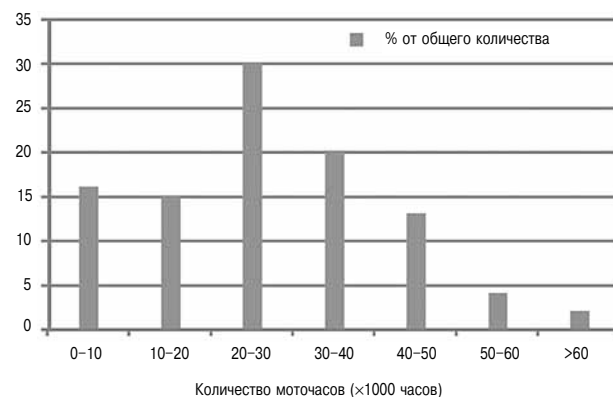


Рис. 4. Диаграмма распределения ТРР61-F по наработке в составе тепловозного парка в Индии

ственно жаркий климат, отсутствие значительного перепада высоты и длинных тоннелей.

За последние два года турбокомпрессоры ТРР56-F постепенно вводились в эксплуатацию в Китае на тепловозах НХN3b и НХN5b с электропередачей. К концу 2015 г. количество таких машин составило порядка 730 единиц, примерно 420 из которых оборудованы турбокомпрессорами с VTG. На китайских дорогах турбокомпрессоры ТРР работают в крайне тяжелых условиях, вызванных большими перепадами температуры и высоты. Так, перепад между зимней и летней температурами в Северном/Южном Китае может достигать почти 100 °С, а высота (например, на Тибетском плато) может превышать 5000 м над уровнем моря. Что касается работы в тоннелях, то этот опыт можно будет получить, в первую очередь, в России, когда дизель-генератор 12ЛДГ500 будет поставлен на линию, идущую вокруг озера Байкал, где есть 16-километровый тоннель.

Изучение опыта эксплуатации будет продолжено, хотя уже имеющиеся данные в достаточной мере подтверждают надежность конструкции ТРР.



**Технические показатели**

Что касается технических показателей, то серия TPR должна оцениваться не только с точки зрения термодинамики, но и с точки зрения механической прочности и надежности.

Следует отметить, что существуют три модификации турбокомпрессора [3], обеспечивающие разную величину степени повышения давления (PIV) (рис. 5). Компрессор с PIV = 3,8 отличается повышенной пропускной способностью и предназначен преимущественно для модернизации существующих изделий. Турбокомпрессор с PIV = 4,8 предназначен для новых двигателей, к которым предъявляются умеренные требования в отношении рабочих параметров и показателей вредных выбросов. Недавно созданный компрессор с PIV = 5,8 предназначен для форсированных двигателей и ориентирован на транспортные средства, работающие на большой высоте и/или там, где к показателям вредных выбросов предъявляются повышенные требования. Для увеличения ресурса компрессорной ступени она снабжена системой воздушного охлаждения. Колесо компрессора изготовлено из алюминиевого сплава.

В условиях, когда к параметрам воздухообеспечения предъявляются еще более высокие требования, планируется применение двухступенчатого наддува на основе платформы TPR. Переход к двухступенчатому наддуву требует конструктивных изменений, особенно в ступени высокого давления. Поскольку фирма АВВ уже накопила значительный опыт при создании системы двухступенчатого наддува Power2 [4], имеющиеся ноу-хау будут применены в ТКР для тепловозных двигателей.

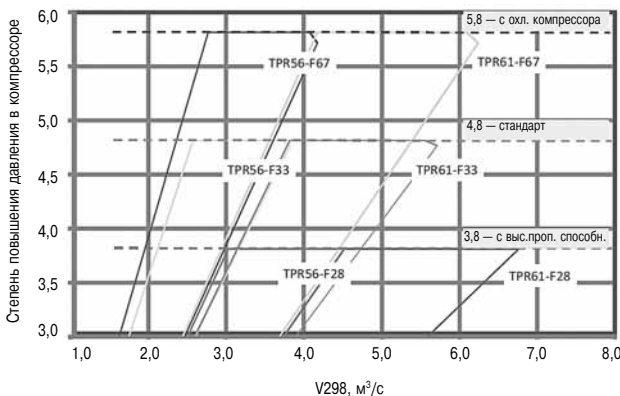
Что касается механической прочности, то конструкция турбокомпрессора не позволит осколкам разлететься даже в случае поломки его внутренних компонентов. Конструкция отличается высокой жесткостью и имеет собствен-

ную частоту 120 и 100 Гц (для моделей TPR56 и 61 соответственно), что делает резонанс маловероятным при работе на двигателе с частотой вращения 1000 об/мин. Опора турбокомпрессора должна выдерживать уровень вибрации, типичный для эксплуатационных условий, а также ударную нагрузку, возникающую при жесткой сцепке вагонов между собой и с тепловозом.

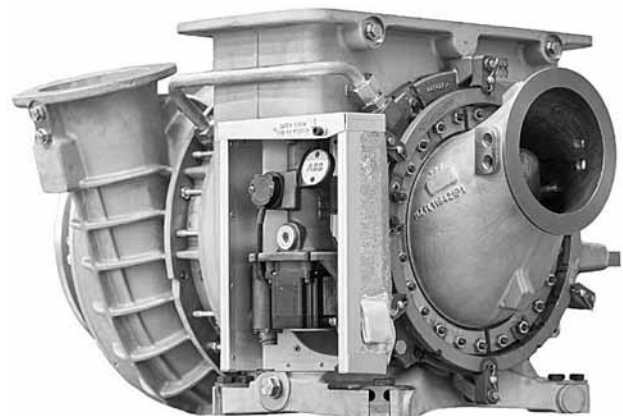
Надежность конструкции — важнейшее условие для минимизации стоимости жизненного цикла изделия. Фактический профиль нагрузки локомотива и число циклов нагрузки имеют первостепенное значение для оценки воздействий, которым вращающиеся части подвергаются в процессе эксплуатации. Ресурс подшипника в значительной степени определяется числом пусков и остановов, а также качеством фильтрации смазочного масла. В настоящее время АВВ разрабатывает методы оценки влияния эксплуатационного износа на оставшийся срок службы наиболее напряженных компонентов. Фирма АВВ в качестве сервиса предлагает для семейства TPR агрегатный ремонт, когда турбокомпрессор, подлежащий ремонту, заменяется на аналогичный из обменного фонда.

**Гибкость**

Как уже упоминалось, для тепловоза характерна высокая цикличность нагрузки, при изменении внешних условий в широких пределах. Помимо широкой номенклатуры типов компрессора, элементов настройки и диффузоров на воздушной стороне, а также различных сочетаний угла установки лопаток и проходного сечения соплового аппарата на газовой стороне, фирма АВВ для турбокомпрессоров серии TPR разработала уникальное устройство, повышающее гибкость управления наддувом — турбину переменной геометрии (VTG — Variable Turbine Geometry). Подробное ее описание и результаты стендовых испытаний приведено в [3]. В Китае были



**Рис. 5. Зависимость степени повышения давления от расхода для компрессоров серии TPR**



**Рис. 6. Турбокомпрессор TPR56-F с VTG для дизелей R12V280ZJ и 12V265ZJ, серийно выпускаемых компанией CRRC в Китае**

разработаны технические требования к системе VTG на базе турбокомпрессора TPR56-F (рис. 6), в целях повышения приспособляемости к меняющимся рабочим условиям и снижения расхода топлива.

К концу текущего года планируется начать установку VTG на турбокомпрессорах типоразмера TPR61-F, что позволяет охватить все типы среднеоборотных (MS) тепловозных дизелей.

Из этого краткого обзора следует, что турбокомпрессор серии TPR в существующем виде оптимален для среднеоборотных тепловозных двигателей, и может стать базой при создании новых моделей, отличающихся более высокими показателям и/или увеличенным ресурсом, а также модулей двухступенчатого наддува.

#### Дизели, использующие цикл Миллера

Охлаждение наддувочного воздуха — проверенное средство для снижения выбросов  $\text{NO}_x$ , расхода топлива, а также тепловой нагрузки на компоненты двигателя.

Цикл Миллера — один из способов дальнейшего снижения температуры в цилиндре двигателя. В «раннем» варианте цикла Миллера впускной клапан на такте всасывания закрывается до момента достижения НМТ поршнем. Этот эффект сопровождается расширением воздушного заряда внутри цилиндра, что приводит к снижению его температуры. Цикл Миллера, по сравнению с обычным, требует повышенного давления наддува во избежание снижения КПД

дизеля. Рабочий процесс на основе цикла Миллера подробно рассмотрен в [5, 6].

При использовании цикла Миллера эффективный коэффициент наполнения цилиндра снижается. Коэффициент наполнения может использоваться как параметр, характеризующий «степень Миллера». Коэффициент наполнения — это масса свежего заряда, остающегося в цилиндре до начала горения, деленная на массу свежего заряда, соответствующего рабочему объему при условиях во впускном ресивере.

Величина коэффициента наполнения может быть определена только с помощью моделирования. Для существующих двигателей в случае снижения коэффициента наполнения до 0,6 используется двухступенчатый наддув. Для двигателей, не использующих цикл Миллера, величина этого параметра близка к единице.

Охлаждающий эффект цикла Миллера зависит от коэффициента наполнения. Изменение температуры воздушного заряда в цилиндре в зависимости от коэффициента наполнения при постоянных значениях температуры воздуха в ресивере показано на рис. 7. Там же приведены значения температуры конца сжатия, требуемого повышения давления наддува и ожидаемого снижения содержания  $\text{NO}_x$ .

Снижение температуры воздушного заряда способствует уменьшению расхода топлива и выбросов  $\text{NO}_x$  до тех пор, пока температура сжатия достаточна для воспламенения смеси. Обычно для дизельного топлива температура порядка 600 °C в момент начала впрыска бывает достаточно.

температуры порядка 600 °C в момент начала впрыска бывает достаточно.

#### Дизель типа Д500 Коломенского завода в составе дизель-генераторного агрегата 12ЛДГ500

Дизель-генератор 12ЛДГ500 Коломенского завода предназначен для тяжелых магистральных локомотивов, например двухсекционный тепловоз 2ТЕ25КМ, используемый в настоящее время на российских железных дорогах. Климат в регионах предполагаемой эксплуатации преимущественно резко континентальный, с большими перепадами температур (см. табл. 1). Тепловозный двигатель должен развивать полную

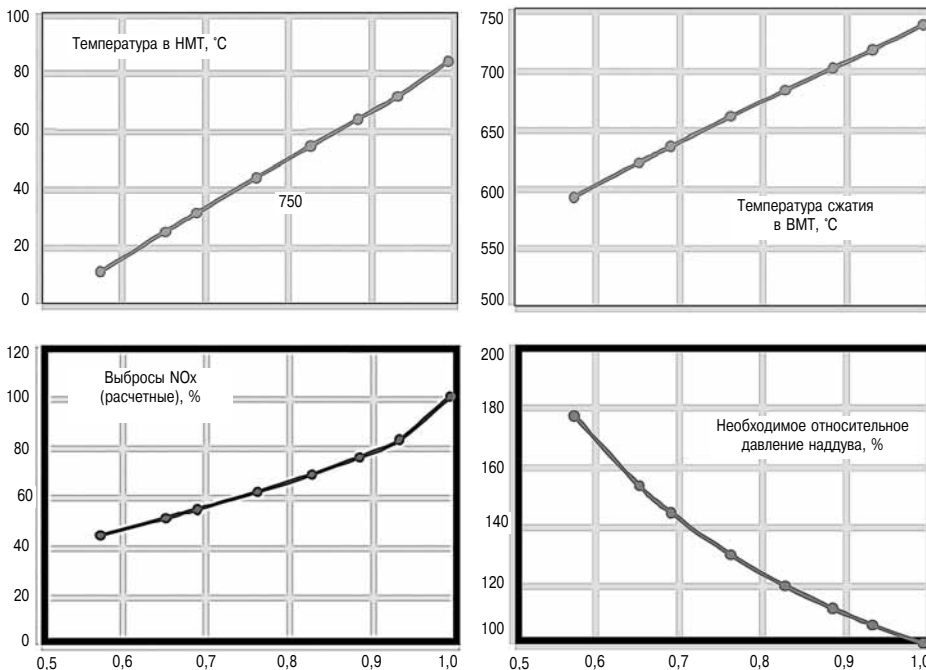
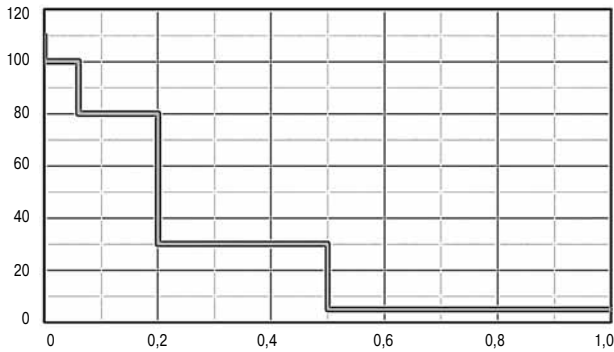


Рис. 7. Влияние изменения коэффициента наполнения («степени Миллера») на параметры рабочего процесса и требуемое давление наддувочного воздуха при степени сжатия 16:1. По горизонтальной оси — величина коэффициента наполнения



**Рис. 8. Испытательный цикл для магистральных локомотивов**

мощность на высоте до 1700 м над уровнем моря.

Ниже рассмотрены возможности дальнейшей оптимизации характеристик двигателя. Приводимые данные получены в результате моделирования рабочего процесса. Исходные показатели с компрессорной ступенью типа F33 соответствуют существующей на данный момент конфигурации двигателя без использования цикла Миллера. При моделировании выбросов использовались экспериментальные данные [6, 7]. Целью оптимизации является достижение показателей выбросов EURO IIIA и EURO IIIB.

Типовой испытательный цикл АБВ для магистральных локомотивов показан на рис. 8. Этому циклу соответствуют средневзвешенные значения

Таблица 4

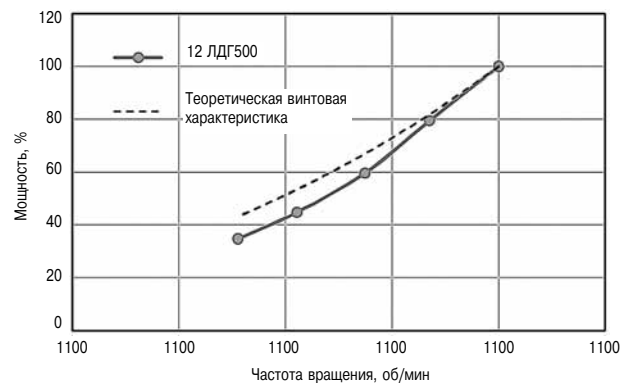
**Граничные условия для двигателя с одноступенчатым наддувом**

Турбокомпрессоры (одноступенчатые)	2 × АБВ ТР56-F VTG
Тип компрессора	F33 / F67
Максимальная степень повышения давления	4,8 / 5,8
Система управления наддувом	VTG
Коэффициент наполнения/углы газораспределения	1/0.90/0.82 (обычный цикл/Миллер 1/Миллер 2)
Номинальная температура в ресивере	60 °С
Пиковое давление сгорания	Постоянное
Степень сжатия EPS	Постоянная
Коэффициент избытка воздуха при любой нагрузке	Постоянный
Углы впрыска	Переменные (при постоянном значении $p_{max}$ )
NO <sub>x</sub>	Исходное значение 12 г/кВт·ч, при использовании цикла Миллера снижается
Номинальная мощность двигателя	4416 кВт при 1000 об/мин, позиция контроллера 8
ВМЕР	25,8 бар
Температура на входе в турбину	Исходное значение 560 °С

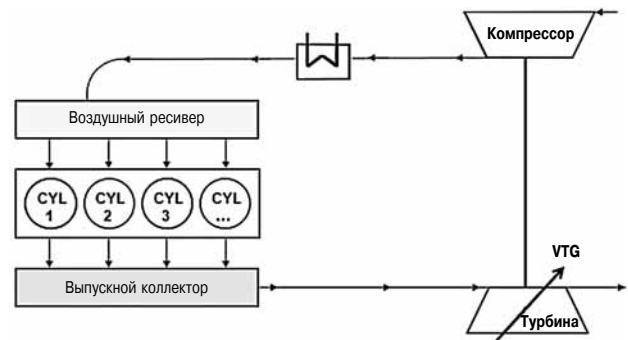
расхода топлива (SFC). Таким образом, данный испытательный цикл реалистично отражает типичный график работы тепловоза в эксплуатационных условиях.

В настоящее время в дизель-генераторе Коломенского завода 12ЛДГ500, оборудованном двумя турбокомпрессорами типа ТР56-Ф33, цикл Миллера не используется. Замена существующего турбокомпрессора на модель ТР56-Ф67 со степенью повышения давления 5,8 позволит за счет использования умеренного цикла Миллера снизить выбросы NO<sub>x</sub> и расход топлива без ограничения мощности во всем диапазоне расчетных окружающих условий. Граничные условия для моделирования работы двигателя с одноступенчатым наддувом приведены в табл. 4. Дизель работает при переменной скорости, зависимость мощности от скорости приведена на рис. 9. Эта же зависимость используется во всех вариантах моделирования. Конфигурация двигателя с одноступенчатым наддувом показана на схеме рис. 10.

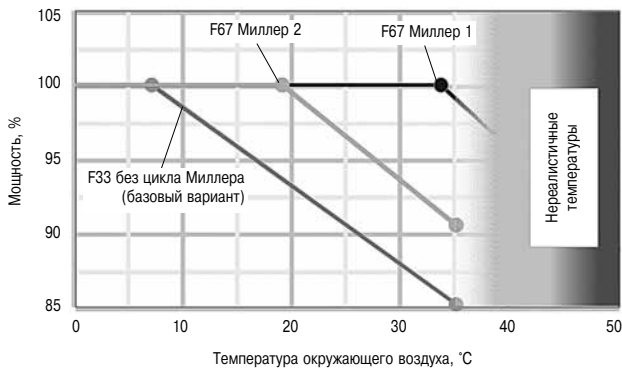
Следует отметить, что термодинамический расчет двигателя выполнен при экстремальных значениях параметров окружающей среды, поскольку оптимизация для других внешних условий (например, по ИСО) в данном случае не целесообразна.



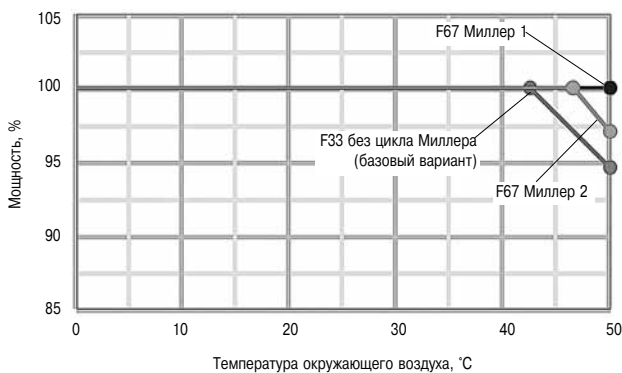
**Рис. 9. Скоростная характеристика дизель-генератора 12ЛДГ500**



**Рис. 10. Топологическая схема двигателя с одноступенчатым наддувом**



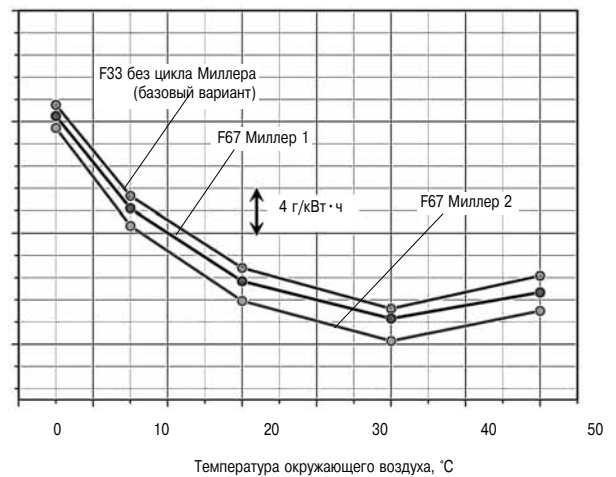
**Рис. 11. Различные варианты цикла Миллера для одноступенчатой системы наддува** (ограничение мощности начинается на высоте 1700 м над уровнем моря. Температуры свыше +35 °С не рассматриваются)



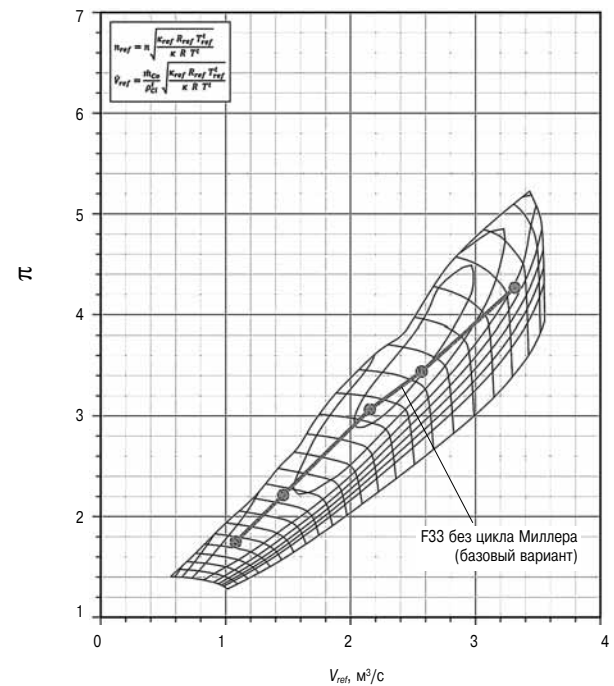
**Рис. 12. Различные варианты цикла Миллера для одноступенчатой системы наддува** (ограничение мощности начинается на высоте 100 м над уровнем моря)

Моделирование выполнено для двух вариантов значений «степени Миллера», соответствующими коэффициенту наполнения 0,90 и 0,82 соответственно. При использовании умеренного цикла Миллера («Миллер 1») двигатель способен работать на полной мощности при любых внешних условиях. При более глубоком цикле Миллера («Миллер 2») появляется необходимость некоторого снижения мощности, хотя достигнутая мощность при высокой температуре воздуха оказывается все же выше, чем без цикла Миллера. Эффективная мощность при различных значениях высоты местности и температуры окружающего воздуха показана на рис. 11 и 12. В рабочих точках, соответствующих началу снижения мощности, значения температуры газов на входе в турбину и скорости турбокомпрессора одновременно оказываются на предельно допустимом уровне. Основным средством достижения заданной мощности при экстремальных внешних условиях является использование VTG.

Как видно из рис. 13, при увеличении «степени Миллера» расход топлива снижается, одновременно происходит снижение выбросов NO<sub>x</sub>.



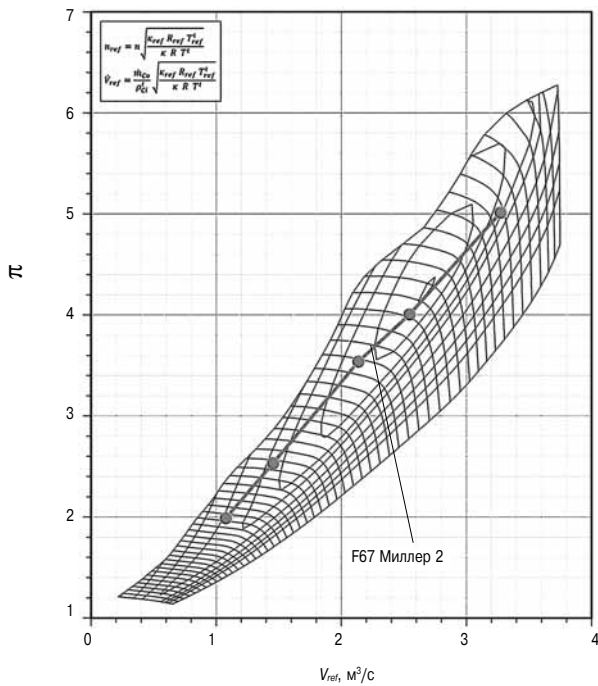
**Рис. 13. Изменение расхода топлива для обычной конфигурации (без цикла Миллера) и с двумя вариантами цикла Миллера** (одноступенчатый наддув, ТК TPR-F67, меньший расход топлива при более глубоком цикле Миллера)



**Рис. 14. Поле совместных режимов двигателя и компрессора F33** (исходный вариант, без цикла Миллера, при параметрах окружающего воздуха 25 °С и 100 кПа)

Тем самым подтверждается, что более глубокий цикл Миллера и соответствующее увеличение давления наддува благоприятно сказываются на показателях двигателя. Поэтому естественным следующим шагом должен стать переход на двухступенчатый наддув.

На рис. 14 и 15 показаны поля режимов работы компрессоров F33 (двигатель с обычным газораспределением) и F67 («Миллер 2») с расходной характеристикой двигателя. Несмотря



**Рис. 15. Поле совместных режимов двигателя и компрессора F67**  
(одноступенчатый наддув, «Миллер 2», параметры окружающего воздуха 25 °С и 100 кПа)

на то, что при использовании цикла Миллера необходимо более значительное повышение давления наддува, предельное значение скорости турбокомпрессора с компрессором F67 оказалось выше.

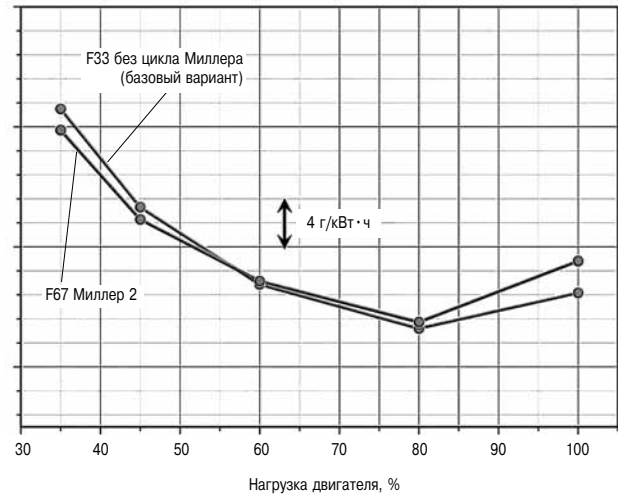
Характерными недостатками цикла Миллера являются снижение коэффициента избытка воздуха и ухудшение параметров рабочего процесса при малых нагрузках. Применение VTG позволяет нивелировать указанные недостатки за счет повышения давления наддува. Как правило, при этом растет КПД турбокомпрессора (при той же нагрузке двигателя), по сравнению с турбиной постоянной геометрии.

Численные значения важнейших параметров для разных вариантов приведены в табл. 7 (в разделе «Результаты»).

**Одноступенчатый наддув, цикл Миллера и нормы выбросов NOx EURO IIIA**

В рассмотренных вариантах речь шла, главным образом, об оптимизации расхода топлива. Для достижения требований по выбросам NOx, соответствующим уровню EURO IIIA с использованием опции «Миллер 2» необходимо увеличивать задержку впрыска, и соответственно — степень сжатия в двигателе. Прочие граничные условия оставались теми же (см. табл. 4).

На рис. 16 показано, что при незначительном росте средневзвешенного расхода топлива расчетное снижение выбросов NOx достигло 42 %.



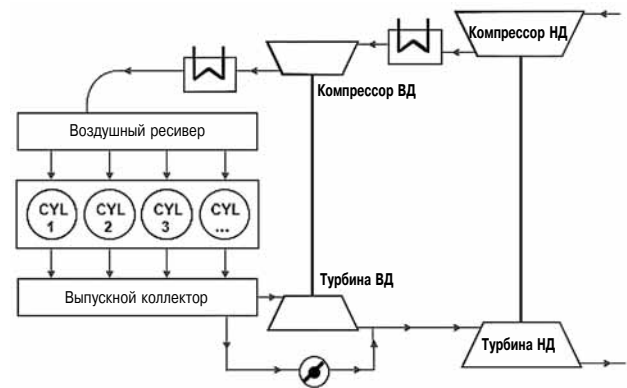
**Рис. 16. Оптимизация рабочего процесса с циклом Миллера для достижения норм вредных выбросов EURO IIIA в сравнении с базовым двигателем**  
(снижение выбросов NOx составило 42 %)

**Двухступенчатый турбонаддув:**

**достижение норм вредных выбросов EURO IIIA**

Двухступенчатый турбонаддув создает предпосылки для более эффективного использования цикла Миллера.

Организация двухступенчатого турбонаддува с промежуточным охладителем воздуха позволяет увеличить одновременно степень повышения давления в компрессоре и КПД турбокомпрессора. При отсутствии системы управления углами газораспределения необходима система регулирования давления наддува. В нашем случае в качестве регулирующего элемента был выбран байпас турбины высокого давления. Турбокомпрессор состоит из двух ступеней низкого давления (НД) и одной ступени высокого давления (ВД), что позволяет компактно разместить его на V-образном двигателе. Схема двигателя с



**Рис. 17. Схема двигателя с двухступенчатым наддувом.**  
(при больших нагрузках работает система байпаса ВД-турбины)

Таблица 5

**Граничные условия для двигателя с двухступенчатым наддувом**

Турбокомпрессоры, ступень низкого давления	2 × АВВ ТР56-НД с фиксированной геометрией
Турбокомпрессор, ступень высокого давления	1 × АВВ ТР56-ВД с фиксированной геометрией
Номинальная степень повышения давления	~7,5 (на большой высоте до 9)
Тип компрессора	НД/ВД
Система управления наддувом	Байпас турбины высокого давления
Коэффициент наполнения/углы газораспределения	0,7 (Миллер 3)
Степень сжатия EPS	Как в базовом варианте или несколько выше — для выполнения требований EURO IIIA
Коэффициент избытка воздуха при всех нагрузках	Постоянный, как и при одноступенчатом наддуве
Углы впрыска	Регулируемые (для постоянного $p_{max}$ и/или для достижения целевого показателя по $NO_x$ )
Пиковое давление сгорания	То же, что и при одноступенчатом наддуве
Температура в воздухоохладителе	55 °С
Температура в ресивере	55 °С
Номинальная мощность двигателя	4416 кВт при 1000 об/мин, позиция контроллера 8
ВМЕР	25,8 бар

двухступенчатым наддувом показана на рис. 17. На рис. 18 показан возможный вариант размещения турбокомпрессоров на двигателе. Граничные условия для моделирования работы двигателя с двухступенчатым наддувом приведены в табл. 5.

Высота подъема клапанов выбрана таким образом, чтобы коэффициент наполнения достигал 0,7. Такое значение «степени Миллера», далекого от экстремума, поэтому с динамикой привода клапанов особых проблем не возникнет, а настройка системы двухступенчатого наддува на малых нагрузках не составит большой сложности. В случае длительной работы на малых нагрузках может возникнуть необходимость увеличить

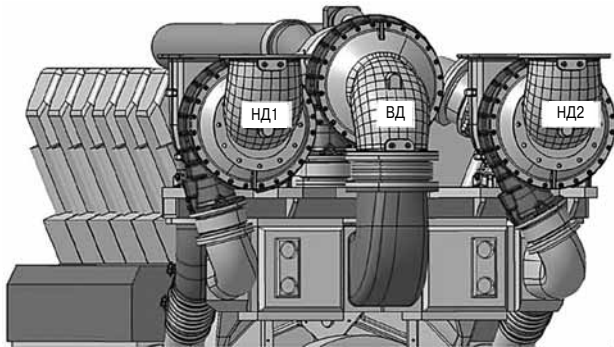


Рис. 18. Схема двигателя с двухступенчатым наддувом

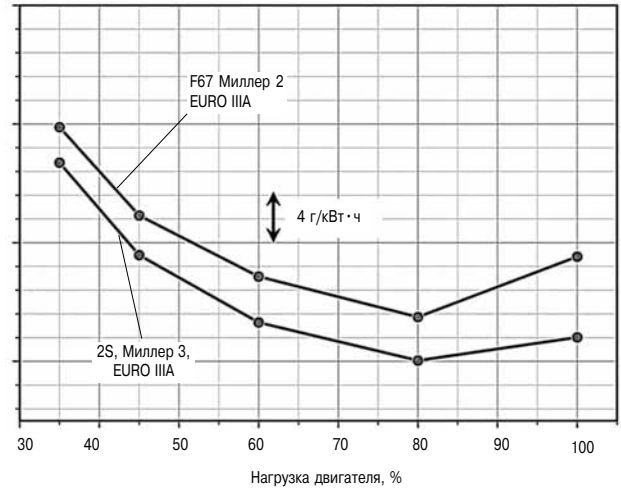


Рис. 19. Расход топлива при двух оптимизированных вариантах (одноступенчатый наддув F67, «Миллер 2» и двухступенчатый наддув «Миллер 3», уровень выбросов  $NO_x$  согласно EURO IIIA)

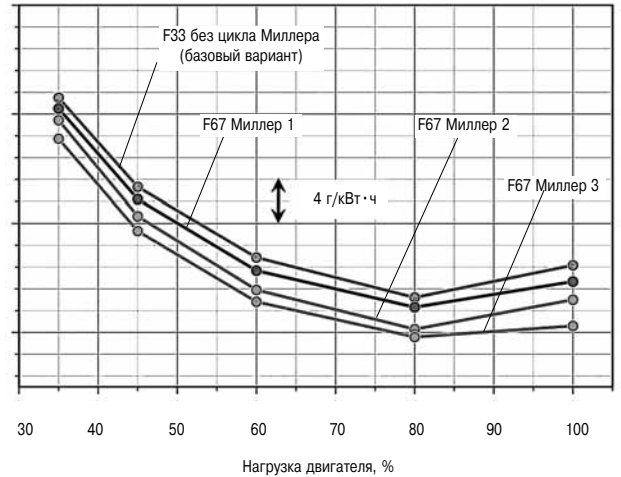
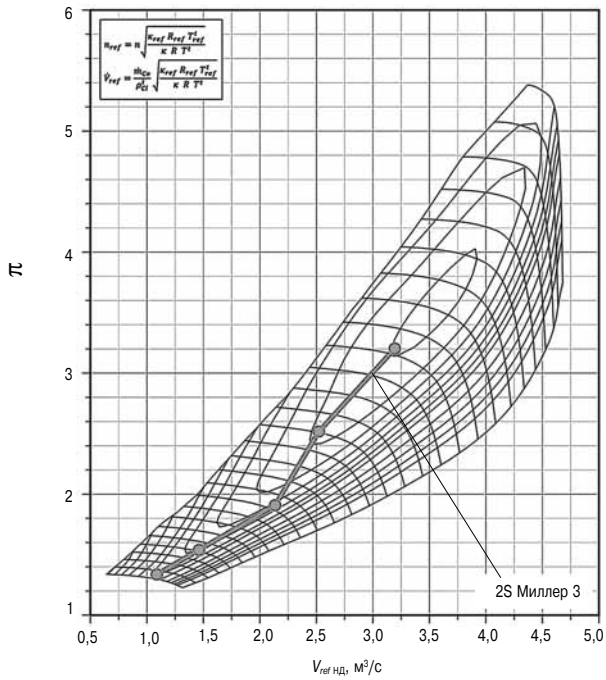


Рис. 20. Снижение расхода топлива за счет применения еще более глубокого цикла Миллера («Миллер 3») и двухступенчатой системы наддува

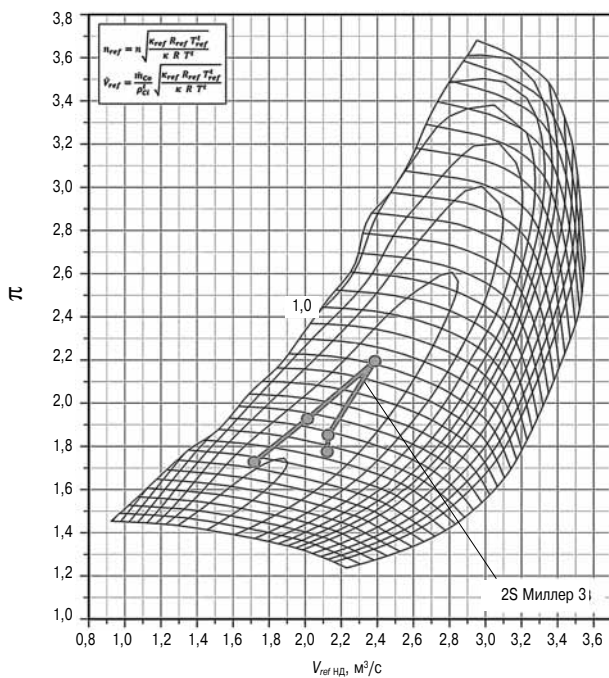
температуру теплоносителя в промежуточном воздухоохладителе, чтобы обеспечить надежное самовоспламенение.

На рис. 19 показано, насколько в данном случае расход топлива снижается по сравнению с вариантом одноступенчатого наддува и опцией «Миллер 2». Выбросы  $NO_x$  соответствуют уровню EURO IIIA. Экономия топлива при переходе к двухступенчатому наддуву составляет от 7 до 4 г/кВт·ч (значения для полной нагрузки и средневзвешенное соответственно).

На рис. 20 показано снижение расхода топлива за счет применения еще более глубокого цикла Миллера, при сохранении постоянства коэффициента избытка воздуха и давления самовоспламенения. Поля режимов работы компрессоров низкого и высокого давления при внешних



**Рис. 21. Поле режимов компрессора НД с опцией «Миллер 3»** (температура окружающей среды 25 °С, давление 100 кПа)



**Рис. 22. Поле режимов компрессора ВД с опцией «Миллер 3»** (температура окружающей среды 25 °С, давление 100 кПа)

условиях на уровне моря показаны на рис. 21 и 22. Запасы по скорости достаточно велики, снижение мощности ни при каких условиях не возникает. Двигатель сможет надежно работать на высоте до 3000 м над уровнем моря при температуре до 35 °С

**Двухступенчатый наддув с EGR: как достичь уровня EURO IIIВ по выбросам NO<sub>x</sub> без использования селективного каталитического восстановления (SCR)**

Одним из средств достижения уровня EURO IIIВ по выбросам NO<sub>x</sub> без использования SCR, может стать рециркуляция отработавших газов (EGR).

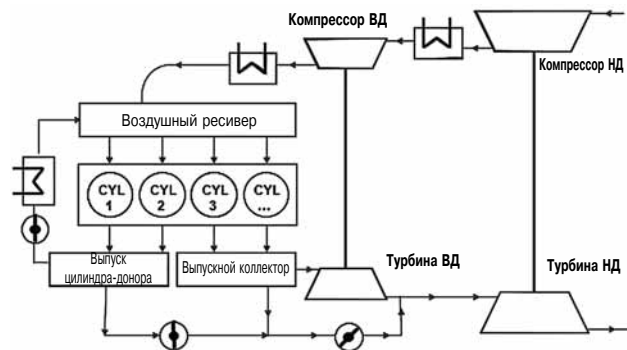
В настоящем исследовании EGR реализуется с помощью близлежащего цилиндра-донора (рис. 23).

При использовании EGR массовый заряд воздуха в цилиндрах уменьшается. Это позволяет, в частности, уменьшить размеры некоторых компонентов турбокомпрессора. Поскольку давление наддува при использовании EGR необходимо увеличить, целесообразно применить двухступенчатую систему наддува.

Следует отметить, что использование EGR требует соответствующей адаптации системы топливоподачи. В большинстве случаев возникает необходимость использования системы common rail, способной обеспечить множественные впрыски.

Применение системы EGR отрицательно сказывается на кривой тепловыделения (профиле сгорания) и на термодинамических свойствах рабочего тела. В настоящем исследовании необходимая коррекция кривой тепловыделения была достигнута за счет изменения угла впрыска топлива. Ухудшение термодинамических свойств рабочего тела может быть отчасти компенсировано повышением давления наддува. В связи с этим придется допустить некоторое повышение (на 5–10 бар) максимального давления сгорания.

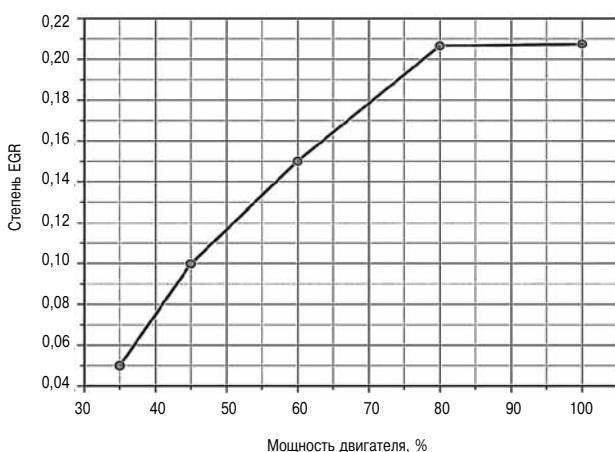
Сложность использования системы EGR с цилиндрами-донорами состоит в том, что такие цилиндры работают при более высоком уровне противодавления. В связи с этим необходимо обеспечить удовлетворительный баланс тепловых и механических нагрузок по цилиндрам.



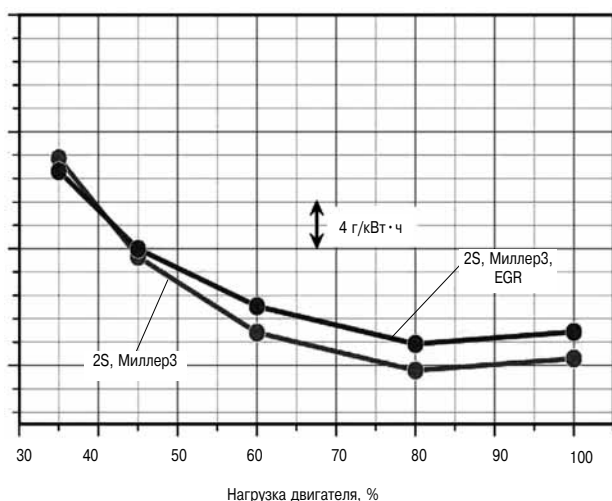
**Рис. 23. Схема двигателя с EGR и двухступенчатым наддувом** положение клапанов на схеме соответствует высокой нагрузке и максимальной степени EGR

На рис. 24 показана зависимость от нагрузки двигателя степени EGR, необходимой для поддержания выбросов  $\text{NO}_x$  на уровне EURO IIIВ. Степень EGR определяется как отношение массы газа, поступающего из системы рециркуляции, к общей массе газа, проходящего через впускные клапаны.

На рис. 25 показано изменение расхода топлива (после оптимизации) от нагрузки двигателя с системой EGR и двухступенчатым наддувом в сравнении с аналогичной кривой для двигателя без системы EGR. Как видно даже после оптимизации и некоторого повышения  $p_{\text{max}}$  расход топлива остается несколько больше, чем в базовом варианте, зато, согласно результатам моделирования, снижение выбросов  $\text{NO}_x$  составляет порядка 50 %, оставаясь в пределах нормы EURO IIIВ.

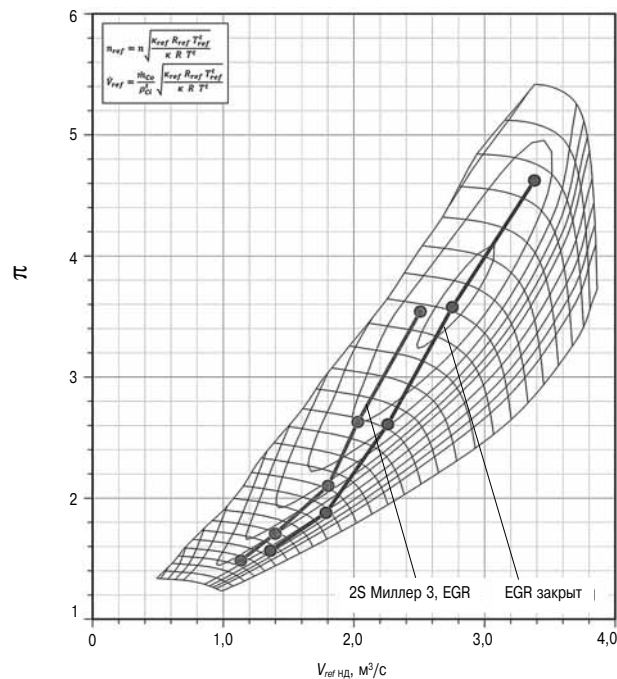


**Рис. 24. Степень EGR, принятая при моделировании**

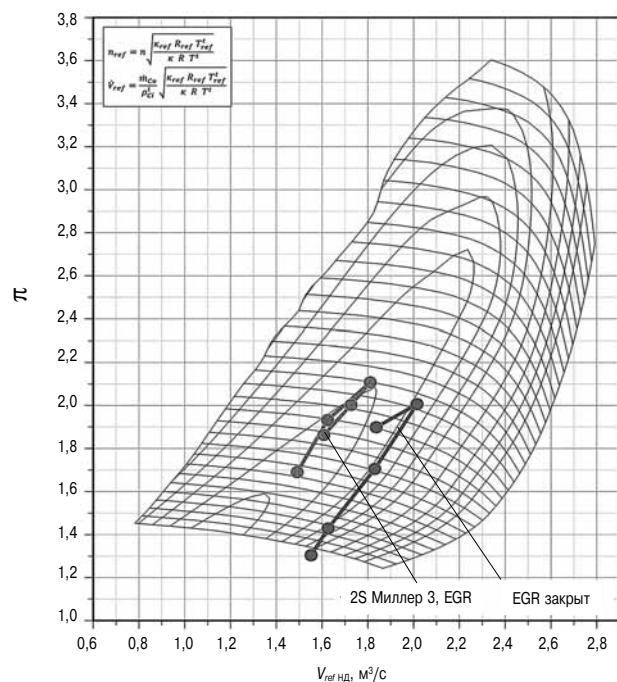


**Рис. 25. Увеличение расхода топлива при использовании EGR (повышение  $p^{\text{max}}$  на 5–10 бар, снижение выбросов  $\text{NO}_x$  на 50 %)**

На рис. 26 и 27 показаны поля рабочих режимов компрессоров низкого и высокого давления при наличии EGR. Из рисунков видно, как повлияет на работу компрессора закрытие тракта EGR без изменения настроек управления наддувом. По приблизительной оценке, работа без



**Рис. 26. Поле режимов работы компрессора НД с опцией «Миллер 3» и EGR (коэффициент наполнения 0,7, параметры окружающей среды — 25 °С, 100 кПа)**



**Рис. 27. Поле режимов работы компрессора ВД (с опцией «Миллер 3» и EGR) параметры окружающей среды — 25 °С, 100 кПа)**



Таблица 6

**Граничные условия для двигателя с двухступенчатым наддувом и EGR**

Турбокомпрессоры, ступень низкого давления	2 × АВВ ТР56-НД с фиксированной геометрией
Турбокомпрессор, ступень высокого давления	1 × АВВ ТР56-ВД с фиксированной геометрией
Номинальная степень повышения давления	~7,5 (на большой высоте до 9)
Тип компрессора	НД/ВД
Система управления наддувом	Байпас турбины высокого давления
Коэффициент наполнения/углы газораспределения	0,7 (Миллер 3)
Степень EGR	21 %
EGR gas cooling temperature	120 °С
Тип EGR	high pressure short-route donor cylinder
Пиковое давление сгорания	5–10 бар higher than baseline engine
Температура в воздухоохладителе	55 °С
Температура в ресивере	65 °С (with EGR gas mixed)
Степень сжатия EPS	as in ref
Коэффициент избытка воздуха при всех нагрузках, включая воздух от EGR	reduced by about 15% vs non-EGR
turbine inlet temperature	same or slightly lower than std two-stage
Номинальная мощность двигателя	4416 кВт при 1000 об/мин, позиция 8
ВМЕР	25,8 бар

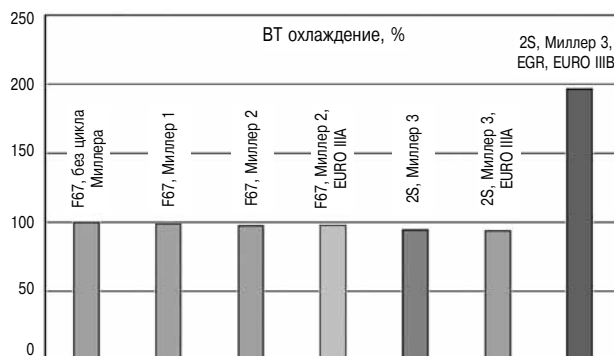
EGR с системой турбонаддува, оптимизированной под EGR приведет к снижению номинальной мощности на 10–15 %. Эта величина может быть уменьшена за счет совершенствования системы управления.

**Влияние наддува на систему охлаждения двигателя**

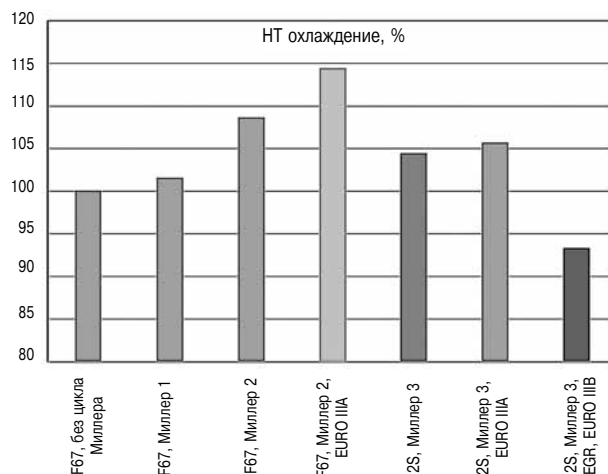
Повышение мощности двигателя, за счет наддува, влечет за собой необходимость интенсификации охлаждения двигателя.

Система высокотемпературного (ВТ) охлаждения, в которой температура охлаждающей воды на входе в двигатель составляет ~80 °С, состоит из рубашек охлаждения двигателя и тракта EGR (при его наличии). Системы охлаждения воздуха (в том числе промежуточные воздухоохладители) и масла относятся к системам низкотемпературного (НТ) охлаждения, в которых температура охлаждающей воды на входе в двигатель составляет ~40 °С).

При использовании EGR необходимый теплоотвод через ВТ-контур примерно удваивается по сравнению с остальными вариантами. Как это ни покажется странным на первый взгляд, при использовании двухступенчатого наддува с



**Рис. 28. Относительная величина необходимого теплоотвода для ВТ-контура**



**Рис. 29. Относительная величина необходимого теплоотвода для НТ-контура**

промежуточным охлаждением воздуха необходимый теплоотвод через НТ-контур оказывается меньше, чем, например, при использовании одноступенчатого наддува и опции «Миллер 2». Дело в том, что использование EGR снижает необходимый теплоотвод через НТ-контур, поскольку при этом расход воздуха уменьшается.

В целом, можно сказать, что необходимый теплоотвод почти во всех случаях увеличивается незначительно, за исключением ВТ-контура при наличии EGR. Относительное изменение необходимого теплоотвода (в кВт рассеиваемого тепла) показано на рис. 28 и 29.

**Результаты**

Все основные результаты моделирования сведены в итоговую табл. 7.

**Заключение**

В первой части настоящего доклада рассмотрены новые технические решения, использованные в турбокомпрессоре типа ТРР, оптимизированном для работы с тепловозным дизелем. Приведены наиболее существенные результаты, полученные из опыта их эксплуатации в реальных условиях. Приведено общее описание и характеристики новой модели двигателя Д500

## Итоговые результаты

Обозначение конфигурации	F-33 без цикла Миллера	F-67 Миллер 1	F-67 Миллер 2	F-67 Миллер 2, EURO IIIA	2S Миллер 3	2S Миллер 3, EURO IIIA	2S Миллер 3, EGR, EURO-IIIВ
Коэффициент наполнения	~1,0	0,90	0,82	0,82	0,70	0,70	0,70
SFC средневзвешенный, %	100	99,5	98,8	100,1	98,3	98,2	98,6
SFC при полной нагрузке, %	100	99,2	98,4	101,4	97,3	97,9	98,3
NO <sub>x</sub> %	100	85	78	58	68	58	32
Необходимый теплоотвод через ВТ-контур, %	100	99	97	98	95	94	197
Необходимый теплоотвод через НТ-контур, %	100	102	109	114	104	106	93
Необходимая общая степень повышения давления при 25 °С на уровне моря	4,26	4,64	5,01	5,20	5,70	5,74	5,99
Необходимый коэффициент избытка воздуха при 100 % нагрузки	2,16	2,16	2,17	2,18	2,20	2,20	1,85
Максимальная мощность при 50 °С на высоте 100 м над уровнем моря	94,5	100	97		100	100	100
Максимальная мощность при 35 °С на высоте 1700 м над уровнем моря	85	98	91		100	100	100

Примечание: 2S — двухступенчатый наддув.

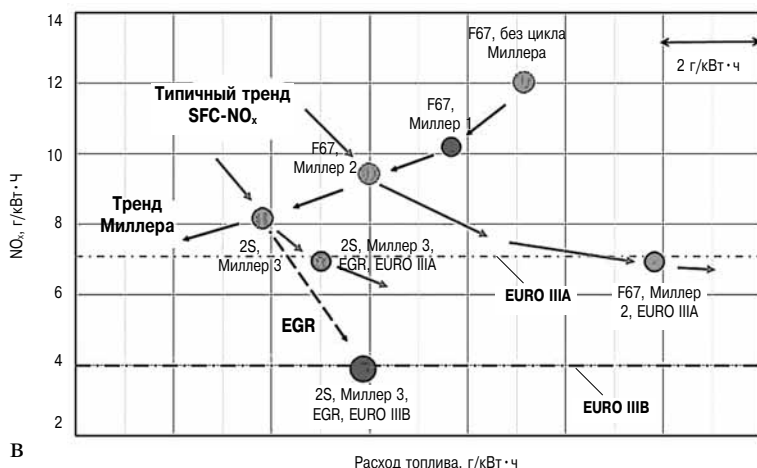


Рис. 30. Способы выполнения нормативов по допустимым выбросам NO<sub>x</sub> и их влияние на расход топлива

составе тепловозного дизель-генератора 12ЛДГ500.

На основании результатов стендовых испытаний дизеля было выполнено моделирование рабочего процесса, с целью дальнейшей оптимизации двигателя. Моделирование отчетливо

выявило необходимость компромисса между расходом топлива и выбросами NO<sub>x</sub>, с одной стороны, и показано, как эта оптимизация скажется на требованиях к системе турбонаддува при сохранении номинальной мощности на большой высоте.

Как показали результаты моделирования, для агрегата 12ЛДГ500 применение одноступенчатого наддува с последней моделью компрессора способно обеспечить выполнение норм EURO IIIA по выбросам NO<sub>x</sub>, тогда как для перехода к EURO IIIВ понадобится двухступенчатая система наддува и система EGR. Все возможные конфигурации показаны на рис. 30.

ОАО «Коломенский завод» и ABB Turbo Systems планируют совместную работу по практическому применению разработанных концепций и окончательной проверке их на испытательном стенде.

## Литература

1. SCI/ Verkehr Cologne 2015 «Diesel Locomotives — Global Market Trends».
2. Doetl R., Bernard O., Pesten D-A. and Phillipsen B. «Turbocharger Power For Future Railway Applications» 2003 Fall Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division. Erie, Pennsylvania USA, September 7–10. 2003 — ICEF2003 — 737.
3. Jacoby P., Wang D., and Xu H. «VTG Turbocharging — a Valuable Concept for Traction Application» CIMAC, 2013, Paper № 116.

4. Behr T., Kahi M., and Reichl A. «Second Generation of Two-Stage Turbocharging Power2 Systems for Medium Speed Gas & Diesel Engines» CIMAC, 2013, Paper № 134.
5. Codan E., and Mathey C. «Emissions — a new challenge for turbocharging» CIMAC, 2007, Paper № 245.
6. Wik C., and Hallback B. «Utilisation of 2-stage turbocharging as an emission reduction mean on a Wartsila 4-stroke medium-speed diesel engine» CIMAC, 2007, Paper № 101.
7. Pueschel M., Buchholz B., Fink C., Rickert C., and Ruschmeyer K. 76: «Combination of PostInjection & Cooled EGR at a Medium-Speed Diesel Engine to Comply with IMO Tier III Emission Limits» CIMAC, 2013, Paper № 076.

УДК 621.43

**Стратегия развития поршневого двигателестроения России на период до 2020 года (окончание) // Двигателестроение.** — 2016. — № 4. — С. 3–9.

**Ключевые слова:** план реализации стратегии, основные мероприятия, государственная поддержка, структуризация производителей, оптимальная кооперация, федеральный исследовательский центр, развитие типажа двигателей.

Предложены мероприятия и основные направления развития отрасли поршневого двигателестроения России, необходимые для восстановления ее эффективности и конкурентоспособности. Для этой цели предлагается реализовать план формирования платформы развития отрасли, включающий следующие позиции: законодательную защиту отечественного рынка от поставок импортной продукции, создание структуры оптимальной кооперации производителей двигателей и компонентов, увеличение доли государственного участия в уставных капиталах ключевых предприятий отрасли, создание федерального исследовательского центра, структуризация НИОКР, развитие типажа двигателей различного применения. Табл. 1. Ил. 1.

УДК 621.444

**Дворцов В.С., Ткаченко М.М., Куколев М.И. Двигатели Стирлинга: Развитие конструкций и методов исследования // Двигателестроение.** — 2016. — № 4. — С. 10–14.

**Ключевые слова:** Двигатели Стирлинга, силовые механизмы, рабочие параметры, модульные конструкции, подготовка специалистов.

Приведены результаты развития конструкций и достигнутые рабочие параметры двигателей Стирлинга (ДС) за последние десятилетия. Показано, что конструкция силовых механизмов ДС развивается в направлении применения бесшатунных схем С.С. Баландина, А.И. Костина и других запатентованных в РФ решений. Одним из перспективных направлений развития ДС является применение конструкций модульного типа, что позволяет создавать мощные двигатели методом дублирования однотипных рабочих контуров. Обоснована необходимость подготовки специалистов по ДВПТ на кафедрах технических университетов. Табл. 2. Ил. 8. Библ. 11.

УДК 621.43.052

**Циплёнкин Г.Е., Иовлев В.И., Коженков А.А. Турбокомпрессоры фирмы «ABB Turbo Systems» с радиальной турбиной // Двигателестроение.** — 2016. — № 4. — С. 15–25.

**Ключевые слова:** дизели, системы наддува, турбокомпрессоры, турбина радиальная, степень повышения давления, производительность, граница помпажа компрессора.

Рассматриваются характеристики и особенности конструкции турбокомпрессоров с радиальной турбиной серии TPS для высокофорсированных высокооборотных и среднеоборотных дизелей и газовых двигателей, разработанных фирмой «ABB Turbo Systems» за последние два десятилетия. Ил. 26. Библ. 14.

УДК 621.431.629

**Хархан В.Г. Метрологические характеристики средств измерений при испытаниях ТНВД дизелей // Двигателестроение.** — 2016. — № 4. — С. 26–29.

**Ключевые слова:** топливная аппаратура, испытательный стенд, средства измерений, погрешность измерений,

источники погрешностей, оптимизация метрологических характеристик.

Выполнен анализ различных источников погрешности измерений, возникающих в технологическом процессе испытаний и настройки ТНВД на стендах. Показано, что в дополнение к погрешностям средств измерений, при испытаниях возникают погрешности, вносимые субъективным фактором и особенностями конструкции объекта испытаний. На основе анализа источников погрешности предложен алгоритм решения задач оптимизации метрологических характеристик средств измерений в процессе производства и испытаний дизельной топливной аппаратуры. Табл. 1. Ил. 3. Библ. 7.

УДК 621.785

**Иванов Д.А., Засухин О.Н. Влияние условий газоимпульсной обработки на механические свойства сталей // Двигателестроение.** — 2016. — № 4. — С. 30–34.

**Ключевые слова:** металлические изделия, газоимпульсная обработка, улучшение механических свойств, ударная вязкость, резонансная частота газовых импульсов.

Рассматриваются вопросы оптимизации амплитудно-частотных характеристик и продолжительности воздействия газового потока на металлические изделия и заготовки в целях повышения их механических и эксплуатационных свойств за минимальное время. Приведенные данные свидетельствуют о доминирующей роли воздействия газовых импульсов нестационарных течений на структуру и свойства металлических изделий, изготовленных из легированных сталей. Установлено, что при использовании резонансных наложений частот колебаний газового потока на собственные колебания изделия такое же или более высокое значение ударной вязкости может быть достигнуто при сокращении продолжительности обработки в два раза. Табл. 4. Ил. 8. Библ. 10.

УДК 621.43

**Основные тенденции и приоритеты развития мирового двигателестроения (материалы конгресса СИМАС 2016) // Двигателестроение.** — 2016. — № 4. — С. 35–60.

**Ключевые слова:** мировое двигателестроение, приоритеты развития, программа «Геркулес-2», адаптивный судовой дизель, дизели нового поколения D500, снижение вредных выбросов, система высокого наддува

В интервью журналу «Diesel Progress» вновь избранный президент СИМАС Клаус Хайм поделился своей оценкой деятельности организации за прошедший период и своими взглядами на ее перспективы, а также приоритеты и тенденции развития мирового двигателестроения.

Конкретным примером реализации этих тенденций могут служить исследования и разработки, которые выполняются в рамках уникальной программы «Геркулес-2» двумя крупнейшими производителями судовых дизелей MAN и «Wartsila». Основная цель этой программы — создание судового двигателя с минимальными выбросами, полностью адаптивного к оптимизации рабочих параметров при воздействии любых внешних факторов.

Достижения отечественного двигателестроения представлены на конгрессе докладом, подготовленным совместно фирмой АВВ и ОАО «Коломенский завод», в котором приведены результаты создания системы наддува для двигателя нового поколения D500. Двигатель по уровню вредных выбросов соответствует действующим и перспективным международным экологическим стандартам. Перевод докладов выполнен к.т.н. Г. Мельником. Табл. 8. Ил. 45. Библ. 12.

UDC 621.43

**Road Map for the Development of Reciprocating Engines in Russia up to Year 2020 (end)** // *Dvigatelistroyeniye*. — 2016. — № 4. — P. 3–9.

**Keywords:** road map for implementation of the strategy, key steps, governmental support, structuring of manufacturers, optimal cooperation, federal R&D centre, standardization of engine families according to power range and application.

The strategy encompasses guidelines and top priority measures needed to restore efficiency and competitive ability of engine building in Russia. In particular, the following measures are offered: legislative protection of Russian engine market from import, optimal cooperation of engine and component manufacturers, increase in governmental share in charter capital of key engine manufacturers, establishment of federal R&D centre, structuring of R&D projects, standardization of engine families according to power range and application.

1 table, 1 ill.

UDC 621.444

**Dvortsov V.S., Tkachenko M.M. and Kukolev M.I. Stirling engines: Progress in design and research methods** // *Dvigatelistroyeniye*. — 2016. — № 4. — P. 10–14.

**Keywords:** Stirling engine, operating parameters, power trains, modular design, training courses for specialists.

Described are progress in design concept of Stirling engine (SE) for several last decades, and engine operating parameters achieved. According to the authors, dominant trend in SE power train development is use of conrod-free solutions patented in RF by S.Balandin, A.Kostin, et al. Modular design is one of most promising lines of SE development, which enables construction of high-powered engines by duplication of similar working medium circuits. The authors lay emphasis on the necessity for establishment of courses for training SE specialists in technical universities.

2 tables, 8 ill., 11 ref.

UDC 621.43.052

**Tsyplenkin G.E., Iovlev V.I. and Kozhenkov A.A. Turbochargers from ABB Turbo Systems featuring radial turbine** // *Dvigatelistroyeniye*. — 2016. — № 4. — P. 15–25.

**Keywords:** diesel engine, supercharge system, turbocharger, radial turbine, pressure ratio, capacity, compressor surge zone boundaries.

The authors review design features and characteristics of ABB Turbo Systems turbocharger platform, TPS series, for medium-speed diesel and gas engines featuring radial turbine, developed for the last two decades.

26 ill., 14 ref.

UDC 621.431.629

**Kharkhan V.G. Instruments used in engine HP fuel pump testing: metrological performance** // *Dvigatelistroyeniye*. — 2016. — № 4. — P. 26–29.

**Keywords:** fuel injection system, test stand, instrumentation, measurement accuracy, metrological performance optimization.

The article discusses sources of various measurement inaccuracies typical to HP fuel pump testing and tuning on dedicated test stands. According to the authors, instrument measurement inaccuracies are added by those caused by human factor and tested object specifics. Based on the analysis of inaccuracy sources, the authors offered an algorithm for optimization of metrological performance of instruments used in manufacturing and testing of fuel injection system components. 1 table, 3 ill., 7 ref.

UDC 621.785

**Ivanov D.A. and Zasukhin O.N. Influence of gas explosion treatment parameters on steel mechanical properties** // *Dvigatelistroyeniye*. — 2016. — № 4. — P. 30–34.

**Keywords:** ceramic components, gas explosion treatment, improvement of mechanical properties, impact strength, gas pulse resonance frequency.

The article discusses optimization of gas explosion treatment parameters (such as gain-frequency characteristics and exposure duration), with a view to improve mechanical properties of metal parts and blanks in minimum time. According to data cited, as far as gas explosion treatment is concerned, structure and properties of parts from alloyed steel are primarily influenced by characteristics of unsteady flow gas pulses.

Superimposition of gas flow resonant oscillation and natural oscillations of treated part results in reduction of treatment time by half, impact strength remaining unaffected. 8 ill., 4 tables, 10 ref.

UDC 621.43

**International engine building: trends and priorities (based on CIMAC 2016 papers)** // *Dvigatelistroyeniye*. — 2016. — № 4. — P. 35–60.

**Keywords:** international engine building, priorities, HERCULES-2 research project, adaptive marine engine, D500 newly designed engine platform, emission compliance, high pressure supercharge system

Klaus Heim, newly elected president of CIMAC, in his interview for Diesel Progress magazine gave his evaluation of CIMAC activities for the last period and its future prospects, and outlined priorities and trends in world engine building.

An example of said trend realization is HERCULES-2, unique project which encompasses a number of research and development programs implemented by two major engine manufacturer groups MAN and WARTSILA. Main objective of the project is creation of marine engine with near-zero emissions, featuring adaptive control methodologies, which would result in engine performance unaffected by any external disturbances.

One of papers presented at the CIMAC congress concerned achievements of domestic engine building, viz., supercharge system jointly developed for Kolomna D500 newly designed engine platform by ABB Turbo Systems and PJSC Kolomensky Zavod. The engine whose entering commercial application was scheduled for 2016, boasts emission compliance with current and future applicable international standards.

The CIMAC papers are translated into Russian by G.Mel'nik, PhD.

45 ill., 8 tables, 12 ref.

## Перечень статей, опубликованных в журнале «Двигателестроение» за 2016 год

### ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЕ В РОССИИ

1. Стратегия развития поршневого двигателестроения России на период до 2020 года (проект публикуется в сокращенной редакции) (№ 1. С. 3–7; № 2. С. 3–18; № 3. С. 3–15; № 4. С. 3–9).

### РАСЧЕТЫ. КОНСТРУИРОВАНИЕ. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

1. Чайнов Н.Д., Краснокутский А.Н., Капшуков А.В.

Моделирование работы резьбовых соединений при расчете сопряжений базовых деталей поршневых двигателей (№ 1. С. 8–10).

2. Березовский А.Б., Максимов А.В., Гагаулин Н.А., Зимина Л.А., Садыков М.Ф., Гумеров И.Ф., Валеев Д.Х., Хафизов Р.Х. Экспериментальное исследование газораспределительного механизма с электрогидравлическим приводом (№ 1. С. 11–17).

3. Пономарев А.С., Метелев А.А., Немчикова М.Н., Зайцев Д.А. Улучшение характеристик газовоздушных каналов головки блока цилиндров дизельного двигателя Fiat 1,3 Multijet (№ 1. С. 18–24).

4. Гаврилов К.В., Дойкин А.А., Лазарев В.Е., Асауляк А.А. Экспериментальная оценка параметров трения и изнашивания трибосопряжения поршень–цилиндр форсированного дизеля (№ 2. С. 19–23).

5. Пищулин М.В. Технологии гомогенизации топливо-воздушной смеси в поршневых ДВС (№ 2. С. 24–27).

6. Гаврилов В.В. Принципы организации и показатели качества смесеобразования и сгорания в судовом дизеле (№ 3. С. 16–22).

7. Дворцов В.С., Ткаченко М.М., Куколев М.И. Двигатели Стирлинга: Развитие конструкций и методов исследования (№ 4. — С. 10–14).

### СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЕЙ. АГРЕГАТЫ

1. Циплёнкин Г.Е., Иовлев В.И. Уровень форсировки поршневых двигателей нового поколения (№ 1. С. 25–50).

2. Алиев А.Я., Айдемиров О.М., Алиев С.А. Электроприводной насос системы охлаждения поршневого двигателя с индукторным электродвигателем (№ 2. С. 28–29).

3. Циплёнкин Г.Е., Иовлев В.И., Коженков А.А. Турбокомпрессоры фирмы «ABB Turbo Systems» с радиальной турбиной (№ 4. С. 15–25).

4. Хархан В.Г. Метрологические характеристики средств измерений при испытаниях ТНВД дизелей (№ 4. — С. 26–29).

### АВТОМАТИЗАЦИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ

1. Крюков О.В. Автоматизированное нагружающее устройство для комплексных испытаний поршневых двигателей (№ 2. С. 30–35).

### ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ

1. Новиков Л.А., Корчинский В.С. Оценка дополнительных затрат судовладельцев при использовании SCR-технологии на судах (№ 3. С. 23–31).

### КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Влияние условий газоимпульсной обработки на механические свойства сталей (№ 4. — С. 31–35).

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ ДВИГАТЕЛЕЙ

1. Сайданов В.О., Смолинский С.Н., Росляков Е.М. Модернизация дизель-генераторных установок в составе электростанций для объектов военной инфраструктуры (№ 1. С. 31–33).

2. Сорокин В.А. Проблемы эксплуатации судовых дизелей с большой наработкой (№ 1. С. 34–39).

3. Хромов В.Н. Восстановление деталей термомпластическим деформированием — резерв импортозамещения запасных частей зарубежных дизелей (№ 1. С. 40–43).

4. Рыбаков М.Г. Диагностирование состояния поршневого уплотнения ДВС методом индирования цилиндров (№ 2. С. 36–40).

### НОВОСТИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

1. Исследование горения в дизеле (материалы конгресса СИМАС 2013) (№ 1. С. 45–57).

2. Развитие модельного ряда двигателей концерна «Hyundai Heavy Industries» (материалы конгресса СИМАС 2013) (№ 2. С. 41–54).

3. Развитие модельного ряда двигателей ПАО «Звезда» и ООО УДМЗ (материалы конгресса СИМАС 2016) (№ 3. С. 32–55).

4. Основные тенденции и приоритеты развития мирового двигателестроения (материалы конгресса СИМАС 2016) (№ 4. — С. 35–60).

## Вниманию авторов

Редакция обращает внимание авторов на тематическую направленность принимаемых к рассмотрению рукописей и необходимость выполнения требований по их оформлению.

Журнал «Двигателестроение» является ежеквартальным научно-техническим изданием, посвященным проблемам развития, проектирования, изготовления и эксплуатации поршневых двигателей.

Тематика публикаций определила следующие основные рубрики журнала:

- расчеты, конструирование, исследования двигателей;
- системы и агрегаты двигателей;
- конструкционные материалы;
- топливо и смазочные материалы, присадки;
- ресурсосбережение;
- эксплуатация и ремонт двигателей;
- автоматизация и диагностирование;
- проблемы экологии;
- гипотезы и дискуссии;
- история развития конструкций (проектов), предприятий и науки о двигателях;
- обзорная и справочная информация.

Текст рукописи должен быть представлен в двух экземплярах на бумаге формата А4, гарнитура Times New Roman 12, через полтора интервала, с обязательным приложением электронной версии на CD (в формате Microsoft Word 2000/2003), полностью соответствующей оригиналу на бумаге. Формулы в электронной версии должны быть набраны с использованием редактора формул Microsoft Equation 3.0. За достоверность набора формул несет ответственность автор. При использовании в наборе специальных шрифтов последние прилагаются в электронном виде. Электронные копии иллюстраций представляются отдельными файлами в форматах: TIF, JPG (не менее 300 dpi, черно-белые полутоновые изображения).

Представляя рукопись статьи в редакцию, автор должен сообщить о ее предыдущих публикациях.

Рукопись статьи должна иметь рекомендацию к публикации в журнале (направление) от организации, где выполнялась работа, а также акт экспертной комиссии с указанием того, что рукопись не содержит сведений, запрещенных к публикации в открытой печати.

Заглавие статьи должно быть кратким (не более 120 знаков), точно отражающим ее содержание.

Для оперативного решения вопросов, связанных с подготовкой рукописи к публикации, а также для размещения электронной версии журнала в НЭБ должны быть представлены сведения об авторах:

- фамилия, имя, отчество (полностью);
- ученая степень и звание;
- полное наименование места работы;
- полный почтовый адрес;
- действующие контактные телефоны, e-mail).

Для представления авторов читателям желательно присылать цветные или черно-белые фотографии авторов размером не менее чем 3×4 см. Допускаются электронные копии в форматах TIF или JPG.

Обязательными приложениями к рукописи являются: реферат, в котором четко и сжато изложены основные цели и результаты работы объемом от 700 до 1200 знаков; код УДК; ключевые слова.

Заглавие статьи, название организаций, ФИО авторов, ключевые слова и реферат необходимо присылать на русском и английском языках.

Объем статьи не должен превышать 25 тыс. знаков, включая таблицы и список литературы. Иллюстрации в виде графиков, диаграмм, схем и фотографий оформляются в виде приложений к тексту рукописи. Все приложения к тексту рукописи представляются на отдельных листах, а в электронной копии — в виде отдельных файлов. Формулы, иллюстрации и таблицы должны быть пронумерованы в порядке упоминания и снабжены поясняющими (подрисуночными) подписями. Все обозначения на иллюстрациях должны быть объяснены (расшифрованы) в тексте или в подрисуночных подписях и соответствовать обозначениям в тексте.

Даже если все иллюстрации заверстаны автором в текст электронной копии рукописи, то их представление в виде отдельных файлов и распечаток на отдельном листе обязательно.

В статьях желательно приводить только те математические формулы, которые необходимы для понимания существа вопроса, исключая их подробные выводы.

Все обозначения, встречающиеся в формулах, должны быть объяснены.

При написании формул необходимо использовать общепринятые обозначения физических величин по Международной системе единиц (ГОСТ 8.417–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин). Ссылки на цитируемые источники необходимо оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 05–2008.

Если представленные в редакцию рукописи не удовлетворяют перечисленным требованиям, то они могут быть доработаны по согласованию с автором сотрудниками редакции. Услуги редакции по доработке рукописей статей платные.

Рукописи статей, поступившие в редакцию, рецензируются специалистами. Если у рецензента имеются обоснованные критические замечания, статья возвращается автору на доработку.

Редакция оставляет за собой право внесения в текст редакторских изменений, не искажающих смысла авторского текста. При поступлении в редакцию обоснованных критических замечаний, касающихся размещенного в журнале материала, редакция оставляет за собой право на их публикацию в порядке дискуссии.

Авторское право на конкретную статью принадлежит авторам. Ответственность за содержание статьи несет также автор. При перепечатке статьи или ее части ссылка на журнал обязательна.

Публикация в журнале учитывается ВАК в качестве печатного научного труда.

Рукописи, направленные в редакцию, авторам не возвращаются.

*Редакция журнала*