

РАСЧЕТЫ. КОНСТРУИРОВАНИЕ. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Гальшев Ю.В., Шабанов А.Ю., Румянцев В.В.,
Хильченко С.В., Ивановский Д.К.*
Анализ перспективных методов снижения мощности
механических потерь в форсированном дизельном
двигателе

Тер-Мкртычян Г.Г.
Трансформация рабочего цикла ДВС при разделении
и добавлении тактов

Путинцев С.В., Агеев А.Г.
Результаты моделирования деформации юбки
поршня быстрого дизеля от действия
гидродинамического давления масла

СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЕЙ. АГРЕГАТЫ

Шестаков Д.С., Кочев Н.С.
Метод определения и устранения неравномерности
цикловой подачи топлива при настройке ТНВД
многоцилиндровых дизелей

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ

*Гумеров И.Ф., Валеев Д.Х., Куликов А.С.,
Хафизов Р.Х., Борисенков Е.Р., Гатауллин Н.А.*
Опыт создания стенда для исследований
экологических показателей двигателей

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ ДВИГАТЕЛЕЙ

Патрахальцев Н.Н., Пилар Габриэла Борреро Гарсия
Анализ возможности повышения эксплуатационной
топливной экономичности судового дизеля

НОВОСТИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Технологии снижения выбросов NO_x и частиц
судовых дизелей
(материалы конгресса CIMAC 2013)

Новости ЗАО «Трансмашхолдинг»
Новый двигатель Коломенского завода

Новости ОАО «Волжский дизель имени Маминых»
Первый маневровый газотепловоз на базе
газопоршневого двигателя

ИНФОРМАЦИЯ

Рефераты статей

ANALYSES, DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF ENGINES

*Galyshev Yu.V., Shabanov A.Yu., Rumyantsev V.V.,
Khilchenko S.V., and Ivanovsky D.K.*
3 How to Reduce Mechanical Losses in High-Powered
Diesel Engine

Ter-Mkrtychyan G.G.
8 Transformation of Reciprocation Engine Working Cycle
by Strokes Separation/Addition

Putintsev S.V. and Agheev A.G.
18 Deformation of Piston Skirt in High-Speed Engine Caused
by Hydrodynamic Oil Pressure

ENGINE SYSTEMS AND UNITS

Shestakov D.S. and Kochev N.S.
22 Prevention of Fuel Injection Rate Non-Uniformity
During Mutli-Cylinder Injection Pump Tuning

ENVIRONMENTAL ISSUES

*Goomerov I.F., Valeyev D.H., Kulikov A.S.,
Khafizov R.H., Borisenkov E.R. and Gataullin N.A.*
26 Development of a Dedicated Stand for Engine Testing
for Environmental Performance

MAINTENANCE AND REPAIR ISSUES

Patrakhaltsev N.N. and Pilar Gabriela Borrero Garcia
31 Potential of Improving Marine Engine Fuel Efficiency

ENGINE BUILDING NEWS

Technologies of Reducing NO_x and Particle Emission
from Marine Diesel Engines
(based on review of CIMAC-2013 papers)

News from JSC Transmashholding
53 New engine developed by Kolomna Works

News from JSC Mamin Brothers Volzhsky Diesel
2 обл. Pioneer shunting locomotive powered by gas engine

INFORMATION

54 Synopsis

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л.А. Новиков, главный редактор

ПРЕДПРИЯТИЯ

В.А. Шелеметьев	<i>техн. директор</i>	<i>ОАО «Коломенский завод», г. Коломна</i>
В.А. Рыжов	<i>гл. конструктор</i>	<i>ОАО «Коломенский завод», г. Коломна</i>
Е.С. Васюков	<i>техн. директор</i>	<i>ЗАО УК БМЗ, г. Брянск</i>
А.К. Лимонов	<i>гл. конструктор</i>	<i>ОАО РУМО, Н. Новгород</i>
Е.И. Бирюков	<i>гл. конструктор</i>	<i>ОАО «Барнаултрансмаш», г. Барнаул</i>
В.М. Гребнев	<i>техн. директор</i>	<i>ОАО «Волжский дизель им. Маминых», г. Балаково</i>
Р.Х. Хафизов	<i>зам. гл. констр. по двиг.</i>	<i>ОАО КамАЗ, г. Набережные Челны</i>
А.А. Матюшин	<i>генеральный директор</i>	<i>ОАО ЗМЗ, г. Заволжье</i>
В.И. Федышин	<i>директор</i>	<i>МАН Ферросталь, Санкт-Петербургский филиал</i>
В.В. Коновалов	<i>1-й зам. ген.директора</i>	<i>ОАО «Звезда», Санкт-Петербург</i>
А.П. Маслов	<i>вед. инж.-конструктор</i>	<i>ООО ГСКБ «Трансдизель», г. Челябинск</i>
А.С. Калюнов	<i>начальник ИКЦ</i>	<i>ООО НЗТА, г. Ногинск</i>

НИИ

В.С. Папонов	<i>ген. директор</i>	<i>ОАО НИКТИД, г. Владимир</i>
Д.П. Ильющенко-Крылов	<i>гл. инженер</i>	<i>ЗАО ЦНИИМФ, Санкт-Петербург</i>
В.А. Сорокин	<i>зав. отделом</i>	<i>ЗАО ЦНИИМФ, Санкт-Петербург</i>
В.И. Ерофеев	<i>нач. отдела</i>	<i>1 ЦНИИ МО РФ, Санкт-Петербург</i>
В.В. Альт	<i>директор</i>	<i>ГНУ СибФТИ, г. Новосибирск</i>
Ю.А. Микутенко	<i>президент</i>	<i>ООО НПХЦ «Миакрон-Нортон»</i>
Б.А. Зеленев	<i>директор</i>	<i>НТЦ ПМТ ФГУП ЦНИИМ, Санкт-Петербург</i>
А.М. Махмудов	<i>с.н.с.</i>	<i>ФГУП «Крыловский ГНЦ», Санкт-Петербург</i>

ВУЗЫ

Ю.В. Галышев	<i>зав. кафедрой ДВС</i>	<i>СПбГПУ, Санкт-Петербург</i>
Н.Д. Чайнов	<i>проф. кафедры Э-2</i>	<i>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва</i>
О.К. Безюков	<i>проф. кафедры ТК СДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
А.А. Иванченко	<i>зав. кафедрой СЭУ</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
Л.В. Тузов	<i>проф. кафедры ТК СДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
А.С. Пунда	<i>проф. кафедры ДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
В.К. Румб	<i>проф. кафедры ДВС и АСЭУ</i>	<i>ГМТУ, Санкт-Петербург</i>
А.В. Смирнов	<i>нач. кафедры Д и ТУ</i>	<i>ФГОУ ВПО ВИ(ИТ), Санкт-Петербург</i>
В.О. Сайданов	<i>проф. кафедры Д и ТУ</i>	<i>ФГОУ ВПО ВИ(ИТ), Санкт-Петербург</i>
А.А. Обозов	<i>профессор кафедры ТД</i>	<i>ФГБОУ ВПО БГТУ, г. Брянск</i>
А.В. Разуваев	<i>профессор кафедры ТАМ</i>	<i>БИТТУ фил. ГОУ ВПО СГТУ г. Балаково</i>

Издатель журнала — ООО «ЦНИДИ-Экосервис», Санкт-Петербург.

Журнал издается при поддержке ФГОУ ВПО «Военный институт (инженерно-технический)» ВИ(ИТ), филиал «Военной академии материально-технического обеспечения», Санкт-Петербург.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата технических наук (www.vak.ed.gov.ru).

Электронные версии журнала (2005–2015 гг.) размещены на сайте «Научная электронная библиотека» (www.elibrary.ru) и включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

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

Сдано в набор 03.09.2015
Подписано в печать 20.09.15
Формат бумаги 60 × 90 1/8

Бумага типографская.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7
Зак. 261. Тираж 700 экз.
Цена договорная

Почтовый адрес редакции журнала:
ООО «ЦНИДИ-Экосервис», 191123, Санкт-Петербург, а/я 65

Тел.: +7 (921) 956-31-94

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

**ДВИГАТЕЛЕ
СТРОЕНИЕ**

Типография «СВЕТЛИЦА»
Лиц. ПД № 2-69-618, 196158,
Санкт-Петербург, Московское шоссе, 25, 215

© Журнал «Двигателестроение». 2015. № 3 (261)

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ МОЩНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ФОРСИРОВАННОМ ДИЗЕЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Ю.В. Галышев, д.т.н., доц., А.Ю. Шабанов, к.т.н., доц., В.В. Румянцев, к.т.н., доц., С.В. Хильченко, Д.К. Ивановский; ФГАОУ ВО «СПбПУ»–ОАО «Звезда»

Проведен анализ возможностей повышения механического КПД двигателя за счет оптимизации работы узлов трения цилиндропоршневой группы. Осуществлен комплекс мероприятий по снижению потерь трения в цилиндропоршневой группе: оптимизирована конструкция поршневых колец и профиля боковой поверхности тронка поршня; разработаны антифрикционные покрытия рабочих поверхностей поршня и цилиндровой втулки; разработаны энергосберегающее смазочное масло и обкаточный состав. Длительные испытания двигателей с использованием модифицированных цилиндропоршневых групп, в которых были реализованы предложенные конструктивные и технологические решения, подтвердили их эффективность. Это проявилось ростом эффективной мощности двигателя, снижением расхода топлива и скорости износа сопряжений трения. Разработанные решения в целом могут рассматриваться как комплексная технология оптимального проектирования узлов трения поршневого уплотнения высокофорсированных двигателей.

Повышение эффективной мощности и снижение удельного расхода топлива дизельного двигателя при сохранении заданных ресурсных показателей является основной задачей, решаемой на стадии проектирования и доводки двигателя. Одно из путей решения поставленной задачи — снижение внутренних непроизводительных потерь мощности, основные из которых — потери трения в цилиндропоршневой группе (ЦПГ) поршневого двигателя. Поэтому разработка эффективных методов снижения мощности трения в трибологических узлах ЦПГ — одна из самых актуальных задач современного двигателестроения.

Работа пар трения поршневые кольца–цилиндровая втулка и тронк поршня–цилиндровая втулка, помимо потерь на трение, определяет еще ряд важных показателей ДВС, таких как расход масла на угар, нетопливная токсичность и дымность отработавших газов, скорость износа и ре-

сурс двигателя, его пусковые характеристики. В этой статье остановимся на одном аспекте этой сложной и многопараметрической задаче — возможностях повышения механического КПД двигателя за счет оптимизации работы узлов трения ЦПГ.

Теоретически узел трения представляет собой трибологическую систему, образованную двумя рабочими поверхностями, одной — неподвижной, другой — перемещающейся относительно нее с заданной переменной скоростью, и разделяющим слоем смазочного материала. При этом, в зависимости от толщины разделяющего слоя, механизм трения в узле может быть как граничным, так и гидродинамическим.

Сила граничного трения $F_{тр}$ определяется зависимостью:

$$F_{тр} = -k_{тр} \cdot F_k \cdot \text{sign} \cdot (C_n),$$

где $k_{тр}$ — коэффициент граничного трения; F_k — сила прижатия поверхностей трения; C_n — мгновенная скорость поршня.

Для режима гидродинамического трения сила трения определяется законом Ньютона:

$$F_{тр} = -\mu S_{тр} (dU/dz),$$

где μ — динамическая вязкость смазочного масла; $S_{тр}$ — площадь зоны трения; dU/dz — поперечный градиент скорости.

Критерием перехода от граничного к гидродинамическому трению является величина толщины разделяющего слоя смазочного масла. Принимается, что переход к гидродинамическому режиму трения происходит тогда, когда толщина разделяющего слоя начинает превышать утроенную величину суммарной высоты шероховатостей поверхностей, образующих рассматриваемую пару трения (рис. 1).

Таким образом, теоретически существуют следующие основные пути для снижения силы и мощности трения в парах трения ЦПГ двигателя:

- снижение коэффициента трения $k_{тр}$ в парах трения поршневое кольцо–цилиндровая втулка и тронк поршня–цилиндровая втулка;
- уменьшение силы прижатия поршневого кольца и боковой поверхности поршня к цилиндровой втулке;

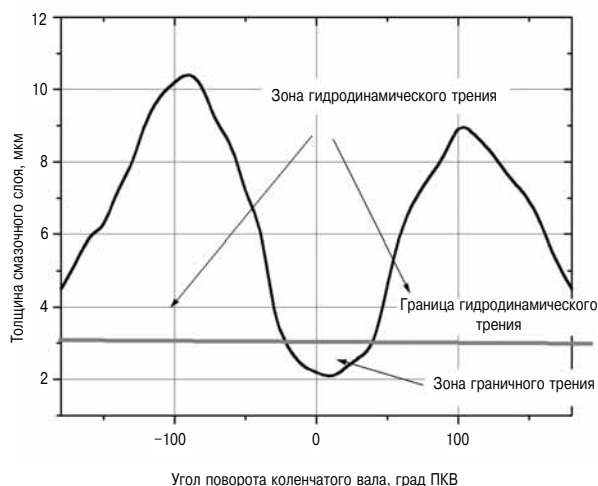


Рис. 1. Зоны граничного и гидродинамического трения в трибологической паре поршневое кольцо—цилиндрическая втулка

- оптимизация вязкости моторного масла для уменьшения силы гидродинамического трения;
- оптимизация условий смазывания, площади контакта и формы контактирующих поверхностей в рассматриваемых трибологических узлах.

Уменьшение скорости относительного движения поверхностей, однозначно определяемое скоростью поршня, не включается в число рассматриваемых методов.

Для высокофорсированного дизельного двигателя можно выделить следующие особенности работы трибологических узлов (в сопоставлении с поршневым двигателем меньшего форсирования):

- наличие больших газовых нагрузок на компрессионные поршневые кольца, определяемых значительными перепадами давлений в кольцевом лабиринте;
- большое различие газовой нагруженности поршневых колец на различных тактах рабочего цикла — сжатии, сгорании-расширении и газообмене;
- значительная газовая нагрузка, соизмеримая с давлением собственной упругости, действующая на маслоотъемное кольцо;
- высокие температуры в зоне работы поршневых колец и тронка поршня;
- большие инерционные нагрузки, определяемые значительной массой поршня, преимущественно выполняемого из тяжелых жаропрочных материалов.

Все это определяет наличие даже на режимах с большими частотами вращения коленчатого вала зон граничного трения, в которых нарушаются условия для формирования устойчивых смазочных слоев в трибологических узлах (рис. 2). В таких условиях для эффективного снижения потерь мощ-

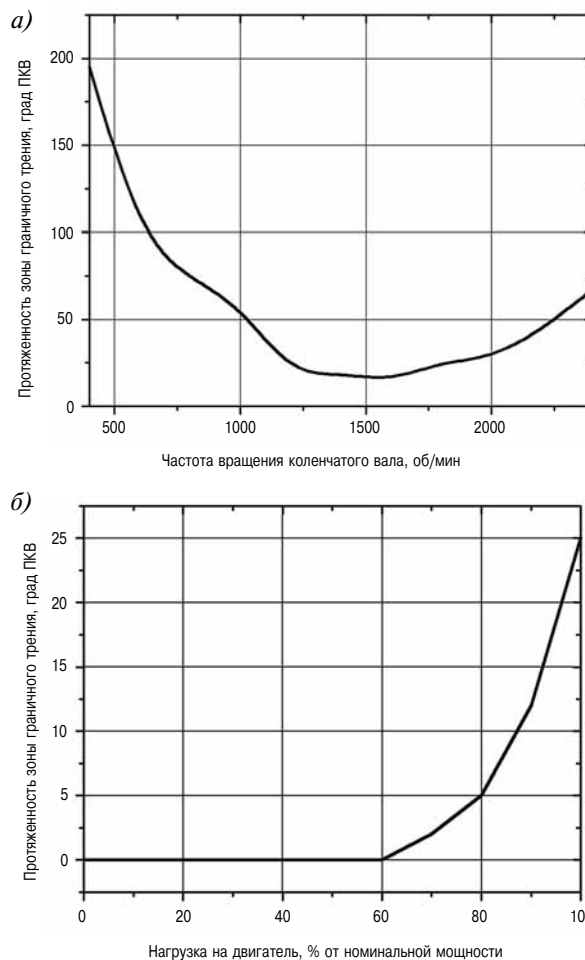


Рис. 2. Угловая протяженность зон граничного трения для трибологического узла поршневые кольца—цилиндрическая втулка высокофорсированного двигателя: а — внешняя скоростная характеристика; б — нагрузочная характеристика; $n = 1200$ об/мин

ности трения следует рассматривать все вышеперечисленные методы.

Рассмотрим возможные пути реализации каждого из предложенных выше методов снижения потерь трения на примере конструкции дизельного двигателя ряда ЧН16/17. В дальнейшем будут использованы результаты, полученные в ходе выполнения лота «Перспектива-ЦПГ» в рамках Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база».

Оптимизация условий смазывания, площади трения и формы контактирующих деталей осуществляется путем изменения конструкции поршня, поршневых колец и цилиндрической втулки. При этом решаются несколько взаимосвязанных задач:

- подбор и оптимизация конструкции поршневых колец по параметрам геометрических размеров, профиля и покрытия рабочей поверхности, тепловых зазоров, силе собственной упругости;

➤ оптимизация расположения поршневых колец на боковой поверхности поршня по условиям наилучшего маслообеспечения, сокращения зоны граничного трения с учетом изменения их температурного состояния;

➤ выбор оптимальных зазоров в паре трения головка поршня–цилиндровая втулка для обеспечения беззадирной работы сопряжения во всем эксплуатационном диапазоне работы двигателя, а также оптимизации газовой нагрузки на поршневые кольца;

➤ выбор оптимального профиля боковой поверхности тронка поршня для обеспечения требуемого маслоограничения зоны работы поршневых колец, снижения потерь трения в паре поршень–цилиндровая втулка с соблюдением условия обеспечения беззадирной работы тронка во всем эксплуатационном диапазоне работы двигателя;

➤ выбор оптимальной температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения двигателя.

Решение поставленной задачи строится на комплексном расчете работы трибологических узлов ЦПГ с учетом реальных температур и деформаций во всем спектре эксплуатационных режимов двигателя. Для моделирования этих процессов используются методики, разработанные на кафедре двигателя, автомобиля и гусеничные машины ФГАОУ ВО «СПБПУ» [3–5].

Одновременно с оптимизацией условий смазывания трибологических узлов ЦПГ решаются задачи по уменьшению нагруженности пар трения поршневой группы. Для компрессионных поршневых колец основная нагрузка формируется на тактах сжатия и сгорания–расширения за счет действующих на кольцах перепадах давления газов, прорывающихся через лабиринт уплотнения. Поэтому одной из важных задач оптимального проектирования системы поршневого уплотнения высокофорсированного двигателя является уменьшение этого перепада при сохранении или уменьшении общего уровня протечки рабочего тела из камеры сгорания в картер двигателя. Решение этой задачи достигается путем соответствующего выбора величин зазоров в замках компрессионных колец, расположения поршневых колец на боковой поверхности поршня и рабочих зазоров между головной частью поршня и цилиндровой втулкой.

Уменьшение величин контактных давлений в тронковой зоне при сохранении уровня форсирования двигателя и номинальной частоты вращения коленчатого вала может быть осуществлено только путем снижения инерционной составляющей боковой силы поршня. Это требует уменьшения массы поршневого комплекта при

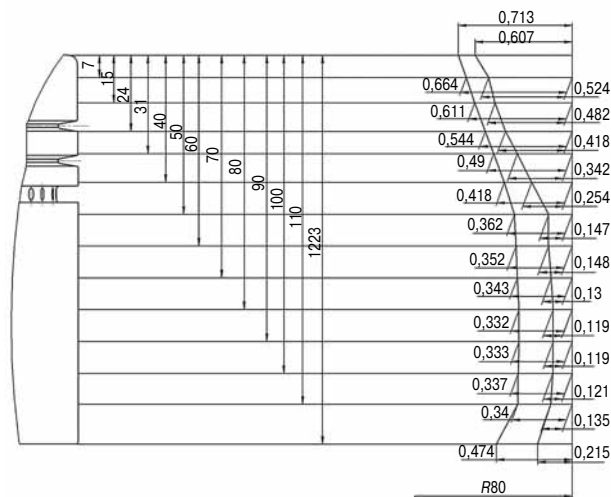


Рис. 3. Модифицированный вариант поршня дизеля ЧН16/17 с улучшенными трибологическими характеристиками

выполнении условий его работоспособности по температурам и напряжениям.

В результате реализации указанного выше комплекса мероприятий был предложен вариант поршневого комплекта двигателя ряда ЧН16/17 (рис. 3), в котором максимальным образом реализованы вышеуказанные мероприятия — оптимизирована форма боковой поверхности поршня по головной и тронковой частям, подобрано оптимальное расположение поршневых колец, улучшена их конструкция.

Важнейшим фактором снижения мощности механических потерь в ЦПГ является использование энергосберегающего смазочного масла. Как известно, эффект энергосбережения моторного масла может быть достигнут двумя основными способами — подбором оптимальной вязкостно-температурной характеристики, обеспечивающей минимальную мощность гидродинамического трения, а также использованием специальных антифрикционных присадок.

В рамках проведения описываемого исследования было разработано моторное масло, в котором реализованы оба принципа энергосбережения. Оптимальная вязкостно-температурная характеристика была рассчитана на стадии моделирования работы трибологических узлов ЦПГ дизеля ряда ЧН16/17 и реализована подбором базового масла нужной вязкости с добавлением комплекса загущающих присадок. Для реализации второго принципа энергосбережения был использован отечественный пакет беззольных противозносных и антифрикционных присадок на базе металлоплакирующих медьсодержащих составов. Общая концентрация пакета функциональных присадок в товарном масле существенно снижена без потери его физико-хими-

ческих и моторных свойств. Это обеспечивает длительный срок службы инновационного моторного масла. По содержанию активных компонент противозносного пакета разработанное масло относится к категории LowSAPS, что допускает его эффективное использование на современных высокофорсированных двигателях, оборудованных нейтрализаторами отработавших газов и сажевыми фильтрами.

Комплекс моторных стендовых испытаний, проведенных на разных типах двигателей, показал, что использование инновационного моторного масла обеспечивает снижение удельного расхода топлива на 1,5–3,0 % по отношению к маслу M14 Г₂ЦС.

Трибологическое качество рабочих поверхностей узлов трения деталей ЦПГ определяет величины коэффициентов трения, влияющие на силу и мощность механических потерь в зонах граничного трения. Кроме того, структура и микропрофиль рабочих поверхностей влияет на размер зон граничного трения и качество смазывания сопряжений ЦПГ.

Решение задачи повышения трибологического качества поверхностей в рамках настоящей работы выполнялось путем разработки антифрикционных покрытий рабочих поверхностей поршня и цилиндровой втулки.

Антифрикционное покрытие тронковой части поршня было выполнено с использованием инновационного наноматериала на базе дихалькогенида вольфрама WSe₂ в качестве активного материала. В качестве носителя активной компоненты использовался полимер полиимид на основе пиромеллитового диангидрида и диаминодифенилового эфира. Циклы лабораторных, аналоговых и моторных испытаний позволили выявить оптимальный фракционный состав наноматериала и его концентрацию ввода в носитель.

Основным преимуществом разработанного покрытия, в сопоставлении с известными антифрикционными покрытиями на базе графита и дисульфида молибдена, является его стойкость к истиранию, что резко увеличивает срок его службы. Так, по результатам испытаний модельных образцов на машине трения, разработанное покрытие обеспечивает уменьшение скорости износа (по диаметру лунки) практически в три раза при одновременном снижении коэффициента трения на 25–50 % в зависимости от режима трения.

Повышение трибологического качества рабочей поверхности цилиндрических втулок достигалась путем нанесения на нее антифрикционного слоя, содержащего латунь. Для этого была разработана специальная технология финишной обработки цилиндрических втулок и создано специальное приспособление.

Наличие защитного антифрикционного слоя благоприятным образом влияет на снижение мощности механических потерь в ЦПГ за счет следующих факторов. Латунированное покрытие имеет существенно более низкий коэффициент трения, чем стальная или чугунная основа втулки цилиндра (в среднем на 15–20 % по сравнению с чугунной втулкой и на 25–35 % по сравнению со стальной втулкой). Это способствует заметному уменьшению мощности механических потерь в зонах граничного трения. Кроме того, значительно улучшается качество поверхности цилиндра за счет резкого уменьшения высоты шероховатостей поверхностей, плакированных латунированным покрытием. Это снижает порог перехода от граничного к гидродинамическому режиму работы поршневых колец и тронка поршня.

В сочетании с использованием инновационного энергосберегающего моторного масла полученный результат существенно усиливается, что можно объяснить запуском механизма избирательного переноса, реализующего принцип безызносности Д.Н. Гаркунова [5].

Отдельное направление, важный итог реализации которого — снижение потерь на трение, является использование специальной технологии начальной обкатки дизельного двигателя. Период обкатки — крайне ответственный для формирования итоговых технико-экономических и ресурсных показателей современного высокофорсированного дизеля. В зависимости от качества начальной приработки поверхностей трения нового дизеля разбег итоговых мощностных показателей может составлять 3–5 %, а ресурсных — до 20–30 %.

Для реализации технологии начальной обкатки двигателя был разработан специальный обкаточный состав на базе минерально-силикатных композиций, в основе которых лежат геомодификаторы трения — мелкодисперсные порошки серпентинита, специально подобранного фракционного и группового состава. Путем проведения широкого цикла лабораторных, аналоговых и моторных стендовых испытаний, были подобраны режимы и длительность работы двигателя в период обкатки.

Испытания показали, что применение разработанного обкаточного состава позволяет заметно, на 10–15 %, снизить мощность потерь трения на всех эксплуатационных режимах по сравнению с двигателем, прошедшим обычный цикл обкатки. Кроме того, отмечено существенное, на 20–25 %, уменьшение скорости износа основных сопряжений трения ЦПГ дизеля.

Итоговые циклы длительных стендовых испытаний двигателей ряда ЧН16/17 и 8Ч12/12 (КамАЗ-740) (рис. 4) с использованием модифи-

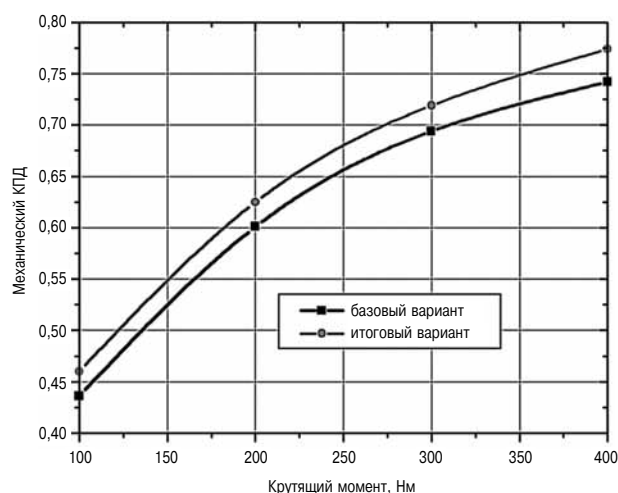


Рис. 4. Изменение механического КПД дизельного двигателя на режиме нагрузочной характеристики, $n = 1200$ об/мин. Варианты комплектации серийными и модифицированными вариантами ЦПГ

цированных цилиндропоршневых групп, в которых были реализованы описанные выше конструктивные и технологические решения, подтвердили их эффективность в плане снижения потерь мощности трения. Это проявилось ростом эффективной мощности двигателя, снижением расхода топлива, более выраженным в зоне режимов холостого хода и малых нагрузок (на 6–10 %). Кроме того, для обоих типов двигателей

было отмечено заметное снижение скорости износа сопряжений трения ЦПГ и дымности отработавших газов.

Таким образом, разработанные решения в целом могут рассматриваться как комплексная технология оптимального проектирования узлов трения поршневого уплотнения высокофорсированного ДВС.

Литература

1. Трение, изнашивание и смазка: справочник. В 2-х кн. / Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина. — М. : Машиностроение, 1979. — Кн. 2. Т.66 — 358 с.
2. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. — М. : Машиностроение, 1977. — 526 с.
3. Петриченко Р.М. Физические основы внутрицилиндровых процессов в ДВС. — Л. : Изд. ЛГУ, 1983. — 241 с.
4. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: Алгоритмы прикладных программ: учеб. пособие / Р.М. Петриченко, С.А. Батурин, Ю.И. Исаков и др.; под общ. ред. Р.М. Петриченко. — Л. : Машиностроение, 1990. — 328 с.
5. Трение и теплообмен в поршневых кольцах ДВС / Р.М. Петриченко, А.Ю. Шабанов и др. — Л. : изд. ЛГУ, 1990. — 320 с.
6. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н., Дудко П.П. Повышение надежности трибосопряжений. — СПб. : Изд. МКС, 2001.