

**РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ГИЛЬЗЫ ЦИЛИНДРА БЫСТРОХОДНОГО ДИЗЕЛЯ****Введение**

Характерной особенностью гильз цилиндров современных автотракторных и других типов дизелей, что подтверждается многочисленными моторными испытаниями, является значительный перепад температур зеркала гильзы по высоте. В зависимости от уровня форсирования температуры могут изменяться от  $250\div 300$  °С в верхней части посадочного бурта до  $90\div 100$  °С в нижней, охлаждаемой жидким теплоносителем, водой или антифризом. Приведенные температуры не являются оптимальными как с точки зрения потерь теплоты в систему охлаждения, так и с точки зрения условий смазки. Кроме того, существенные температурные градиенты по высоте гильзы вызывают дополнительные термические напряжения, развитие трещин. Возникает задача перераспределения подводимых и отводимых к гильзе тепловых потоков с целью их согласования, возможно управления при изменяющихся эксплуатационных режимах, оптимизации.

В работе на основе проведенных экспериментальных и расчетных исследований показана возможность выравнивания рабочих температур зеркала гильзы по высоте до оптимальных значений.

**Анализ публикаций**

Исследованию теплонапряженного состояния (ТНС) цилиндрических втулок расчетными и экспериментальными методами посвящены известные работы проф. Чайнова Н.Д., проф. Дьяченко Н.Х., проф. Шеховцова А.Ф. [1, 2, 4]. Решение задач ТНС с использованием метод конечных элементов (МКЭ) для деталей ДВС, в том числе и для цилиндрических втулок, детально рассматривается в работе [3].

Так в работе [4] рассмотрены результаты расчетно-экспериментального исследования ТНС гильзы цилиндра тракторного дизеля 4ЧН12/14 (СМД-18Н) на установившихся и на переходных режимах сброса-наброса нагрузки. Для уточнения граничных условий (ГУ) задач теплопроводности и механики был проведен моторный эксперимент с термометрией гильзы в 16-ти контрольных точках. Для расчетного моделирования ТНС гильзы использовалась осесимметричная математическая

модель (ММ), разработанная с использованием МКЭ в ИПМаш НАН Украины (пакет программ KROK). Расчеты и эксперимент позволили выделить наиболее напряженные участки гильзы и подтвердили выводы о существенной неравномерности распределения температур по высоте гильзы от 270 °С в верхней торцевой части до 95-100°С в ее нижней части.

В работе проф. Е.И. Третьяка [5] была сформулирована задача оптимизации теплового состояния цилиндрической втулки судового дизеля 6ЧН26/34, изложены возможные подходы и алгоритмы проведения такой оптимизации расчетным методом. Характерные требования при этом сводились к ограничению на температуру зеркала в зоне первого компрессионного кольца при положении поршня в ВМТ, к постоянству температуры зеркала цилиндра на участке трения поршня и поршневых колец о гильзу, получения заданного профиля температур образующей, полученного, например, из условий минимума потерь на трение. Постановка задачи оптимизации при разработке одного из алгоритмов была связана, как отмечается в [5], с необходимостью выбора ограничений на температуру зеркала гильзы. Одним из вариантов выбора допустимой температуры гильзы стало компромиссное решение, учитывающее, во-первых, зависимость коэффициента трения от температуры трущихся поверхностей в поршневом комплекте ( $f_{\text{трmin}}$  при  $t_{\text{ц}}=180-220$  °С) и, во-вторых, надежность и работоспособность гильзы из опыта эксплуатации ( $t_{\text{ц}}=160-170$  °С). Было принято условие  $t_{\text{ц}}\leq 165$  °С по высоте гильзы, вплоть до ее нижнего торца. Для достижения этого условия предлагалось уменьшение высоты охлаждаемого пояса, задача решалась методом последовательных приближений [5].

Для практического решения поставленной задачи в ходе экспериментальных исследований [6] Е.И. Третьяком рассматривались три конструктивных варианта цилиндрической втулки: с тепловой изоляцией нижнего пояса гильзы путем постановки дополнительной бандажной втулки и образования воздушной кольцевой полости; с тепловой изоляцией в виде органосиликатного покрытия; разделение серийной полости охлаждения посредством

уплотнительной втулки и охлаждения только верхнего оребренного пояса. Были получены положительные результаты по уменьшению расхода топлива, улучшению условий смазки и кавитационной стойкости гильзы.

Устранение фактора неравномерности температурного поля по высоте гильзы, которая в большей степени проявляется на форсированных режимах современных автотракторных и других типах ДВС, таким образом, является актуальным.

#### Цель и постановка задачи

Целью данной работы было проведение расчетно-экспериментального анализа условий выравнивания температуры гильзы по высоте до оптимальных или близких к ним значений.

В работе ставились и решались следующие задачи:

- анализ влияния локального воздушного охлаждения верхнего посадочного бурта гильзы на ее тепловое состояние в ходе безмоторного эксперимента, оценка эффективности локального охлаждения;

- уточнение ГУ задачи теплопроводности для варианта гильзы с локальным охлаждением;

- расчетное моделирование ТНС гильзы для серийного, охлаждаемого и комбинированного вариантов с одновременным охлаждением верхней части гильзы и теплоизоляцией её нижней, охлаждаемой водой, части при нанесении эмалевого покрытия.

#### Основные этапы и результаты исследования

В качестве объекта исследования была выбрана гильза цилиндра автотракторного дизеля 4ЧН12/14, что можно объяснить наличием большого объема информации расчетного и экспериментального характера о её ТНС. Моделировался номинальный режим дизеля СМД-18Н (4ЧН12/14) –  $N_e=73,6$  кВт,  $n=1800$  мин<sup>-1</sup>.

На первом этапе исследования была поставлена задача оценить эффективность локального охлаждения (ЛО) бурта гильзы сжатым воздухом. Применяемые для этой цели варианты охлаждения в судовых и тепловозных ДВС, которые в основном сводятся к выполнению системы проточных каналов между рубашкой жидкостного охлаждения блока, буртом и крышкой цилиндра, неприемлемы для автотракторных дизелей, из-за существенно меньшей их размерности, блочной конструкции головок цилиндров, сложностей, возникающих при

уплотнении газового стыка в местах протока жидкого теплоносителя. Оценка эффективности ЛО проводилась на безмоторном стенде, конструкция которого детально описана в работе [7]. Для образования проточной полости охлаждения в зоне верхнего опорного бурта серийной гильзы на посадочный пояс после его предварительной механической обработки был напрессован чугунный кольцевой бандаж с воздухоподводящим и воздухоотводящим штуцерами. Гильза оснащалась пятью хромель-алюмелевыми термопарами, равномерно расположенными по высоте гильзы. Нагрев гильзы осуществлялся плавильной печью до эксплуатационных температур в зоне верхнего бурта на номинальном режиме (250-260 °С) и поддерживался трансформатором с регулируемым напряжением.

В эксперименте определялись температуры гильзы в контрольных точках на режимах без подвода охладителя, а также с его подачей при избыточном давлении  $P_0=0,1$  МПа и  $P_0=0,2$  МПа, контролировались расход и температуры воздуха на входе и на выходе из гильзы. Контролировалась также динамика изменения температур в контрольных точках во времени от момента начала подачи сжатого воздуха до выхода на установившийся температурный режим. Результаты этого этапа исследования можно оценить по графикам, представленным на рис. 1.

Для уточнения ГУ задачи теплопроводности на охлаждаемых воздухом поверхностях опорного бурта гильзы была поставлена и решена с помощью МКЭ-модели серия тестовых задач. Уточненные значения ГУ 3-рода для различных режимов охлаждения бурта составили:  $\alpha=500...650$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $t_{рез}=40...70$  °С. Была проведена возможных дополнительных затрат в пересчете на  $z=4$  цилиндра. Для варианта применения в качестве источника сжатого воздуха приводного поршневого компрессора затраты на прокачку воздуха могут составить от 0,425 до 1,6 кВт. Снижение экономичности может быть компенсировано за счет роста уровня форсирования двигателя по температуре цикла, при которой ЛО обеспечит надежную работу двигателя. ЛО для улучшения экономичности предполагается использовать только на напряженных режимах и отключать на частичных при помощи автоматики.

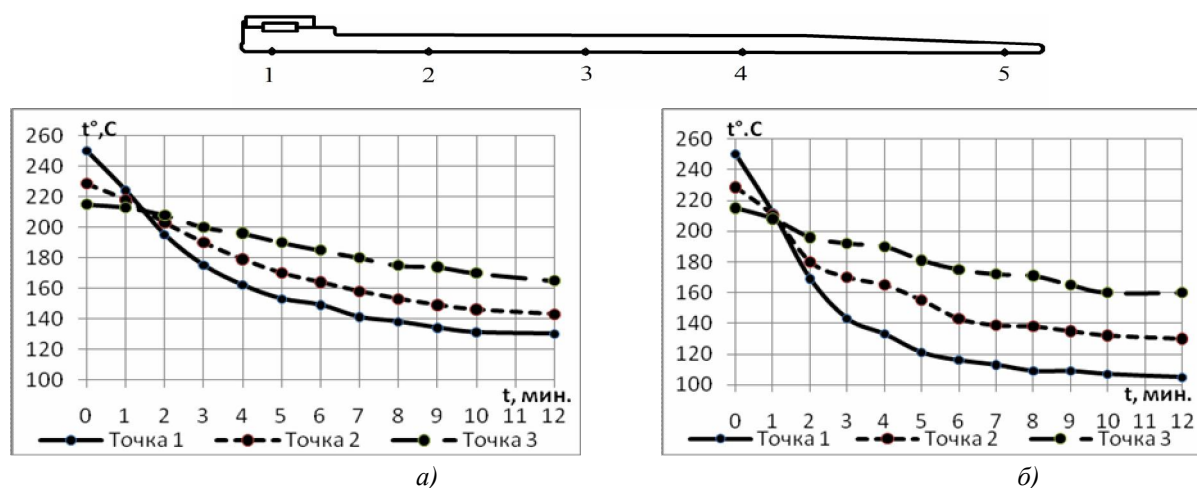


Рис. 1. Динамика изменения температуры в контрольных точках гильзы при подводе охладителя:  
а)  $P_e=0,1 \text{ МПа}$ ; б)  $P_e=0,2 \text{ МПа}$

Для проведения последующего расчетного этапа исследования необходимо было определиться с типом теплоизолирующего покрытия наружной поверхности гильзы, охлаждаемой водой. На основе проведенного анализа теплофизических свойств, технологий нанесения и практического применения для теплоизоляции деталей ДВС было выбрано эмалевое покрытие. Детальный анализ свойств такого покрытия, его ТНС при нанесении на детали ДВС был проведен проф. А.Ф. Шеховцовым в работе [8]. Отмечается высокое термическое сопротивление такого покрытия, позволяющее получить заметный теплоизоляционный эффект при сравнительно небольшой толщине. Условием целесообразности применения эмалирования деталей ДВС, кроме теплозащитного эффекта, является приемлемая долговечность покрытия. Наиболее распространенные дефекты – это трещинообразование в слое эмали и его скалывание с поверхности детали. С увеличением толщины покрытия его сопротивление трещинообразованию и сцепляемость с металлом ухудшается. Такой рекомендуемой толщиной, как отмечается в [8], является значение  $\delta \geq 0,5 \text{ мм}$ .

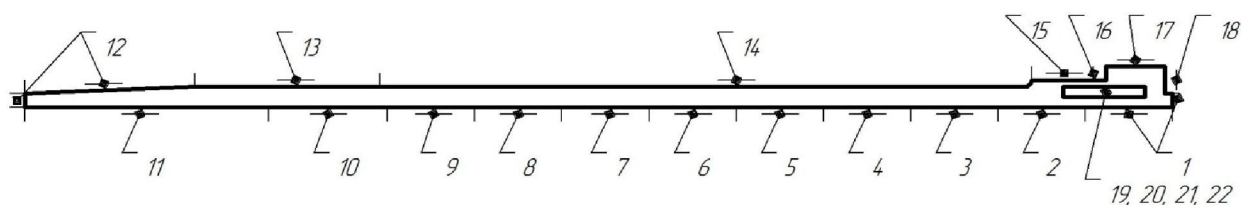
Положительные свойства эмалевых покрытий при их нанесении на чугунные изделия, детальное описание технологий нанесения приводятся в работе проф. Брагиной Л.Л. [9]. Эмалевые покрытия обладают очень низким, по сравнению с чугуном, коэффициентом теплопроводности ( $\lambda=0,84-1,24 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ), прочно и надежно удерживаются на чугуне, имеют простой способ нанесения. Эмалевые покрытия наносятся на металл в виде равномерного слоя определенной толщины. Этот слой после об-

жига обладает комплексом свойств, гарантирующих качество: оптимальной толщиной, минимальной разнотолщинностью, сплошностью и прочностью.

При уточнении ММ гильзы цилиндра с ЛО верхнего посадочного пояса и теплоизоляцией внешней поверхности гильзы в значительной степени были использованы результаты работы [4], моторных исследований, проведенных к.т.н. Левтеровым А.М. При построении расчетной модели принимались допущения: для всех расчетных вариантов гильзы использовалась осесимметричная модель; напряженно-деформированное состояние рассматривалось в пределах упругих деформаций. Решение задачи проводилось при помощи МКЭ и программного комплекса KROK [4].

Схема задания ГУ задачи теплопроводности для вариантов серийной гильзы, гильзы с локальным охлаждением верхнего пояса и комбинированным вариантом гильзы на номинальном режиме представлены на рис. 2.

Схема разбивки теплообменной поверхности для задания ГУ задачи теплопроводности была использована для всех 3-х конструктивных вариантов. При этом для первого варианта – чугунная гильза без охлаждения посадочного бурта и без теплоизоляции - для участков 19-22 принимался нулевой тепловой поток  $q=0$  и поверхностному слою конечных элементов на внешней боковой поверхности придавались свойства основного материала (серый чугун). Второй вариант отличался от первого тем, что в полость (участки 19-22) подводился охладитель. Условия теплообмена задавались через  $\alpha=550 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  и  $t_{\text{рез}}=40^\circ\text{C}$ .



№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19-22
$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	250	300	10000	5000	15000	150	200	550
t, °C	960	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	85	90	90	100	150	160	160	40
$q \cdot 10^4$ , Вт/м <sup>2</sup>	-	21,5	16	15,5	15	14	13,5	12	5	4	0,95	-	-	-	-	-	-	-	-

Рис. 2. Схема задания ГУ условий задачи теплопроводности

Третий вариант – гильза с локальным охлаждением и покрытием - поверхностному слою конечных элементов на участке 14 придавались свойства эмалевого покрытия толщиной  $\Delta=0,5$  мм, что не противоречит технологии нанесения и надежно-

сти покрытия в условиях эксплуатации, а также соответствует рекомендациям [8]. Теплофизические свойства покрытия и чугуна, которые принимались в расчетах ТНС, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Теплофизические свойства чугуна и эмалевого покрытия

Характеристики	Значение характеристик чугуна / эмали при t, °C			
	20	100	200	300
$\lambda$ , Вт/(м·К)	51,2 / 0,84	50,4 / 0,84	48,7 / 0,845	46,6 / 0,85
$\alpha \cdot 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>	9,2 / 9,1	10 / 9,3	11 / 9,5	12 / 9,7
E, ГПа	125 / 80	124 / 78	120 / 77	115 / 76
$\nu$	0,25 / 0,40	0,25 / 0,46	0,25 / 0,52	0,25 / 0,58
$\sigma_p$ , МПа	350 / 80	350 / 80	350 / 80	350 / 80

При задании ГУ задач механики, как и для задачи теплопроводности, моделируются тепловые и механические нагрузки, которые возникают на номинальном режиме с  $N_e=73,6$  кВт и  $n=1800$  мин<sup>-1</sup> для дизеля СМД-18Н. На данном режиме, как показали расчеты рабочего процесса, максимальные значения давления достигают  $P_z=9.5$  МПа. Рассматриваются механические нагрузки при нахождении поршня вблизи ВМТ в начале такта расширения, когда детали ЦПГ воспринимают максимальное давление. При определении распределения давления газов по высоте гильзы принимается во внимание размещение поршневых колец в базовой конструкции поршня СМД-18Н. Поверхность гильзы от ее верхнего торца до первого компрессионного кольца нагружена силой давления газов  $P_1=P_z=9,5$  МПа.; поверхность между 1-м и 2-м кольцами - давлением  $P_2=0,5P_1=4,75$  МПа, которое по линейному закону уменьшается до атмосферно-

го между 2-м и 3-м компрессионными кольцами, как показано на рис.3.

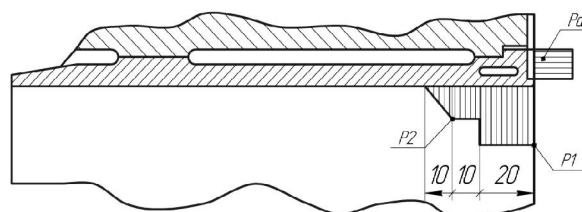


Рис. 3. Схема задания ГУ задачи механики

Кроме сил давления газов, которые действуют на зеркало гильзы в верхней ее части, учитывалась также сила давления  $P_a$ , которая возникает при затягивании силовых шпилек и герметизации газового стыка между головкой и блоком цилиндров. Указанная сила прикладывается к торцевой поверхности верхнего посадочного пояса. Принимаем, что по посадочным поясам, верхнему и нижне-

му, гильза установлена в блок с минимальным зазором.

На рис. 4 представлено температурное поле серийной неохлаждаемой гильзы и поле интенсивностей напряжений.

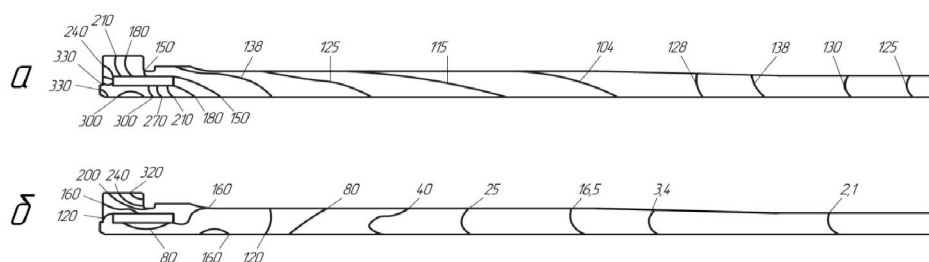


Рис. 4. Теплонапряженное состояние серийной гильзы:  
а) температурное поле, °С; б) поле интенсивности напряжений, МПа

Максимальная температура гильзы на верхней торцевой поверхности достигает 330 °С, в зоне работы первого и второго компрессионных колец, при нахождении поршня вблизи ВМТ температуры зеркала изменяются в пределах от 300 ÷ 220 °С. В то же время при переходе в зону жидкостного охлаждения наблюдается резкое снижение температур до уровня 125 ÷ 100 °С, что подтверждает ранее сделанные выводы о значительной неравномерности температурного поля по высоте гильзы. Среди составляющих напряженного состояния преобладают круговые напряжения: растягиваю-

щие - 250 МПа и сжимающие - 90 МПа в зоне верхнего посадочного бурта. Интенсивности напряжений в этой же зоне изменяются от 80 до 320 МПа. Максимальные напряжения, а также интенсивности напряжений наблюдаются вблизи концентраторов напряжений (острые кромки, минимальные радиусы округлений). Такие концентраторы можно устранить путем совершенствования конструкции охлаждаемой полости.

На рис. 5 представлено ТНС охлаждаемой гильзы.

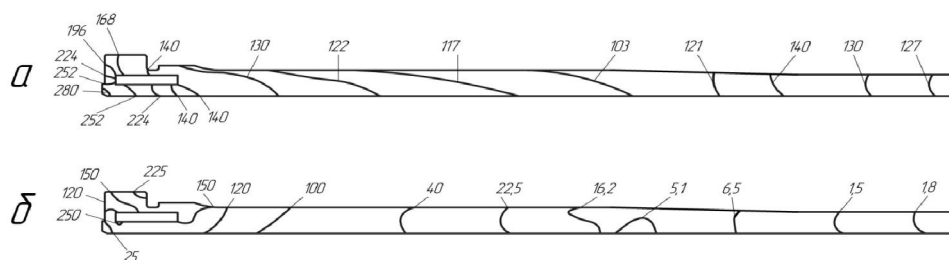


Рис. 5. Теплонапряженное состояние охлаждаемой гильзы:  
а) температурное поле, °С;  
б) поле интенсивности напряжений, МПа

Применение локального охлаждения с  $P_e = 0,1$  МПа позволило снизить температуры в зоне верхнего посадочного бурта в среднем на 50 ÷ 60 °С. При этом температуры зеркала гильзы на участке работы верхних компрессионных колец снизились до приемлемых 200 ÷ 220 °С, что, безусловно, способствует улучшению работы колец, увеличению моторесурса колец и гильзы. Охлаждение снижает интенсивности напряжений в зоне бурта в среднем на 60 ÷ 80 МПа, что можно объяснить некоторым выравниванием температуры между наружной и внутренней поверхностями бурта. Приведенные

расчеты ТНС охлаждаемой гильзы с  $P_e = 0,2$  МПа показали более существенное снижение температур гильзы в верхней части до 170 ÷ 190 °С. При этом локальное охлаждение бурта гильзы почти не влияет на температурное состояние нижней части (125 ÷ 105 °С), а также на уровень составляющих напряженного состояния.

Теплонапряженное состояние для варианта охлаждаемой гильзы с теплоизоляцией наружной поверхности представлено на рис. 6.

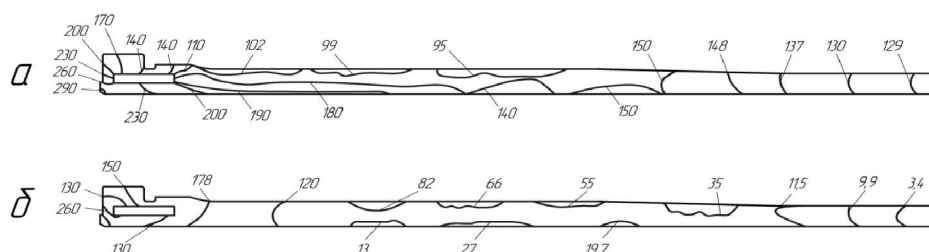


Рис. 6. Теплонапряженное состояние гильзы с ЛО и теплоизоляционным покрытием:  
а) температурное поле, °С; б) поле интенсивности напряжений, МПа

Отмечается незначительное ( $10 \div 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) повышение температур верхнего бурта, снижение напряжений в этой части. Существенно изменяется распределение и характер изотерм в нижней части гильзы. Изотермы размещаются вдоль рабочей поверхности гильзы и значительно отличаются по наружной и внутренней поверхностям гильзы:  $170 \div 180 \text{ }^\circ\text{C}$  - на зеркале;  $95 \div 100 \text{ }^\circ\text{C}$  - на внешней охлаждаемой поверхности. Разница в температурах между внутренней и наружной поверхностями приводит к заметному ( $80\text{-}90 \text{ МПа}$ ), но некритичному для эмалевого покрытия росту интенсивностей напряжений. Напряженное состояние верхней части гильзы для комбинированного варианта получаем близким по всем составляющим к охлаждаемому варианту без покрытия.

### Выводы

Проведенные расчетно-экспериментальные исследования подтвердили возможность получения оптимального распределения температур по зеркалу гильзы на уровне  $170 \div 180 \text{ }^\circ\text{C}$  на участках работы и наибольших нагрузок компрессионных колец. За счет подбора параметров охлаждающего воздуха и эмалевого покрытия можно варьировать температурой гильзы, уменьшая тепловые потери, механические потери на трение, износ колец и самой гильзы.

### Список литературы:

1. Чайнов Н.Д., Иващенко Н.А. Тепломеханическая напряженность деталей двигателей. М. 1977. 152 с. 2. Дьяченко Н.Х. Теория двигателей внутреннего сгорания. – Л., 1974. -552с. 3. Шабров Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. Л. 1983. 212с. 4. Шеховцов А.Ф. Тепловое и напряженно-деформированное состояние гильзы цилиндра быстроходного дизеля при нестационарных нагружениях. / А.Ф. Шеховцов, П.П. Гонтаровский, Ф.И. Абрамчук, А.М.

Левтеров // Двигатели внутреннего сгорания. – 1993. – Вып.54. – С. 9-22. 5. Третяк Е.И. Оптимальное конструирование с помощью ЭВМ гильз цилиндров дизелей по заданным механическим требованиям / Е.И. Третяк // Двигатели внутреннего сгорания. – 1993. – Вып. 54. – С. 54-56. 6. Третяк Е.И. Оценка возможности улучшения топливной экономичности судового дизеля 6ЧН26/34 при тепловой защите гильзы цилиндра / Е.И. Третяк, Б.Л. Гоцкало, О.С. Кинжалов и др. // Двигатели внутреннего сгорания. 1987.– Вып. 45. – с.33-39. 7. Тринёв А.В. Оценка эффективности локального охлаждения гильовки цилиндров дизеля КаМАЗ в безмоторном эксперименте / А.В. Тринёв, В.Т. Коваленко, С.В. Обозный и др. // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011 – №2. – С. 19-24. 8. Шеховцов А.Ф. Исследование напряженного состояния эмалевых покрытий деталей двигателей внутреннего сгорания / А.Ф. Шеховцов // Двигатели внутреннего сгорания. 1974. – Вып.19. – С. 108-120. 9. Технология эмали и защитных покрытий: учеб. пособие / Под ред. Л.Л. Брагиной, А.П. Зубехина. – Харьков: НТУ «ХПИ»; Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2003.-484с.

### Bibliography (transliterated):

1. Chajnov N.D., Ivawenko N.A. Teplomechanicheskaja naprjazhennost' detalej dvigatelej. M. 1977. 152 s. 2. D'jachenko N.H. Teorija dvigatelej vnutrennego sgoranija. – L., 1974. -552s. 3. Shabrov N.N. Metod konechnyh jele-mentov v raschetah detalej teplovyh dvigatelej. L. 1983. 212s. 4. Shehovcov A.F. Teplovoe i naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie gil'zy cilindra bystrohodnogo dizelja pri nestacionarnyh nagruzenijah. / A.F. Shehovcov, P.P. Gontarovskij, F.I. Abramchuk, A.M. Levterov // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – 1993. –Vyp.54. – S. 9-22. 5. Tretjak E.I. Optimal'noe konst-ruirovanie s pomow'ju JeVM gil'z cilindrov dizelej po zadannym mehanicheskim trebovanijam / E.I. Tretjak // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – 1993. – Vyp. 54. – S. 54-56. 6. Tretjak E.I. Ocenka vozmozhnosti uluchshenija toplivnoj jekonomichnosti sudovogo dizelja 6ChN26/34 pri teplovoj zavite gil'zy cilindra / E.I. Tretjak, B.L. Gockalo, O.S. Kinshalov i dr. // Dvigateli vnutrennego sgoranija. 1987.– Vyp. 45. – s.33-39. 7. Trinjov A.V. Ocenka jeffektivnosti lokal'nogo ohlazhdenija gilovki cilind-rov dizelja KaMAZ v bezmotornom jeksperimente / A.V. Trinjov, V.T. Kovalenko, S.V. Oboznyj i dr. // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – 2011 – №2. – S. 19-24. 8. Shehov-cov A.F. Issledovanie naprjazhennogo sostojanija jemale-vyh pokrytij detalej dvigatelej vnutrennego sgora-nija / A.F. Shehovcov // Dvigateli vnutrennego sgoranija. 1974. – Vyp.19. – S. 108-120. 9. Tehnologija jemali i za-witnyh pokrytij: ucheb. posobie / Pod red. L.L. Bragi-noj, A.P. Zube-hina. – Har'kov: NTU «HPI»; Novo-cher-kassk: JuRGTU (NPI), 2003.-484s.