

Р. З. Кавтарадзе, М. М. Арипджанов,  
Д. О. Онищенко

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ СОСТАВНОГО ПОРШНЯ С КЕРАМИЧЕСКИМ ТЕПЛОИЗОЛЯТОРОМ

*Приведены результаты моделирования теплового состояния трех вариантов конструкции поршня экспериментального дизеля. Показано, что использование нитрида кремния в качестве теплоизолирующего материала снижает общий температурный уровень поршня, способствует выравниванию его температурного поля и снижает термические напряжения. Верификация моделей осуществлялась путем сравнения расчетных данных с результатами измерения локальных температур как на металлической, так и на керамической частях составного поршня.*

**Ключевые слова:** локальный теплообмен, поршень, теплонапряженное состояние, тепловая изоляция, керамическая накладка.

За последние годы проведен большой объем работ по исследованию и применению конструкционной керамики в двигателестроении [1, 2]. Основное достоинство керамических материалов — материалов будущего — заключается в том, что они имеют меньшую (по сравнению с традиционно используемыми металлами) массу и могут эксплуатироваться при высоких температурах. Еще одно их немаловажное достоинство — сырье для производства керамических материалов, практически неисчерпаемо, так как из него состоит почти вся земная кора. Поскольку керамика является перспективным материалом для поршневых двигателей нынешнего столетия, то это обязывает автомобильную промышленность приложить все усилия, чтобы не остаться в роли догоняющего, и указывает на актуальность задачи создания экологически чистых двигателей с уменьшенными тепловыми потерями и нагрузками на основных деталях.

В настоящей работе рассматривается задача использования керамики как термобарьерного материала в целях защиты поршня от повышенных тепловых нагрузок со стороны высокотемпературного рабочего тела, а также снижения теплоотдачи в систему охлаждения.

Объектом исследования являлся одноцилиндровый четырехтактный дизель, спроектированный и построенный на базе универсального картера, поршневая группа которого была заимствована у тракторного двигателя СМД-14 (производство Алтайского моторного завода). Опытный базовый двигатель имеет камеру типа Гессельмана и четырехклапанную головку цилиндра, при этом для интенсификации вихревого движения воздушного заряда в одном из впускных клапанов установлена ширма с углом охвата  $120^\circ$ . Поворот клапана и фиксирование его в определенном положении осуществляется с помощью специального устройства. В головке дизеля по оси цилиндра

вертикально размещена насос-форсунка, там же имеются гнезда для пневмоэлектрического и пьезоэлектрического датчиков давления.

**Постановка краевой задачи теплопроводности для составного поршня.** Поршень является основной деталью, определяющей долговечность и надежность двигателя. Тепловое состояние поршня, как уже отмечалось, является одним из основных факторов, ограничивающих увеличение удельной мощности дизелей. Поэтому при создании новых и модернизации существующих образцов деталей двигателя, особенно составных деталей с термоизоляторами, исследование их теплового состояния имеет первостепенное значение.

Трехмерное температурное поле  $T = T(x, y, z, \tau)$  в поршне определяется уравнением теплопроводности Фурье

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где  $c, \rho, \lambda$  — теплоемкость, плотность и теплопроводность материала или поршня соответственно;  $x, y, z$  — декартовы пространственные координаты

При установившихся режимах работы двигателя температурные поля поршня получаются практически стационарными за исключением тонких слоев поверхности, в которых за цикл происходят колебания температуры с небольшой амплитудой (всего 5...8 °С). При использовании теплоизолирующих материалов амплитуда колебания температуры существенно растет, а глубина слоя уменьшается. В любом случае задача сводится к решению уравнения стационарной теплопроводности (уравнения Лапласа)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (2)$$

Условия однозначности, необходимые для решения уравнений (1) и (2), включают в себя распределение температуры внутри поршня в начальный момент времени (начальное условие — в случае уравнения Фурье), закон взаимодействия между окружающей средой и поверхностью тела (граничные условия), а также геометрическую форму и теплофизические свойства материала поршня.

Граничные условия III рода для решения стационарной задачи теплопроводности поршня определялись расчетным путем с использованием фундаментальной теории турбулентного пограничного слоя [3, 4]. В качестве исходных данных при этом были использованы как расчетные, так и экспериментальные индикаторные диаграммы, полученные на двигателе в стендовых условиях. Тестовые задачи решались также с применением граничных условий I рода, полученных на основе результатов физического моделирования.

Для контактирующих поверхностей составного поршня, у которого кроме металлических (обозначается индексом 1) имеются и керамические части (индекс 2), соответствующие условиям теплообмена между

двумя соприкасающимися телами граничное условие IV рода записывается в следующем виде:

$$\lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial n} \right) = \lambda_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial n} \right); \quad T_1(x, y, z, \tau) = T_2(x, y, z, \tau). \quad (3)$$

Для базового поршня (поршень без теплоизолятора) задача, конечно, упрощается, и применение граничных условий (3) уже не требуется.

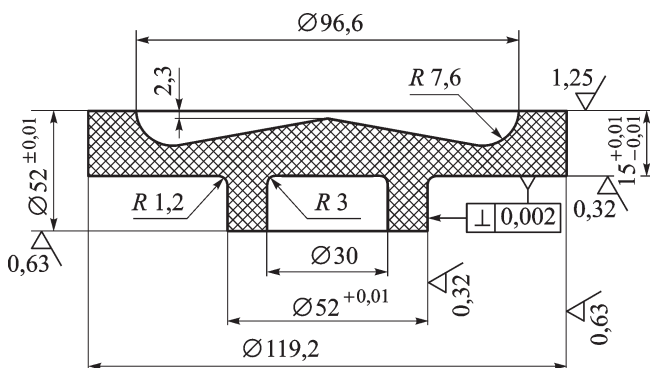
Применение нестационарных граничных условий (локальных мгновенных значений коэффициента теплоотдачи и температуры газа) позволяет получить циклически изменяющуюся температуру на тепловоспринимающей поверхности поршня [3].

**Краткое описание разработанных конструкций поршня.** Для уменьшения тепловых потерь и тепловой защиты теплоизоляция поршня имеет большее значение, чем теплоизоляция крышки цилиндра или гильзы. Это связано с тем, что, во-первых, поршень является термически наиболее нагруженной деталью, а во-вторых, известно, что при теплоизоляции только поршня потери теплоты теоретически могут быть уменьшены на  $\sim 26\%$  [3].

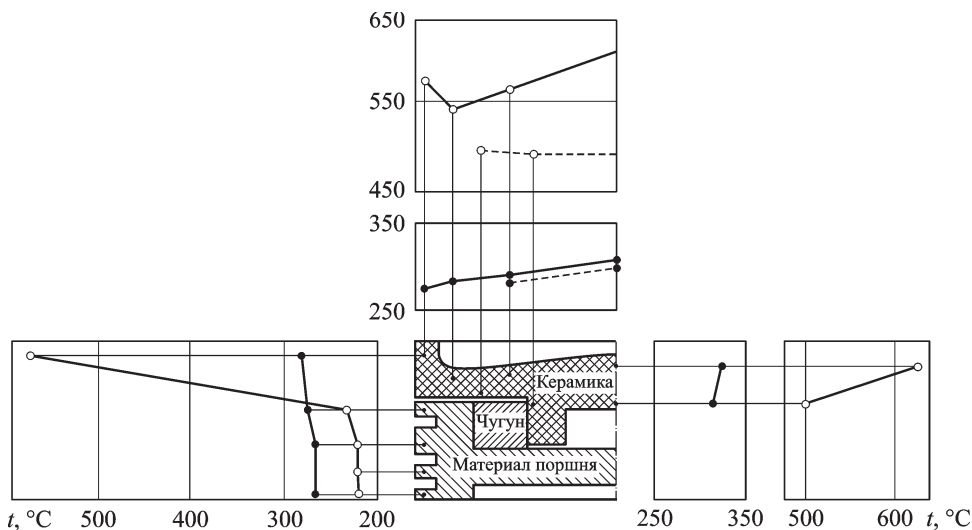
В настоящей работе решалась конкретная задача: уменьшение температуры поршня в зоне компрессионных колец, и особенно в зоне первого компрессионного кольца, путем установки керамической накладки в целях повышения надежности работы колец и кольцевых канавок в поршне.

Спроектирован и изготовлен составной поршень с керамической накладкой, конструкция которой приведена на рис. 1. Составной поршень представляет собой разъемное соединение деталей из материалов (рис. 2) с различными теплофизическими свойствами, которое в целях повышения его надежности удовлетворяет следующим требованиям.

1. Площадь контакта керамической накладки с корпусом из алюминиевого сплава по возможности минимальная.



**Рис. 1. Керамическая накладка для поршня, изготовленная из композиционного материала на основе нитрида кремния**



**Рис. 2. Сравнение измеренных локальных температур базового (---) и составного (—) поршней**

2. Торцевая часть чугунного соединительного кольца отделена от керамической накладкой воздушным зазором.

3. Боковая площадь контакта чугунного кольца с керамической накладкой находится далеко от тепловоспринимающей поверхности камеры сгорания и не подвергается воздействию высоких температур.

**Расчет теплового состояния базового поршня и поршня с теплоизолятором.** В качестве теплоизолирующего материала выбран нитрид кремния. Исследование теплонапряженного состояния проводилось для двух вариантов поршней: базового и теплоизолированного с керамической накладкой. Поскольку разработанные конструкции составных поршней кроме керамической накладки имели также и чугунную вставку (см. рис. 2), была составлена многоэтапная программа исследования теплонапряженного состояния поршней, предусматривающая расчет следующих вариантов.

1. Базовый поршень из алюминиевого сплава (теплопроводность  $\lambda = 150 \dots 160 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , плотность  $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент линейного расширения  $\alpha = 21 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ).

2. Составной поршень из алюминиевого сплава (без чугунной вставки) с керамической накладкой из нитрида кремния ( $\lambda = 18 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ,  $\rho = 3100 \text{ кг/м}^3$ ,  $\alpha = 3 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ).

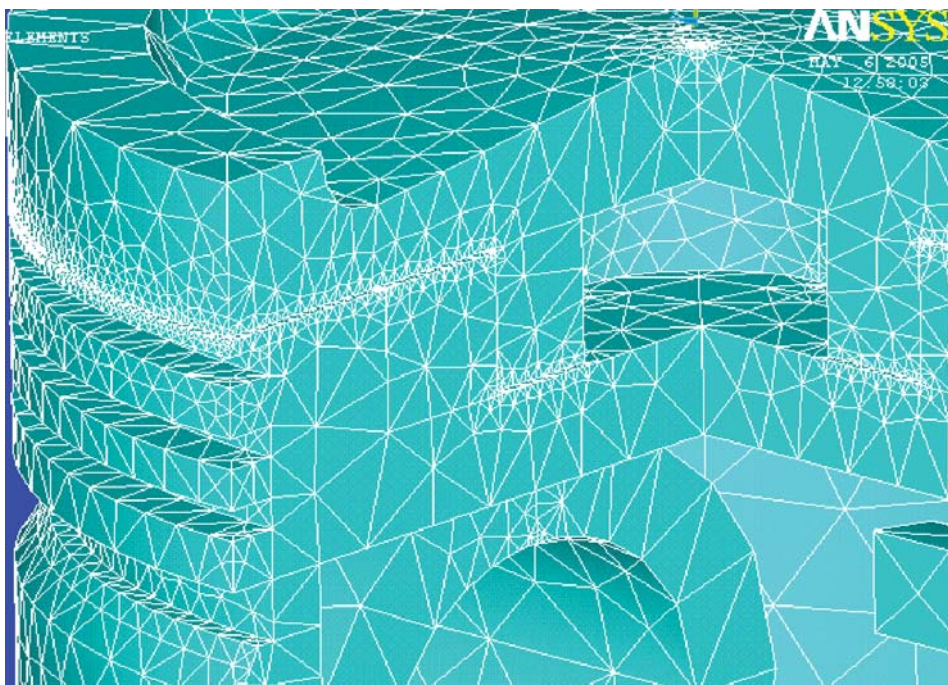
3. Составной поршень из алюминиевого сплава с керамической накладкой из нитрида кремния и вставкой из серого чугуна ( $\lambda = 65 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ,  $\rho = 7600 \text{ кг/м}^3$ ,  $\alpha = 13 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ).

Для каждого варианта поршня решались задачи трехмерной теплопроводности с применением уравнения Лапласа (2). Термические граничные условия задавались по результатам расчета рабочего процесса [3–5]. В качестве основного инструмента при моделировании трехмерных тепловых состояний базового и экспериментальных поршней

использован метод конечных элементов и созданный на его основе пакет прикладных программ ANSYS [6].

При генерации расчетной сетки основное внимание следует уделять контактным соединениям металлического и керамического материалов, так как именно на этих поверхностях возникают импульсы градиентов температуры, для определения которых используется уравнение Фурье (1). На рис. 3 в увеличенном масштабе показана конечно-элементная разбивка в области соединения керамической вставки из нитрида кремния и алюминиевого корпуса составного поршня. При этом хорошо заметен воздушный зазор ( $\delta \approx 0,5$  мм) в горизонтальной плоскости, расположенный между керамическими и металлическими частями поршня. В целом число элементов теплоизолированного поршня составляет 222 852, а число узлов — 359 705. Отметим, что при разбивке базового поршня по конечным элементам число элементов и число узлов значительно меньше и составляют соответственно 25 116 и 43 018.

Воздушный зазор является хорошим теплоизолятором, его наличие увеличивает надежность составной конструкции поршня, так как уменьшается площадь соприкосновения между керамикой и металлом, имеющими сильно различающиеся коэффициенты линейного расширения. Однако наличие зазора, размеры которого существенно меньше по сравнению с размерами самого поршня, усложняет разбивку по конечным элементам, увеличивает число расчетных узлов, время счета и объем памяти компьютера. Несмотря на это, исследование теплонапря-



**Рис. 3. Конечно-элементная разбивка в области соединения керамического и металлического материалов**



женного состояния поршня проводилось для реальных конструкций, использованных в экспериментальных исследованиях, без какого-либо упрощения, что обеспечивает получение достоверных результатов.

**Анализ теплового состояния базового поршня из алюминиевого сплава.** На рис. 4 приведены результаты моделирования теплового состояния стандартного (базового) поршня при работе двигателя на режиме максимальной мощности. Представляют интерес предельные значения температуры в характерных точках поршня. Как известно [3], температура поверхностей поршня, контактирующих со смазочным маслом минерального происхождения, не должна превышать значений  $T_w = 220 \dots 240 \text{ }^\circ\text{C}$ . Однако на режиме максимальной нагрузки температура в районе верхнего компрессионного кольца базового поршня достигает  $248 \dots 281 \text{ }^\circ\text{C}$  (см. рис. 3), что может привести к интенсивному лако- и нагарообразованию в результате окислации масла.

Максимальную температуру  $T_w = 414 \text{ }^\circ\text{C}$  поршень имеет в центральной части поверхности огневого днища, что превышает допустимые для алюминиевого сплава температурные границы ( $\sim 350 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Это указывает на опасность возникновения нежелательных последствий, связанных с изменением структуры материала, ухудшением его физико-механических свойств, приводящих к появлению трещин и поломкам детали.

Камера Гессельмана, используемая на исследуемом двигателе, характеризуется интенсивным движением высокотемпературного рабочего тела в области кромки поршня, особенно в процессах сжатия–сгорания–расширения. Сильная интенсификация конвективного те-

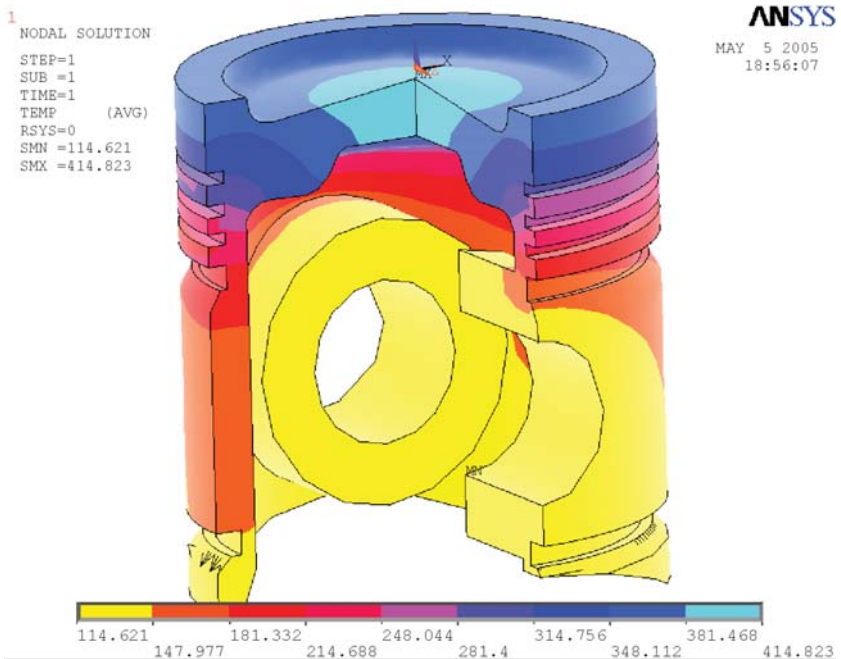


Рис. 4. Трехмерное температурное поле ( $^\circ\text{C}$ ) базового поршня

плообмена, сопровождаемая воздействием теплового излучения, приводит к высоким тепловым нагрузкам в этой области камеры сгорания, и температура на кромках поршня повышается до  $T_w = 348 \dots 381 \text{ }^\circ\text{C}$ .

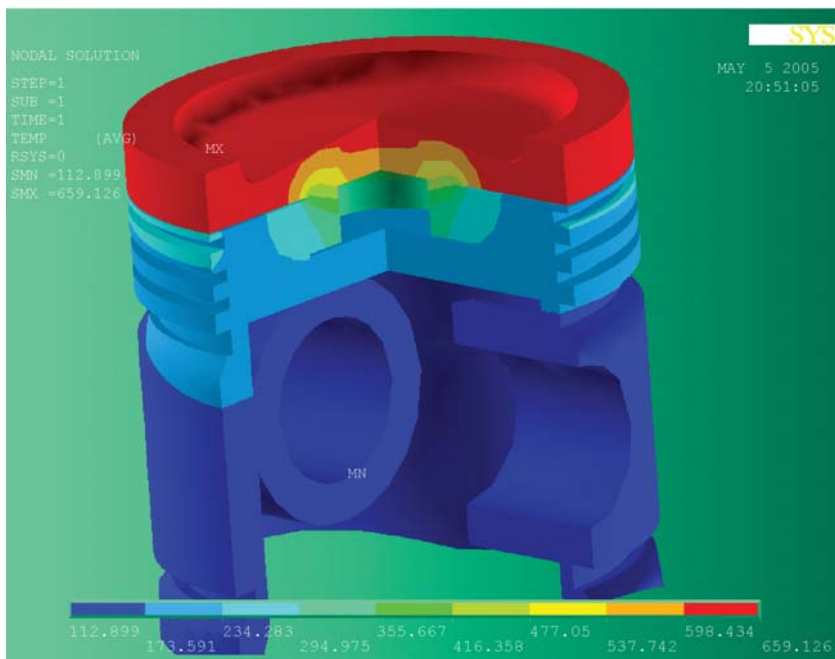
Если обратить внимание на то, что значения температур в нижней части поршня (бобышки для крепления поршневого пальца, юбки поршня) не превышают  $114 \text{ }^\circ\text{C}$ , то становится очевидным, что в целом в поршне возникают высокие градиенты температуры.

Таким образом, исследование теплового состояния базовой конструкции поршня указывает на необходимость ее термической защиты, т.е. на проведение таких мероприятий, которые привели бы к уменьшению температуры и градиентов температуры в поршне. В связи с этим были разработаны конструкции опытных поршней, в которых в качестве теплоизоляционных материалов использована керамика или керамика с чугуном.

**Тепловое состояние экспериментального составного поршня из алюминиевого сплава с керамической накладкой из нитрида кремния.** При расчете теплонапряженного состояния составного поршня контакт между частями из различных материалов считается идеальным, т.е. без промежуточного термического сопротивления. На рис. 5 приведено трехмерное температурное поле опытного поршня из алюминиевого сплава с керамической накладкой из нитрида кремния. Наличие керамического теплоизолятора обуславливает снижение градиентов температуры и приводит к более равномерному распределению температуры в поршне. При этом наиболее контрастные изменения локальных температур наблюдаются на стыке материалов с различными теплофизическими свойствами.

По сравнению с поршнем базовой конструкции температуры всех характерных областей данного поршня заметно уменьшаются, за исключением, конечно, тепловоспринимающей поверхности поршня. Температура этой поверхности (максимальная температура поршня) достигает  $T_w = 659 \text{ }^\circ\text{C}$  (см. рис. 5), что объясняется низким значением коэффициента теплопроводности нитрида кремния по сравнению с алюминиевым сплавом. Таким же образом температура на кромке поршня повышается до  $T_w = 598 \text{ }^\circ\text{C}$ . Несмотря на относительно высокую температуру керамического днища поршня ( $T_w = 598 \dots 659 \text{ }^\circ\text{C}$ ) градиенты температуры в днище меньше (см. рис. 5), чем в случае базового поршня (см. рис. 4). С точки зрения теплового состояния поршня это хорошо, так как снижаются термические напряжения. С другой стороны, для обеспечения приемлемых эффективных и экологических показателей двигателя необходимо, чтобы параметры рабочего процесса (давление и закон впрыскивания топлива, конвективный и лучистый теплообмен, интенсивность закрутки и т.п.) оценивались, регулировались и устанавливались с учетом температуры поверхности камеры сгорания.

Из рис. 5 видно, что значения температуры в области поршневых колец, особенно в области верхнего поршневого кольца, заметно снижаются (до  $T_w = 173 \dots 234 \text{ }^\circ\text{C}$ ). При этом максимальное значение



**Рис. 5. Трехмерное температурное поле (°C) опытного поршня из алюминиевого сплава с керамической накладкой из нитрида кремния**

$T_w = 234^\circ\text{C}$  наблюдается на относительно небольших поверхностях только верхнего компрессионного кольца. Очевидно, что в таком случае опасность лако- и нагарообразования в результате выгорания смазочного масла отпадает.

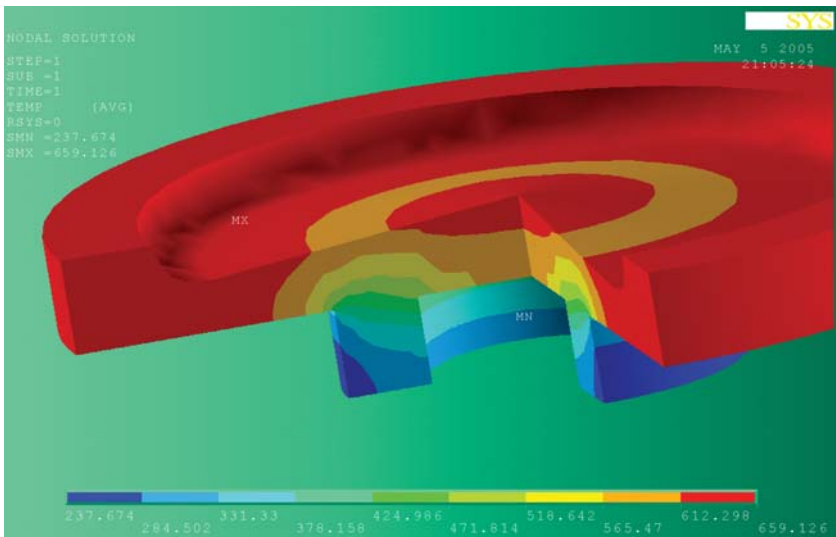
Температура поверхности поршня в области бобышек и юбки практически не меняется и остается на уровне  $T_w = 112 \dots 113^\circ\text{C}$  (см. рис. 5). Низкие температуры в нижней части поршня сохраняются благодаря небольшому воздушному зазору между теплоизолятором и алюминиевым корпусом поршня, играющему роль теплового барьера при теплопередаче от изолятора к корпусу поршня.

Таким образом, применение керамического теплоизолятора не только снижает температуру, градиенты температуры и тепловые напряжения, но и улучшает условия работы поршневых колец и гильзы, снижает расход смазочного масла. Следует также заметить, что немаловажным фактором является то, что снижаются относительные потери теплоты в масляную систему. Расчетно-экспериментальные оценки показывают, что потери теплоты в масляную систему на номинальном режиме работы двигателя 1Ч 12/9,6 в случае базового поршня в тепловом балансе составляют  $\sim 7\%$ , а при использовании поршня с керамической накладкой эти потери снижаются до  $3,5\%$ , т.е. в 2 раза. Если учесть также, что снижение этих потерь приводит к более простой конструкции и уменьшению габаритных размеров масляного охладителя, снижению мощности на привод вентилятора, то становится очевидным, что эти преимущества теплоизолированного двигателя тоже имеют важное практическое значение.

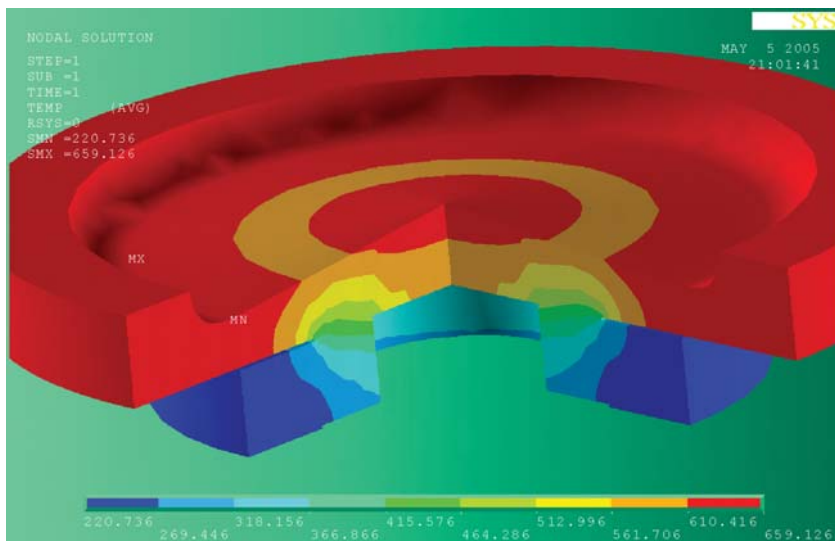


Подробная картина температурного поля керамической накладки (рис. 6) показывает, что минимальная ее температура  $T_w = 237^\circ\text{C}$  получается на поверхности ее нижней части, соединяющей с алюминиевым корпусом. Как видно, градиенты температуры возникают в основном в нижней кольцевой части керамической накладки, а не в огневом днище, что можно объяснить наличием контакта с алюминиевым корпусом поршня, играющего теплоотводящую роль. Как было отмечено, над нижним торцом керамической накладки имеется воздушная прослойка, отделяющая керамическую деталь от алюминиевого корпуса и играющая роль теплового барьера. Наличие этого промежуточного слоя воздуха обуславливает накопление подводимой тепловой энергии в периферийной части накладки и температурное поле в этой области более равномерное ( $T_w = 612 \dots 659^\circ\text{C}$ ).

**Тепловое состояние опытного составного поршня из алюминиевого сплава с керамической накладкой из нитрида кремния и вставкой из серого чугуна.** В этой конструкции теплоизолирующая накладка, изготовленная из композиционного материала на основе нитрида кремния методом горячего прессования, крепится к юбке алюминиевого поршня механическим способом с помощью цилиндрической вставки из чугуна и проходящих через эту вставку четырех болтов. Кроме чугунной вставки поршень имеет также соединительную вставку, представляющую собой чугунное цилиндрическое кольцо с внутренним  $d_1 = 52$  мм и внешним  $d_2 = 80$  мм диаметрами и высотой  $h = 15,2$  мм. Конечно, соединительное кольцо может оказать влияние на температурное поле огневого днища поршня. В связи с этим были проведены численные эксперименты в целях определения роли чугунного кольца в теплонпряженном состоянии опытного поршня. Результаты этих исследований приведены на рис. 7.



**Рис. 6. Трехмерное температурное поле ( $^\circ\text{C}$ ) керамической накладки из нитрида кремния без чугунной вставки**



**Рис. 7. Трехмерное температурное поле (°C) керамической накладки из нитрида кремния с чугунной вставкой**

Сравнение трехмерных температурных полей на рис. 6 и 7 показывает, что наличие или отсутствие чугунного кольца практически не меняет тепловое состояние керамического теплоизолятора. Максимальная температура ( $T_w = 659^\circ\text{C}$ ) и локальная область ее существования (поверхность углубленной части камеры) остаются неизменными. Что касается минимальной температуры, то она снижается от  $T_w = 237^\circ\text{C}$  (см. рис. 6) до  $T_w = 220^\circ\text{C}$ . Область минимальной температуры, как и ожидается в таких случаях, находится на периферийной части чугунного кольца. Такое незначительное влияние чугунного соединительного кольца на теплонапряженное состояние днища поршня объясняется двумя факторами: низким коэффициентом теплопроводности нитрида кремния по сравнению с чугуном и алюминиевым сплавом; относительно малой контактной площадью теплообмена между керамической накладкой и чугунной вставкой. Эти факторы обуславливают аккумуляцию основной части тепловой энергии, подводимой со стороны рабочего тела, в керамической накладке.

**Результаты измерения локальных температур поршня.** Верификация разработанных математических моделей осуществлялась путем сравнения расчетных данных с экспериментальными результатами, полученными на тепловом стенде, предназначенном для физического моделирования теплового состояния поршней как при стационарных, так и нестационарных тепловых нагрузках. Подробное описание экспериментальной установки приведено в работе [7]. Тепловой стенд позволяет в идентичных условиях проводить термодинамические испытания исследуемых (базового и двух экспериментальных) поршней одновременно. Для термометрирования базового (из алюминиевого сплава) поршня применялись хромель-копелевые термопары из термоэлектродных проволок диаметром 0,3 мм. Термометрирование

керамических вставок проводилось хромель-алюмелевыми термопарами. С этой целью в керамических вставках были просверлены каналы диаметром 3 мм, в которых с помощью керамических трубок и высокотемпературного клея крепились термопары. Расположение термопар в характерных зонах керамической и металлической частей поршня показано ранее на рис. 2. Там же приведены значения локальных температур, полученные в результате физического моделирования на тепловом стенде. Как видно, влияние керамической накладки на локальные температуры металлической части поршня существенно. Отметим, что расстояние от горячего спая термопары до тепловоспринимающей поверхности поршня находилось в пределах  $1,9 \pm 0,1$  мм, а относительная погрешность измерений температуры не превышала 3%. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений локальных температур, полученных при термических граничных условиях, соответствующих стендовым условиям, показало хорошее согласование (разница в пределах 5%).

Установлено, что нестационарные (циклические) термические нагрузки способствуют возникновению и развитию трещин в керамическом днище составного поршня. Расчетный анализ температурных полей составных конструкций показывает, что в области соединения материалов с различными теплофизическими свойствами возникают большие градиенты температуры [3, 4], изменение которых носит импульсивный характер, что наглядно наблюдается только при численных экспериментах. Эти импульсы градиентов температуры и являются основной причиной образования трещин. В связи с этим целесообразно применение керамики с улучшенными теплофизическими и механическими свойствами [1]. В базовой конструкции поршня, изготовленного из алюминиевого сплава, трещин обнаружено не было.

**Выводы.** 1. Разработаны и реализованы трехмерные модели для исследования теплонапряженного состояния серийного (базового) поршня, поршня с керамической вставкой и поршня с керамической вставкой и дополнительным чугунным кольцом, предназначенных для быстроходного дизеля с непосредственным впрыскиванием топлива.

2. Применение керамического материала (нитрида кремния) в качестве теплоизолятора поршня приводит как минимум к трем положительным факторам: 1) снижению общего температурного уровня поршня; 2) выравниванию температурного поля, в результате чего уменьшаются термические напряжения, приводящие сначала к образованию трещин, а затем поломке поршня и выходу двигателя из строя; 3) уменьшению отвода теплоты от рабочего тела, снижению количества теплоты, переданной в систему охлаждения, увеличению энтальпии выпускных газов, что создает благоприятное условие для турбонаддува и увеличения мощности турбины.

3. Анализ температур в характерных областях (в центральной части поверхности огневого днища поршня, на кромке поршня, в области верхнего компрессионного кольца) показывает, что на режиме максимальной нагрузки базового двигателя максимальные температуры

могут превышать допустимые пределы. Это подтверждает необходимость тепловой (термической) защиты поршня базовой конструкции в целях повышения долговечности и надежности двигателя.

4. Применение теплоизолятора приводит к снижению температуры на поверхности юбки поршня, в том числе в сечении, перпендикулярном к оси поршневого пальца, которое в результате воздействия боковой силы подвергается усиленному трению и изнашивается. Уменьшение температуры в этой части поверхности юбки имеет существенное практическое значение, так как позволяет уменьшить тепловой зазор между поршнем и гильзой цилиндра и улучшить условия работы поршневой группы на режимах частичной нагрузки. Это особенно важно для быстроходных дизелей, длительное время работающих на этих режимах. В области бобышек поршня изменение температуры юбки при установке керамической накладки на поршень менее чувствительно, так как сами бобышки теплоотводящие.

5. Численные эксперименты по исследованию трехмерных температурных полей базового и опытных поршней подтверждают, что наличие керамическойкладки на поршень приводит к увеличению максимальной температуры поверхности в центральной части камеры сгорания на 245 °С (от 414 до 659 °С). Такой рост температуры на тепловоспринимающей поверхности поршня в случае керамическойкладки объясняется низкой теплопроводностью нитрида кремния по сравнению с алюминиевым сплавом.

6. Установка разработанного варианта чугунного цилиндрического кольца как соединительного звена между керамической накладкой и корпуса поршня из алюминиевого сплава на теплонапряженное состояние составного поршня оказывает незначительное влияние.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M a y U., K a u f m a n n H., M a y R. J. Hochleistungskeramik unter zyklischer Beanspruchung // Konstruktion 58 (2006) 11/12, IW10-11.
2. M a y U., S t r o m b e r g e r F., K o h l J., S c h u b e r t J., B e r r o t h K., K a i l e r A. Technology potential of ceramic piston pins // MTZ. – 2008. – No. 5. – P. 46–51.
3. К а в т а р а д з е Р. З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 472 с.
4. Р а с ч е т радиационно-конвективного теплообмена в камере сгорания дизеля / Р.З. Кавтарадзе, А.И. Гайворонский, В.А. Федоров и др. // Теплофизика высоких температур. – 2007. – Т. 45. № 5. – С. 741–748.
5. T a t s c h l R., S c h n e i d e r J., B a s a r a B., B r o h m e r A., M e h r i n g A., H a n j a l i c K. Fortschritte in der 3D-CFD Berechnung des gas- und wasserseitigen Wärmeübergangs in Motoren // 10. Tagung “Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors”. Graz, Austria, 22-23 September. 2005. – 17 s.
6. Б а с о в К. А. ANSYS в примерах и задачах. – М.: Изд-во Компьютер пресс, 2002. – 224 с.

7. Арипджанов М. М. Некоторые результаты расчетно-экспериментального исследования теплового состояния поршня транспортного дизеля // Материалы науч.-техн. конф. “Вторые Луканинские чтения. Пути решения энергоэкологических проблем в автотранспортном комплексе”. – М.: Изд-во МАДИ, 2005. – С. 41–42.

Статья поступила в редакцию 25.09.08

Реваз Зурабович Кавтарадзе родился в 1951 г., окончил в 1973 г. Грузинский политехнический институт (г. Тбилиси). Д-р техн. наук, профессор кафедры “Поршневые двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Член Национального комитета по теплообмену РАН. Автор более 130 научных работ, в том числе 6 монографий и учебников, в области теории теплообмена и поршневых двигателей.



R.Z. Kavtaradze (b. 1951) graduated from the Georgian Polytechnic Institute (Tbilisi) in 1973. D. Sc. (Eng.), professor of “Reciprocating Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University, member of National Committee on Heat Mass Exchange, RAS. Author of more than 120 publications including 6 monographs and textbooks in the field of heat exchange and reciprocating engines.

Мадаминжон Марыпович Арипджанов родился в 1951 г., окончил в 1973 г. Ташкентский автомобильно-дорожный институт (ТАДИ). Д-р техн. наук, профессор ТАДИ. Автор более 50 научных работ в области поршневых двигателей.



M.M. Aripdzhanov (b. 1951) graduated from the Tashkent Automobile and Road Institute in 1973. D. Sc. (Eng.), professor of the Tashkent Automobile and Road Institute. Author of more than 50 publications in the field of reciprocating engines.

Дмитрий Олегович Онищенко родился в 1976 г., окончил в 1999 г. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Поршневые двигатели” МГТУ им. Н. Э. Баумана. Автор более 15 научных работ в области поршневых двигателей.



D.O. Onishchenko (b. 1976) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1999. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Reciprocating Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 15 publications in the field of reciprocating engines.