



## Модифицированный квазистационарный метод изучения изменения температур перехода поршней дизельного двигателя, покрытых теплозащитными материалами

© М.Ш.Х. Аль-Бдейри, В.В. Красильников, С.В. Сергеев

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

**Резюме:** Цель – выявить сложные переходные пути теплового потока в камере сгорания двигателя, значительно улучшить модели теплового потока дизельного двигателя и изучить влияние оксидного алюминиевого покрытия гальваноплазменной модификацией на кратковременные и долгосрочные реакции головки поршня. Анализ работы поршня дизельного двигателя с покрытием из алюминиевого сплава проведен с помощью модифицированного квазистационарного метода и метода конечных элементов. Представлен термодинамический анализ с применением уравнений энергии и состояния с соответствующей теплопередачей газа. Зависящие от времени граничные условия задавались на газообдуваемых поверхностях двумерных переходных моделей конечного элемента компонентов камер сгорания. Показано, что данная методология может раскрыть сложные переходные пути теплового потока в камерах сгорания двигателя и детали распределения тепловых потерь в различных охлаждающих средах. Численное моделирование показало, что увеличение максимальной температуры относительно поршня без покрытия составляет 64,3% для покрытия толщиной 0,13 мм. Испытания показали, что покрытия могут выдерживать до 280 термоциклов. Установлено, что прогнозы численного моделирования находятся в хорошем согласии с результатами экспериментов, которые были выполнены для отремонтированных поршней. В результате опытной эксплуатации двигателей Cummins KTA 38 на Черногорском и Восточно-Бейском угольных разрезах двигатель, имеющий после ремонта поршень с нанесенным гальваническим плазменным методом алюминиевым покрытием, находился в эксплуатации 2 года и 3 месяца при установленном межремонтном ресурсе 18000 моточасов. Таким образом, предлагаемая методика позволяет уменьшить изменения температуры в поршне и тем самым увеличить срок службы поршней двигателя, покрытых с использованием технологии термического барьерного покрытия.

**Ключевые слова:** модифицированный квазистационарный метод, гальваноплазменная модификация, термодинамика, теплообмен, поршень дизельного двигателя, покрытие из алюминиевого сплава

**Информация о статье:** поступила в редакцию 02 сентября 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 01 октября 2020 г.; принята к публикации 30 октября 2020 г.

**Для цитирования:** Аль-Бдейри М.Ш.Х., Красильников В.В., Сергеев С.В. Модифицированный квазистационарный метод изучения изменения температур перехода поршней дизельного двигателя, покрытых теплозащитными материалами. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 5. С. 954–965. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-954-965>

## Modified quasi-stationary method for studying changes in transition temperatures of diesel engine pistons coated with heat-shielding materials

Mahmood S. H. Al-Bdeiri, Vladimir V. Krasilnikov, Sergey V. Sergeev

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

**Abstract:** The purpose of the work is to identify complex transient heat flow paths in the combustion chamber of engine, significantly improve the models of diesel engine heat flow, and study the effect of aluminum oxide coating by the galvanic plasma method on short-term and long-term reactions of the piston head. The analysis of operation of aluminum alloy coated diesel engine piston is carried out using a modified quasi-steady method and a finite element method. A thermodynamic analysis is presented using energy and state equations with corresponding gas heat transfer. Time-dependent boundary conditions are set on the gas-blown surfaces of 2D finite element transition models of combustion chamber components. It is shown that this methodology can reveal complex transient paths of the heat flow in engine combustion

chambers and distribution details of heat losses in various cooling media. Numerical simulation has shown that the maximum temperature increase relative to the uncoated piston is 64.3% for the coating thickness of 0.13 mm. Tests have shown that the coatings can endure up to 280 thermal cycles. It is found out that predictions of numerical simulation are in good agreement with the results of experiments conducted with repaired pistons. The experimental operation of Cummins KTA 38 engines at Chernogorsk and Vostochno-Beysk coal mines has shown that the engine equipped after repair with the piston coated with aluminum applied by the galvanic plasma method has been in operation for 2 years and 3 months, whereas its set overhaul period is 18,000 hours. Therefore, the proposed methodology allows to reduce temperature variations in the piston and, thereby increase the service life of engine pistons coated with the use of the thermal barrier coating technology.

**Keywords:** modified quasi-stationary method, galvanic-plasma modification, thermodynamics, heat transfer, diesel engine piston, aluminum alloy coating

**Information about the article:** Received September 02, 2020; revised October 01, 2020; accepted for publication October 30, 2020.

**For citation:** Al-Bdeiri M.S.H., Krasilnikov VV, Sergeev SV. Modified quasi-stationary method for studying changes in transition temperatures of diesel engine pistons coated with heat-shielding materials. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(5):954–965. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-954-965>

## ВВЕДЕНИЕ

Теплопередача к стенкам камеры сгорания двигателей внутреннего сгорания является одним из важнейших факторов, значительно влияющих как на конструкцию, так и на работу двигателей. В последние годы исследовательские работы, касающиеся теплообмена в поршневых двигателях внутреннего сгорания, направлены на детальное понимание явлений, процессов, связанных с моделированием термодинамического цикла и изучением влияния тепловой нагрузки на критические компоненты камер сгорания (КС) [1]. Применение керамических материалов в дизельных двигателях также является одним из множества примеров, когда теплообмен двигателя является доминирующим фактором. В то же время специальные кожухи двигателей, например, с воздушным охлаждением [2], требуют особого подхода к описанию сложных явлений теплопередачи.

Явления теплопередачи в двигателе внутреннего сгорания (ДВС), как и в других промышленных агрегатах и конструктивных элементах [3], являются переходными, трехмерными и подвержены быстрым колебаниям давления и температуры газа в цилиндре. Кроме того, сама КС с ее движущимися границами дополняет эту сложность [4]. В современных дизельных двигателях небольшого размера экстремальные пиковые значения давления и температуры сгорания в сочетании с повышенными значениями частоты

вращения двигателя приводят к значительно более высокой амплитуде колебаний температуры. Это ведет к огромному увеличению тепловой нагрузки на поверхности КС [5]. В то же время переходная работа двигателя (изменения скорости и / или нагрузки) оказывает значительное дополнительное влияние на теплопередачу системы, которым нельзя пренебрегать на этапе проектирования двигателя [6, 7].

Явления, связанные с теплопередачей двигателя внутреннего сгорания, можно разделить по шкале времени на две основные категории:

**Краткосрочные ответные реакции**, которые вызваны колебаниями давления и температуры газа во время цикла двигателя. В результате колебания температуры и теплового потока возникают в поверхностных слоях КС на частоте рабочего цикла двигателя (период времени составляет порядка миллисекунд), иначе они называются явлениями теплообмена циклического двигателя.

**Долгосрочные ответные реакции**, возникающие из-за большого временного масштаба (порядка секунд), непериодических колебаний частоты вращения двигателя и / или нагрузки. В результате тепловые явления этой категории возникают только во время переходной работы двигателя. С другой стороны, явления кратковременного отклика также присутствуют и в этом режиме работы двигателя.



Обе вышеуказанные категории явлений нестационарного теплообмена в двигателе были исследованы в настоящей работе, а также в работах других авторов. Бохак и соавторы [8] представили глобальную модель, характеризующую тепловое поведение двигателей внутреннего сгорания. Основанная на методе тепловой сети их модель может использоваться в стационарном или переходном тепловом моделировании. Керибар и Морель [9] изучили расчетные переходные характеристики двигателя, а также тепловую и напряженную реакцию различных металлических и керамических компонентов при резких изменениях скорости и нагрузки в дизелях большой мощности. Тем не менее в литературе имеется довольно ограниченное количество информации (только несколько статей), рассматривающей комбинацию явлений долгосрочного и краткосрочного реагирования одновременно. Лин и Фостер [10] сообщили об экспериментальных результатах, касающихся давления в цилиндре с разрешением цикла, температуры поверхности и теплового потока для дизельного двигателя во время скачкообразного изменения нагрузки. В издании<sup>1</sup> автором отмечается, что основным объектом исследования нестационарных локальных тепловых нагрузок на поверхностях КС ДВС являются локальные нестационарные температуры этих поверхностей. При этом амплитуда колебаний температуры на указанных поверхностях зависит как от теплофизических свойств применяемых материалов, так и от частоты вращения коленчатого вала двигателя (даже в большей степени). Существует еще одна важная проблема, на которую следует обратить внимание: это влияние вышеуказанных явлений на целостность конструкции двигателя. Вопрос заключается в том, составляют ли они дополнительный фактор, который следует учитывать на ранней стадии проектирования двигателя. В настоящей статье делается попытка дать ответы на вышеуказанные важные вопросы.

<sup>1</sup>Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях: учеб. пособ. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 592 с.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Аналитические решения модели теплопроводности стенки камеры сгорания.** Для расчета мгновенного теплового потока через определенное место стенки КС для полного цикла двигателя во время переходной работы двигателя существуют определенные ограничения при использовании классической процедуры анализа Фурье [11]. Чтобы преодолеть это, ряд исследователей в этой области с успехом разработали и использовали несколько альтернативных моделей. Например, модели, разработанные и представленные в [12, 13], основаны на идее разделения непрерывного изменения переходного процесса от его начального до его окончательного устойчивого состояния на число  $N_c$  дискретных этапов, каждый из которых имеет продолжительность соответствующего цикла двигателя. В этом приближении каждый отдельный цикл двигателя повторяется бесконечное число раз, так что тепловой поток, проходящий через соответствующий компонент, становится периодическим по времени, и поэтому в конечном итоге можно применить анализ Фурье. Представленные результаты доказали, что такое приближение не вносит существенных ошибок. В предположении, что тепловой поток через компонент является одномерным, а свойства материала остаются постоянными, соответствующее выражение уравнения нестационарной теплопроводности для  $i$ -го цикла переходного процесса определяется как

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_i, \quad (1)$$

где  $i = 1, \dots, N_c$  и  $N_c$  – общее количество циклов работы двигателя во время переходного процесса изменения частоты вращения двигателя и (или) нагрузки;  $x$  – расстояние от поверхности стенки КС,  $\alpha = k_w / \rho_w c_w$  – коэффициент температуропроводности стенки,  $\rho_w$  – плотность, а  $c_w$  – удельная теплоемкость.

Граничные условия для уравнения (1) в  $i$ -м цикле можно записать в виде

$$\begin{aligned} T_i(0, t) &= T_{w,i}(t), x = 0; \\ T_i(\delta, t) &= \bar{T}_{\delta,i} = \text{const}, x = \delta, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\delta$  – расстояние от поверхности стенки глубокой термопары, которая обеспечивает постоянные показания температуры во время работы двигателя в установившемся режиме. Однако в случае кратковременной работы двигателя эта температура незначительно изменяется в течение цикла двигателя, и поэтому в течение  $i$ -го цикла используется ее среднее значение. При использовании анализа Фурье измеренная температура поверхности стенки  $i$ -го цикла выражается в следующем виде [14]:

$$T_{w,i}(t) = T_{m,i} + \sum_{n=1}^N [A_{n,i} \cos(n\omega_i t) + B_{n,i} \sin(n\omega_i t)], \quad (3)$$

где  $T_{m,i}$  – усредненное по времени значение;  $T_{w,i}$ ,  $A_{n,i}$  и  $B_{n,i}$  – коэффициенты Фурье;  $n$  – номер гармоники;  $N$  – общее число гармоник, а  $\omega_i$  в (рад/с) – угловая частота изменения температуры в  $i$ -м цикле, которая для четырехтактного двигателя составляет половину угловой скорости коленвала. Замечено, что общее количество гармоник  $N$  в настоящем анализе оставалось постоянным в течение всего переходного процесса. В основном это число может изменяться от цикла к циклу из-за изменения температуры в конкретном цикле.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ANSYS

**Размер временного шага.** В областях с сильными температурными градиентами во время переходного процесса существует зависимость между наибольшим размером элемента в направлении теплового потока и наименьшим размером временного шага, которая обеспечивает хорошие результаты. При использовании автоматического режима по времени и элементов с узлами в середине (квадратичные элементы) ANSYS рекомен-

дует контролировать максимальный размер временного шага с помощью описания входных данных загрузки и определять минимальный размер временного шага (или максимальный размер элемента) на основе следующего соотношения:

$$\Delta t = \frac{\delta^2}{4\alpha},$$

где  $\delta$  – продольная длина элемента вдоль направления теплового потока в ожидаемом наибольшем градиенте температуры,  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности. Если вышеуказанное соотношение нарушается при использовании элементов с узлами в средней части, ANSYS обычно вычисляет нежелательные колебания и температуры вне физически возможного диапазона [15]. При использовании элементов без промежуточных узлов нежелательные колебания маловероятны, и приведенную выше рекомендацию по минимальному временному шагу можно считать несколько консервативной. Необходимо избегать использования очень маленьких временных шагов, особенно при установлении начальных условий. Очень маленькие числа могут вызвать ошибки вычисления в ANSYS (рис. 1).

**Конечно-элементные сетки.** Разрешение колебаний неустановившейся температуры керамически покрытых компонентов требует плотности с очень мелкими отверстиями на поверхностях компонента. Для точного моделирования колебания поверхностной температуры требуются целые, равномерно распределенные узлы на 1%-й переходной глубине проникновения. При условии колеблющейся поверхности 1%-ая глубина проникновения в твердый предмет требует точного моделирования слоя проникновения, подложки компонента поршня и гильзы. На все это вместе потребовалась бы сетка, состоящая из свыше 205254 узлов. Поскольку такие большие сетчатые размеры в вычислительном отношении неэффективны для получения сходящегося квазиустойчивого решения, то в ходе решения методом конечных элементов (МКЭ) используется многосетчатая техника, чтобы минимизировать



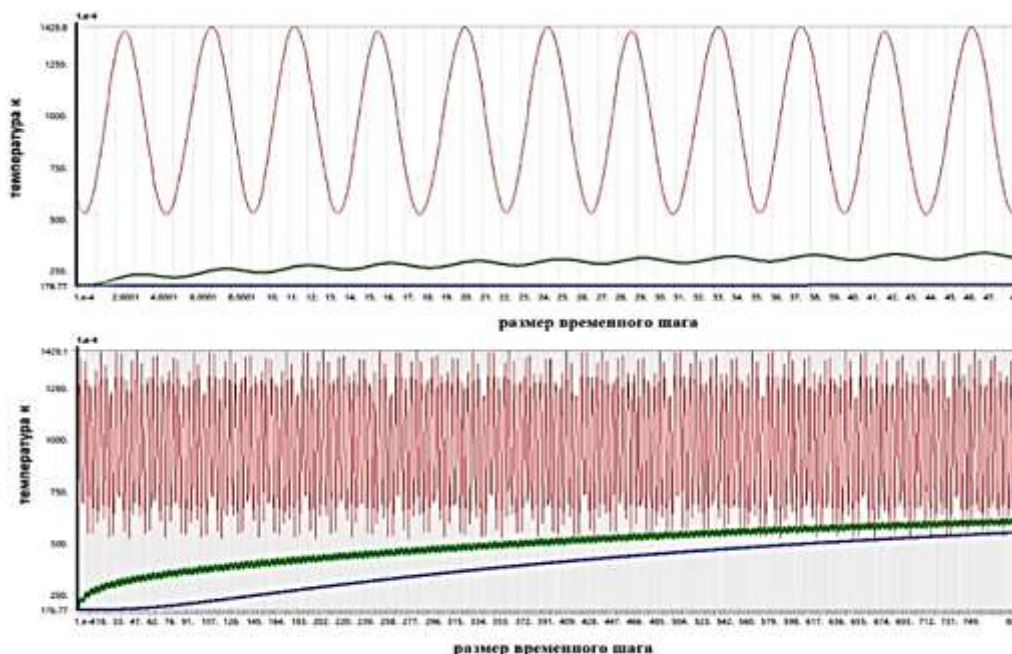


Рис. 1. Влияние размера временного шага на точность результатов  
Fig. 1. Time step size vs result accuracy

процессорное время, так как решения в глубине проникновения имеют ограниченную точность. Многосетчатая техника использует комбинацию крупных и эффективных сеток компонента. Рис. 2 показывает сетки конечного элемента, которые используются в тепловом анализе данной системы поршневой гильзы. Благодаря осевой симметрии образца используется только половина каждого компонента, в результате чего сокращается количество узлов и уменьшается вычислительная стоимость [16]. В крупных сетках компонента только три-четыре узла помещаются в глубинах проникновения различных материалов, подчиняющихся циклическим граничным условиям. Усовершенствованные сетки компонента содержат приблизительно 10 узлов в каждой переходной области проникновения. Расширенное представление конкретных интересных мест в каждой усовершенствованной сетке проиллюстрировано на рис. 2. Увеличенные области чрезвычайно важны с точки зрения дизайна, потому что они обычно связаны с невозможностью керамики выдержать чрезмерные циклические тепловые нагрузки. В переходных областях проникновения МКЭ вычисления выполняются посредством многих полных циклов алго-

ритма до тех пор, пока циклическое аккумулирование энергии тепла в глубине проникновения не уменьшается до нуля.

Рекомендуется для уменьшения вычислительного времени теплоемкость узлов вне глубины проникновения искусственно представить очень маленьким числом, как в последних узлах цикла. Хотя эта стратегия не может использоваться для определения реального времени прогрева, она особенно справедлива по ширине, когда квазиустановившееся решение найдено.

Для улучшения точности квазиустановившегося решения на обдуваемых газом поверхностях и в глубине проникновения циклических переходных процессов используются усовершенствованные сетки области проникновения. Характеристики покрытия подробно описаны в статье [17].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Результаты относительно долго-временных явлений теплообмена в камере сгорания с большой временной шкалой (непериодической).** На рис. 3 показаны изменения переходных температур не покрытых и покрытых поверхностей головки поршня, обусловленные явлениями динами-

ческого теплообмена, возникающими во время переходной работы двигателя. Соответствующие данные, представленные на рис. 3, охватывают первые 200,0 с переходных процессов. Фиксированы все геометрические и эксплуатационные параметры двигателя, свойства поршня и покрытия, а также граничные условия модели. Наблюдается постепенное увеличение амплитуды градиентов температуры в течение первых 20 с после начала переходного процесса.

Характерными в случае без покрытия являются экстремумы градиента температуры поверхности, представленные на рис. 3. Их наибольшее значение  $\partial T/\partial t = 156 \text{ K/c}$  (температура в камере сгорания равна 2000 K в этот момент) достигается в течение 340-го цикла от начала переходного процесса. Это значение, безусловно, намного выше ожидаемого, даже во время переходного режима, и это связано с аномальным сгоранием и эффектами детонации дизеля. Вполне вероятно, что это явление длится всего около 30 с или первые 375 циклов от начала переходного процесса. После этого периода температура поверхности в камере сгорания возвращается к своим нормальным колебаниям, и температурные градиенты постепенно уменьшаются до значения, соответствующего конечному установившемуся состоянию после приблизительно 625-го цикла от нача-

ла переходного процесса. Из результатов настоящего исследования выяснилось, что явления экстремальных градиентов давления и температуры характерны для внезапных или «скачкообразных» переходных изменений. Для описания такого экстремального поведения двигателя часто используется в литературе термин «тепловой удар» [18–20].

На рис. 3 также показано распространение температурных переходных процессов с поверхности поршня с керамическим покрытием в тех же условиях. Наблюдается значительное увеличение амплитуды температурных градиентов в течение первых ста циклов после начала перехода. Характерным в этом случае являются внезапные экстремумы градиента температуры поверхности, большие, чем в первом случае, представленном на рис. 3. Их наибольшее значение  $\partial T/\partial t = 300 \text{ K/c}$ . Другое отличие состоит в том, что максимальное значение температурных градиентов в течение всего переходного периода поддерживалось ниже уровня  $\partial T/\partial t = 10 \text{ K/c}$ . Этот результат демонстрирует, что материал оксид алюминия имеет преимущество в случаях термического удара, поскольку он поглощает тепловую волну и быстро переносит ее во внешние области. Таким образом, он может выдерживать высокие локальные пиковые градиенты температуры (тепловой поток) во время переходного процесса.

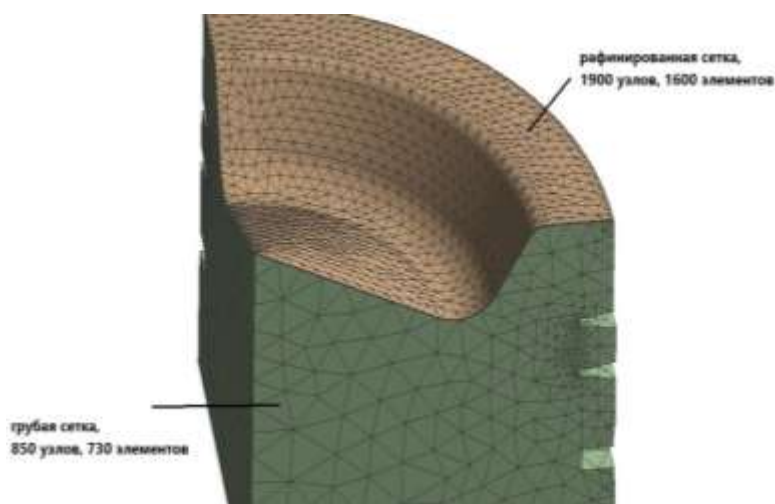


Рис. 2. Грубые сетки поршня и гильзы, используемые для анализа методом конечных элементов. Показаны расширенные виды сетки для уточнения компонента, применяемые в переходных областях проникновения  
Fig. 2. Coarse meshes of piston and liner used for finite element analysis. Extended views of the mesh applied in the transition areas of penetration are shown for component specification

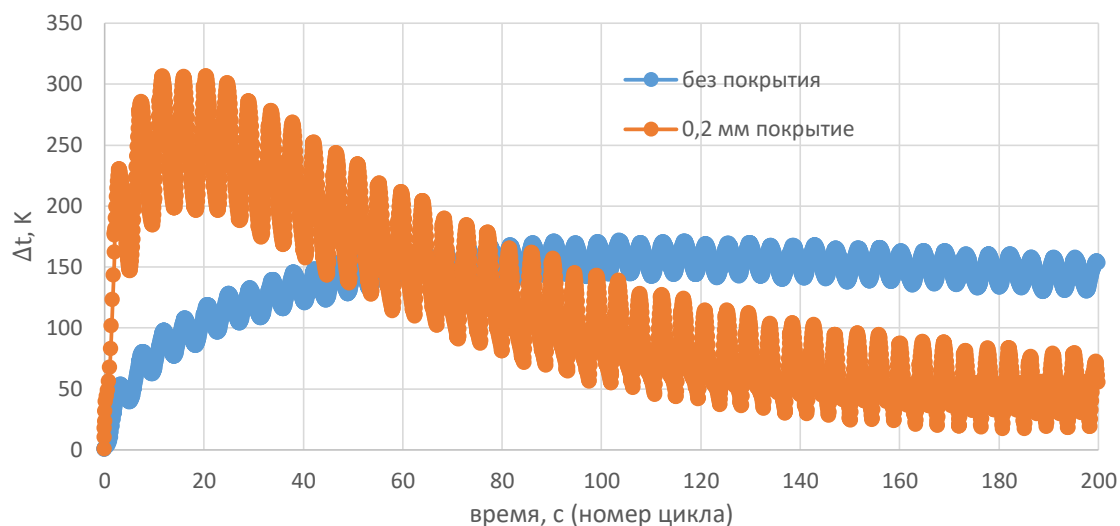


Рис. 3. Изменения переходных температур непокрытых и покрытых поверхностей головки поршня со временем  
Fig. 3. Changes in the transition temperatures of uncoated and coated surfaces of the piston head over time

На рис. 4 показано распределение переходных температур вдоль боковой стенки поршня, а также распространение температурных переходных процессов от поверхности поршня с керамическим покрытием к внутренней части в центральном месте. Для керамического покрытия с более низкой диффузией, температурные переходы быст-

ро спадают внутрь (в пределах 0,205 мм) от поверхности поршня. Следует отметить увеличение фазового сдвига циклических переходных процессов с увеличением глубины подповерхностного слоя за счет конечной скорости распространения теплового возмущения внутрь.

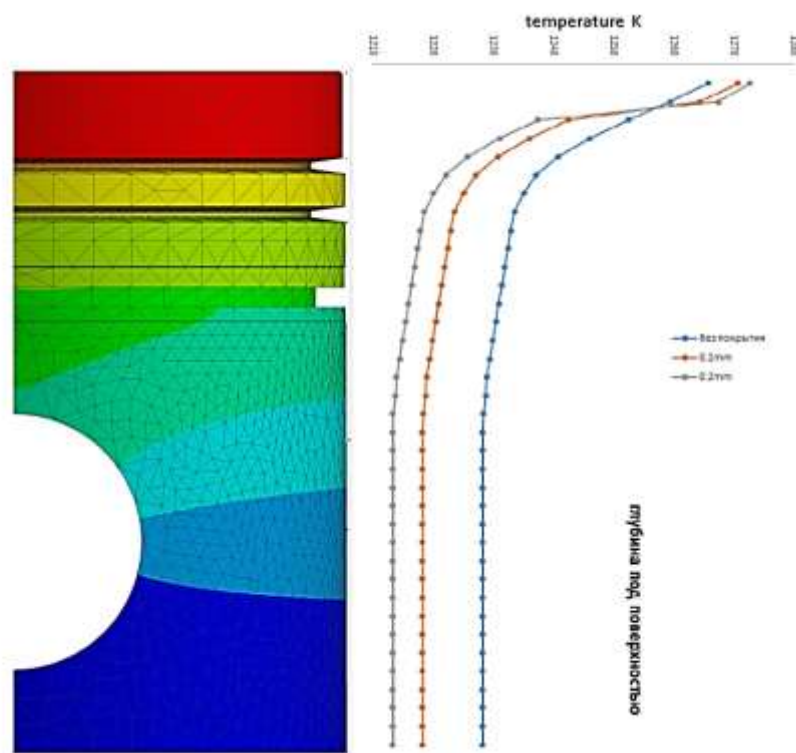


Рис. 4. Распределение переходных температур вдоль боковой стенки поршня  
Fig. 4. Distribution of transition temperatures along the piston side wall

**Результаты относительно кратковременных явлений теплообмена в камере сгорания (один цикл).** На рис. 5 показаны колебания температуры в верхней мертвой точке (ВМТ) поверхности головки поршня без покрытия и с покрытием под разным углом кривошипа при различной толщине покрытия. Выбраны три случая: без покрытия, с покрытием 0,1 мм и 0,2 мм. Для сравнения фиксируются все геометрические и эксплуатационные параметры тестового двигателя, свойства поршней и покрытия, граничные условия модели. Из рис. 5 видно, что в ходе сжатия (угол кривошипа изменяется в пределах 180–360°) температура сначала имеет тенденцию к незначительному снижению, а затем к незначительному повышению как для поршней без покрытия, так и для поршней с покрытием. Причина в том, что в этом ходу температура в цилиндре изначально ниже, чем температура поверхности отверстия цилиндра. При повышении давления температура в цилиндре медленно повышается и вызывает небольшое увеличение вынужденной конвекции.

Как только поршень достигает ВМТ, температура поверхности отверстия цилиндра резко повышается из-за большого количества выделяемого тепла. При движении поршня вниз в направлении *нижней мертвой точки* (угол 360–540°) температура постепенно снижается. Кроме того, при сжатии (угол 180–360°) температуры при толщине

покрытия 0,1 мм и 0,2 мм практически не меняются, что связано с низкой температурой в цилиндре, то есть изменение толщины покрытия практически не приводит к изменению температуры в этом такте. Как показано на рис. 5, заметная разность температур наблюдается при силовом ходе (угол 360–540°). Для покрытий толщиной 0,1 мм, и 0,2 мм максимальная разность температур 17,1 К и 28,9 К, соответственно, возникает при угле поворота кривошипа приблизительно 400°. Соответствующая разность температур для поверхности поршня без покрытия равна 9,1 К. Это связано с тем, что под этим углом кривошипа существует максимальная температура в цилиндре. Большое количество выделяемого тепла не может быть быстро передано теплоносителю из-за низкой теплопроводности покрытия, что приводит к резкому повышению температуры поверхности отверстия цилиндра. Отметим, что максимальная разность температур возникает только в очень короткое время. Обнаружено также, что по мере падения температуры в цилиндре двигателя, разность температур при покрытиях 0,1 мм и 0,2 мм снижается до тех пор, пока она не станет почти нулевой в конце рабочего хода (угол кривошипа 540°). Таким образом, разность температур сильно связана с температурой в цилиндре. Чем выше температура внутри цилиндра, тем больше разность температур.

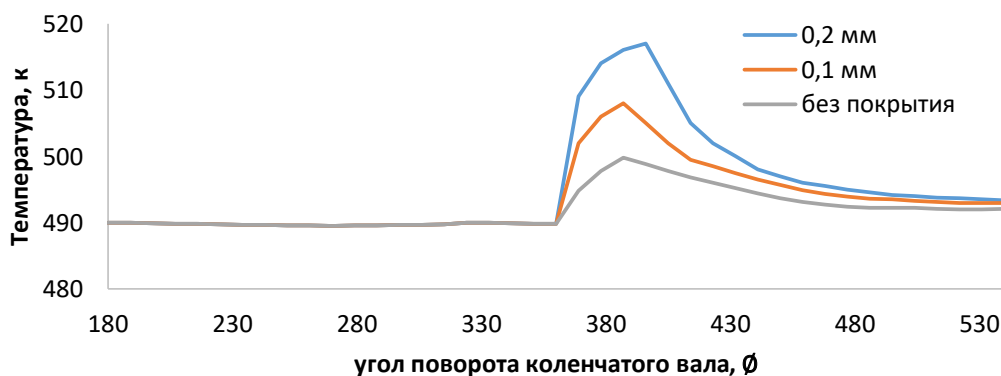


Рис. 5. Влияние толщины покрытия на зависимость температуры в верхней мертвой точке от угла поворота коленчатого вала в течение такта сжатия (угол поворота кривошипа 180–360°) и рабочего хода (угол поворота кривошипа в диапазоне 360–540°)

Fig.5. Influence of coating thickness on the dependence of the top dead center temperature on the crankshaft rotation angle during the compression stroke (crank angle rotation is 180–360 °) and the working stroke (crank angle rotation is in the range of 360–540 °)





## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлена методика проведения сопряженных термодинамического и теплообменного анализов дизельного двигателя. Методология основана на модифицированном квазистационарном методе и методах конечных элементов. Показано, что данная методология может раскрыть сложные переходные пути теплового потока в КС двигателя и детали распределения тепловых потерь в различных охлаждающих средах. Используя двумерные резисторные сети, можно с большей степенью точности анализировать тепловыделение и прогнозировать производительность двигателей с геометрически подобными компонентами.

2. В первых циклах (термодинамическая фаза) переходного процесса в двигателе происходило ненормальное сгорание, сопровождающееся явлениями «теплого удара». В результате амплитуда колебаний температуры поверхности увеличивалась до экстремальных значений, превышающих почти в три раза уровень соответствующих колебаний в стационарном режиме. Так как наличие этих явлений зависит от характеристик системы впрыска топлива, используемой в двигателе, то двигатели с разными системами впрыска и управления могут демонстрировать несколько иное поведение во время соответствующего переходного процесса.

3. Реакция конструкции двигателя на возникающую тепловую волну в основном зависит от температуропроводности материала, используемого в стенке КС. Для высокотемпературных материалов, таких как ок-

сид алюминия, глубина проникновения увеличивается во время переходного процесса, по сравнению с соответствующей во время работы в установившемся режиме. Для головки поршня с оксидным алюминиевым покрытием в данном случае длина проникновения во время переходного процесса достигла значения 3 мм. Следовательно, данные материалы обеспечивают значительную защиту конструкции двигателя благодаря своей способности быстро поглощать экстремальные тепловые ударные волны во внутренних слоях.

4. Максимальная температура поршня с покрытием составляет 517 К, что всего на 17,1 К выше, чем у поршня без покрытия в ВМТ в течение очень короткого периода рабочего хода (угол поворота коленчатого вала 360–540°). Обнаружена малозаметная разница температур между цилиндрами с покрытием и без покрытия в такте сжатия (угол поворота коленчатого вала 180–360°). Таким образом, покрытия могут почти не влиять на условия сгорания, и, следовательно, не будут возникать проблемы с детонацией или предварительным зажиганием двигателя. Покрытия малой толщины не оказывали значительного влияния на температурные градиенты в системах покрытие / материал подложки. Остаточное напряжение, вызванное градиентом температуры, должно быть незначительным. С точки зрения материалов и дизайна можно изменять теплопроводность глиноземных покрытий, манипулируя техникой ГПМ.

## Библиографический список

1. Пылев В.А., Белогуб А.В., Ободец Д.К. Прогнозирование ресурсной прочности поршня легкомоторного авиационного двигателя // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2013. № 9. С. 177–182.
2. Федоров В.А. Модифицирование микродуговым оксидированием поверхностного слоя деталей // *Сварочное производство*. 1992. № 8. С. 29–30.
3. Shakhrai S.G., Nemchinova N.V., Kondrat'ev V.V., Mazurenko V.V., Shcheglov E.L. Engineering solutions for cooling aluminum electrolyzer exhaust gases // *Metallurgist*. 2017. Vol. 60. No. 9-10. P. 973–977. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0394-z>
4. Ac'imovic'-Pavlovic' Z., Raic' K.T., Belic' I. Modification

- of piston surfaces by compressed plasma flow // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2011. Vol. 47. No. 6. P. 797–802. <https://doi.org/10.1134/S2070205111060190>
5. Моргунов В.В., Файнштейн А.Л., Шкилько А.М. Математическая модель процессов электронно-лучевой очистки дымовых газов от SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, ПАУ, ЛОС // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2011. Т. 3. № 11. С. 25–30.
6. Свирский Ю.А., Баутин А.А., Лукьянчук А.А., Басов В.Н. Приближенный метод решения упругопластической задачи // *Вестник Московского авиационного института*. Серия: Авиационная и ракетно-космическая

техника. 2020. Т. 27. № 2. С. 61–70. <https://doi.org/10.34759/vst-2020-2-61-70>

7. Семенова А.С., Кузьмин М.В. Подбор дискретности конечно-элементной сетки для вращающихся деталей межроторного подшипника газотурбинного двигателя с учетом шероховатости поверхности // Вестник Московского авиационного института. Серия: Авиационная и ракетно-космическая техника. 2020. Т. 27. № 1. С. 171–179. <https://doi.org/10.34759/vst-2020-1-171-179>

8. Bohac S.V., Baker D.M., Assanis D.N. A global model for steady state and transient S.I. engine heat transfer studies // International Congress & Exposition. 1996. P. 196–214. <https://doi.org/10.4271/960073>

9. Rifat K., Morel T. Thermal shock calculations in I.C. engines // SAE Transactions. 1987. Vol. 96. Section 4. P. 130–148. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.jstor.org/stable/44470831> (29.06.2020).

10. Lin C.S., Foster D.E. An analysis of ignition delay, heat transfer and combustion during dynamic load changes in a diesel engine // SAE International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exhibition. 1989. <https://doi.org/10.4271/892054>

11. Рябко Е.В. Математическая модель и результаты расчета температуры стенки, образующей камеру сгорания дизельного двигателя горно-транспортной машины // Известия Уральского государственного горного университета. 2018. Вып. 2. С. 107–113. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-2-107-113>

12. Morel T., Wahiduzzaman S., Fort E.F., Keribar R., Blumberg P.N. Methods for heat transfer and temperature field analysis of the insulated diesel: Phase 3, Final report // Ricardo-IT1 Westmont. 1988. 169 p. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/255071748\\_Methods\\_for\\_heat\\_transfer\\_and\\_temperature\\_field\\_analysis\\_of\\_the\\_insulated\\_diesel\\_Phase\\_3\\_Final\\_report](https://www.researchgate.net/publication/255071748_Methods_for_heat_transfer_and_temperature_field_analysis_of_the_insulated_diesel_Phase_3_Final_report) (23.06.2020).

13. Марченко А.П., Пылёв В.В. Методика моделирования нестационарного высокочастотного температурного состояния поршня двигателя внутреннего сгорания // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. Раздел: Транспортное и энергетическое маши-

ностроение. 2013. Т. 5. № 4. С. 43–48.

14. Rakopoulos C.D., Mavropoulos G.C. Modelling the transient heat transfer in the ceramic combustion chamber walls of a low heat rejection diesel engine // International Journal of Vehicle Design. 1999. Vol. 22. No. 3-4. P. 195–215. <https://doi.org/10.1504/IJVD.1999.001865>

15. Сергеев С.В., Аль-Бдейри М.Ш., Дубровина Н.А. Модификация поверхности алюминиевого сплава АК12ММГН методом микродугового оксидирования с целью повышения эксплуатационных показателей // Вестник Московского авиационного института. Серия: Авиационная и ракетно-космическая техника. 2020. Т. 27. № 1. С. 217–223. <https://doi.org/10.34759/vst-2020-1-217-223>

16. Платонов К.Ю., Хмелев П.Н. Математическое моделирование процесса пуска малоразмерного дизельного двигателя // Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса Саратовской области (ТРАНСЭНЕРГО К-2018): сб. науч. тр. по матер. Всерос. науч.-практ. конф. (г. Саратов, 16–17 мая 2018 г.). Саратов: Изд-во СГТУ, 2018. С. 153–155.

17. Sergeev S., Albieri M.Sh., Yatsenko V., Dubrovina N. Theoretical and practical study of possibility to decrease thermal stress in pistons of internal combustion diesel engine by using galvanic plasma modification // International Journal of Advanced Science and Technology. 2019. Vol. 28. No. 8. P. 550–562.

18. Аль-Бдейри М.Ш.Х. Обзор методов гальвано-плазменной модификации для производства анодированных покрытий на сплавах алюминия: микроструктура, свойства и применение // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2020. № 3. С. 51–59.

19. Карташов Э.М., Партон В.З. Динамическая термоупругость и проблемы термического удара // Итоги науки и техники. Серия: Механика деформируемого твердого тела. М.: ВИНТИ, 1991. Т. 22. С. 55–127.

20. Mura T. Dynamical thermal stresses due to thermal shocks // Research Report. Faculty of Eng. Meiji University. 1956. No. 8. P. 63–73.

## References

1. Pylev VA, Belogub AV, Obodec DK. Predicting the resource strength of piston small-engine aircraft engines. *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2013;9:177–182.

2. Fedorov VA. Modification of part surface layer by micro-arc oxidation. *Svarochnoe Proizvodstvo*. 1992;8:29–30. (In Russ.)

3. Shakhrai SG, Nemchinova NV, Kondrat'ev VV, Mazurenko VV, Shcheglov EL. Engineering solutions for cooling aluminum electrolyzer exhaust gases. *Metallurgist*. 2017;60(9-10):973–977. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0394-z>

4. Ac'imo'vic'-Pavlovic' Z, Raic' KT, Belic' I. Modification of piston surfaces by compressed plasma flow. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*.

2011;47(6):797–802.

<https://doi.org/10.1134/S2070205111060190>

5. Morgunov VV, Fajnshtejn AL, Shkilko AM. Mathematical model of the processes of electron-beam cleaning of flue gas from SO<sub>2</sub>, NOX, PAHS, VOCS. *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tekhnologij*. 2011;3(11):25–30.

6. Svirskii YA, Bautin AA, Luk'yanchuk AA, Basov VN. Approximate method for local elastic-plastic problems solving. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta. Seriya: Aviacionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika = Aerospace MAI Journal. Series: Aeronautical and Space-Rocket Engineering*. 2020;27(2):61–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.34759/vst-2020-2-61-70>

7. Semenova A.S., Kuz'min M.V. Finite element grid dis-



creteness selecting for rotating parts of inter-rotor bearing of a gas turbine engine considering surface roughness. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta. Seriya: Aviacionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika = Aerospace Mai Journal. Series: Aeronautical and Space-Rocket Engineering.* 2020;27(1):171–179. (In Russ.) <https://doi.org/10.34759/vst-2020-1-171-179>

8. Bohac SV, Baker DM, Assanis DN. A global model for steady state and transient S.I. engine heat transfer studies. In: *International Congress & Exposition.* 1996:196–214. <https://doi.org/10.4271/960073>

9. Rifat K, Morel T. Thermal shock calculations in I.C. engines. *SAE Transactions.* 1987;96(4):130–148. Available from: <https://www.jstor.org/stable/44470831> [Accessed 29th June 2020].

10. Lin CS, Foster DE. An analysis of ignition delay, heat transfer and combustion during dynamic load changes in a diesel engine. *SAE International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exhibition.* 1989. <https://doi.org/10.4271/892054>

11. Ryabko EV. Mathematical model and calculation results of the temperature of the wall forming the combustion chamber of the diesel engine mining machine. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = News of the Ural State Mining University.* 2018;2:107–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-2-107-113>

12. Morel T, Wahiduzzaman S, Fort EF, Keribar R, Blumberg PN. Methods for heat transfer and temperature field analysis of the insulated diesel: Phase 3, Final report. *Ricardo-IT1 Westmont.* 1988; 169 p. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/255071748\\_Methods\\_for\\_heat\\_transfer\\_and\\_temperature\\_field\\_analysis\\_of\\_the\\_insulated\\_diesel\\_Phase\\_3\\_Final\\_report](https://www.researchgate.net/publication/255071748_Methods_for_heat_transfer_and_temperature_field_analysis_of_the_insulated_diesel_Phase_3_Final_report) [Accessed 23rd June 2020].

13. Marchenko AP, Pylyov VV. Simulation technique of nonstationary high-frequency temperature state of piston of internal combustion engine. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Mashinostroyeniye. Razdel: Transportnoe i energeticheskoe mashinostroyeniye = Proceedings of Higher Educational Institutions. Category: Transportation and Power Engineering.* 2013;5(4):43–48. (In Russ.)

14. Rakopoulos CD, Mavropoulos GC. Modelling the transient heat transfer in the ceramic combustion chamber walls of a low heat rejection diesel engine. *International*

*Journal of Vehicle Design.* 1999;22(3-4):195–215. <https://doi.org/10.1504/IJVD.1999.001865>

15. Sergeev SV, Al-Bdieri MS, Dubrovina NA. Surface modification of the AK12MMGH aluminum alloy by micro-oxidation technique to improve operating characteristics. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta. Seriya: Aviacionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika = Aerospace MAI Journal. Series: Aeronautical and Space-Rocket Engineering.* 2020;27(1):217–223. <https://doi.org/10.34759/vst-2020-1-217-223>. (In Russ.)

16. Platonov KY, Khmelev RN. Mathematical simulation of the start process of a small diesel engine. *Rol' opornogo vuza v razviti transportno-energeticheskogo kompleksa Saratovskoy oblasti (TRANSENERGO K-2018): sbornik nauchnykh trudov po materialam Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii = The role of a flagship university in the development of the transport and energy complex of the Saratov region (TRANSENERGO K-2018): collected scientific articles by the materials of the All-Russian scientific and practical conference.* 16–17 May 2018, Saratov. Saratov: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; 2018, p. 153–155. (In Russ.)

17. Sergeev S, Albieri MSh, Yatsenko V, Dubrovina N. Theoretical and practical study of possibility to decrease thermal stress in pistons of internal combustion diesel engine by using galvanic plasma modification. *International Journal of Advanced Science and Technology.* 2019;28(8):550–562.

18. Al-Budeiri MSH. Review of electroplating-plasma modification methods for the production of anodized coatings on aluminum alloys: microstructure, properties and application. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, Materials Science.* 2020;3:51–59. (In Russ.)

19. Kartashov EM, Parton VZ. Dynamic thermoelasticity and thermal shock problems. In: *Itogi nauki i tekhniki. Seriya: Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela = Results of science and technology, a series of mechanics of a deformable solid body.* Moscow: VINITI; 1991, vol. 22, p. 55–127. (In Russ.)

20. Mura T. Dynamical thermal stresses due to thermal shocks. *Research Report. Faculty of Eng. Meiji University.* 1956;8:63–73.

#### Критерии авторства

Аль-Бдейри М.Ш.Х., Красильников В.В., Сергеев С.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### Authorship criteria

Al-Bdeiri M.S.H., Krasilnikov V.V., Sergeev S.V. declare equal participation in obtaining and formalization of the scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Аль-Бдейри Махмуд Шакир Хассан,**  
аспирант,  
Белгородский государственный  
национальный исследовательский университет,  
308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, Россия;  
✉ e-mail: engmahmood86@gmail.com

**Красильников Владимир Владимирович,**  
доктор физико-математических наук, старший  
научный сотрудник,  
профессор кафедры материаловедения  
и нанотехнологий,  
Белгородский государственный  
национальный исследовательский университет,  
308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, Россия;  
e-mail: kras@bsu.edu.ru

**Сергеев Сергей Валерьевич,**  
заведующий Научно-исследовательской  
лабораторией технологических систем,  
Белгородский государственный  
национальный исследовательский университет,  
308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, Россия;  
e-mail: sergeev\_sv@bsu.edu

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Mahmood S. H. Al-Bdeiri,**  
Postgraduate Student,  
Belgorod State National Research University,  
85, Pobedy St., Belgorod 308015, Russia;  
✉ e-mail: engmahmood86@Gmail.com

**Vladimir V. Krasilnikov,**  
Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher,  
Professor of the Department of Material Science  
and Nanotechnologies,  
Belgorod State National Research University,  
85, Pobedy St., Belgorod 308015, Russia;  
e-mail: kras@bsu.edu.ru

**Sergey V. Sergeev,**  
Head of the Research Laboratory of Technological  
Systems,  
Belgorod State National Research University,  
85, Pobedy St., Belgorod 308015, Russia;  
e-mail: sergeev\_sv@bsu.edu