УДК 622.6:621.436.1 DOI 10.21440/2307-2091-2018-2-107-113

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕНКИ, ОБРАЗУЮЩЕЙ КАМЕРУ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ГОРНО-ТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ

Евгения Владимировна Рябко
railroader@yandex.ru

Донецкий национальный технический университет
Украина, Донецк

Актуальность. Поверхность крышки цилиндра дизеля горно-транспортной машины со стороны камеры сгорания испытывает переменные во времени воздействия температуры рабочих газов. Изменение во времени температуры рабочих газов вызывает в цилиндровой крышке переменные во времени градиенты температур, вследствие чего возникают механические напряжения. Перспективным направлением является исследование параметров и процессов, протекающих в деталях силовой дизельной установки и оказывающих влияние на бесперебойную работу эксплуатируемых горно-транспортных машин.

Целью статьи является разработка методики расчета температурных полей стенки, образующей камеру сгорания дизеля горно-транспортной машины.

Методология исследований основывается на применении численных методов решения задач нестационарной теплопроводности.

Результаты работы и область их применения. Исследование температурных полей в деталях силовой дизельной установки позволит улучшить условия эксплуатации горнотранспортных машин. Для выполнения исследований разработана математическая модель процесса изменения температуры в слоях огневого днища крышки цилиндра дизеля горно-транспортной машины, которая учитывает средний коэффициент теплоотдачи в течение цикла и градиент температур, изменяющийся во времени. С помощью математической модели определено изменение температуры в слоях крышки цилиндра. Рассмотренная методика может применяться для оценки теплонапряженного состояния деталей дизельных двигателей горно-транспортных машин. Область применения математической модели не ограничивается только крышками цилиндров, при необходимом количестве исходных данных можно решать сложные задачи теплопроводности в силовой дизельной установке горно-транспортной машины. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают адекватность математической модели процесса изменения температуры в огневом днище крышки цилиндра дизельного двигателя горно-транспортной машины.

Ключевые слова: горно-транспортная машина; силовая дизельная установка; цилиндро-поршневая группа; крышка цилиндра; температурное поле; теплоотдача; математическая модель.

Введение

В настоящее время силовой дизельный привод все чаще применяется среди горно-транспортных машин. Применением силовых дизельных установок на горнотранспортных машинах, проведением разработок и исследований занимаются такие организации, как ДонУГИ, Донгипроуглемаш, Дружковский машиностроительный завод, Александровский машиностроительный завод, международные компании Ferrit, Becker, Sharf и др. [1–4]. Безотказная работа силовой дизельной установки горно-транспортной машины (СДУ ГТМ) зависит, прежде всего, от правильной эксплуатации, технического обслуживания и исправности деталей цилиндро-поршневой группы. Также существенное влияние на работоспособность СДУ ГТМ оказывают качество дизельного топлива и его строгое соответствие летним или зимним периодам года, что особо актуально при эксплуатации горнотранспортных машин в карьерах. Детали цилиндро-поршневой группы являются наиболее нагруженными частями СДУ ГТМ и подвержены влиянию множества факторов [5].

Актуальность исследования

Несмотря на значительный объем исследований в области создания и повышения эффективности работы силовых дизельных установок, одной из ключевых проблем является совершенствование характеристик горно-транспортных машин, в том числе и экологических [6], недостаточное внимание уделено обоснованиям параметров и режимам работы дизельного привода горно-транспортной машины. Поэтому одним из перспективных направлений является исследование параметров и процессов, протекающих в деталях силовой дизельной установки и оказывающих влияние на бесперебойную работу эксплуатируемых горно-транспортных машин.

В зоне повышенных температур и механических нагрузок находится цилиндровая крышка (головка цилиндра) – сложная по конструкции и нагруженная деталь цилиндрового комплекта СДУ ГТМ. Поверхность крышки цилиндра дизеля горнотранспортной машины со стороны газов испытывает переменные во времени воздействия температуры рабочих газов. Изменение во времени температуры рабочих газов вызывает в цилиндровой крышке переменные во времени градиенты температур, вследствие чего возникают механические напряжения в металле крышки [7–10]. Переменные во времени механические напряжения вызывают процесс усталостного разрушения металла, которое выражается в постепенном развитии трещин усталости, что приводит на практике к появлению сквозных трещин и разрушению крышки.

Постановка цели и задач

Для разработки мероприятий, направленных на снижение температурной напряженности дизельных двигателей горно-транспортных машин, за счет снижения вероятности усталостного разрушения металла необходимо на первом этапе исследовать динамику температурных полей, а на втором этапе исследований установить динамику переменных механических напряжений в огневой поверхности крышки цилиндра, связанную с динамикой температурных полей в нем [11–13].

Одной из поставленных в исследованиях задач является разработка математической модели расчета температурных полей в металле крышки, выбор исходных данных для расчета температурных полей и градиентов температур. При решении этих вопросов может быть решен также вопрос теплоаккумулирующего эффекта крышки цилиндра и влияния этого эффекта как на температурное поле в металле, так и на перенос теплоты через стенку крышки от отработавших газов к охлаждающей жидкости. Результаты этих исследований позволят уточнить методику теплопереноса через стенки цилиндра дизеля [14].

Расчеты

Имеется стенка, образующая камеру сгорания дизельного двигателя горно-транспортной машины, толщиной δ, с одной стороны которой воздействуют рабочие газы с изменяющейся во времени температурой $f(\tau)$, с другой стороны стенки – охлаждающая жидкость с температурой $t_в$, задается начальная температура стенки $t_н$. Стенку по толщине разобьем на m слоев, при этом толщину крайних слоев примем в два раза меньше по сравнению с соседними слоями, что позволит считать температуру крайних слоев равной температуре поверхности стенки. Величина шага по времени определяется длительностью цикла работы дизельного двигателя. Для разбивки цикла на шаги по времени удобной может быть замена времени в секундах на углы поворота φ коленчатого вала дизеля.

При выводе формул для определения температуры в разных слоях стенки после некоторого числа шагов по времени принимаются следующие обозначения:

– $t_{\Delta\tau,\,\Delta\chi}$ – температура в первом слое стенки после одного шага по времени, К (°С);
– $t_{\Delta\tau,\,2\Delta\chi}$ – то же во втором слое после первого шага по времени, К (°С);
– $t_{2\Delta\tau,\,2\Delta\chi}$ – то же во втором слое после второго шага по времени, К (°С);
– $t_{i\Delta\tau,\,j\Delta\chi}$ – температура в j-м слое после i-го шага по времени, К (°С);
– $t_{г.\,о}$ – температура газов в цилиндре в начальный момент времени, К (°С);
– $t_{г,\,i}$ – температура газов в цилиндре после i-го шага по времени, К (°С);
– $\alpha_{г.\,о}$ – суммарный коэффициент теплоотдачи от газов в цилиндре к огневому днищу в начальный момент времени, Вт/(м^2 · К);
– $\alpha_{г,\,i}$ – то же после i-го шага по времени, Вт/(м^2 · К);
– $\alpha_в$ – коэффициент теплоотдачи от охлаждающей воды к стенке крышки, Вт/(м^2 · К);
– $t_в$ – температура охлаждающей воды, К (°С);
– λ – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м · К).

Далее рассмотрим вопрос о температурах в отдельных слоях стенки цилиндровой крышки после каждого шага по времени. Для углов поворота коленчатого вала в пределах от 330° до 380° принимаем Δφ = 2°; для углов поворота коленчатого вала от 380° до 540° – Δφ = 5°; для углов поворота коленчатого вала в пределах от 550° до 270°– Δφ = 10°; в пределах от 275° до 330° – Δφ = 5°.

Температура в слоях после первого шага по времени. В соответствии с основными положениями метода элементарных балансов после первого шага по времени температура будет изменяться только в крайних слоях стенки.

Количество теплоты (Дж), подводимой от горячих газов к огневому днищу, определяем по закону Ньютона–Рихмана [15]:

$$Q_1 = \alpha_{г.\,о}(t_{г.\,о} - t_н)F\Delta\tau_1, \tag{1}$$

где $t_н$ – начальная температура стенки, К (°С); F – площадь поверхности теплообмена, м^2; $\Delta\tau_1$ – длительность первого шага по времени, с.

Количество теплоты, отводимой от первого слоя ко второму слою, будет равным нулю, поскольку определяется по температурам предшествующего шага по времени, т. е. по начальным температурам слоев. Поскольку начальные температуры слоев приняты одинаковыми, то передача теплоты теплопроводностью от первого слоя ко второму после первого шага по времени будет отсутствовать.

Количество накопленной теплоты в первом слое за время теплообмена в течение времени $\Delta\tau_1$ будет иметь вид:

$$\Delta Q_1 = \frac{1}{2}\Delta\chi_2 F\rho c\,(t_{\Delta\tau,\,\Delta\chi} - t_н). \tag{2}$$

По уравнениям (1) и (2) записываем:

$$\alpha_{г.\,о}\,(t_{г.\,о} - t_н)\,F\Delta\tau_1 = \frac{1}{2}\Delta\chi_2 F\rho c\,(t_{\Delta\tau,\Delta\chi} - t_н), \tag{3}$$

где $\Delta\chi_2$ – толщина слоя, м; ρ – плотность материала стенки, кг/м^3; c – удельная массовая теплоемкость материала стенки, Дж/(кг · К); $t_{\Delta\tau,\,\Delta\chi}$ – ожидаемая температура первого слоя через один интервал времени, К (°С).

Из уравнения (3) находим ожидаемое значение температуры первого слоя $t_{\Delta\tau,\,\Delta\chi}$, одновременно являющейся температурой поверхности стенки:

$$t_{\Delta\tau,\,\Delta\chi} = t_{г.\,о}\frac{2\alpha_{г.\,о}\Delta\tau_1}{\Delta\chi_2\rho c} + t_н\left(1 - \frac{2\alpha_{г.\,о}\Delta\tau_1}{\Delta\chi_2\rho c}\right). \tag{4}$$

После первого шага по времени температура последующих слоев, начиная со второго, остается неизменной и равной $t_н$.

Температура в слоях после второго шага по времени. После второго шага по времени температура изменится в двух слоях стенки. Температуру первого слоя рассчитываем так же, как и в предыдущем слое – по балансу теплоты, принятой этим слоем и отданной им.

Количество теплоты, поступающее к первому слою со стороны газов после второго шага по времени, определяется по формуле, аналогичной формуле (1):

$$Q_1 = \alpha_{г,1}\,(t_{г,1} - t_{\Delta\tau,\,\Delta\chi})F\Delta\tau_2, \tag{5}$$

где $t_{г,1}$ – температура газов после первого шага по времени.

Количество теплоты, которое отдается первым слоем второму, определяется по формуле:

$$Q_2 = \frac{t_{\Delta\tau,\,\Delta\chi} - t_{\Delta\tau,\,2\Delta\chi}}{\Delta\chi}\lambda F\Delta\tau_2. \tag{6}$$

В формуле (6) температура во втором слое после первого шага по времени $t_{\Delta\tau,\,2\Delta\chi}$, как показано выше, равна $t_н$, т. е.:

$$Q_2 = \frac{t_{\Delta\tau,\,\Delta\chi} - t_н}{\Delta\chi_2}\lambda F\Delta\tau_2. \tag{7}$$

Количество накопленной теплоты в первом слое после второго шага по времени определяется по разности теплоты Q_1 и Q_2, и это количество теплоты будет израсходовано на изменение температуры первого слоя. Уравнение баланса теплоты в этом случае будет аналогичным уравнению (3). Используя соотношения (5) и (7), можно записать:

$$\alpha_{г,1}(t_{г,1} - t_{\Delta\tau,\,\Delta\chi})F\Delta\tau_2 - \frac{t_{\Delta\tau,\,\Delta\chi} - t_н}{\Delta\chi_2}\lambda F\Delta\tau_2 = \frac{1}{2}\Delta\chi_2 F\rho c\,(t_{2\Delta\tau,\,\Delta\chi} - t_{\Delta\tau,\,\Delta\chi}), \tag{8}$$

где $t_{2\Delta\tau,\,\Delta\chi}$ – ожидаемая температура первого слоя после второго шага по времени.

После некоторых преобразований из уравнений (8) находим искомую величину $t_{2\Delta\tau,\,\Delta\chi}$:

$$t_{2\Delta\tau,\,\Delta\chi} = t_{\Delta\tau,\,\Delta\chi}\left(1 - \frac{2\alpha_{г,1}\Delta\tau_2}{\Delta\chi_2\rho c} - \frac{2\lambda\Delta\tau_2}{\Delta\chi_2^2\rho c}\right) + t_{г,1}\frac{2\alpha_{г,1}\Delta\tau_2}{\Delta\chi_2\rho c} + t_н\frac{2\lambda\Delta\tau_2}{\Delta\chi_2^2\rho c}.$$

Температура второго слоя после второго шага по времени определяется по балансу теплоты, поступающей ко второму слою от первого, и отводимой теплоты от второго слоя к третьему. При этом температура третьего слоя после второго шага по времени $t_{2\Delta\tau3,\,2\Delta\chi}$ и температура второго слоя после первого шага по времени $t_{\Delta\tau,\,2\Delta\chi}$ равны начальной температуре стенки $t_н$.

Количество подведенной теплоты от первого слоя ко второму запишется уравнением:

$$Q_1 = \frac{t_{\Delta\tau,\,\Delta\chi} - t_н}{\Delta\chi_2}\lambda F\Delta\tau_2.$$

Количество отведенной теплоты от второго слоя к третьему после второго шага по времени будет иметь вид:

$$Q_2 = \frac{t_н - t_н}{\Delta\chi_{2-3}}\lambda F\Delta\tau_2 = 0.$$

Уравнение теплового баланса в этом случае запишется в виде:

$$\frac{t_{\Delta\tau,\,\Delta\chi} - t_{\Delta\tau,\,2\Delta\chi}}{\Delta\chi_2}\lambda F\Delta\tau_2 = \Delta\chi_2 F\rho c\left(t_{2\Delta\tau,\,2\Delta\chi} - t_{\Delta\tau,\,2\Delta\chi}\right).$$

Тогда после некоторых преобразований из последнего уравнения находим искомую температуру второго слоя после двух шагов по времени $t_{2\Delta\tau,\,2\Delta\chi}$:

$$t_{2\Delta\tau,\,2\Delta\chi} = t_н\left(1 - \frac{\lambda\Delta\tau_2}{\Delta\chi_2^2\rho c}\right) + t_{\Delta\tau,\,\Delta\chi}\frac{\lambda\Delta\tau_2}{\Delta\chi_2^2\rho c}.$$

Температура третьего и последующих слоев после второго шага по времени равна начальной температуре стенки $t_н$. Дальнейшее построение уравнений для определения температуры в отдельных слоях стенки крышки цилиндра, образующей камеру сгорания силовой дизельной установки горнотранспортной машины, после каждого шага по времени производится аналогично уравнениям, изложенным ранее.

Выполнив необходимые преобразования, можно записать ряд общих формул для расчета температуры в отдельных слоях.

1. Температура в первом слое при разном числе шагов по времени $i \geq 1$:

$$t_{i\Delta\tau,\,\Delta\chi} = t_{(i-1)\Delta\tau,\,\Delta\chi}\left(1 - \frac{2\alpha_{г,(i-1)}\Delta\tau_i}{\Delta\chi_2\rho c} - \frac{2\lambda\Delta\tau_i}{\Delta\chi_2^2\rho c}\right) + t_{(i-1),\,2\Delta\chi}\frac{2\lambda\Delta\tau_i}{\Delta\chi_2^2\rho c} + t_{г,(i-1)}\frac{2\alpha_{г,(i-1)}\Delta\tau_i}{\Delta\chi_2\rho c}. \tag{9}$$

При этом следует принимать значение температуры с индексом $t_{i\Delta\tau,\,j\Delta\chi}$, в котором $i < j$, равным начальной температуре в слое, такой, какой она была в начале «прогонки». При этом понятие «прогонка» включает в себя совокупность расчета температур в слоях после одного шага по времени.

2. Температура во втором слое при разном числе шагов i по времени ($i \geq 1$):

$$t_{i\Delta\tau,\,2\Delta\chi} = t_{(i-1)\Delta\tau,\,2\Delta\chi}\left(1-\frac{\lambda\Delta\tau_i}{\Delta\chi_2^2\rho c}-\frac{2\lambda\Delta\tau_i}{\Delta\chi_2\left(\Delta\chi_2+\Delta\chi_3\right)\rho c}\right)+t_{(i-1)\Delta\tau,\,3\Delta\chi}\frac{2\lambda\Delta\tau_i}{\Delta\chi_2\left(\Delta\chi_2+\Delta\chi_3\right)\rho c}+t_{(i-1)\Delta\tau,\,\Delta\chi}\frac{\lambda\Delta\tau_i}{\Delta\chi_2^2\rho c}. \quad (10)$$

Как и в предыдущем случае, в выражении температуры $t_{i\Delta\tau,\,j\Delta\chi}$ при $i < j$ значение температуры $t_{i\Delta\tau,\,j\Delta\chi}$ принимается равным начальной температуре предыдущей прогонки. Это условие можно выразить следующим образом:

$$t_{i\Delta\tau,\,j\Delta\chi} = t_{\text{н}}, \text{если } i < j. \quad (11)$$

В формуле (11) значение $t_{\text{н}}$ принимается по температуре в слое после предыдущей прогонки.

3. Температура в слоях, начиная с третьего до двух предпоследних, определяется по формуле:

$$t_{i\Delta\tau,\,j\Delta\chi} = t_{(i-1)\Delta\tau,\,j\Delta\chi}\left(1-\frac{2\lambda\Delta\tau_i}{\Delta\chi_j\left(\Delta\chi_j+\Delta\chi_{j-1}\right)\rho c}-\frac{2\lambda\Delta\tau_i}{\Delta\chi_j\left(\Delta\chi_j+\Delta\chi_{j+1}\right)\rho c}\right)+$$
$$+t_{(i-1)\Delta\tau,\,(j+1)\Delta\chi}\frac{2\lambda\Delta\tau_i}{\Delta\chi_j\left(\Delta\chi_j+\Delta\chi_{j+1}\right)\rho c}+t_{(i-1)\Delta\tau,\,(j-1)\Delta\chi}\Delta\chi\frac{2\lambda\Delta\tau_i}{\Delta\chi_j\left(\Delta\chi_j+\Delta\chi_{j-1}\right)\rho c}. \quad (12)$$

При расчетах по формуле (12) учитывается условие (11). Ограничение по числу слоев к формуле (11) можно выразить соотношением:

$$3 \leq j < (m-2),$$

где m – число выделенных слоев в стенке.

Уравнения, приведенные ранее, справедливы для расчета температуры в слоях стенки, начиная с первого от поверхности крышки цилиндров, образующей камеру сгорания. Одновременно с этим осуществляется процесс теплообмена со стороны охлаждающей жидкости. При этом расчетные зависимости для определения температуры будут отличаться от предыдущих только для двух слоев, примыкающих к полости охлаждения. Далее излагаются эти расчетные зависимости.

Для построения расчетных зависимостей определения температуры в двух слоях со стороны охлаждающей воды принимаются два условия:

– температура охлаждающей воды $t_{\text{в}}$ не изменяется во времени;

– толщина последнего (m-го) слоя принимается равной половине толщины предпоследнего слоя.

Уравнение для определения температуры последнего слоя после i-го шага по времени $t_{i\Delta\tau,\,m}$:

$$t_{i\Delta\tau,\,m} = t_{(i-1)\Delta\tau,\,m}\left(1-\frac{2\lambda\Delta\tau_i}{\Delta\chi_{(m-1)}^2\rho c}-\frac{2\alpha_{\text{в}}\Delta\tau_i}{\Delta\chi_{(m-1)}\rho c}\right)+t_{(i-1)\Delta\tau,\,(m-1)}\frac{2\lambda\Delta\tau_i}{\Delta\chi_{(m-1)}^2\rho c}+t_{\text{в}}\frac{2\alpha_{\text{в}}\Delta\tau_i}{\Delta\chi_{(m-1)}\rho c}. \quad (13)$$

Уравнение для определения температуры предпоследнего слоя после i-го шага по времени $t_{i\Delta\tau,\,(m-1)}$:

$$t_{i\Delta\tau,(m-1)} = t_{(i-1)\Delta\tau,(m-1)}\left(1-\frac{2\lambda\Delta\tau_i}{\Delta\chi_{(m-1)}\left(\Delta\chi_{(m-1)}+\Delta\chi_{(m-2)}\right)\rho c}-\frac{\lambda\Delta\tau_i}{\Delta\chi_{(m-1)}^2\rho c}\right)+$$
$$+t_{(i-1),(m-1)}\frac{2\lambda\Delta\tau_i}{\Delta\chi_{(m-1)}\left(\Delta\chi_{(m-1)}+\Delta\chi_{(m-2)}\right)\rho c}+t_{(i-1)\Delta\tau,m}\frac{\lambda\Delta\tau_i}{\Delta\chi_{(m-1)}^2\rho c}. \quad (14)$$

Таким образом, уравнения (9), (10) (12), (13) и (14) составляют систему уравнений для определения температуры в слоях стенки после ряда шагов по времени.

При этом уравнения (9) и (10) – система уравнений А – определяют температуру в двух слоях огневого днища со стороны газов в цилиндре; уравнения типа (12) – система уравнений В – определяют температуру в слоях от третьего со стороны горячих газов до предпоследнего слоя после ряда шагов по времени. Уравнения (13) и (14) – система уравнений С – определяют температуру в предпоследнем и последнем слоях огневого днища при разном числе шагов по времени.

Для проведения расчетов по приведенным формулам задаются следующие исходные данные: значения шагов по времени $\Delta\tau_i$, толщины слоев $\Delta\chi_j$, значения температуры газов $t_{\text{г},\,i}$ и суммарного коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{г}i}$, значение коэффициента теплоотдачи от охлаждающей воды к стенке $\alpha_{\text{в}}$, значение температуры охлаждающей воды $t_{\text{в}}$, а также начальные температуры в слоях стенки $t_{\text{н}}$

Результаты

С помощью математической модели определено изменение температуры в слоях крышки цилиндра (рис. 1). При известных температурах определены градиенты между слоями. Зная градиенты температур, используя классические

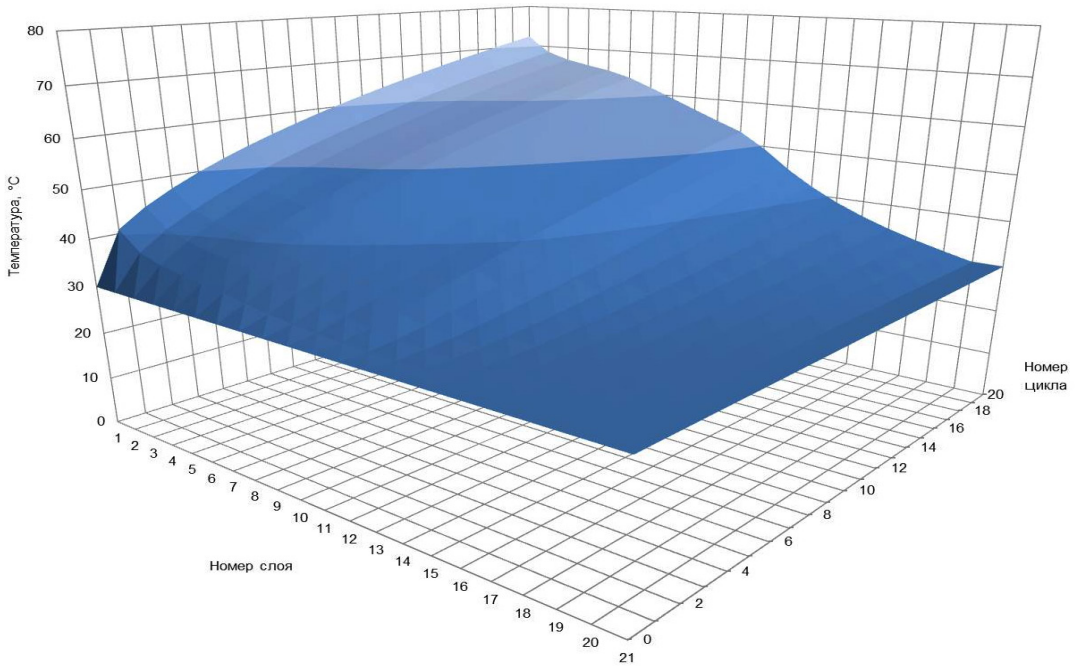

Рисунок 1. Диаграмма распределения температуры в слоях крышки цилиндра СДУ ГТМ.
Figure 1. Diagram of the temperature distribution in the layers of the cylinder cover of the power diesel engine of mining machine.

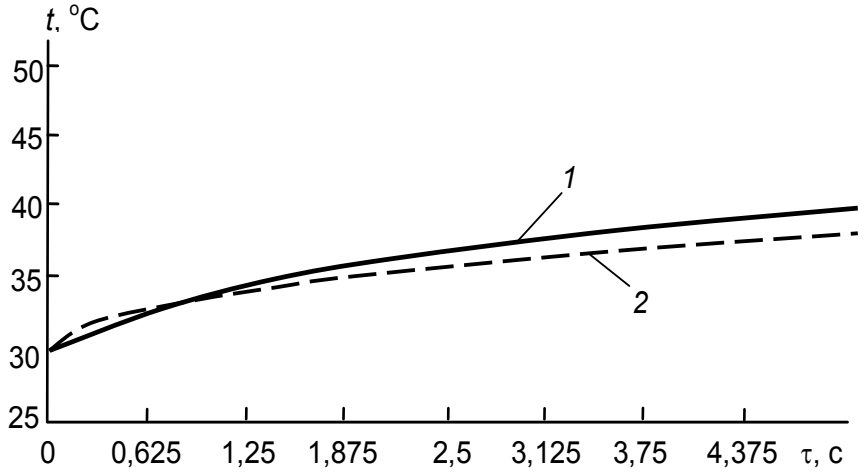

Рисунок 2. Результаты экспериментальных исследований и сравнение с данными моделирования. *1* – экспериментальные значения, *2* – теоретические значения.
Figure 2. Experimental results and comparison with simulation data.

методы расчета теплонапряженности материалов [16], можно определить температурные напряжения на поверхности цилиндровой крышки.

Для проверки адекватности математической модели проведены экспериментальные исследования температурных полей крышки цилиндра дизеля горно-транспортной машины с последующим анализом и сопоставлением полученных результатов с теоретическими исследованиями.

В качестве объекта исследований использовалось огневое днище крышки цилиндра дизеля Д49. В эксперименте предусмотрено постоянство температуры окружающей среды $t_{о.с}$ = 22 °С. Эксперимент планируется и реализуется при одновременном варьировании двух факторов – температуры поверхности нагревательного прибора и времени нагрева материала крышки цилиндра дизеля горнотранспортной машины. Для измерения температуры в различных слоях крышки цилиндра использовались термоэлектрические методы измерения при помощи термоэлектрических термометров (термопар). При этом величина температуры определялась по показаниям АЦП/ЦАП ZET Sigma 16/16 USB. При измерениях использовалось три термопары, которые помещались на различную глубину и находились в нескольких точках материала огневого днища. Данные точки соответствовали характерным слоям, в которых рассчитывалась температура по приведенной математической модели. Опрос термопар осуществляется со скоростью 0,01 с, что обеспечивает достаточную точность измерений, для построения кривой *1* (рис. 2) было использовано 582 точки. Погрешность термопар ТХА при проведении измерений не превышала ± 2 °С, что соответствует допустимым паспортным значениям ± 2,5 °С. В процессе проведения экспериментальных исследований было установлено, что вне зависимости от слоя

крышки цилиндров характер изменения температуры имеет одинаковую закономерность. Изменение температуры имеет логарифмический характер, по этой причине опытным путем установлено необходимое время измерений. Среднее квадратическое отклонение экспериментальных и теоретических данных составило 0,8, среднее отклонение модели от фактических значений – 0,9, среднее процентное отклонение – 2,4, что является достаточным для практического использования результатов эксперимента.

На рис. 2 приведены полученные данные.

Полученные результаты свидетельствуют об адекватности математической модели, что позволяет применять полученные результаты моделирования для разработки комплекса мероприятий, направленных на повышение надежности дизельных силовых установок горно-транспортных машин.

Выводы

Разработана математическая модель процесса изменения температуры в слоях огневого днища крышки цилиндра дизеля горно-транспортной машины с учетом среднего коэффициента теплоотдачи в течение цикла и градиента температур, изменяющегося во времени.

Рассмотренная методика может применяться для оценки теплонапряженного состояния деталей дизельных двигателей горно-транспортных машин. Область применения математической модели не ограничивается только крышками цилиндров, при необходимом количестве исходных данных можно решать сложные задачи теплопроводности в силовой дизельной установке горно-транспортной машины. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают адекватность математической модели процесса изменения температуры в огневом днище крышки цилиндра дизельного двигателя горно-транспортной машины.

Приведенная методика может быть использована:

– для оценки времени прогрева силовой дизельной установки горнотранспортной машины и ввода ее в эксплуатацию после «холодного пуска»;

– анализа переходных процессов, протекающих в деталях камеры сгорания силовой дизельной установки;

– оценки времени нахождения дизеля в горячем резерве после его остановки в холодное время года;

– разработки мероприятий, направленных на улучшение условий работы деталей камеры сгорания;

– решения задач усовершенствования системы охлаждения;

– расчетного моделирования оптимального теплового состояния деталей силовой дизельной установки горно-транспортной машины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ferrit. Global Mining Solution. 2015. URL: http://ferrit.cz/ru/produkty/podvesnoj-transport
2. Becker Mining Systems. 2018. URL: http://becker-mining.com
3. Гнайдинг Э. Презентация фирмы «CMT Шарф» и новые разработки. Дальнейшее расширение производственной программы // Глюкауф. 2011. №1. С. 24–27.
4. Pieczora E., Dobrzaniecki P., Kaczmarczyk K., Suffner H. Development of underground diesel transportation machines // Mining machinery. 2016. Vol. 34, № 2. P. 20–32.
5. Рябко Е. В. Анализ факторов, влияющих на надежность дизельных силовых установок карьерных и рудничных локомотивов // Вестник ДонНТУ. 2017. № 3 (9). С. 44–51.
6. Гутаревич В. О., Рябко К. А., Рябко Е. В. Проблемы и направления совершенствования экологических характеристик горно-транспортных машин с дизельной установкой // Вестник ДонНТУ. 2018. № 1 (11). С. 12–17.
7. Чайнов Н. Д., Заренбин В. Г., Иващенко Н. А. Тепломеханическая напряженность деталей двигателей. М.: Машиностроение, 1977. 152 с.
8. Попов В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М.: Энергия, 1971. 214 с.
9. Ролле И. А. Повышение ресурса крышек цилиндров тепловозных дизелей: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: ПГУПС, 2006. 130 с.
10. Barchenko F. B., Bakulin V. N. Calculation of the Thermal Loading of the Cylinder-Piston Group of the Automobile Engine // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. Vol. 90, № 3. P. 657–664.
11. Jahangirian S., Srivastava A., Hosseini S., Ballard S. A Multi-Physics 3D Modeling Methodology for Multi-Cylinder Diesel Engine Thermal Management and Fatigue Life Prediction // SAE Int. J. Mater. 2015. № 8 (3). P. 893–904. DOI: 10.4271/2015-01-0671.
12. Zhang H., Lin Z., Xing J. Temperature field analysis to gasoline engine piston and structure optimization // Journal of Theoretical & Applied Information Technology. 2013. Vol. 48, №. 2. P. 904–910.
13. Menacer B. Thermodynamic Analysis of a Turbocharged Diesel Engine Operating under Steady State Condition // Journal of Applied Fluid Mechanics. 2016. Vol. 9, № 2. P. 573–585.
14. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
15. Yusha V. L. The estimation of thermal conditions of highly-cooled long-stroke stages in reciprocating compressors // Procedia Engineering. 2015. Vol. 113. P. 264–269.
16. Коваленко А. Д. Основы термоупругости. Киев: Наук. думка, 1970. 308 с.

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2018 г.

УДК 622.6:621.436.1 DOI 10.21440/2307-2091-2018-2-107-113

Mathematical model and calculation results of the temperature of the wall forming the combustion chamber of the diesel engine mining machine

Evgeniya Vladimirovna Ryabko
railroader@yandex.ru

Donetsk National Technical University
Donetsk, Ukraine

Urgency of the work. The surface of the cylinder cover of the diesel mining machine experiences influences variable in time of exposure. These influences come from the temperature of the working gases in the combustion chamber. This change in the temperature of the working gases in time causes temperature gradients in time in the cylinder cover. This results in mechanical stresses. A promising line of research is studying the parameters and processes occurring in the details of the power diesel engine. These processes affect the smooth operation of the mining transport machines being used.
The purpose of the work is to develop a method of calculating the temperature fields of the wall forming the combustion chamber of the diesel mining transport machine.
Research methodology is based on the application of numerical methods for solving the problems of non-stationary thermal conductivity.
The results of the work and the field of their application. The study of temperature fields in the details of the power diesel engine will improve the operating conditions of mining vehicles. To carry out the research, a mathematical model of the temperature change process in the layers of the bottom of the cylinder cover of the diesel mining machine has been developed. It considers the average heat transfer coefficient during the cycle and the temperature gradient varying in time. Using a mathematical model, the temperature change in the layers of the cylinder cover is determined. The method considered can be used to assess the heat-stressed state of the diesel engine parts of mining transport machines. The field of application of the mathematical model is not limited to the cylinder covers, with the required amount of initial data. It is possible to solve complex problems of thermal conductivity in the power diesel engine of mining transport machines. The experimental studies confirm the adequacy of the mathematical model of the temperature change process in the bottom of the cylinder cover of the diesel engine of mining transport machines.

Keywords: mining transport machine; power diesel installation; cylinder-piston group; cylinder head; temperature field; heat transfer; mathematical model.

REFERENCES

1. 2015, Ferrit. Global Mining Solution. URL: http://ferrit.cz/ru/produkty/podvesnoj-transport
2. 2018, Becker Mining Systems. URL: http://becker-mining.com
3. Gneiding E. 2011, *Prezentatsiya firmy «SMT Sharf» i novyye razrabotki. Dal'neysheye rasshireniye proizvodstvennoy programmy* [Presentation of the company "SMT Scarf" and new developments. Further expansion of the production program]. *Glyukauf* [Gluckauf], no. 1, pp. 24–27.
4. Pieczora E., Dobrzaniecki P., Kaczmarczyk K., Suffner H. 2016, Development of underground diesel transportation machines. *Mining machinery*, vol. 34, no. 2, pp. 20–32.
5. Ryabko Ye. V. 2017, *Analiz faktorov, vliyayushchikh na nadyozhnost' dizel'nykh silovykh ustanovok karyernykh i rudnichnykh lokomotivov* [Analysis of factors affecting the reliability of diesel power plants in the quarrying and mining locomotives]. *Vestnik DonNTU* [Vestnik Donetsk National Technical University], no. 3 (9), pp. 44–51.
6. Gutarevich, V. A., Ryabko, K. A., Ryabko E. V. 2018, *Problemy i napravleniya sovershenstvovaniya ekologicheskikh kharakteristik gorno-transportnykh mashin s dizel'noy ustanovkoy* [The problems and directions of improving the environmental performance of the mining vehicles with diesel plant]. *Vestnik DonNTU* [Vestnik Donetsk National Technical University], no. 1 (11), pp. 12–17.
7. Chinov N. D., Serebin V. G., Ivashchenko N. A. 1977, *Teplomekhanicheskaya napryazhyonnost' detaley dvigateley* [Mechanical tension parts of engines]. Moscow, 152 p.
8. Popov V. M. 1971, *Teploobmen v zone kontakta raz'yomnykh i neraz'yomnykh soyedineniy* [Heat exchange in the contact zone of detachable and all-in-one connections]. Moscow, 214 p.
9. Rolle I. A. 2006, *Povysheniye resursa kryshek tsilindrov teplovoznykh dizeley: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving resource covers of cylinders of diesel engines: Dissertation of the Candidate of technical sciences]. Saint Petersburg, 130 p.
10. Barchenko F. B., Bakulin V. N. 2017, Calculation of the Thermal Loading of the Cylinder-Piston Group of the Automobile Engine. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 90, no. 3, pp. 657–664.
11. Jahangirian S., Srivastava A., Hosseini S., Ballard S. 2015, A Multi-Physics 3D Modeling Methodology for Multi-Cylinder Diesel Engine Thermal Management and Fatigue Life Prediction. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, no. 8 (3), pp. 893–904. DOI: 10.4271/2015-01-0671
12. Zhang H., Lin Z., Xing J. 2013, Temperature field analysis to gasoline engine piston and structure optimization. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, vol. 48, no. 2, pp. 904–910.
13. Menacer B. 2016, Thermodynamic Analysis of a Turbocharged Diesel Engine Operating under Steady State Condition. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 9, no. 2. pp. 573–585.
14. Kutateladze S. S. 1979, *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of heat transfer theory]. Moscow, 416 p.
15. Yusha V. L. 2015, The estimation of thermal conditions of highly-cooled long-stroke stages in reciprocating compressors. *Procedia Engineering*, vol. 113, pp. 264–269.
16. Kovalenko A. D. 1970, *Osnovy termouprugosti* [Fundamentals of thermoelasticity]. Kiev, 308 p.

The article was received on April 3, 2018