СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

УДК 536.24 doi.org/10.33298/2226-8553/2019.1.28.01

Панин В.В., Кривошей Ф.А., Семин А.А., Макаров А.М.

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДВИГАТЕЛЯ В ПРИБЛИЖЕНИИ «БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ» ТЕМПЕРАТУРЫ С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ

Известно, что в строгой постановке задача нестационарного конвективного теплообмена должна формулироваться и решаться как сопряженная задача с граничными условиями IV рода. Такая постановка предполагает решение внешней гидродинамической задачи и сопряжение ее результатов с решением внутренней задач теплопроводности.

В приближении «бегущей волны» авторами определены предельные значения температуры, при которой происходят термические повреждения (микротрещины – «паутина») теплообменных поверхностей двигателя внутреннего сгорания.

В статье утверждается, что при t = 1200 . . .1800 с температура днища поршня достигает предельного для данного металла значения 750 К, что повышает риск его термического повреждения. При форс-мажорных обстоятельствах (аварийном нагружении двигателя или его перегрузках при плавании во льдах) необходимо использовать съемные днища поршней из жаропрочной стали.

Ключевые слова: *температура, «бегущая волна», термическое повреждение.*

Постановка проблемы. Определение температуры огневой поверхности поршня при аварийном нагружении двигателя и выбор метода решения этой проблемы.

Анализ последних исследований и публикаций. Впервые термин «бегущая волна» был определен академиком Белорусской Академии наук Лыковым А.В. и получил дальнейшее развитие в работе д.т.н. Кривошея Ф.О. «Обобщение решения параболических уравнений типа бегущей волны на случай переменной скорости» [3] и в настоящей работе.

Цель исследования. Предупреждение термического повреждения теплообменных поверхностей двигателей внутреннего сгорания.

Изложение материала. При аварийном нагружении двигателя из «холодного состояния» (328. . . 333 *К*) резко возрастает напряженность его деталей. Поскольку термические повреждения, в частности, днища поршня за времена порядка 10. . .15 *мин* проникают на глубину 3. . .5*мм*, то допустимо рассматривать его как полуграничное тело вдоль оси цилиндра. Численная оценка такого допущения показала, что его относительная погрешность по температурам составляет 2. . .3%.

Известно, что в строгой постановке задача нестационарного конвективного теплообмена должна формулироваться и решаться как сопряженная задача с граничными условиями (ГУ) IV рода [1]. Такая постановка предполагает решение внешней гидродинамической задачи и сопряжение ее результатов с решением внутренней задач теплопроводности.

Однако сложность быстропротекающих нестационарных гидродинамических процессов в цилиндре делает как формулировку, так и решение задачи в такой постановке практически не возможными. Поэтому в практике исследований теплонапряженности двигателей для оценки интенсивности теплообмена широко (но вынужденно) используют ГУ III рода

$$q = a_r(t)[T_r(t) - T_{\text{ст}}(t)], \tag{1}$$

где q – плотность теплового потока на границе, Вт/м^2; a_r – коэффициент теплоотдачи от газов к тепловоспринимающей поверхности, Вт/м^{2}К; T_r – температура газа, К; $T_{ст}$ – температура стенки, *К*; *t* – время, *с*. Наибольшая теплонапряженность деталей двигателя наблюдается в аварийном режиме, поэтому для определения a_r используется наиболее распространенная полуэмпирическая формула Эйхельберга

$$a_r = \sqrt{p_r T_r}\sqrt[3]{c_m}\sqrt[4]{p_k} \ , \tag{2}$$

где $p_r T_r$- соответственно давление *(МПа)* и температура *(К)* рабочего тела (газа); p_k- давление надувочного воздуха, *(МПа);* c_m- средняя скорость поршня, (м/с).

Известен класс решений параболических уравнений, имеющих вид «бегущей волны», распространяющийся с постоянной скоростью *V*. Решением такого вида описывается, например, прогрев вещества, по которому с постоянной скоростью *V* распространяется детонационная волна, на фронте которой реакция поддерживает постоянную температуру [2]. Аналогично можно полагать, что температурное поле может быть описано уравнением типа «бегущей волны», имеющим решение в виде *T = T(x – V t)*, где *x* – координата. Решение такого вида можно получить, используя понятия скорости распространения изотермической поверхности [1]. Решение уравнения для полного дифференциала изотермы

$$\frac{dT}{dt} + V\frac{dT}{dt} = 0 \ , \tag{3}$$

в случае *V=const* имеет вид *T = T (x – V t*), где *V = dx/dt* – скорость распространения изотермической поверхности. Решение с аргументом *(x – V t)* пригодны лишь для специальных случаев, например, [2].

Очевидно, что в общем случае скорость распространения возмущения переменна [3]. Аргумент искомого решения можно получить из решения смешанной задачи для управления (3), он имеет вид

$$\xi = x = \int_0^t V(x, t')dt' \ . \tag{4}$$

Относительное изменение теплофизических свойств теплопроводимости *(λ)* и удельной теплоемкости *(cρ)* в рассматриваемом диапазоне температур 333. . 700 К составляет 15. . 20%, что приводит к относительной погрешности решения прямой задачи теплопроводимости порядка 4. . .6%. Для оценки температуры повреждения можно использовать постоянные средне интегральные значения λ и *cρ.* Поэтому можно использовать линейное уравнение теплопроводимости:

$$\frac{d}{dt} - a\frac{d^2T}{dt^2} = 0 \ . \tag{5}$$

где α – температуропроводимость. Будем искать решение уравнения (5) в виде T = T(ξ). Подставляя эту функцию в уравнение (5), после преобразование получим уравнение:

$$\frac{d^2T}{d\xi^2} + (\frac{V}{a} - \int_0^t \frac{d^2V}{dx^2}dt')(1 - \frac{d^2V}{dx}dt')^{-2}\frac{dT}{d\xi} \ , \tag{6}$$

общее решение, которого имеет вид:

$$T(\xi) = c_1 + c_2\exp\left[-(\frac{V}{a} - \int_0^t \frac{d^2V}{dx^2}dt')\left(1 - \frac{d^2V}{dx}dt'\right)^{-2}\xi^{-1}\right]. \tag{7}$$

где постоянные c_1 и c_2 определяются из краевых условий.

Из выражения (7) следует:

$$-\left(1-\frac{d\varphi}{dx}\right)^2 \ln\left(\frac{T-T_{\text{н}}}{T_{\xi=0}-T_{\text{н}}}\right)\xi^{-1}=\frac{1}{a}\frac{d\varphi}{dt}-\frac{d^2\varphi}{dx^2}, \quad (8)$$

где φ= $\int_0^{t} V\,dt'$ Скорость V найдем из условия *ξ =0,* когда координата распространения возмущения φ совпадает с произвольно выбранным значением независимой переменной x. Тогда $x = \int_0^{t} V(x,t')dt'$ - уравнение распространения теплового возмущения, соответствующее фронту волны. При *ξ→0* из (8) следует, что функция φ удовлетворяет уравнению

$$\frac{d\varphi}{dt}-a\frac{d^2\varphi}{dx^2}=0. \quad (9)$$

и краевым условиям: $x \to 0$, $\varphi \to \varphi_0$; $x \to \infty$, φ=0; t→0, φ→0. Решение задачи для φ в изображениях Лапласа имеет вид:

$$\varphi(x,c)=\varphi_0(s)\exp\left(-\sqrt{\frac{s}{a}}\right), \quad (10)$$

где *s* – параметр преобразования Лапласа. Продифференцируем выражение (10) по x и умножим обе части полученного равенства на $s^{-3/2}$, тогда после преобразования получим

$$\sqrt{a}L^{-1}\left[\frac{\varphi}{\varphi_0}\cdot\frac{s}{s\sqrt{s}}\right]=2\sqrt{\frac{at}{\pi}}\exp\left(-\frac{x^2}{4a}\right)-x\cdot\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right), \quad (11)$$

где L^{-1}, *erfc =1 – erf* – соответственно оператор обратного преобразования Лапласа и функция ошибок Гаусса. Из выражения (11) следует, что в его левой части при $x\to 0$ числитель $\varphi\to\varphi_0$, знаменатель $\varphi_0 s\sqrt{s} \to 1$, откуда $\sqrt{a\varphi_0} \to s^{3/2}$, и $\varphi_0 = 2\sqrt{\frac{at}{\pi}}$, что тождественно правой части этого выражения при x=0.

Следовательно:

$$\varphi(x,t)=2\sqrt{\frac{at}{\pi}}\exp\left(-\frac{x^2}{4a}\right)-x\cdot\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right), \quad (12)$$

откуда получаем выражение для скорости распространение изотермы

$$V=\sqrt{a}\cdot\sqrt{\frac{1}{\pi t}}\exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right). \quad (13)$$

Таким образом, скорость V представляет произведение $\sqrt{a}$ на функцию источника в теории теплопроводности. Решение уравнения (5), выражение через скорость, в интегральной форме имеет вид:

$$\int_0^t \frac{T(t')dt'}{\sqrt{\pi(t-t')}}=\sqrt{\frac{1}{a}}\cdot\int_0^t T_0(t-t')V(t')dt', \quad (14)$$

где $T_0 = T(0,t)$ – температура на границе $x = 0$.

При T_0 =const из (14) получим выражение $T=T_0\left(1-\operatorname{erf}\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)$, тождественное решению, произведенному в [1]. Изображение по Лапласу решения (14) имеет вид

$$T(x,t) = T_0(s)e^{-x\sqrt{\frac{s}{a}}} .$$

оригинал, которого

$$T(x,t) = \frac{x}{2\sqrt{a\pi}}\int_0^T T_0(t-t')\frac{e^{-(\frac{x^2}{4at'})}}{(t')^{3/2}}dt' \quad . \qquad (15)$$

После преобразования (15) получаем выражение:

$$q(t) = \frac{\lambda}{\sqrt{a\pi}}\int_0^T \frac{dT_0(t')}{dt'}\frac{dt'}{\sqrt{(t-t')}} \quad , \qquad (16)$$

идентично приведенному в [4].

Подставляя в (16) ГУ III рода (1), получаем уравнение для искомой температуры *(T_{cm} = T_0)* на поверхности теплообмена

$$a[T_r - T_0(t)] = \frac{\lambda}{\sqrt{a\pi}}\int_0^T \frac{dT_0(t')}{dt'}\frac{dt'}{\sqrt{(t-t')}} \quad . \qquad (17)$$

Решение уравнения в изображениях Лапласа таково $T_0(s) = \frac{T_\varphi}{s(\varphi+\sqrt{s})} + \frac{T_н}{\sqrt{s}(\varphi+\sqrt{s})}$.

Оригинал имеет вид:

$$T_0(t) = T_r + (T_н - T_r)\left[(1 - \mathrm{erf}\varphi\sqrt{t})\right] , \qquad (18)$$

где $\varphi = a\sqrt{\frac{a}{\lambda}}$, λ – коэффициент теплопроводимости, *Вт/мК*, t – текущее время, *с*.

По данным в [5] для двигателя Sulzer RD76 a = 210 Вт/м^{2}К, λ = 35 Вт/мК, a = 9 · 10^{-6} м^2/с, средняя за цикл температура газов $T_г$ = 1173 К, начальная температура перед аварийным нагружением $T_н$ = 333 К.

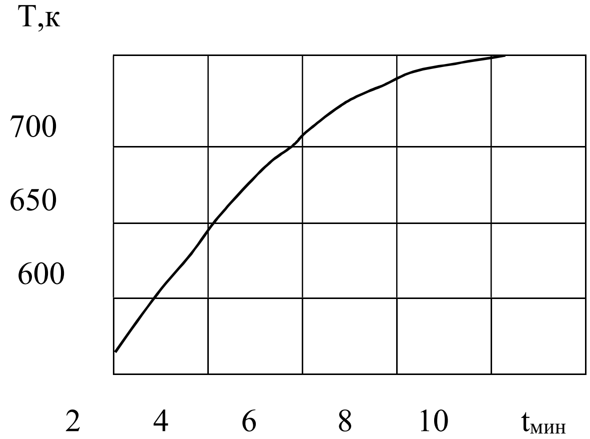

Рисунок 1 – Изменение температуры поверхности теплообмена во время аварийного нагружения двигателя Sulzer RD76

На рис. 1 показано изменение температуры поверхности теплообмена во время аварийного нагружения двигателя, описанного в [5].

Выводы. При t = 1200 . . .1800 с температура днища поршня достигает предельного для данного металла значения 750 К, что повышает риск его термического повреждения. При форс-мажорных обстоятельствах (аварийном нагружении двигателя или его перегрузках при плавании во льдах) необходимо использовать съемные днища поршней из жаропрочной стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности . – Москва: Высшая школа, 1967. – 599 с.
2. Зельдович Я. Б., Рейзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – Москва: Наука, 1966. – 686 с.
3. Кривошей Ф. А. Обобщение решения параболических уравнений типа бегущей волны на случай переменной скорости // Докл. АН Украины. – 1992. - №5. – С. 82-843.
4. Ландау Л. Д., Лившиц В.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. – Москва: Наука. – 1988. – 736 с.
5. Овсянников М. К., Давыдов Г. А. Тепловая напряженность судовых дизелей. – Ленинград: Судостроение, – 1975. – 260 с.

Панін В.В., Кривошей Ф.О., Сьомін О.А., Макаров О.М.

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕРМІЧНОГО ПОШКОДЖЕННЯ ТЕПЛОНАПРУЖЕННИХ ПОВЕРХОНЬ ДВИГУНА В НАБЛИЖЕННІ «БІГУЧОЇ ХВИЛІ» ТЕМПЕРАТУРИ ЗІ ЗМІННОЮ ШВИДКІСТЮ

Відомо, що в строгій постановці завдання нестаціонарного конвективного теплообміну повинна формулюватися і вирішуватися як сполучена завдання з граничними умовами IV роду. Така постановка передбачає вирішення зовнішньої гідродинамічної задачі і сполучення її результатів з рішенням внутрішньої задач теплопровідності.

У наближенні «біжучої хвилі» авторами визначені граничні значення температури, при якій відбуваються термічні ушкодження (мікротріщини - «павутина») теплообмінних поверхонь двигуна внутрішнього згоряння.

У статті стверджується, що при t = 1200. . .1800 с температура днища поршня досягає граничного для даного металу значення 750 К, що підвищує ризик його термічного пошкодження. При форс-мажорних обставинах (аварійному навантаженні двигуна або його перевантаженнях при плаванні в льодах) необхідно використовувати знімні днища поршнів з жароміцної сталі.

***Ключові слова**: температура, «бігуча хвиля», термічне ураження.*

Panin V., Krivoshey F., Syomin O., Makarov O.

DEFINING OF THE TEMPERATURE OF THERMAL DAMAGE OF THE HEAT-STRESSED SURFACES OF THE ENGINE IN THE APPROXIMATION OF «RUNNING WAVE» WITH VARIDLE VELOCITY

It is well known that, in a rigorous formulation, the problem of non-stationary convective heat exchange must be formulated and solved as an adjoint problem with boundary conditions of the fourth kind. Such a formulation assumes the solution of an external hydrodynamic problem and the conjugation of its results with the solution of an internal heat conduction problem.

In the approximation of the "traveling wave", the authors determined the limiting values of the temperature at which thermal damage occurs (microcracks - "web") of the heat exchange surfaces of the internal combustion engine.

The article states that at t = 1200. . .1800 C the temperature of the piston head reaches the limit for this metal value of 750 K, which increases the risk of its thermal damage. In case of force majeure (emergency loading of the engine or its overload when swimming in ice) it is necessary to use removable heads of heat-resistant steel pistons.

***Keywords:** temperature, «running wave», thermal damage.*