

## ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ МАСЛЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРШНЕЙ ДВС

### АНОТАЦИЯ

В настоящее время проектирование и оптимизация конструкций поршней для двигателей нового поколения невозможны без углублённого исследования условий его теплообмена с горячими газами и охлаждающей средой. Значительная экономия временных и интеллектуальных ресурсов может быть достигнута с помощью математического моделирования теплового состояния деталей. Однако применение математических моделей требует их экспериментального обоснования. В представленной работе проводится углублённое исследование теплообмена на внутренних поверхностях поршня, принудительно охлаждаемым маслом. Целью исследования является экспериментальное изучение механического и теплового взаимодействия потока масла с возвратно-поступательно движущейся внутренней поверхностью поршня.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основным методом анализа тепловой и механической напряженности деталей двигателей является метод конечных элементов (МКЭ). Его повсеместное применение обеспечивается наличием универсальных пакетов прикладных программ. Проведенный анализ методик [1, 3–7] расчёта параметров теплообмена показал их ограниченные возможности, несоответствующие для анализа МКЭ. В представленной работе проводится исследование теплообмена на внутренних поверхностях поршня, принудительно охлаждаемого маслом. Целью исследования является изучение механического и теплового взаимодействия потока масла с возвратно-поступательно движущейся внутренней поверхностью поршня.

### 2. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООТДАЧИ НА ОХЛАЖДАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПОРШНЯ

#### 2.1. Определение толщины плёнки масла с учётом возвратно-поступательного движения поршня

Рассмотрено течение плёнки масла по внутренней поверхности поршня между бобышками, подаваемого из форсунки, установленной в корпусе двигателя. Принимается формулировка струйного (одномерного) течения в слое вязкой жидкости.

В плёнке на ускоренно перемещающейся по поверхности поле скоростей представляется суммой скоростей некоторого начального течения, задаваемого соплом, и периодических знакопеременных течений, задаваемых переносной скоростью. Отрывы плёнки возможны при больших положительных

(направленных к ВМТ) ускорениях поршня. Их можно исключить увеличением расхода или начальной скорости масла через сопло.

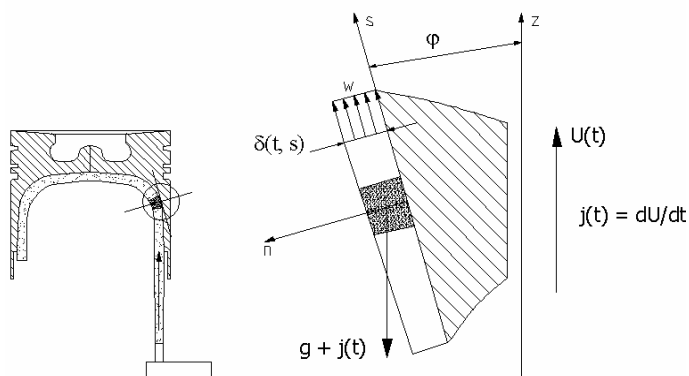


Рис. 1. Расчётная схема одномерного течения плёнки масла

Принимаем, что по поверхности поршня  $n = 0$  распространяется плёнка вязкой жидкости. Поверхность поршня  $n = 0$  совершает ускоренное возвратно-поступательное движение с ускорением  $j = dU/dt$ . Решение гидродинамической части задачи проводится не по традиционной схеме вязкого течения в пограничном слое плёнки, а в гидравлической постановке. Эта постановка не дает полей скорости и температуры, но отвечает на вопрос в принципе – возможно ли течение в данном поле переносной скорости.

Система уравнений движения имеет вид

$$\frac{Dw}{Dt} = -ig - ij - v \frac{\partial^2 w}{\partial n^2}, \quad \frac{\partial q}{\partial s} + \frac{\partial \delta}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

Здесь  $\frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial s}$  – субстанциальная производная скорости в относительном движении;  $w$  – средняя скорость жидкости в плёнке в относительном движении;  $i$  – уклон поверхности поршня;  $i = \sin \angle(s, x)$ ;  $s$  – продольная координата;  $s \perp n$ ,  $x$  – горизонтальная координата;  $v \frac{\partial^2 w}{\partial s^2}$  – составляющая трения  $\delta = \delta(t, s)$  – толщина плёнки;  $q = w \delta$  – расход жидкости в относительном движении.

Линеаризованный аналог уравнения движения получается, если пренебречь квадратом скорости

$$w \frac{\partial w}{\partial s} \ll \frac{\partial w}{\partial t}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -gi - j(t)i - v \frac{\partial^2 w}{\partial n^2}. \quad (2)$$

Для решения уравнения (2) ускорение плёнки масла представляется как

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{w_{i+1} - w_i}{\Delta t} \quad (3)$$

Разность скоростей по сечениям находятся из уравнения

$$\frac{w_{i+1}^2}{2g} = \frac{w_i^2}{2g} + h + h_{тр}, \quad (4)$$

где  $h_{тр}$  – потеря энергии на трение;  $h$  – потеря напора.

После преобразований уравнение (1) принимает вид:

$$v \frac{\partial^2 w}{\partial n^2} = -j(t)i - gi - g \frac{h_{тр} + h}{s} \quad (5)$$

Расход через плёнку:

$$q = \int_0^{\delta} w dn = \frac{\delta^3}{3v} \left[ -g \frac{h_{тр} + h}{s} - gi - j(t)i \right] \quad (6)$$

Толщина плёнки:

$$\delta(t, s) = \sqrt[3]{\frac{3vq}{-g \frac{h_{тр} + h}{s} - gi - ji}} \quad (7)$$

## 2.2. Определение параметров теплообмена на охлаждаемой поверхности

Рассматриваемые в работе процессы теплопередачи относятся к вынужденному конвективному течению для описания которого принята зависимость [10]:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (8)$$

Случай продольного обтекания пластины при больших числах Прандтля был давно исследован М.А. Левеком [2]. Установленная зависимость имеет вид

$$Nu_s = 0.34 Pr^{1/3} \sqrt{Re_s}, \quad (9)$$

где  $Nu_s = \frac{\alpha(s)s}{\lambda}$ ;  $Re_s = \frac{ws}{v}$ .

Тогда, используя соотношение [10],

$$\frac{\delta}{s} \approx \frac{1}{\sqrt{Re_s}}, \quad (10)$$

где  $\frac{\delta}{s}$  – толщина приведённая к безразмерному виду. Получаемое выражение для коэффициента теплоотдачи

$$\alpha(s) = 0.34 \frac{\lambda}{\delta(s)} Pr^{1/3} \quad (11)$$

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАСЛЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Экспериментальное исследование посвящено изучению движения масляной плёнки вдоль внутренней поверхности поршня, расположенной между

бобышками. С этой целью была создана экспериментальная установка, дающая возможность получить детальное представление о процессе взаимодействия струи масла с охлаждаемой поверхностью.

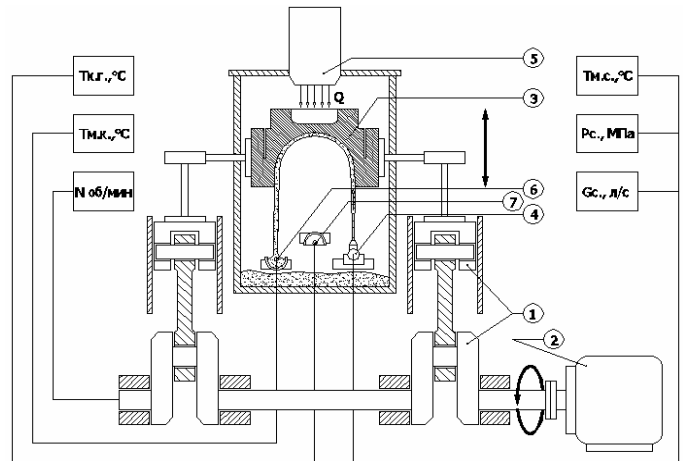


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Принципиальная схема установки показана на рис. 2. Основное назначение исследуемого элемента 3 состоит в имитации отвода теплоты, подводимой от горелки 5 к огневому днищу, в охлаждающее масло, подающееся из форсунки 4 на внутреннюю поверхность. Задание исследуемому элементу возвратного поступательного движения производится с помощью кривошипно-шатунного механизма 1, приводимого в движение электродвигателем 2. Датчики 6 фиксируют температуры масла на выходе из форсунки и после прохождения поверхности охлаждения. Для оценки теплоотдачи от масла в воздух фиксируется температура картерных газов 7. Для определения распределения температур по объёму исследуемого элемента используются термопары, схема расположения которых представлена на рис. 3–7. Результаты термометрирования элемента 3 использовались для оценки теплового потока и определения экспериментальных значений коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{экс}$ , которые сравнивались с расчётными величинами  $\alpha_{рас}$ , определяемыми по формуле (11).

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Целью настоящего исследования является получение данных для оценки влияния масляного охлаждения на тепловое состояние поршня. При этом рассматривается влияние температуры и расхода масла на тепловое состояние элемента 3. Важно также оценить характер движения плёнки вдоль омываемой поверхности при различных её конфигурациях.

На рис. 3–7 и в табл. 1–4 представлены результаты одного из экспериментов с использованием конструкции исследуемого элемента 3 с охлаждаемой поверхностью, максимально приближенной к внутренней поверхности поршня расположенной между бобышками. Эксперимент проводился при температуре масла  $T_m = 89^\circ\text{C}$  частоте вращения коленчатого вала 1000 об/мин.

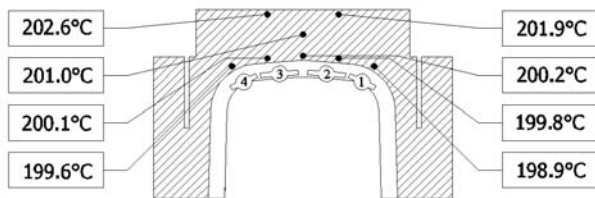


Рис. 3. Тепловое состояние нагретого элемента 3 без включения масляного охлаждения

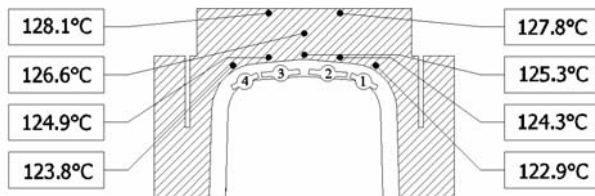


Рис. 4. Тепловое состояние элемента 3 при масляном охлаждении  $q=54.6$  л/час

Таблица 1. Расчётные и эмпирические значения  $\alpha$  вдоль охлаждаемой поверхности при  $q=54.6$  л/час

Участок	1	2	3	4
$\delta_{рас}$	0.103	0.118	0.142	0.079
$\delta_{экс}$	0.097			
$\alpha_{рас}$	1340	1145	992	586
$\alpha_{экс}$	902	886	727	655

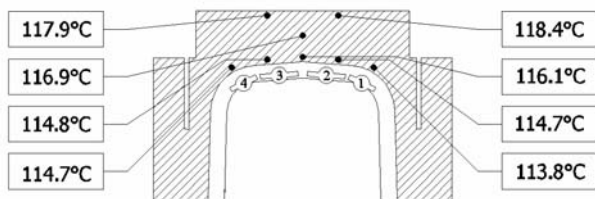


Рис. 5. Тепловое состояние элемента 3 при масляном охлаждении  $q=76.8$  л/час

Таблица 2. Расчётные и эмпирические значения  $\alpha$  вдоль охлаждаемой поверхности при  $q=76.8$  л/час

Участок	1	2	3	4
$\delta_{рас}$	0.102	0.119	0.144	0.082
$\delta_{экс}$	0.127			
$\alpha_{рас}$	1335	1195	1100	770
$\alpha_{экс}$	970	1019	989	899

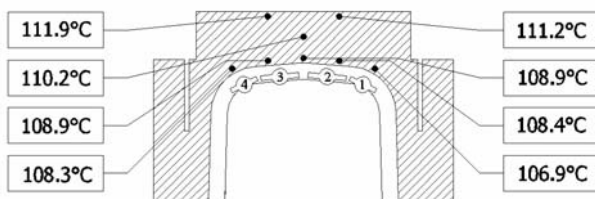


Рис. 6. Тепловое состояние элемента 3 при масляном охлаждении  $q=98.2$  л/час

Таблица 3. Сравнение расчётных и эмпирических значений  $\alpha$  вдоль охлаждаемой поверхности

Участок	1	2	3	4
$\delta_{рас}$	0.122	0.127	0.134	0.164
$\delta_{экс}$	0.106			
$\alpha_{рас}$	1353	1250	1185	1035
$\alpha_{экс}$	1482	1488	1319	1170

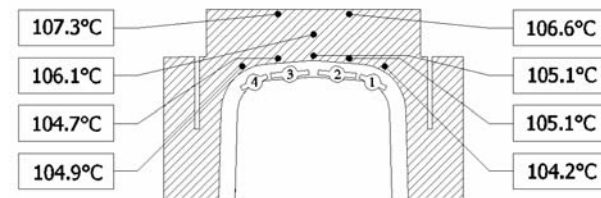


Рис. 7. Тепловое состояние элемента 3 при масляном охлаждении  $q=112.1$  л/час

Таблица 4. Сравнение расчётных и эмпирических значений  $\alpha$  вдоль охлаждаемой поверхности

Участок	1	2	3	4
$\delta_{рас}$	0.134	0.135	0.139	0.157
$\delta_{экс}$	0.081			
$\alpha_{рас}$	1381	1296	1247	1142
$\alpha_{экс}$	1760	1261	1357	1058



Рис. 8. Отрыв плёнки масла при ходе поршня вверх

На рис. 8 представлен характерный отрыв плёнки при движении поршня с большим ускорением в сторону ВМТ. Съёмка произведена при  $n = 1000$  об/мин, в точке  $20^\circ$  по УПКВ ускорение поршня  $j \sim 500$  м/с<sup>2</sup>.

Такое отрывное течение обуславливает выраженный локальный характер теплообмена на охлаждаемой поверхности поршня. Это необходимо учитывать при разработке конструкции поршней. Правильно подобранные режимы охлаждения и геометрии внутренней поверхности могут значительно расширить область режимов работы поршней при безотрывном течении.

В результате проведённого исследования разработана методика оценки параметров теплообмена масла с охлаждаемой поверхностью на основе

струйной (одномерной) схемы течения в слое вязкой жидкости, получено экспериментальное подтверждение.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены рекомендации по значениям коэффициентов теплоотдачи на внутренней поверхности поршня при струйном масляном охлаждении.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

КВ – коленчатый вал;  
МКЭ – метод конечных элементов;  
 $i$  – уклон поверхности поршня;  
 $g$  – ускорение свободного падения;  
 $h_{тр}$  – потеря энергии на трение Дж;  
 $h$  – потеря напора Дж;  
 $j$  – ускорение поршня  $м/с^2$ ;  
 $n$  – координата нормальная к поверхности поршня;  
 $Nu$  – число Нуссельта;  
 $Pr$  – число Прандтля;  
 $q$  – расход жидкости в относительном движении,  $м^3/с$ ;  
 $Re$  – число Рейнольдса;  
 $s$  – продольная координата относительного движения масла, м;  
 $w$  – осреднённая скорость плёнки масла в относительном движении, м/с;  
 $x$  – горизонтальная координата, м;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на охлаждаемой поверхности,  $Вт/(К \cdot м^2)$ ;  
 $\alpha_{рас}$  – коэффициент теплоотдачи на охлаждаемой поверхности определённый эмпирическим путём,  $Вт/(К \cdot м^2)$ ;  
 $\alpha_{экс}$  – коэффициент теплоотдачи на охлаждаемой поверхности определённый эмпирическим путём,  $Вт/(К \cdot м^2)$ ;  
 $\delta$  – толщина пленки масла в относительном движении, м;  
 $\delta_{рас}$  – толщина пленки масла определённая расчетным путём, м;

$\delta_{экс}$  – толщина пленки масла определённая эмпирическим путём, м;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности масла,  $Вт/(К \cdot м)$ ;  
 $\nu$  – кинематическая вязкость масла,  $сСт$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вейнблат М.Х., Быков В.Ю.** Отключение охлаждения поршней на частичных режимах – резерв улучшения эксплуатационных показателей турбопоршневого дизеля // Двигателестроение. 1985. № 6. С. 20–21.
2. **Дюрэнд В.** Аэродинамика. М.: Оборонгиз, 1939.
3. **Костин А.К., Михайлов Л.И., Славински З.** Оценка точности задания граничных условий при расчете теплонапряженности поршней // Двигателестроение. 1982. № 7. С. 9–12.
4. **Костин А.К., Ларионов В.В., Михайлов Л.И.** Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания: Справочное пособие. Л.: Машиностроение, 1979.
5. **Лазарев Е.А., Перлов М.Л.** Определение конструктивных параметров маслоприемного и сливного каналов полости охлаждения поршня тракторного дизеля 4 ЧН // Двигателестроение. 1982. № 4. С. 21–23.
6. **Лазарев Е.А., Перлов М.Л.** выбор конструктивных параметров маслоподающего сопла системы охлаждения поршня // Двигателестроение. 1985. № 8. С. 14–17.
7. **Петриченко Р.М.** Интенсивность теплоотдачи при масляном охлаждении поршней ДВС // Двигателестроение. 1980. № 12. С. 16–18.
8. **Розенблит Г.Б.** Теплоотдача в дизелях. М.: Машиностроение, 1977.
9. **Стефановский Б.С.** Испытания двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1972.
10. **Устинов А.Н., Волков Ю.П.** Приближенный расчёт коэффициента теплоотдачи от внутренней поверхности поршня в картерные газы // Двигателестроение. 1981. № 5. С. 11–13.
11. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. С. 262–272.
12. **Юдаев Б.Н.** Теплопередача. М.: Высшая школа, 1973.