

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОГО
СОСТОЯНИЯ ДВС РАСЧЕТНЫМ МЕТОДОМ**

САМАРА 2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Определение параметров теплового состояния ДВС расчетным методом

Составители: *А.С.Коровин, С.В.Крашенинников*

САМАРА
Издательство Самарского университета
2016

УДК 621.432

Составители: А.С. К о р о в и н, С.В. К р а ш е н и н н и к о в

Рецензент: доцент, к.т.н. Радько В.М.

Определение параметров теплового состояния ДВС расчетным методом: методические указания / А.С.Коровин, С.В.Крашенинников – .Самара: Изд-во Самарского университета, 2016. -20 с.

Приводятся основные этапы расчета допустимых температур и выбор профиля поршня ДВС связь временного фактора с предельной температурой, расчетное определение монтажных зазоров между поршнем и цилиндром и теплового зазора в поршневом кольце, а также экспериментальный метод определения профиля поршня. Изложенные материалы рекомендованы к использованию в качестве методических указаний к лабораторным работам по дисциплинам «Измерение параметров ДВС», «Автоматизация испытаний и экспериментальным исследованиям» по направлению подготовки 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей, профиль Двигатель внутреннего сгорания.

Подготовлено на кафедре теплотехники и тепловых двигателей

УДК 621.432

© Самарский университет, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| 1. СВЯЗЬ ВРЕМЕННОГО ФАКТОРА С ПРЕДЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ..... | 11 |
| 2. РАСЧЕТ ДОПУСТИМЫХ ТЕМПЕРАТУР И ВЫБОР ПРОФИЛЯ ПОРШНЯ ... | 13 |
| 3. РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОНТАЖНЫХ ЗАЗОРОВ МЕЖДУ ПОРШНЕМ И ЦИЛИНДРОМ И ТЕПЛОВОГО ЗАЗОРА В ПОРШЕВОМ КОЛЬЦЕ | 14 |
| 4 . ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОРШНЯ . | 15 |
| ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ | 17 |
| СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 19 |

ВВЕДЕНИЕ

При отработке программ эквивалентных циклических испытаний подвесного лодочного мотора (ПЛМ) в серийном исполнении была определена граница наработки τ (час) от предельно допустимой температуры $t_{\text{гол}}$. Граничная линия представлена на графике рис.1

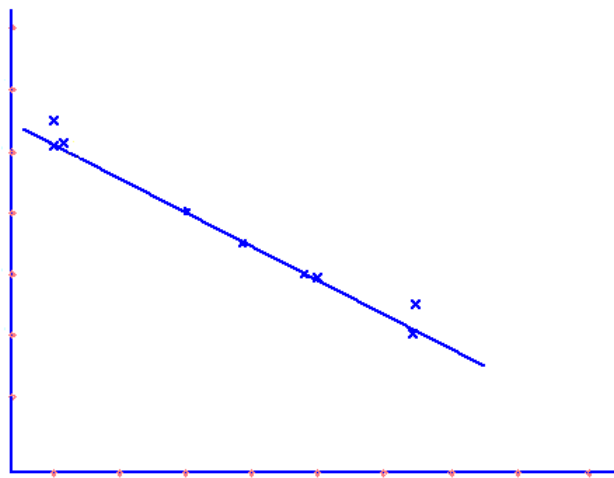


Рисунок 1 - Зависимость времени работы двигателя от предельной температуры головки блока цилиндров

Работа ПЛМ на граничной линии в определенный момент времени заканчивалась "заклиниванием" или "прихватом" поршня с наволакиванием алюминия на зеркало цилиндра и "залеганием" поршневых колец в канавках. В ряде случаев происходили поломки верхнего поршневого кольца. На ПЛМ проведено термометрирование блоков цилиндров как по окружности, так и по высоте, выявлены причины неравномерного охлаждения блока головок. Полученные экспериментальные материалы позволили представить механизм проявления дефекта по поршню, который излагается в настоящем учебном пособии.

Температурное состояние элементов конструкции двигателя определяется многими факторами, как внешними, так и внутренними. К внешним факторам можно отнести: количество подаваемой воды водопомпой, отсутствие кавитации или пу-

зырей воздуха, гидравлическое сопротивление тракта охлаждения, давление на входе в водопомпу. К внутренним факторам следует отнести влияние теплонапряженности элементов цилиндра-поршневой группы (ЦПГ) на надежность и ресурс ПЛМ.

Здесь решается теплофизическая задача с привлечением данных термометрирования, свойств материалов, характера дефекта и места его проявления. Теплонапряженность поршневого двигателя определяется режимами его работы. Для ПЛМ, работающего по внешней скоростной характеристике наиболее теплонапряженным режимом является режим максимального крутящего момента $M_{кр\ max}$. Поэтому в дальнейшем в расчетах будут использоваться экспериментальные данные, полученные при испытании ПЛМ "Вихрь-30М" на частоте оборотов $n = 5400\ об/мин$, что соответствует указанному режиму. Максимальные значения температур гильзы цилиндра по результатам термометрирования приведены на графике рис.2.

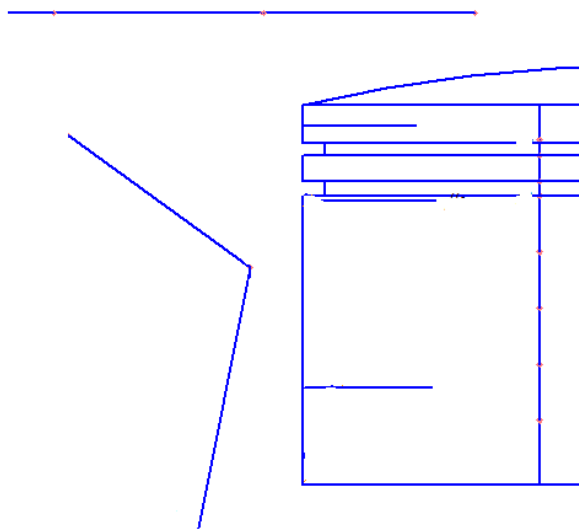


Рисунок 2 - Результаты термометрирования гильзы цилиндра

Установлено, что наибольшая температура цилиндра наблюдается в районе верхнего поршневого кольца - более $140\ ^\circ C$. Как правило, при такой температуре происходили поломки поршневого кольца.

Между температурой головки блока цилиндров $t_{гол}$ существует определенная связь с температурой гильзы цилиндра в верхнем поясе $t_{г}$ (рис.3), что удобно для контроля теплового состояния двигателя и в последующих расчетах.

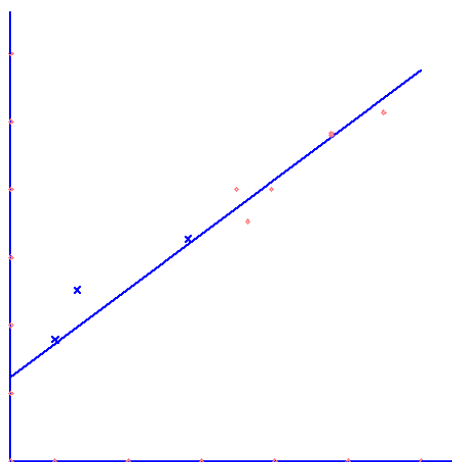


Рисунок 3 - Зависимость температуры головки блока цилиндров от температуры цилиндров

Исходный диаметр гильзы цилиндра в холодном состоянии $D_{ц}=72\text{мм}$, высота поршня $h=65\text{мм}$. На графике рис.4 представлена схема положения поршня в гильзе цилиндра в монтажном (холодном) состоянии и в рабочем (горячем).

В холодном состоянии монтажные зазоры для серийного ПЛМ "Вихрь-30" и модернизированного "Вихрь-30М" приведены на графике рис.5.

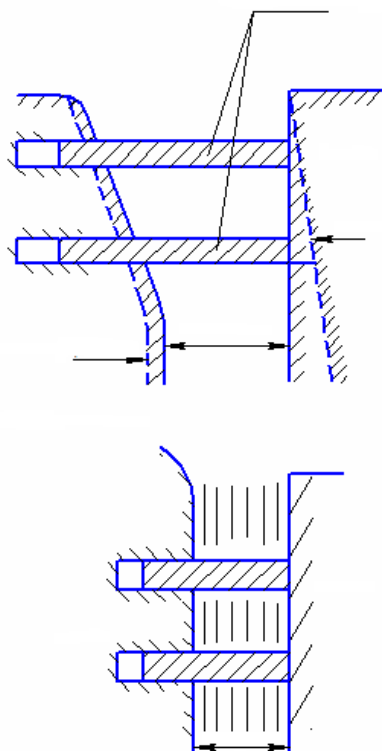


Рисунок 4 - Схема положения поршня в гильзе цилиндра

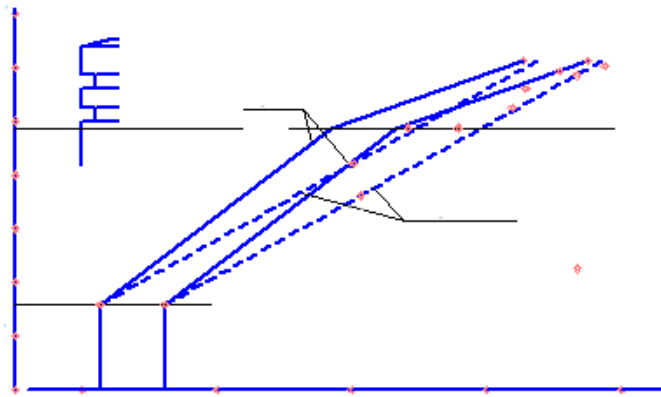


Рисунок 5 - Изменение зазоров по высоте поршня

Применяющиеся материалы цилиндропоршневой группы:

| Деталь | Марка материала | коэффициент температурного расширения |
|------------------|--------------------|---------------------------------------|
| поршень | алюминий АЛ-25 | 0,000024 |
| поршневое кольцо | легированный чугун | 0,000012 |
| гильза цилиндра | серый чугун СЧ-20 | 0,000012 |

В рабочем состоянии элементы цилиндро-поршневой группы вследствие разности температур и коэффициентов линейного расширения изменяют свои геометрические размеры и зазоры по уравнению

$$\Delta' = \alpha \cdot D_1 \cdot \Delta t$$

где Δ' - величина линейного расширения,

α - коэффициент теплового линейного расширения,

D_1 - исходный диаметр,

$\Delta t = t_2 - t_{с6}$ - разность температур в "горячем" (рабочем) состоянии и при монтаже (сборке) соответственно.

Допустимо предположить, что зазор в рабочем состоянии между стенками поршня и цилиндра (см. рис.5) будет равным толщине масляного слоя S_m .

Эта величина по опытным данным составляет $0,01 \dots 0,015$ мм. При решении тепловой задачи для двигателя "Вихрь" принимаем среднюю величину $S_m = 0,0125$ мм.

В теплонапряженных конструкциях при постоянном уровне напряжений проявляется ползучесть материала, т.е. возрастает деформация с течением времени [1].

В теории течения при ползучести материала принимают следующие определяющие параметры:

$$\Phi = f(\sigma, T, \tau),$$

где Φ - функция ползучести;

σ - напряжение

T - температура

τ - время.

Можно представить, что "заклинивание" поршня возможно при остаточной деформации равной величине масляного слоя $S_m = 0,0125$ мм,

т.е. при относительном удлинении

$$\Delta\% = \frac{2 \cdot S_m \cdot 100}{D} = \frac{2 \cdot 0,0125 \cdot 100}{72} = 0,3\%$$

Величина относительного удлинения соизмерима с величиной остаточного относительного удлинения $0,2\%$, вызываемой напряжениями, определяющими предел текучести материала $\sigma_{0,2}$ с признаками пластической деформации (см. рис 6.).

Характеристики прочности для легких материалов, таких как алюминий, полученные при обычных температурах, пригодны до значений температур $50 \dots 150^\circ\text{C}$. При более высоких температурах (а температура поршня иногда превышает 200°C) эти характеристики изменяются и становятся зависимым от длительности действия повышенных температур и напряжений. С повышением температуры предел прочности и предел текучести уменьшаются, а пластичность обычно возрастает при недлительном действии повышенных температур. На графике рис.6 приведены для алюминиевого сплава АЛ-21 характеристики прочности и ползучести. На графике рис. 7, применительно к размерности поршня "Вихрь", путем перестроения представлена

приближенная зависимость изменения диаметра поршня от времени при $\sigma = const$ и $t=300^{\circ}C$.

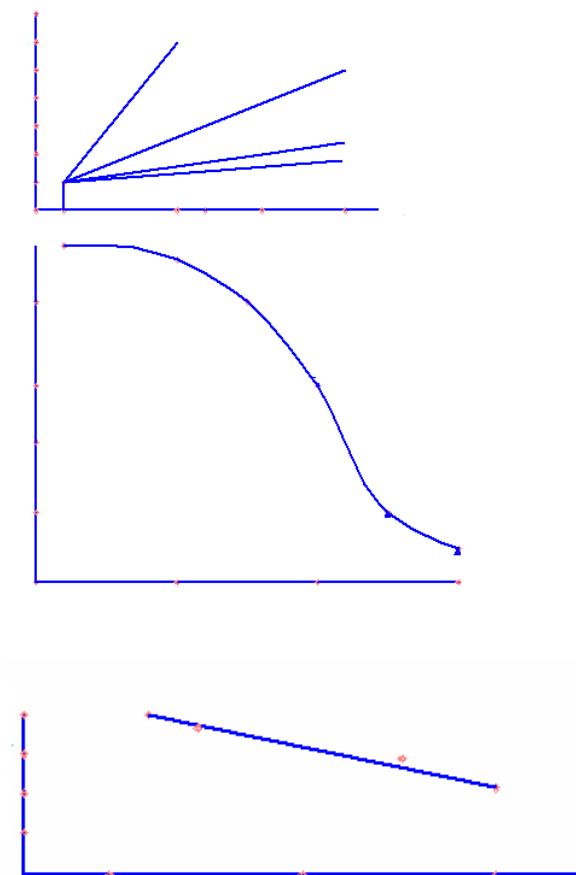


Рисунок 6 - Кривые ползучести алюминиевого сплава АЛ-21

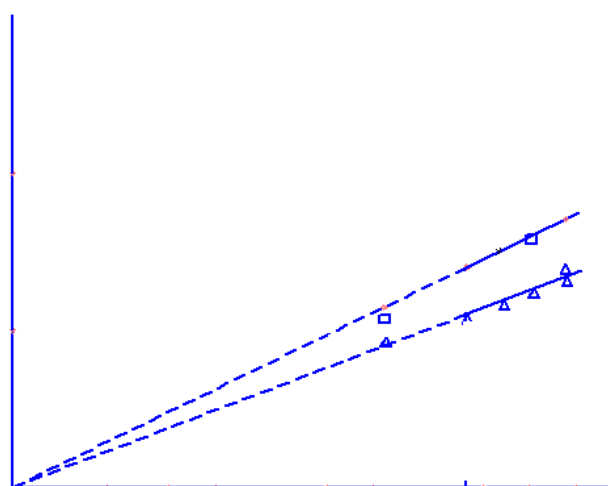


Рисунок 7 - Кривая ползучести материала поршня

1. СВЯЗЬ ВРЕМЕННОГО ФАКТОРА С ПРЕДЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

Аналитическую связь между ресурсом ЦПГ и предельно допустимой температурой, в частности температурой головки блока цилиндров $t_{гол}$, возможно установить, если использовать уравнения в общем виде со следующими допущениями:

$$1. \quad t_{гол} = t_{ц} - \Delta t_1,$$

Δt_1 - разность между температурой цилиндра $t_{ц}$ и головки блока $t_{гол}$, - есть величина постоянная.

$$2. \quad t_n = t_{ц} + \Delta t_2$$

Δt_2 - разность между температурой поршня t_n и цилиндра $t_{ц}$ в конкретном сечении - есть величина также постоянная.

$$D_{цг} = D_{нх} \cdot [1 + \alpha_n \cdot (t_n - t_{сб})]$$

$$D_{цг} = D_{цх} \cdot [1 + \alpha_{ц} \cdot (t_{цг} - t_{сб})]$$

$$5. \quad D_{цг} - D_{нз} = 2 \cdot S_M$$

$$6. \quad \Delta_{заз} = 2 \cdot S_M$$

$$7. \quad \Delta_{заз} = k \cdot \ln \tau$$

$$K = \frac{\Delta \Delta_{заз}}{\Delta \ln \tau}$$

- наклон кривой ползучести материала

В уравнениях индексы означают:

$гол$ - головка, $ц$ - цилиндр, $н$ - поршень, $нз$ - поршень горячий, $нх$ - поршень холодный, $цг$ - цилиндр горячий, $цх$ - цилиндр холодный, $сб$ - сборочный, $м$ - масло, $заз$ - зазор.

Уравнения запишем в дифференциальной форме:

$$\delta t_{зол} - \delta t_{ц} = 0$$

$$\delta t_n - \delta t_{ц} = 0$$

$$\delta D_{III} - \alpha_n \cdot D_{nx} \cdot \delta t_n = 0$$

$$\delta D_{цз} - \alpha_{ц} \cdot D_{цх} \cdot \delta t_{ц} = 0$$

$$\delta D_{цз} - \delta D_{цз} + \delta S_m = 0$$

$$\delta \Delta_{ззз} - \delta S_m = 0$$

$$\delta \Delta_{ззз} - \frac{\Delta_{ззз}}{\ln \tau} \cdot \delta \ln \tau = 0$$

В результате совместного решения уравнений получим уравнение связи параметров

$t_{зол}$ и τ в следующем виде:

$$\delta \ln \tau = \frac{\ln(\alpha_{ц} D_{цх} - \alpha_n D_{nx})}{\Delta_{ззз}} \delta t_{зол} \quad \text{или} \quad \delta \ln \tau = A \delta t_{зол}$$

В нашем случае при принятых параметрах:

$$\ln \tau = 5,6 \quad (\tau \approx 270 \text{ ч из графика рис. 1.})$$

$$\alpha_{ц} = 0,000012 \text{ 1/град}, \quad \alpha_n = 0,000024 \text{ 1/град}$$

$$D_{цх} = 72 \text{ мм}, \quad D_{nx} = 71,76 \text{ мм}, \quad \Delta_{ззз} = 2S_m = 0,025 \text{ мм}.$$

Определим коэффициент А:

$$A = \frac{5,6 \cdot (0,000012 \cdot 72 - 0,000024 \cdot 71,76)}{0,025} = -0,19$$

Таким образом, связь между предельной температурой $t_{зол}$ и наработкой τ для конкретного случая должна описываться уравнением:

$$\delta \ln \tau = -0,19 \delta t_{зол}$$

По результатам экспериментальных данных рис. 1 получим уравнение:

$$\delta \ln \tau = -\frac{5,6}{150-120} \Delta t_{20л} = -0,187 \delta t_{20л}$$

Таким образом, математически подтверждена связь предельно допустимой температуры $t_{20л}$ с наработкой τ , полученная ранее экспериментальным путем.

2. РАСЧЕТ ДОПУСТИМЫХ ТЕМПЕРАТУР И ВЫБОР ПРОФИЛЯ ПОРШНЯ

Теплонапряженность ЦПГ определяет выбор монтажных зазоров между поршнем и цилиндром, а также в поршневых кольцах. На графике рис. 2 приведена радиальная эпюра температуры цилиндра, являющейся предельной для развития "заклинивания" поршня (кривая I). Максимальная температура, при которой происходит "заклинивание" поршня с серийной эпюрой профиля и монтажными зазорами (см. рис.5), в верхней части цилиндра составляет $t_{ц. макс} \approx 160^{\circ}\text{C}$. Температуру поршня измерить сложно и это требует значительных материальных затрат. В данном разделе приведен расчетный метод оценки температура поршня в критических точках, определяющих место развития "заклинивания" (см. рис.2).

Расчетный метод заключается в следующем.

1) Определяется диаметр цилиндра $D_{цг}$ в горячем состоянии по формуле:

$$D_{цг} = D_{цх} (1 + \alpha_{ц} (t_{цг} - t_{сб})),$$

где $D_{цх} = 72 \text{ мм}$, $t_{сб} = 20^{\circ}\text{C}$, $t_{цг}$ - по графику рис.2.

2) Определяется диаметр "горячего" поршня $D_{пг} = D_{цг} - 0,025$,

где $0,025$ - принятая толщина масляного слоя ($2S_m$).

Для случая "заклинивания" $D_{пг} = D_{цг}$.

3) Определяется температура поршня в сходственной температурной точке цилинд-

$$\text{ра } t_{пг} = \frac{\frac{D_{пг}}{D_{пх}} - 1}{\alpha_n} + t_{сб}, \text{ где } D_{пх} - \text{исходный диаметр поршня.}$$

По расчетным данным построена графическая зависимость температуры поршня по высоте (рис. 8).

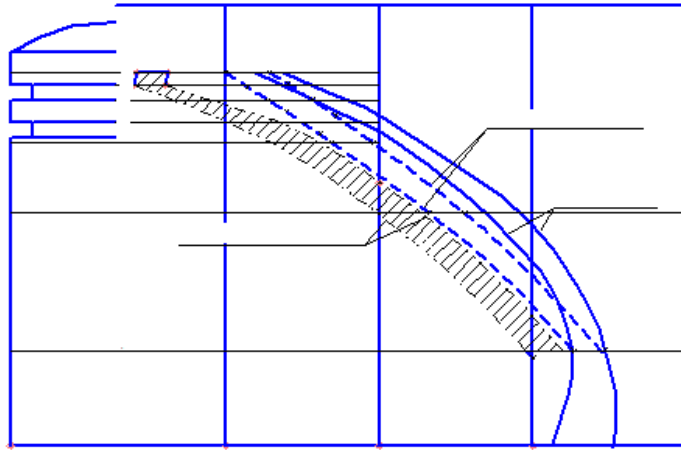


Рисунок 8 - Расчетные значения температуры стенок поршня по высоте

По расчету ожидаемая расчетная максимальная температура поршня составляет

$T_{п макс} = 262...277^{\circ}\text{C}$ в районе верхнего поршневого кольца.

На графике рис. 8а приведена оценка теплонапряженности поршней по высоте по расчетным и экспериментальным данным.

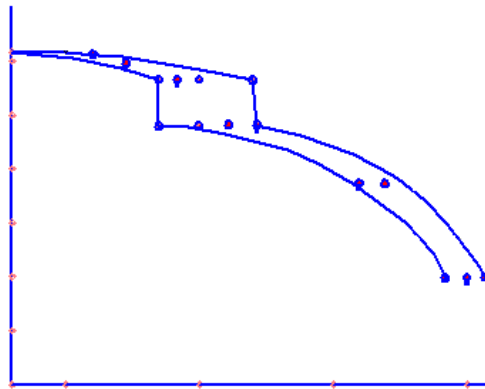


Рисунок 8а - Оценка теплонапряженности поршня

3. РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОНТАЖНЫХ ЗАЗОРОВ МЕЖДУ ПОРШНЕМ И ЦИЛИНДРОМ И ТЕПЛОВОГО ЗАЗОРА В ПОРШЕВОМ КОЛЬЦЕ

Для определения необходимых зазоров между поршнем и цилиндром используются предельные значения температур поршня, полученные в результате расчетов (рис.8), и измеренные предельные температуры цилиндра (рис.2, кривая II). При

этом необходимый зазор определяется в каждой конкретной точке по высоте поршня-цилиндра по формуле:

$$\Delta_j = 72 - \frac{72 \cdot (\alpha_{ц}(t_{цзj} - 20) + 1) - S_m}{\alpha_n(t_{нзj} - 20) + 1}.$$

Расчет теплового зазора Δ_k в поршневом кольце проводится по следующей формуле:

$$\Delta_k = 72 \cdot \pi (t_{нз} - t_{сб}) \alpha_k,$$

где $t_{нз}$ - температура кольца, равная температуре поршня по графику рис.8;

α_k - коэффициент теплопроводности, принимается для поршневого кольца из чугуна $\alpha_k = 0,000012$ 1/град.

Принимаем температуры:

для верхнего поршневого кольца $t_{нз\ верх} = 240^\circ\text{C}$;

для нижнего поршневого кольца $t_{нз\ нижн} = 220^\circ\text{C}$.

Тогда для верхнего поршневого кольца монтажный тепловой зазор составит

$$\Delta_{k\ верх} = 72 \cdot 3,14 (240 - 20) \cdot 0,000012 = 0,6 \text{ мм},$$

для нижнего кольца

$$\Delta_{k\ нижн} = 72 \cdot 3,14 (220 - 20) \cdot 0,000012 = 0,54 \text{ мм}.$$

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОРШНЯ

Экспериментальный метод определения профиля заключается в нанесении на цилиндрическую образующую поршня композитного материала следующего состава:

Смола К-И53 -45 гр. - 82,3%

Al - 5 гр. - 11,1%

MoS₂ - 3гр. - 6,6%.

Результаты измерений профилей поршней и цилиндров для двух режимов работы ($n_1 = 3000$ об/мин и $n_2 = 5000$ об/мин) приведены на рис.9. Графическая зависимость $\Delta = f(n)$ приведена на рис.10.

Величина выбранного зазора прямо пропорциональна частоте вращения. Зависимостью можно пользоваться при диагностике величины изменения зазора в случае "заклинивания" поршня с изменением (падением) частоты вращения.

По известному диаметру цилиндра (рис.9) вычислены величины зазоров, которые сопоставлены с экспериментальными на графике рис.11. Заметна удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных результатов.

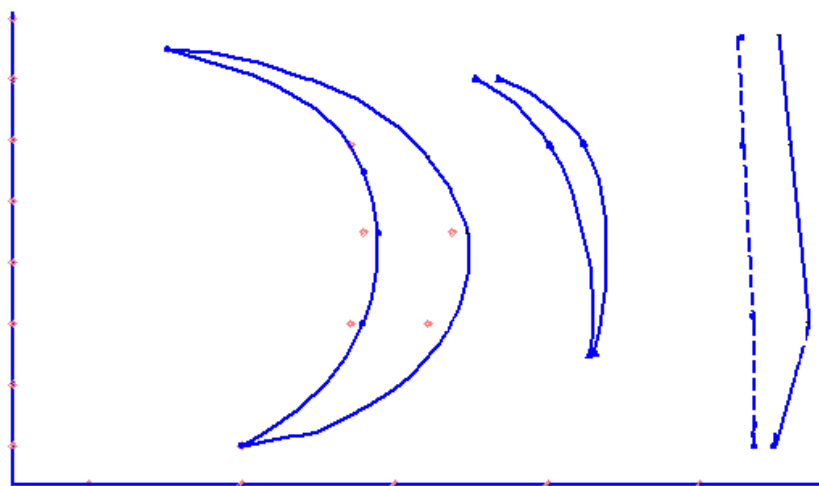


Рисунок 9 - Профили поршня и гильзы цилиндра по высоте

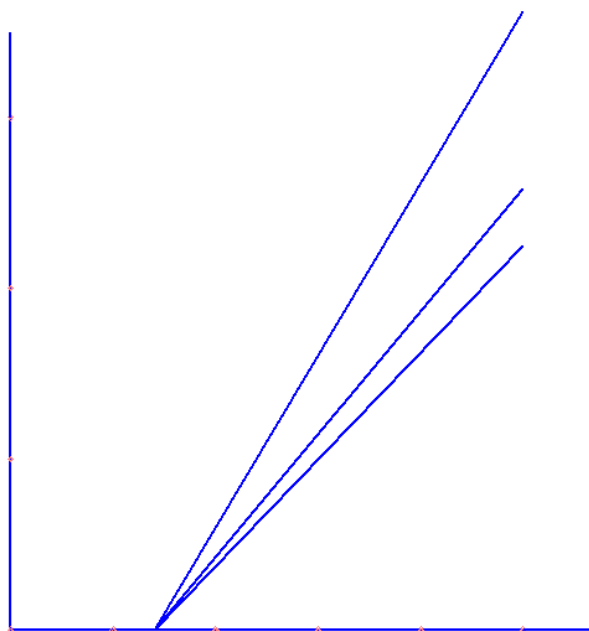


Рисунок 10 - Величина износа композиционного материала в зависимости от частоты вращения вала двигателя

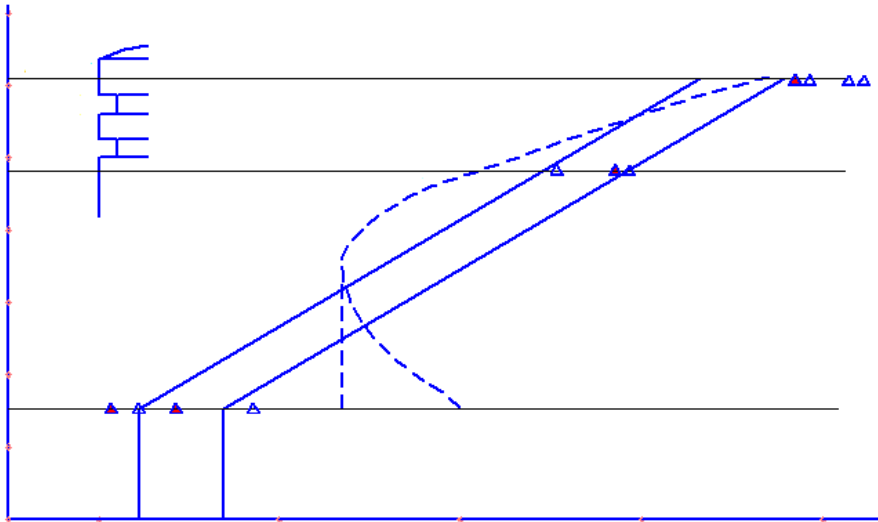


Рисунок 11 - Сопоставление расчетных и экспериментальных зазоров

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчет по лабораторной работе должен содержать графики, построенные по индивидуальному заданию для студента, приводимы в данных методических указаниях.

Графическая зависимость на рис.12 наглядно показывает изменение диаметров поршня со временем, связанное с ползучестью материала алюминия. Из анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что изменение геометрических размеров поршня происходит в течение всего времени работы двигателя, причем в первые часы до $\tau \approx 100$ ч более интенсивно, а далее, если рассматривать до $\tau = 550$ ч, интенсивность снижается примерно в три раза .

В более горячей части поршня изменение (уменьшение) зазоров к $\tau = 550$ ч составляет в среднем по диаметру $D1 \approx 0,03$ мм, по диаметру $D2 \approx 0,06$ мм. По юбке поршня (диаметр $D3$) отмечается износ и уменьшение диаметра поршня (увеличение зазора) на $\sim 0,025$ мм. Принятое упреждающее уменьшение профиля поршня по диаметрам $D1$ и $D2$ и сохранение по диаметру $D3$ является правильным техническим решением.

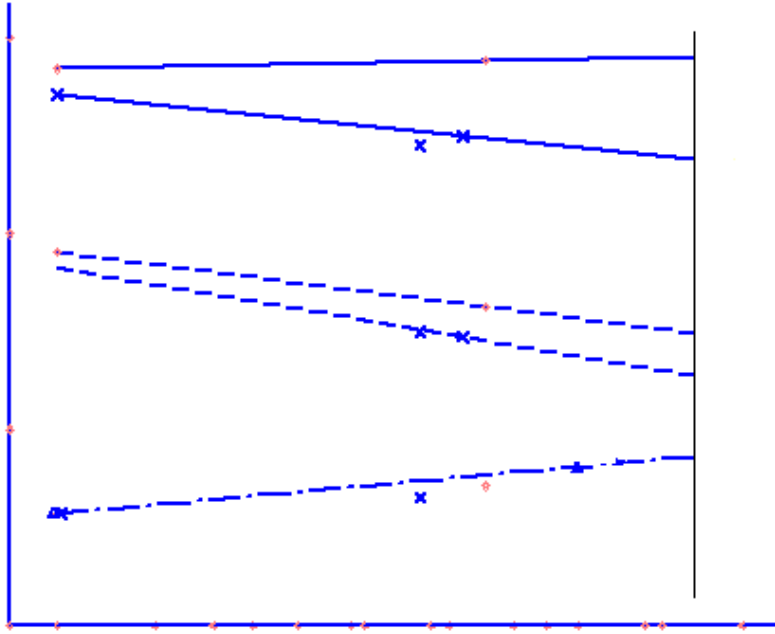


Рисунок 12 - Изменение зазора по диаметру, связанное с ползучестью материала

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Двигатели внутреннего сгорания / под ред. Луканина В.Н. – М.: 2005 г.
2. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учебное пособие для вузов – М.: 2002 г.
3. И.А.Биргер и др. Расчет на прочность деталей машин. Справочник. М.: 1979 г.
4. И.А.Биргер и др. Авиационные поршневые двигателя, М.: 1959 г.
5. Справочник ВИАМ по авиационным материалам. Машиностроение.: 1965 г.
6. Н.Х.Дьяченко и др. Теплообмен в двигателях. М.: 1969 г.

Методические материалы

**Определение параметров теплового
состояния ДВС расчетным методом**

Методические указания

Составители *А.С.Коровин, С.В.Крашенинников*

Редактор

Компьютерная вёрстка

Подписано в печать _____. Формат 60x84 1/20

Бумага офсетная. Печ. л. _____.

Тираж _____ экз. Заказ _____. Арт. _____ / 2018.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Изд-во Самарского университета.

443086, Самара, Московское шоссе, 34.