

РАДИАЛЬНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ ЧАСТИ ПОРШНЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Ю.В. Рождественский, АМ. Гусев

Обосновываются предпосылки для разработки методологии оптимизации радиального профилирования направляющей части поршня. Оценено влияние радиального профиля на гидромеханические характеристики сопряжения «поршень-цилиндр».

У двигателей внутреннего сгорания на юбке поршня после некоторого периода эксплуатации возникают натирсы. Они являются результатом работы двигателя на режиме, когда толщина масляной пленки не достаточна для обеспечения жидкостного трения, или абразивного износа сопряжения. Таким образом, область натирсы юбки можно считать несущей областью, в которой толщина масляного слоя меньше, а гидродинамическое давление больше чем в других частях юбки поршня.

Анализ натиров у различных поршней [1] позволил выделить три разновидности геометрических форм пятен контакта юбки поршня, характерные как для бензиновых, так и для дизельных двигателей: овальные, искобразные и прямоугольные. В общем случае натирсы у нагруженной и ненагруженной сторон юбки поршня различны.

На формирование несущей поверхности (пятна контакта) юбки поршня влияет ее осевое и радиальное профилирование. Под осевым профилированием авторы понимают конструктивно заданное отклонение направляющей части поршня от цилиндричной формы, под радиальным профилированием - конструктивно заданное отклонение наружной границы поперечного сечения юбки от окружности. Методология оптимизации осевого профиля и расчет гидромеханических параметров рассмотрены в работах [2-6], задача оптимального радиального профилирования изучена недостаточно полно.

Форма и площадь несущей поверхности непосредственно влияют на гидродинамические характеристики сопряжения «поршень - цилиндр»: потери мощности на трение, расход смазки в направлении камеры сгорания и толщину смазочного слоя. Целенаправленно формируя геометрию несущей поверхности можно добиться оптимальных гидродинамических характеристик сопряжения.

На примере поршня с овальной формой несущей поверхности рассмотрим развертку юбки в координатах $0\phi Z$ (рис. 1), где ϕ - угловая координата, отсчитываемая от плоскости проходящей через продольную ось поршня и перпендикулярную оси поршневого пальца, Z - координата по высоте юбки отсчитываемая от середины юбки. Линии $\phi_1(z)$, $\phi_2(z)$, $\phi_3(z)$, $\phi_4(z)$ ограничивают несущие поверхности, причем $\phi_1(z)$ и $\phi_4(z)$ симметричны относительно прямой проходящей через O (360°) и образуют нагруженную сторону юбки, а линии $\phi_2(z)$ и $\phi_3(z)$ симметричны относительно прямой проходящей через 180° и образуют ненагруженную сторону юбки. Точки C_1 и C_2 совпадают с вершинами линий $\phi_1(z)$ и $\phi_2(z)$ соответственно. Размеры θ_{01} и θ_{02} - это ширина несущих поверхностей на уровнях Z_{C1} и Z_{C2} соответственно, размер h_{1i} - расстояние по оси ϕ от точки C_i до пересечения границы несущей поверхности с верхним краем развертки, размер h_{2i} - расстояние по оси ϕ от точки C_i до точки пересечения границы несущей поверхности с нижним краем развертки, где $i=1, 2$ - нагруженная и ненагруженная сторона поршня. На рис. 2 и 3 изображены развертки для поршней с искобразной и прямоугольной формой несущей поверхности.

По аналогии с осевым профилированием [2-4], линии $\phi_1(z)$, $\phi_2(z)$, $\phi_3(z)$ и $\phi_4(z)$ можно аппроксимировать параболой вида:

$$\begin{cases} \phi_1(z) = \frac{\theta_{01}}{2} + \frac{\theta_{01}}{2} \cdot k_{r1} \cdot (z - m_{r1})^{l_{r1}}, \\ \phi_4(z) = 360 - \frac{\theta_{01}}{2} - \frac{\theta_{01}}{2} \cdot k_{r1} \cdot (z - m_{r1})^{l_{r1}}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varphi_2(z) = 180 - \frac{\theta_{02}}{2} - \frac{\theta_{02}}{2} \cdot k_{r2} \cdot |(z - m_{r2})|^{l_{r2}}, \\ \varphi_3(z) = 180 + \frac{\theta_{02}}{2} + \frac{\theta_{02}}{2} \cdot k_{r2} \cdot |(z - m_{r2})|^{l_{r2}}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь k_{ri} , l_{ri} , m_{ri} – коэффициенты параболы (индекс “r” указывает на радиальное профилирование):

$$l_{ri} = \frac{\ln \frac{h_{2i}}{h_{1i}}}{\ln \frac{a - m_{ri}}{a + m_{ri}}}, \quad k_{ri} = \frac{h_{1i}}{\frac{\theta_{02}}{2} (a + m_{ri})^{l_{ri}}}, \quad m_{ri} = \frac{Z_{Ci}}{R}, \quad a = \frac{B}{2R}, \quad z = \frac{Z}{R}, \quad (3)$$

где B и R – высота и радиус юбки поршня, мм.

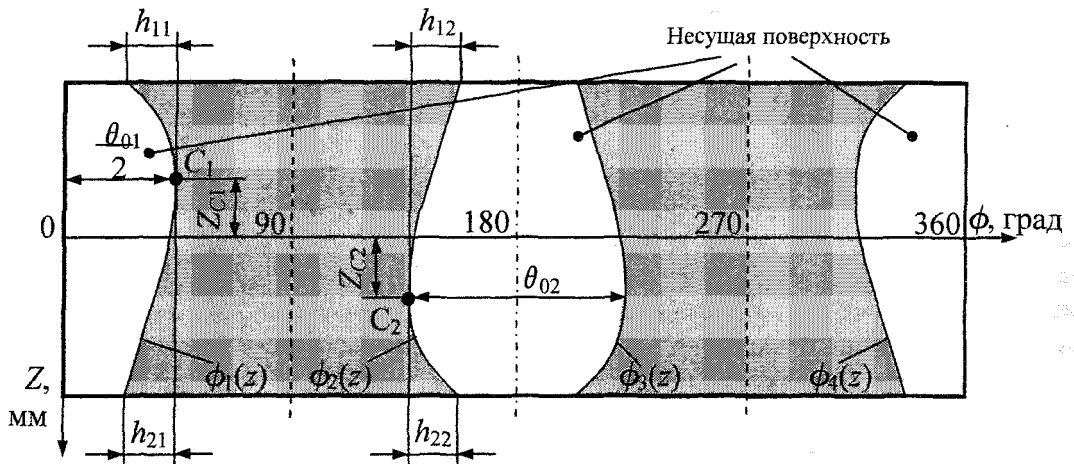


Рис. 1. Развертка юбки поршня с овальным радиальным профилированием (несущая поверхность овальной формы)

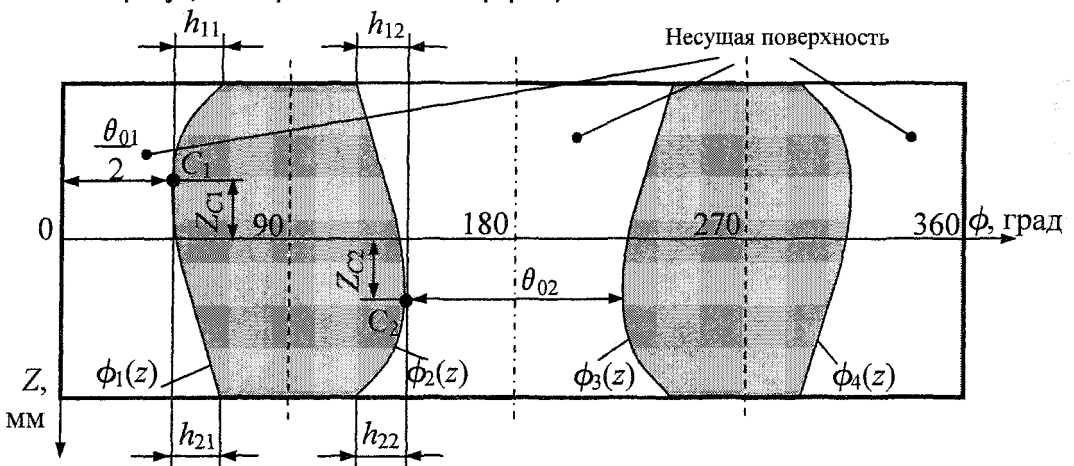


Рис. 2. Развертка юбки поршня с иксообразным радиальным профилированием (несущая поверхность иксообразной формы)

Формулы (1) и (2) при $l \geq 1$ описывают несущую поверхность наиболее встречающихся форм: если коэффициент $k_{ri} > 0$, несущая поверхность имеет иксообразную форму; при $k_{ri} < 0$ – овальную; при $k = 0$ – прямоугольную.

После внесения описанных выше дополнений в разработанную программу «Орбита - Поршень 3» [7], с ее помощью исследовано влияние формы несущей поверхности поршня на гидромеханические характеристики сопряжения «поршень - цилиндр». Рассчитывалась динамика поршня на смазочном слое в цилиндре двигателя с допущениями классической гидродинамической теории смазки. Основные рассчитываемые характеристики: N – потери мощности на трение;

Q_l - расход смазки в направлении камеры сгорания, косвенно характеризующий расход смазки на угар; h_{cp} - средняя за цикл толщина смазочного слоя.

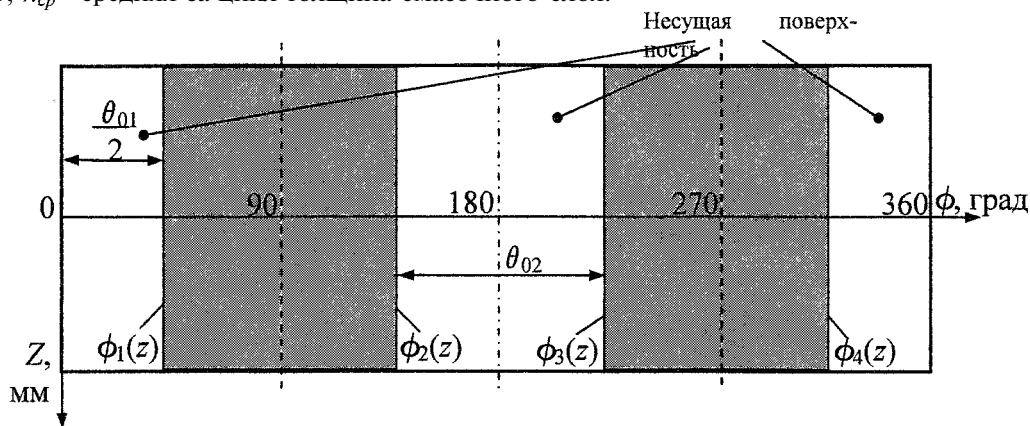


Рис. 3. Развертка юбки поршня с прямоугольным радиальным профилированием (несущая поверхность прямоугольной ормы)

В качестве объекта исследований выбран поршень двигателя типа ЧН 15/16. Расчеты производились на режиме номинальной мощности. Несущие поверхности принимались одинаковые (симметричные) с нагруженной и ненагруженной стороны поршня ($l_{r1}=l_{r2}=l$, $k_{r1}=k_{r2}=k$, $m_{r1}=m_{r2}=m$, $\theta_{01}=\theta_{02}=\theta_0$, $h_{11}=h_{12}=h_1$). При исследовании влияния параметров k , l , m площадь несущих поверхностей оставалась постоянной и принималась равной площади прямоугольной несущей поверхности с параметром $\theta_{0i} = 90^\circ$. Расчеты выполнялись для двух вариантов: цилиндрическая юбка поршня в горячем состоянии, симметричный бочкообразный осевой профиль юбки.

Параметр k , определяющий форму несущей поверхности, изменялся от -2,959 до 6,724, что соответствует изменению параметра h_1 от -50° до $+50^\circ$. Для сохранения постоянного значения площади несущей поверхности параметр θ_0 изменялся от 55° до 125° . Меньшие значения этого параметра соответствуют иксообразной форме, большие - овальной. Форма некоторых несущих поверхностей представлена на рис. 4. Из графиков (рис. 5) видно, что сопряжение с иксообразной несущей поверхностью имеет меньший расход смазки в направлении камеры сгорания, а так же меньшие потери мощности на трение, как для цилиндрической, так и для бочкообразной формы юбки поршня.

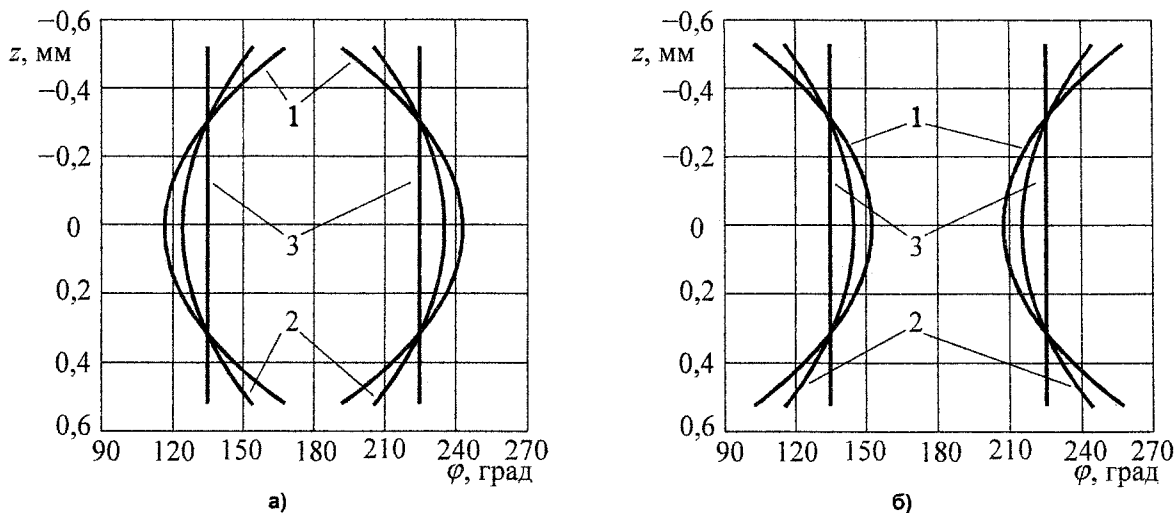


Рис. 4. Форма рассчитываемых несущих поверхностей юбки поршня:
 а - овальная: 1 - $h_1 = -50^\circ$, 2 - $h_1 = -25^\circ$, 3 - $h_1 = 0^\circ$;
 б - иксообразная: 1 - $h_1 = 50^\circ$, 2 - $h_1 = 25^\circ$, 3 - $h_1 = 0^\circ$

При исследовании влияния параметра m , определяющего положение вершин парабол, описывающих границы несущей поверхности, параметр h_1 принимался равным -20° для несущей поверхности овальной формы и $+20^\circ$ для иксообразной. Для рассматриваемого поршня диапазон

изменения параметра t составляет от $-0,52$ до $+0,52$. Отрицательные значения соответствуют смещению вершины в направлении днища поршня. При исследованиях параметр t изменялся от $-0,13$ до $+0,39$, так как расширение этого диапазона приводило (для принятых условий) к пересечению границ несущих поверхностей. Некоторые из исследуемых несущих поверхностей приведены на рис. 6, а результаты расчетов на рис. 7. Исходя из полученных результатов, следует вывод, что у поршня с несущей поверхностью овальной формы с увеличением параметра t растет расход смазки Q_1 .

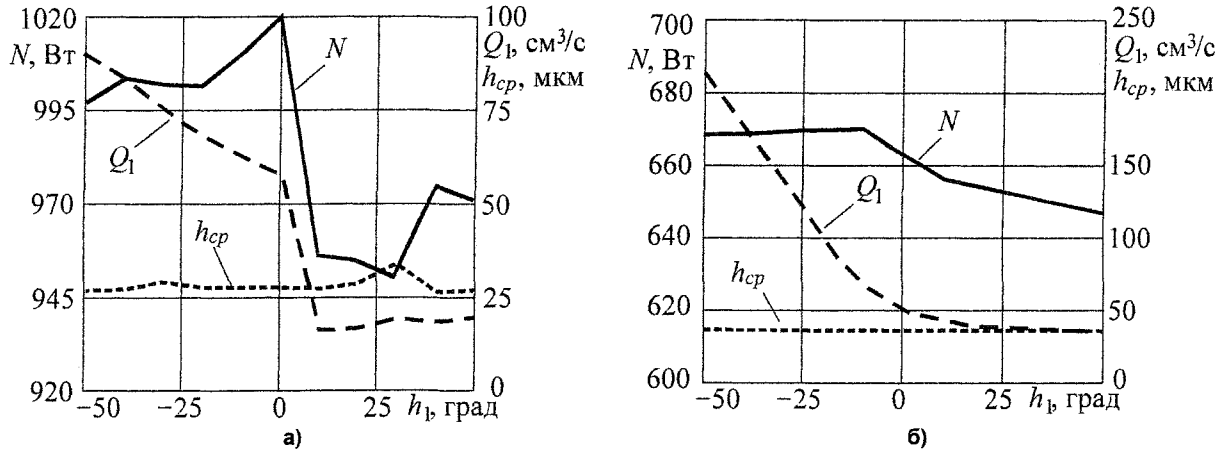


Рис. 5. Результаты расчета влияния параметра h_b :
 а – для поршня без осевого профиля;
 б – для поршня с осевым профилем

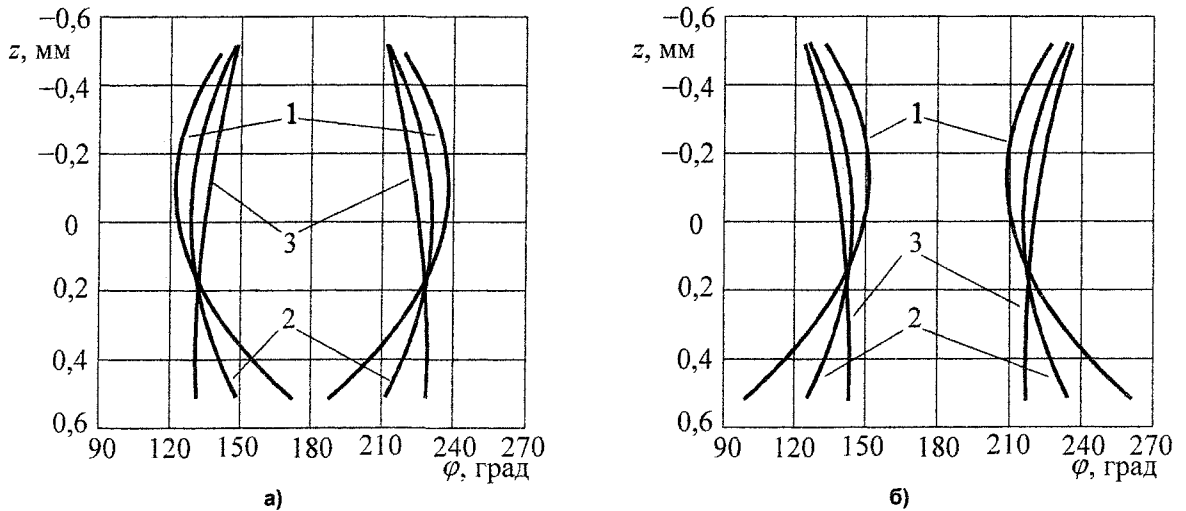


Рис. 6. Форма рассчитываемых несущих поверхностей:
 а – овальная: 1 – $t = -0,13$, 2 – $t = 0$, 3 – $t = 0,39$;
 б – иксообразная: 1 – $t = -0,13$, 2 – $t = 0$, 3 – $t = 0,39$

Параметр l характеризует кривизну границ несущей поверхности. В расчетах $l = 1, 2, 3, 4$; параметр h_1 принимался равным -30° для несущей поверхности овальной формы и $+30^\circ$ для иксообразной. Если $l = 1$, то несущая поверхность (при $k > 0$) принимает вид ромба. Несущая поверхность такой формы в литературе не встречалась, но может представлять интерес как предельный случай. Некоторые из рассматриваемых несущих поверхностей изображены на рис. 8, результаты расчета представлены на рис. 9, из которого следует, что этот параметр слабо влияет на характеристики сопряжения при данных условиях.

Расчет влияния θ_0 производился для прямоугольной, овальной и иксообразной формы несущей поверхности на цилиндрической и бочкообразной юбке поршня. Параметр h_1 для овальной несущей поверхности принимался равным -15° , для иксообразной $+15^\circ$, $l = 2$. С увеличением θ_0

Расчет и конструирование

площадь несущей поверхности увеличивается. Форма рассчитываемых несущих поверхностей представлена на рис. 10. Результаты расчета изображены на рис. 11.

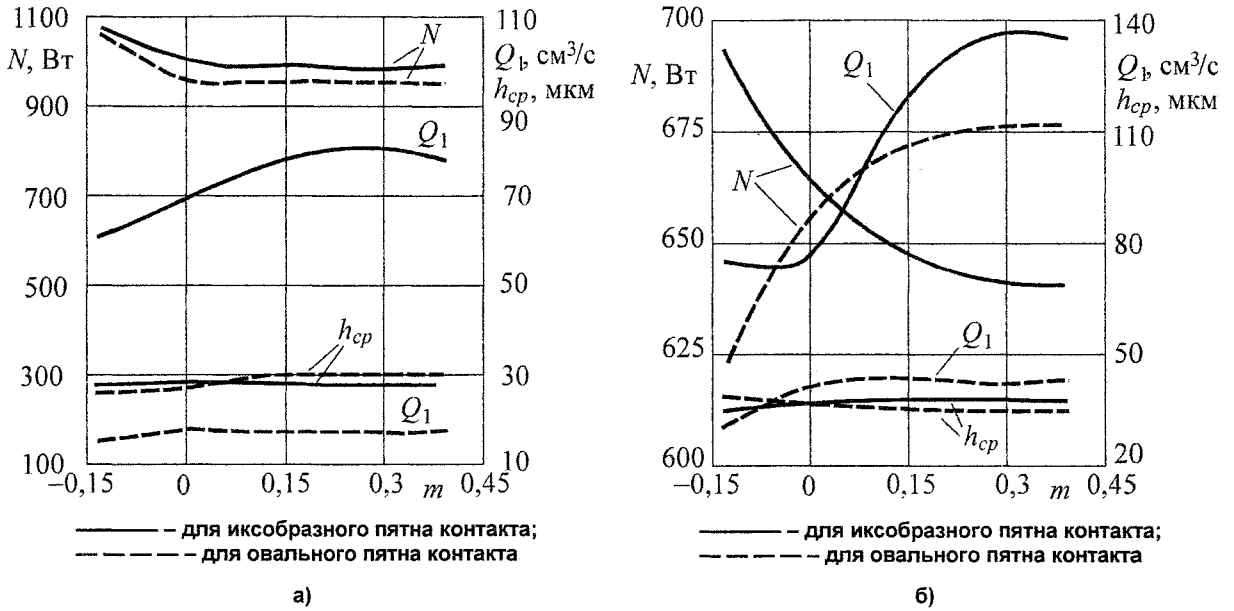


Рис. 7. Результаты расчета влияния параметра m :
а – для поршня без осевого профиля;
б – для поршня с осевым профилем

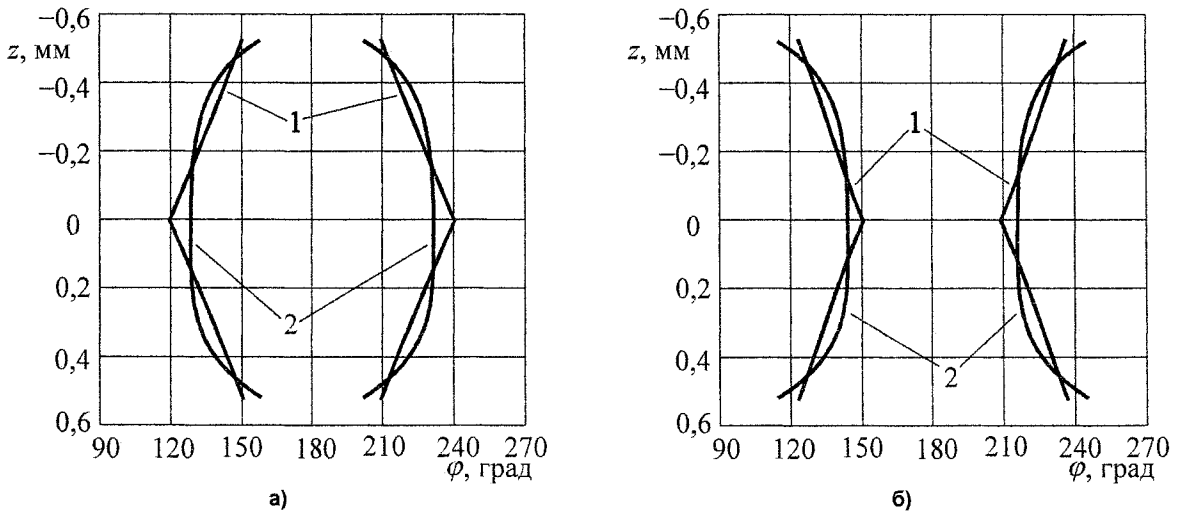


Рис. 8. Форма рассчитываемых несущих поверхностей:
а – овальная: 1 – $l=1$; 2 – $l=4$;
б – эллиптическая: 1 – $l=1$; 2 – $l=4$

Во всех трех случаях (см. рис. 11 а, б, в) с увеличением ширины несущей поверхности наблюдается рост потерь мощности на трение, как для цилиндрической, так и для бочкообразной юбки. Более высокие потери мощности присущие эллиптической несущей поверхности по сравнению с прямоугольной и овальной объясняются ее наибольшей площадью при одинаковых значениях θ_0 . Для прямоугольной и овальной несущей поверхности с ростом θ_0 происходит снижение расхода смазки Q_1 . Можно отметить увеличение толщины смазочного слоя h_{cp} с увеличением ширины несущей поверхности.

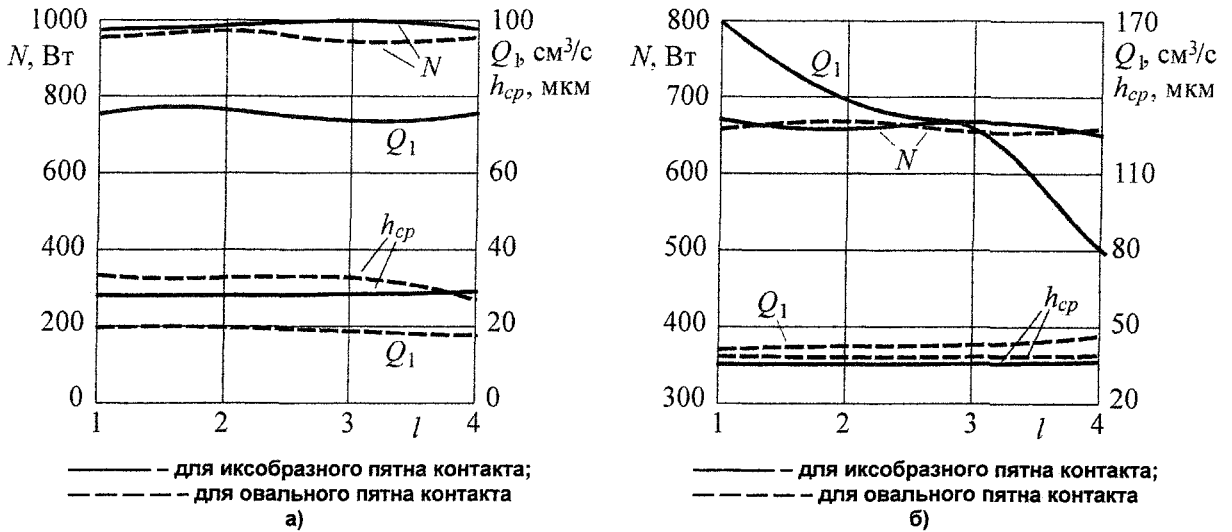


Рис. 9. Результаты расчета влияния параметра l :
 а – для поршня без осевого профиля;
 б – для поршня с осевым профилем

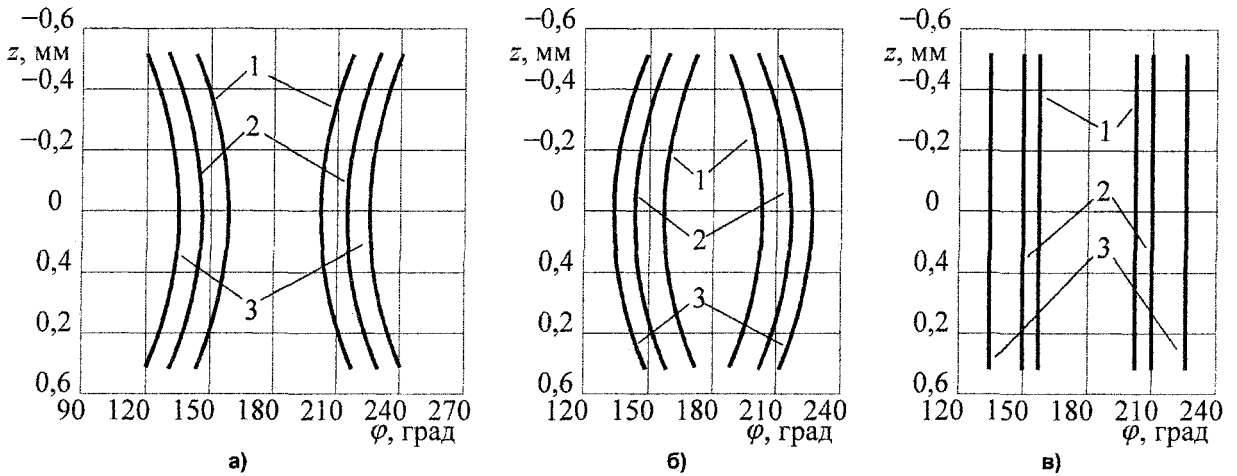


Рис. 10. Форма рассчитываемых несущих поверхностей:
 а – овальная: 1 – $\theta_0 = 45^\circ$, 2 – $\theta_0 = 70^\circ$, 3 – $\theta_0 = 90^\circ$;
 б – эллипсовая: 1 – $\theta_0 = 45^\circ$, 2 – $\theta_0 = 70^\circ$, 3 – $\theta_0 = 90^\circ$;
 в – прямоугольная: 1 – $\theta_0 = 45^\circ$, 2 – $\theta_0 = 60^\circ$, 3 – $\theta_0 = 90^\circ$

Подводя итог, можно сделать вывод, что основное влияние на гидромеханические характеристики сопряжения «поршень-цилиндр» оказывает форма несущей поверхности. У сопряжения с эллипсовой несущей поверхностью поршня лучшие характеристики лучше: меньше потери на трения и расход смазки в направлении камеры сгорания. При удалении положения вершин границ несущей поверхности от днища поршня с овальной несущей поверхностью происходит увеличение расхода смазки Q_1 . Кривизна границ несущей поверхности, определяемая параметром l на рассматриваемые характеристики сопряжения влияет мало. Увеличение параметра θ_0 с одновременным ростом площади несущей поверхности приводит к значительному увеличению потерь мощности, увеличению толщины смазочного слоя h_{cp} , снижению расхода смазки в направлении камеры сгорания для овальной и прямоугольной несущей поверхности юбки поршня. Целенаправленное изменение геометрии несущей поверхности юбки поршня позволит оптимизировать гидродинамические параметры сопряжения «поршень - цилиндр» двигателя внутреннего сгорания.

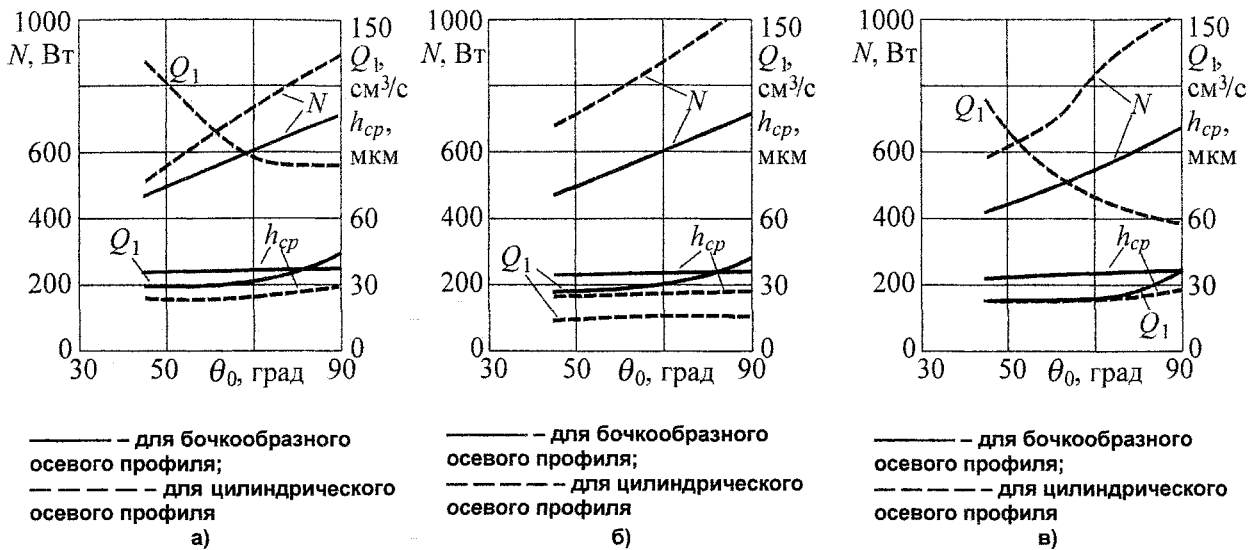


Рис. 11. Результаты расчета влияния параметра θ_0 :
 а – овальная несущая поверхность;
 б – бочкообразная несущая поверхность;
 в – прямоугольная несущая поверхность

Работа выполнена при финансовой поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 годы)» (код проекта РНП 2.1.2.2285).

Литература

1. Поршень в общем и в частности / С. Самохин, А. Хрулев / www.ab-engine.ru.
2. Влияние параметров криеошипно-шатунного механизма на гидромеханические характеристики сопряжения «поршень-цилиндр» двигателя внутреннего сгорания / Ю.В. Рождественский, Г.И. Плеваков, А.И. Гусев // Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения: Труды Международной научно-технической конференции, 23-25 апреля 2003 г., г. Челябинск. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. - С. 219-221.
3. Оптимизация профиля поршня / Ю.В.Рождественский, А.П. Маслов, В.В. Милицын, Г.И. Плеваков // Наука и технологии: Сборник трудов. - М.: РАН, 2002. - С. 146-151.
4. Маслов А.П., Милицын В.В., Плеваков Г.И. Влияние профиля цилиндра на гидромеханические характеристики сопряжения «поршень - цилиндр» двигателя внутреннего сгорания // Наука и технологии: Сборник трудов. - М.: РАН, 2002. - С. 151-156.
5. Результаты расчетных исследований динамики сопряжения «поршень-цилиндр» транспортного дизеля / Ю.В.Рождественский, А.П. Маслов, В.В. Милицын, Г.И Плеваков // Конструирование и эксплуатация наземных транспортных машин: Сборник трудов. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. - С. 86-91.
6. Рождественский Ю.В., Плеваков Г.И., Гусев А.И. Влияние геометрии юбки в осевом и радиальном направлении на гидродинамические параметры сопряжения «поршень - цилиндр» транспортных дизелей // Многоцелевые гусеничные и колесные машины: актуальные проблемы теории и практики, научная работа и образование (26-27 октября 2004 г.): Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Н.Л. Духова. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. - С. 67-102.
7. Комплекс программ для исследования работы трибосопряжения «поршень-цилиндр» «Орбита - Поршень 3». Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005610094, Зарег. 11 января 2005 г.