

ОБМЕН ТЕПЛОМ ПОСРЕДСТВОМ ПРЯМОГО КОНТАКТА В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

А.П. Новиков¹, М.С. Хрипченко², А.В. Латынин³

^{1,2,3} Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
г. Воронеж, Россия

¹ap-novikov@mail.ru

²as-vglu@yandex.ru

³lat-07@mail.ru

Аннотация. Теплообмен в ДВС, имеющий контактный характер, охватывает процессы передачи тепла между газовой смесью и твердыми частями цилиндра-поршневой группы [1]. К тому же, теплоперенос происходит в зонах непосредственного соприкосновения твердых элементов (поршень — кольцо — цилиндр, клапан — седло, подшипники). Правильное понимание и моделирование этих тепловых взаимодействий являются ключевыми для обеспечения теплового баланса двигателя, его экономичности, долговечности и уровня выбросов [2]. Данная работа посвящена исследованию ключевых механизмов контактного теплообмена в двигателях внутреннего сгорания, а также методов его моделирования и измерения. В работе также проанализировано влияние контактного теплообмена на параметры двигателя и рассмотрены пути его инженерной оптимизации.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, теплообмен, газовая смесь, оптимизация, тепловой баланс.

HEAT EXCHANGE THROUGH DIRECT CONTACT IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

A.P. Novikov¹, M.S. Khripchenko², A.V. Latynin³

^{1,2,3} Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

¹ap-novikov@mail.ru

²as-vglu@yandex.ru

³lat-07@mail.ru

Annotation. The heat exchange in the internal combustion engine, which has a contact character, covers the processes of heat transfer between the gas mixture and the solid parts of the cylinder-piston group. In addition, heat transfer occurs in areas of direct contact of solid elements (piston — ring — cylinder, valve — seat, bearings). Proper understanding and modeling of these thermal interactions are key to ensuring the thermal balance of the engine, its efficiency, durability and emissions levels. This work is devoted to the study of the key mechanisms of contact heat exchange in internal combustion engines, as well as methods of its modeling and measurement. The paper also analyzes the effect of contact heat transfer on engine parameters and considers ways of its engineering optimization.

Keywords: internal combustion engine, heat transfer, gas mixture, optimization, thermal balance.

В ходе работы ДВС в цилиндрах происходят интенсивные энергетические превращения. Топливо воспламеняется, генерируя высокотемпературные газы, которые отдают тепло стенкам цилиндра, поршню и головке блока. Важное значение имеет также теплообмен, реализующийся через твердые контакты (поверхности поршневой группы, подшипники, опоры клапанов). Контактный теплообмен оказывает существенное

влияние на распределение температур, возникновение тепловых напряжений, износ и смазочно-трибологические характеристики [3]. Понимание и управление этими процессами требуется для повышения КПД и ресурса двигателя.

Газо-твердофазный контакт (конвективный и лучистый теплообмен)

Основной путь отвода теплоты от газов — конвекция при контакте газа с поверхностями камер сгорания и стенками цилиндра; дополнительно присутствует теплоизлучение от горячих газов и продуктовых потоков.

Для описания используют закон Ньютона для поверхностных теплообменных процессов.

Особенность ДВС — нестационарность и сильная зависимость h от тактового положения поршня, давления, температуры и локальных скоростей газов (пульсации, вихри, струи от впрыска и клапанов) [4].

В местах непосредственного соприкосновения тел (кольцо — цилиндр, сопряжения поршня, седло клапана) реальная площадь контакта значительно меньше номинальной и состоит из множества микроконтактов, разделённых микронеровностями и заполненных смазкой или воздухом.

Теплоперенос через такие контакты определяется двумя параллельными путями: теплопроводность через реальные контакты и через немассированные зазоры (проведение через тонкие слои смазки, контактные газы) и теплоперенос через микровоздушные зазоры (переменчивый теплообмен, преимущественно кондукция и местами рассеяние лучевой энергии) [5].

В пределах цилиндра часто применяются полузависимые эмпирические корреляции для h (например, Woschni, Hohenberg и др.), связывающие коэффициент теплоотдачи со средними скоростями газа, давлением, температурой и геометрическими размерами. Эти корреляции удобны для расчёта среднего теплового потока в циклограммах.

Теплопередача через контактные поверхности моделируется на основе теории контактной механики (Гертц, Greenwood–Williamson) и моделей теплового контактного сопротивления (Yovanovich, Mikic и др.). Реальная площадь контакта A_r увеличивается с ростом нормальной нагрузки и зависит от распределения высот микронеровностей.

Для конвективного теплообмена применяют числа подобия: Re , Pr , Nu , что позволяет использовать корреляции для различных режимов потока и геометрий (стенки, щели, канал цилиндра) [6].

В ДВС применяют термопары, тепловые датчики поверхности и интегральные методы для измерения тепловых потоков; инфракрасная термография позволяет получать пространственные распределения температур на наружных поверхностях.

Для изучения контактной проводимости используют лабораторные методы: метод «flash» для измерения теплопроводности слоёв, стационарные методы теплового контакта, специализированные стенды с контролируемым давлением и температурой контакта [7].

Оптические и аэродинамические эксперименты (optical engines, PIV — Particle Image Velocimetry) дают информацию о скоростях и турбулентности внутри цилиндра, что важно для уточнения h .

Тепловые потери в стенках цилиндров и через контактные узлы снижают общую эффективность двигателя, уменьшают полезную работу и изменяют температурный режим, который влияет на механизм сгорания и возможность детонации [8].

Неправильное распределение температур вызывает локальные перегревы, термические напряжения и ускоренный износ (поршень, кольца, седла клапанов), влияет на смазку и образование нагара.

Контактная проводимость через поршневую группу важна для отвода тепла от поршня к кольцам и далее в систему охлаждения; снижение проводимости (например, из-за загрязнения или газа в микрозазорах) приводит к повышению температуры поршневой верхней части и снижению ресурса.

Материалы и покрытия. Использование керамических термобарьерных покрытий (ТВС) на головке и поршневой короне уменьшает теплотери в охлаждающую систему и повышает локальную температуру горения, что может повысить термодинамический КПД, но увеличивает тепловую нагрузку на детали. Диэлектрические и DLC-покрытия на кольцах и юбках уменьшают трение и изменяют контактную проводимость.

Управление смазкой. Толщина и состав масляной плёнки в контактах существенно влияют на теплопередачу и износ. Режим масляной смазки оптимизируют для баланса отвода тепла и снижения трения.

Геометрия и охлаждение. Оптимизация охлаждающей рубашки, установка масляных форсунок на поршень, изменение формы юбки и кольцевых канавок позволяют перераспределять тепло и снижать пиковые температуры.

Текстурирование и обработка поверхностей. Управляемая шероховатость и текстуры могут корректировать реальную контактную площадь, улучшая теплопроводность в необходимых зонах и уменьшая трение в других.

Современные подходы объединяют CFD для описания горения и газодинамики с моделями конвективного теплообмена и переносом тепла в твердых телах (conjugate heat transfer, СНТ). Для детальных задач применяют LES/DNS, но чаще используют RANS с моделями турбулентности [9].

Для контактной проводимости используют многоуровневые модели: макроскопические расчёты контактного давления, микромасштабные модели шероховатости и гетерогенной теплопроводности межфазной области. Часто применяется сопряжение CFD + FEM (трехмерная теплопроводность твердой части) с учётом переменных граничных условий.

Разработка упрощённых и приближённых моделей (сегментные сетки, эмпирические поправки) остаётся востребованной для инженерного проектирования и быстрого анализа.

Переход к более высоким степеням сжатия и альтернативным видам топлива требует более точного управления тепловыми потоками, что стимулирует развитие аддитивных поверхностных текстур, новых материалов и интеллектуальных систем охлаждения.

Многоуровневое моделирование с учётом микроструктур, данных измерений и машинного обучения позволяет создавать более точные и быстрые предиктивные модели теплового поведения ДВС [10].

В гибридных и маломощных двигателях роль оптимизации контактного теплообмена возрастает в связи с необходимостью быстрого прогрева до рабочей температуры и минимизации потерь при частичных нагрузках.

Контактный теплообмен в ДВС — комплексный мультифизический процесс, включающий конвективный обмен между газами и стенками и теплопроводность через реальные микроконтакты твердых тел. Его влияние на эффективность, ресурс и экологические характеристики двигателя делает тему критически важной для проектирования и оптимизации. Комбинация экспериментальных исследований, развитого численного моделирования и инженерных мер (материалы, покрытия, смазка, геометрия, охлаждение) даёт возможности для значительного повышения эффективности и надёжности современных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кавтарадзе, Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.-592 с.
2. Reducing the impact of transport machinery and equipment on the environment during re-forestation: An innovative approach / Khripchenko, M., Novikov, A., Goncharov, A, Snyatkov, E. // Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference,

IBIMA 2019: Education Excellence and Innovation Management through Vision 20202019, Pages 2438-2445.

3. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление-М.: Энергия, 1977-328с.

4. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений-М: Энергия, 1977-216с.

5. Меснянкин С.Ю., Викулов В.Г., Викулов Д.Г. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел.//Успехи физических наук. 2009-Т.179.-№9

6. Howard Y.R., Sutton A.E. An axperimental Study of Heat Transfer Thraqh Periodically Contacting Surface // Ynter.Vournal of Heat Mass Transfer. 1970. Vol.13.

7. Говард Ю.Р., Саттон А.Е. Влияние теплового контактного сопротивления на процесс тепла между периодически контактирующими поверхностями // Теплопередача. 1973.-№3.

8. Howard Y.R. An axperimental Study of Heat Transfer Thraqh Periodically Contacting Surface // Ynter.Vournal of Heat Mass Transfer. 1976. Vol.19.

9. Чернышов А.Д., Попов В.М., Карпов А.А. Контактная теплопроводность через периодически соприкасающиеся стержни.// Инженерно-физический журнал. 2008.- Т.81.-№5.

10. Попов В.М., Карпов А.А., Крючков А.Е., Иванов А.В. Теплопроводность между периодически контактирующими поверхностями // Вестник ВГТУ. 2007-Т.3.-№6.

REFERENCES

1. Kavtaradze, R.Z. Local heat transfer in piston engines. Moscow: Publishing House of Bau-man Moscow State Technical University, 2001. 592 p.

2. Reducing the impact of transport machinery and equipment on the environment during reformation: An innovative approach / Khripchenko, M., Novikov, A., Goncharov, A, Snyatkov, E. // Proceedings of the 33rd International Business Information Management As-society Conference, IBIMA 2019: Education Excellence and Innovation Management through Vision 20202019, Pages 2438-2445.

3. Shlykov Yu.P., Ganin E.A., Tsarevsky S.N. Contact thermal resistance, Moscow: Energiya, 1977-328s.

4. Popov V.M. Heat transfer in the contact zone of separable and non-separable joints-Moscow: Energiya, 1977-216с.

5. Mesnyankin S.Yu., Vikulov V.G., Vikulov D.G. A modern view on the problems of thermal contacting of solids.//Achievements of physical sciences. 2009-Vol.179.-No. 9

6. Howard Y.R., Sutton A.E. An experimental Study of Heat Transfer Through periodically Contacting Surface // Ynter.Journal of Heat Mass Transfer. 1970. Vol.13.

7. Howard Y.R., Sutton A.E. Influence of thermal contact resistance on the heat process between periodically contacting surfaces // Heat transfer. 1973.-№3.

8. Howard Y.R. An experimental Study of Heat Transfer through Periodically Contacting Surface // Ynter.Journal of Heat Mass Transfer. 1976. Vol.19.

9. Chernyshov A.D., Popov V.M., Karpov A.A. Contact thermal conductivity through periodically touching rods.// Engineering and Physics Journal. 2008. Vol.81.No.5.

10. Popov V.M., Karpov A.A., Kryuchkov A.E., Ivanov A.V. Thermal conductivity between periodically contacting surfaces // Vestnik VGTU. 2007-Vol.3.-No. 6.