

ЛОКАЛЬНЫЙ ТЕПЛОБМЕН В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ — РАЗВИТИЕ НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ В МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА

Р.З. Кавтарадзе, д.т.н., профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Изложены краткая история и вклад кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана в развитие научного направления. Проанализированы специфические для поршневых двигателей задачи локального теплообмена, решаемые как в рамках классической теории Прандтля, так и с применением современных 3D-CRFD-кодов. Сформулированы пока еще нерешенные задачи локального теплообмена и теории рабочих процессов поршневых двигателей.

Введение. Основы теории теплообмена в поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС) были заложены Р. Дизелем и В. Нуссельтом и впоследствии развиты их последователями, среди которых Н.Р. Брилинг, G. Eichelberg, Г.Б. Розенблит, G. Woschni, G. Hohenberg, Ch. Zapf и др. [1, 2]. Профессор МГТУ (ранее ИМТУ, МВТУ) Н.Р. Брилинг возглавил первую советскую научную школу теплообмена в поршневых двигателях. Позже такие же школы были образованы в Санкт-Петербурге (в Ленинграде) и в Харькове. Усилиями этих ученых была создана теория теплообмена в поршневых двигателях, обозначенная как традиционная или нуссельтовская теория, для которой характерным является, прежде всего, оценка и минимизация тепловых потерь, а также связанная с этим разработка α -формул для расчета коэффициента теплоотдачи в камере сгорания (КС) двигателя. Основные недостатки этой традиционной теории теплообмена заключаются в том, что она: позволяет определить параметры только усредненного по поверхности камеры сгорания теплообмена; не пригодна для определения термических граничных условий для расчета теплонапряженного состояния деталей двигателя; не учитывает влияния турбулентности на интенсивность теплообмена; основана на гипотезе аддитивности конвективных и радиационных тепловых потоков; переоценивает роль вихревого движения заряда в конвективной теплоотдаче в КС дизеля; не дает обоснования правомерности применения фундаментального закона теплоотдачи Ньютона для специфических условий КС, в частности, для знакопеременного теплового потока; не приспособлена для исследования влияния на теплообмен искусственных и естественных теплоизоляторов в КС. Устранение

этих и других изъянов нуссельтовской теории стало возможным после разработки и внедрения в теории поршневых двигателей методов локального теплообмена. Следует подчеркнуть, что теория внутрицилиндровых процессов в настоящее время стала практически теорией локальных процессов и, естественно, исследует изменения локальных параметров в цилиндре. Не умоляя значения традиционной теории рабочих процессов, являющейся основным инструментом при прогнозировании эффективных показателей двигателя и основанной на исследовании усредненных по объему цилиндра параметров, необходимо отметить, что она не в состоянии достоверно решать целый ряд актуальных задач современного двигателестроения. Имеются в виду задачи, связанные с экологией (с образованием вредных компонентов в процессе сгорания) и надежностью (с теплонапряженным состоянием основных деталей) двигателя. Необходимость разработки теории локального теплообмена привела к возникновению трех различных направлений.

1. Стремление к получению новых формул для расчета локального значения α (А.К. Костин, Г.Б. Розенблит, W. Pflaum) или модернизация существующих (P. Ludwig) [1]. Это направление не привело к удачным результатам.

2. Решение обратных задач теплопроводности (G. Eichelberg, G. Woschni, Н.А. Ивашенко, S. Bludszuweit). Эти методы требуют проведения измерений локальных температур деталей и востребованы при обработке экспериментальных данных [1].

3. Разработка методов на основе теории пограничного слоя (Р.М. Петриченко и М.Р. Петриченко — на основе теории ламинарного ПС; МГТУ им. Н.Э. Баумана — на основе теории турбулентного ПС; J. Heuwood, K. Boulouchos — измерения параметров ПС в цилиндре ДВС; K. Nanjalic — новая модель турбулентности для ПС). Это направление считается наиболее перспективным и активно развивается.

Приоритет в применении теории турбулентного пограничного слоя для решения задач локального теплообмена в камерах сгорания поршневых двигателей принадлежит кафедре «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана [1, 3, 4]. Решения получены как в рамках классической (полуэмпирической) теории Прандтля, основанной

на гипотезе длины пути перемешивания, так и в рамках современной теории, базирующейся на 3D-CRFD-кодах с применением пристеночных функций [1, 2, 5]. Следует также отметить, что 3D-CRFD-коды впервые в России для исследования рабочего процесса и локального теплообмена были применены в МГТУ им. Н.Э. Баумана [1, 2, 5]. В работе [6] впервые в теории ДВС для расчета теплового состояния поршня был использован метод контрольных объемов. В области теории рабочих процессов и связанной с ней теории теплообмена защищены 4 докторские (Р.З. Кавтарадзе, 1991; И.Е. Лобанов, 2006; М.М. Арипджанов, 2007; Д.О. Онищенко, 2013) и 13 кандидатские диссертации (Д.Ш. Бенидзе, 1992; Н.А. Лапушкин, 1995; И.Е. Лобанов, 1998; Ичунь Ван, 2000; Д.О. Онищенко, 2003; А.С. Голосов, 2003; А.А. Скрипник, 2004; В.А. Федоров, 2004; З.Р. Кавтарадзе, 2006; А.В. Шибанов, 2007; А.А. Зеленцов, 2011; С.С. Сергеев, 2011; А.Н. Костюченков, 2012; Е.В. Краснова, 2015; В.М. Краснов, 2016). Научное направление активно развивается в двух научно-образовательных центрах, созданных на базе кафедры, руководимых проф. Д.О. Онищенко.

Решения на основе классической теории пограничного слоя (ПС). Гипотеза Прандтля предполагает, что рабочее тело за пределами ПС представляет собой идеальный газ без трения и теплопроводности, что позволяет использовать «струйные» модели течения, в которых начальные скорости в сечениях КС вычисляются из термодинамических соотношений [1, 2, 4]. В рамках классической теории получены результаты, из которых следует отметить следующие.

1. Модель сложного (радиационно-конвективного теплообмена) в пограничных слоях КС. Доказана нецелесообразность применения традиционного, аддитивного подхода при оценке результирующего воздействия конвективного и лучистого тепловых потоков в КС дизеля.

2. Обобщение интегральных соотношений Кармана и Польгаузена–Кружилина для расчета гидродинамического и термического ПС в КС [1].

3. Оценка локального числа Больцмана и турбулентного числа Прандтля в условиях КС [1].

4. Исследование роли излучения в сложном теплообмене и его влияния на конвективный тепловой поток.

5. Влияние формы и кривизны поверхности КС на профиль теплового ПС;

6. Исследование роли интенсивности вихревого движения заряда в локальном теплообмене в КС. В традиционной теории теплообмена (G. Woschni, Г.Б. Розенблит) эта роль преувеличена [1, 7].

7. Доказательство правомочности применения фундаментального закона теплоотдачи Ньютона

при знакопеременных нестационарных тепловых потоках в КС [1].

8. Метод определения толщины слоя нагара в КС, температуры и теплового потока на поверхности слоя, оценка теплоизолирующего воздействия слоя нагара — естественного теплоизолятора, образованного при гетерогенном сгорании [1, 8].

9. Исследование влияния искусственной теплоизоляции (керамических материалов) на теплонпряженное состояние деталей и на экологические показатели дизеля [1]. Отметим, что теоретические результаты прошли экспериментальную проверку на различных двигателях российского и зарубежного производства [1, 2, 9].

Решения с применением 3D-CRFD-кодов. Кафедре поршневые двигатели МГТУ им. Н.Э. Баумана принадлежит приоритет использования 3D-CRFD-кодов в России для исследования рабочего процесса и локального теплообмена [1, 5, 9]. Классическая теория Прандтля в основном предполагает применение двухслойной модели пограничного слоя. В задачах ПС с применением современных 3D-CRFD-кодов и моделей пристеночной турбулентности используется более детальная схема пограничного слоя (ПС). Консервативность пристеночного течения позволяет ввести универсальные зависимости — пристеночные функции (например, К. Khanjalic и др. [1, 2]), связывающие параметры течения и теплообмена в ПС с безразмерным расстоянием от поверхности стенки

$$y^+ \equiv \frac{v_*}{\nu} y —$$

— с аналогом числа Рейнольдса, где ν — кинематическая вязкость;

$$v_* \equiv \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} —$$

— динамическая скорость, τ_w — касательное напряжение, ρ — плотность. Внешняя область не отличается консервативностью, так как ее свойства существенным образом зависят от предыстории турбулентного потока. При $y^+ < 30$ (ламинарный подслой + буферная зона) используется низкорейнольдсовая, а при $30 < y^+ < 200$ (область логарифмического закона) — высокорейнольдсовая модель турбулентности. В основе моделей лежат фундаментальные уравнения Навье–Стокса, Фурье–Кирхгофа, Фика и неразрывности, записанные в форме Рейнольдса в результате осреднения по Фавру [1, 2]. Детальное описание трехмерной расчетной области с подвижными границами, связь и взаимные влияния процессов гидродинамики, теплообмена и хими-

ческой кинетики, отраженные в указанных фундаментальных уравнениях переноса, а также учет предыстории протекающих в цилиндре двигателя и в смежных системах процессов является основным преимуществом описанного метода по сравнению с классической теорией Прандтля. Методом 3D-моделирования проведены исследования локального теплообмена в камерах сгорания ДВС различного назначения (авиационные и автомобильные бензиновые двигатели и дизели, двухтопливные двигатели (газодизели), газовые двигатели, водородный дизель) [1, 2, 10, 11]. Следует особенно отметить, что 3D-моделирование в отличие от 0-мерных моделей позволяет исследовать влияние на параметры рабочего процесса и теплообмена такого фактора, как кинетическая энергия турбулентности.

Нерешенные задачи локального теплообмена в КС. К таким задачам следует отнести создание для 3D-CRFD-кодов надежных подмоделей для описания таких процессов, как образование сажи в процессе гетерогенного сгорания и распределения частиц сажи в ПС, генерация лучистого теплового потока в КС и его влияние на профили скорости и температуры в ПС, взаимные влияния лучистого и конвективного тепловых потоков друг на друга, движение частиц сажи в ПС, их осаждение на поверхности КС, образование теплоизолирующего слоя нагара и локальное распределение этого слоя на тепловоспринимающих поверхностях КС. Очевидно, что эти задачи особенно актуальны для дизелей, а также для бензиновых двигателей с непосредственным впрыском, для которых уже введены ограничения по эмиссии твердых частиц. Современные 3D-CRFD-коды и используемые в них модели турбулентности (включая пристеночные функции с большим количеством эмпирических коэффициентов) практически не учитывают эти факторы. Очевидно также, что современные 3D-модели локального теплообмена в ДВС в этом отношении пока отстают от модели, основанной на классической теории Прандтля. Можно утверждать, что 3D-моделирование по точности количественных результатов может и опережает классический метод, однако уступает по качественным результатам, отражающим физическую сторону исследуемых задач (взаимное влияние конвективных и лучистых тепловых потоков, например).

Заключение. Связь и взаимное влияние процессов смесеобразования, сгорания, образования вредных веществ и теплообмена, учет которых необходим для усовершенствования двигателя, можно исследовать только с помощью локальных параметров. Другого пути для получения достоверных результатов нет. 0-мерные модели рабочего

процесса, прежде всего, многозонные модели, и по сравнению с 3D-моделями они представляют собой существенно упрощенную реальность, однако малое время счета при правильном отображении процессов сгорания и образования вредных веществ делает их востребованными, например, при моделировании городского ездового цикла с переходными режимами с учетом влияния управляемых фаз газораспределения и хода клапанов, условий работы λ -зонда и др. Кроме того, они могут быть полезными при прогнозировании и экспресс-оценке Downsizing- и Downsampling-мотор-трендов. Так как уровень сложности поставленных теорией ДВС задач обычно растет быстрее, чем располагаемые расчетные ресурсы, можно утверждать, что концептуально правильно построенные 0-мерные модели пока еще могут служить развитию ДВС. Очевидно также, что при создании новых перспективных поршневых двигателей 3D-CRFD-коды будут находить все более широкое применение.

Литература

1. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. — 515 с.
2. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. — 590 с.
3. Кавтарадзе Р.З. Решение задач конвективного и сложного теплообмена в камере сгорания дизеля с учетом пристеночного турбулентного течения. АН СССР. // ТВТ. — 1990. — Т. 28, № 5. — С. 969–977.
4. Кавтарадзе Р.З., Гайворонский А.И., Федоров В.А., Онищенко Д.О., Шибанов А.В. Расчет радиационно-конвективного теплообмена в камере сгорания дизеля // РАН. ТВТ. — 2007. — Т. 45, № 5. — С. 741–748.
5. Kavtaradze R.Z., Onishchenko D.O., Zelentsov A.A., Sergeev S.S. The influence of rotational charge motion intensity on nitric oxide formation in gas-engine cylinder. International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009). — 4308–4316.
6. Круглов М.Г., Кавтарадзе Р.З. Краевые задачи теплопроводности для транспортных энергетических установок и их решение численным методом. Известия АН СССР Энергетика и транспорт. — 1989. — № 5. — С. 149–157.
7. Петриченко М.Р., Валишвили Н.В., Кавтарадзе Р.З. Пограничный слой в вихревом потоке на неподвижной плоскости. РАН, Сибирское отделение. // Теплофизика и аэромеханика. — 2002. — Т. 9, № 3. — С. 411–421.
8. Kavtaradze R., Zelentsov A., Gladyshev S., Kavtaradze Z., Onishchenko D. Heat Insulating Effect of Soot Deposit on Local Transient Heat Transfer in Diesel Engine Combustion Chamber. SAE International Paper, № 2012-01-1217. — 12 p.
9. Кавтарадзе Р.З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород. — Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. — 238 с.
10. Леонтьев А.И., Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Голосов А.С., Панкратов С.А. Повышение эффективности рабочего процесса поршневого двигателя путем прямого преобразования теплоты выпускных газов в электрическую энергию. РАН. // Теплофизика высоких температур. — 2016. — Т. 54, № 1. — С. 99–107.
11. Кавтарадзе Р.З. Улучшение экологических показателей водородного дизеля с непосредственным впрыскиванием газообразного водорода. РАН. // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2016. — Т. 45, № 4. — С. 20–29.