

УДК 621.431.74.016

Б.И. Руднев, О.В. Повалихина

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ РАБОЧЕГО ТЕЛА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Представлены поля скоростей рабочего тела в камере сгорания дизельного двигателя, полученные численным методом. Показаны возможности их использования для расчета локальных конвективных тепловых потоков.

Ключевые слова: дизельный двигатель, камера сгорания, поля скоростей, газы, локальный конвективный тепловой поток.

B.I. Rudnev, O.V. Povalikhina

FLOWFIELDS OF GASES IN DIESEL ENGINE COMBUSTION CHAMBER

Flowfields of gases received by numerical method in diesel engine combustion chamber are given. The passivityes of their usage for calculation local convective heat fluxes are shown.

Key words: diesel engine, combustion chamber, flowfields, gases, local convective heat flux.

Введение

Современные тенденции развития дизелей связаны, прежде всего, с увеличением их удельной мощности, улучшением экономических и экологических характеристик. Это обуславливает появление целого ряда проблем, и одна из важнейших из них – возрастание теплонапряженности деталей, образующих камеру сгорания (КС). Взаимодействие рабочего тела со стенками КС приводит к крайне неравномерному тепловому нагружению ее деталей. Высокие локальные тепловые потоки на указанных поверхностях являются основной причиной низкой эксплуатационной надежности современных форсированных дизельных двигателей.

Вместе с тем процессы локального радиационного и конвективного теплообмена между рабочим телом и стенками КС все еще остаются недостаточно изученными. Достоверная расчетная оценка теплового и напряженно-деформированного состояния деталей цилиндропоршневой группы как на стадии проектирования, так и при доводке конструкций вызывает серьезные трудности. Они обусловлены главным образом правильностью задания локальных граничных условий со стороны рабочего тела. В связи с этим создание надежных, экспериментально обоснованных расчетно-теоретических методов исследования локального радиационного и конвективного теплообмена в КС дизелей является весьма сложной и актуальной проблемой.

Определение локальной плотности конвективного теплового потока на поверхностях деталей камеры сгорания

Математическая модель (ММ) конвективного теплообмена в КС дизеля, разработанная одним из авторов [1], предусматривает расчетное определение локальных потоков этого вида переноса теплоты для поверхностей крышки цилиндра, поршня и втулки как функции угла поворота коленчатого вала (ПКВ). При этом рабочее тело в КС дизеля рассматривается условно состоящим из ядра потока и турбулентного пограничного слоя. Выполненными расчетными оценками установлено, что для дизелей типа 8ЧН 13/14 и

аналогичных ему скорость звука в КС лежит в пределах 520-880 м/с. В то же время величина скорости рабочего тела в дизелях с КС типа ЯМЗ и им подобных укладывается в диапазон 10-70 м/с. Сопоставление последних со скоростями звука показывает, что условие $v < 0,25a$ выполняется во всем диапазоне угла ПКВ, при котором передается основная часть теплоты от рабочего тела к стенкам деталей, образующих КС (процессы сгорания и расширения рабочего тела). Подробный анализ системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена применительно к КС дизелей показал, что течение рабочего тела в ядре потока можно считать невязким. Кроме этого, в дизелях, имеющих КС типа ЯМЗ, ЦНИДИ, КАМАЗ и им подобных, движение рабочего тела в ядре потока можно считать осесимметричным и перейти от трехмерной к двумерной постановке задачи. При этом система уравнений в частных производных, описывающая фундаментальные законы сохранения массы, импульса и энергии применительно к течению рабочего тела в потенциальном ядре потока в КС дизеля, запишется в цилиндрической системе координат следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (ru)}{\partial r} \right) = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + p \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (ru)}{\partial r} \right) = 0, \quad (4)$$

где ρ – плотность рабочего тела в КС, кг/м³; E – внутренняя энергия рабочего тела; u, v – вертикальная (осевая) и радиальная проекции вектора скорости рабочего тела в КС, м/с; z, r – вертикальная (осевая) и радиальная координаты цилиндрической системы, м.

Уравнения (1)-(4) решались численно на ЭВМ по специально разработанной программе с применением итерационного метода [1]. При этом использовались лагранжевы координаты и неявная полностью консервативная разностная схема. В расчетах условий течения рабочего тела в КС 8 ЧН 13/14 использовались регулярные сетки размером 25×20 для плоской поверхности днища поршня и 30×20 для днища со сложным профилем поверхности. Рассмотрение и численное решение задач течения рабочего тела в КС с плоским днищем поршня были обусловлены необходимостью выяснения ряда как общих закономерностей, так и особенностей такого течения, а также отработкой алгоритма и программы численного решения уравнений на ЭВМ. В результате были получены поля скоростей, температуры, плотности и давления рабочего тела в объеме КС при различных углах ПКВ. Для КС со сложным профилем поверхности поршня типа ЦНИДИ, ЯМЗ, Гессельман и др. возможно, как показали выполненные на ЭВМ расчеты, использование рекомендаций С. Патанкара [2] о блокировке некоторых расчетных областей регулярной конечно-разностной сетки. Полученные расчетные поля скоростей, температуры, плотности и давления рабочего тела были затем использованы как входные параметры для расчета локального конвективного теплового потока [3]. Расчетная зависимость для локальной плотности конвективного теплового потока построена на локальном соотношении

энергии для турбулентного пограничного слоя. Путем преобразований с использованием закона теплообмена, справедливого для обтекания плоской пластины несжимаемым неизотермическим потоком рабочего тела при турбулентном пограничном слое с последующим интегрированием, указанное выше соотношение приводится к уравнению, включающему локальные значения критерия Стентона и ряда других параметров:

$$\text{St} = \text{CRe}_L^{-m/(1+m)} \psi_T \Delta T^m \left[\int_0^{\tilde{x}} \psi_T \Delta T^{1+m} d\tilde{x} \right]^{-m/(1+m)}, \quad (5)$$

где Re_L – число Рейнольдса, построенное по характерному размеру поверхности; ψ_T – коэффициент, учитывающий влияние неизотермичности на теплоотдачу; ΔT – температурный напор, К; \tilde{x} – относительный радиус крышки цилиндра или поршня.

Полученное локальное значение критерия Стентона в совокупности с локальными значениями скорости, температуры, плотности и теплоемкости рабочего тела однозначно определяют локальную плотность конвективного теплового потока:

$$q_\omega = C_{p\infty} \rho_\infty W_\infty \Delta T^{m+1} \text{CRe}_L^{-m/(1+m)} \psi_T \left[\int_0^{\tilde{x}} \psi_T \Delta T^{1+m} d\tilde{x} \right]^{-m/(1+m)}, \quad (6)$$

где $C_{p\infty}$, W_∞ , T_∞ – изобарная теплоемкость, скорость и температура рабочего тела в КС.

Выполненные на ЭВМ расчеты с использованием зависимости (6) позволили получить распределение локальной плотности конвективного теплового потока по всем поверхностям КС. В частности, для поверхности крышки цилиндра он составил $1,2 \cdot 10^6 - 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м².

Поля скоростей рабочего тела

Поля скоростей (распределение вектора скорости) рабочего тела в КС были получены в результате численного решения дифференциальных уравнений основных законов сохранения. Последние были ранее подробно проанализированы в [1]. Визуализация поля скоростей проводилась на ЭВМ с помощью специальных графических программ Surfer и Grapher фирмы Golden Software inc., Golden, Colorado, USA.

На рис. 1 и 2 показаны распределения вектора скорости рабочего тела в КС с плоским днищем. Ось цилиндра двигателя на этих рисунках показана справа и совпадает с осью симметрии КС в численном решении. Следует отметить, что численное решение на ЭВМ задачи внешнего течения для КС с плоским днищем поршня было выполнено с двумя целями. Первая цель – отработка на ЭВМ соответствующего алгоритма и программы, а также определение с ее помощью основных параметров внешнего течения. Вторая цель – оценка влияния начальных условий на параметры внешнего течения рабочего тела в КС. Указанные цели были достигнуты в процессе многовариантных расчетов на ЭВМ.

Полученные при этом результаты по полям скоростей в качественном и количественном отношении хорошо согласуются с аналогичными расчетными и экспериментальными исследованиями, выполненными в последнее время [4, 5, 6].

Анализ полей скоростей, представленный на рис. 1 и 2, позволяет сделать вывод о том, что в случае плоского днища поршня движение рабочего тела около его поверхности имеет примерно радиальный характер. Вдоль огневой поверхности крышки цилиндра движение рабочего тела носит четко выраженный радиальный характер.

15° ПКВ после ВМТ

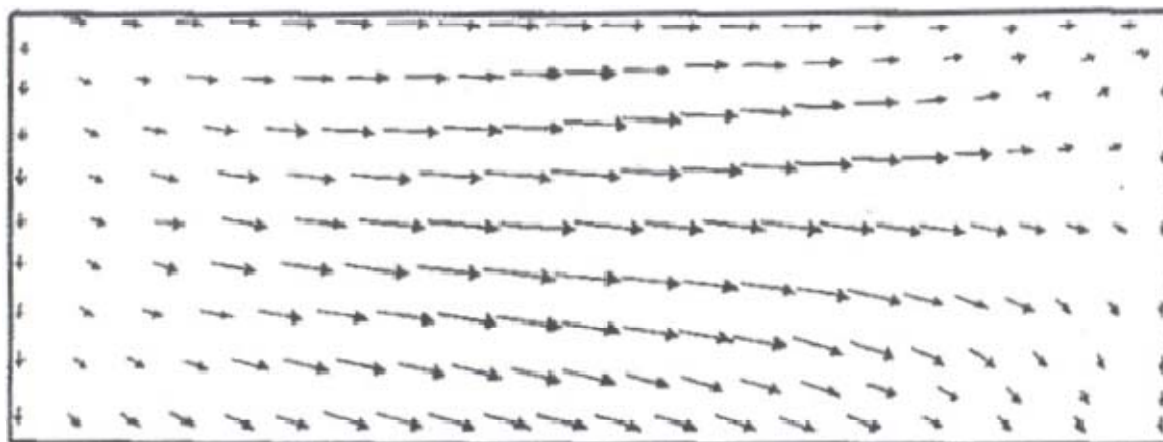


Рис. 1. Распределение вектора скорости рабочего тела в вертикальной симметрии в КС с плоским днищем поршня, полученное численным методом

Fig. 1. Gases flowfields distribution in vertical plan of symmetry in combustion chamber with flat of piston

20° ПКВ после ВМТ

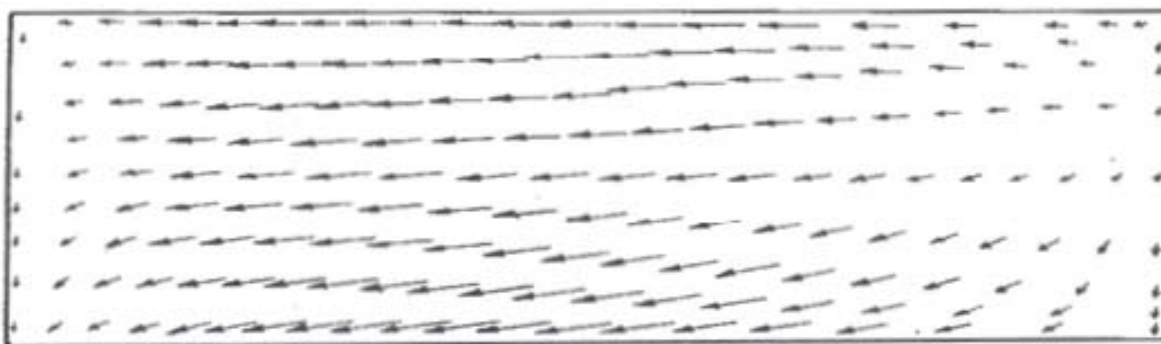


Рис. 2. Распределение вектора скорости рабочего тела в вертикальной симметрии в КС с плоским днищем поршня, масштаб вектора скорости 5 мм – 10 м/с

Fig. 2. Gases flowfields distribution in vertical plan of symmetry in combustion chamber with flat of piston, scale vector of velocity 5 mm – 10 m/s

Поля скоростей рабочего тела в КС с фигурным днищем поршня для различных углов ПКВ после ВМТ показаны на рис. 3, 4 и 5.

На этих рисунках ось цилиндра располагается справа, поршень – в нижней части рисунков и движется от ВМТ. Следует отметить, что в этом случае поля скоростей рабочего тела отличаются от таковых по сравнению с КС, имеющей плоское днище поршня.

Во-первых, принципиально меняется качественная картина течения рабочего тела в объеме КС. В углублении КС в поршне в районе кромки течение меняет свое направление. При этом в потоке рабочего тела образуются вихревые структуры. Последние, безусловно, должны интенсифицировать процесс теплообмена между рабочим телом и поверхностью днища поршня в районе кромки КС. Это положение полностью подтверждается результатами глубоких экспериментальных исследований, выполненных специалистами фирмы «Даймлер – Бенц» [7]. Анализ этой работы приведен ранее в [1], а часть полученных в ней экспериментальных данных – в [3]. Течение рабочего тела около поверхности крышки цилиндров и в этом случае имеет в основном радиальный характер.

10° ПКВ после ВМТ

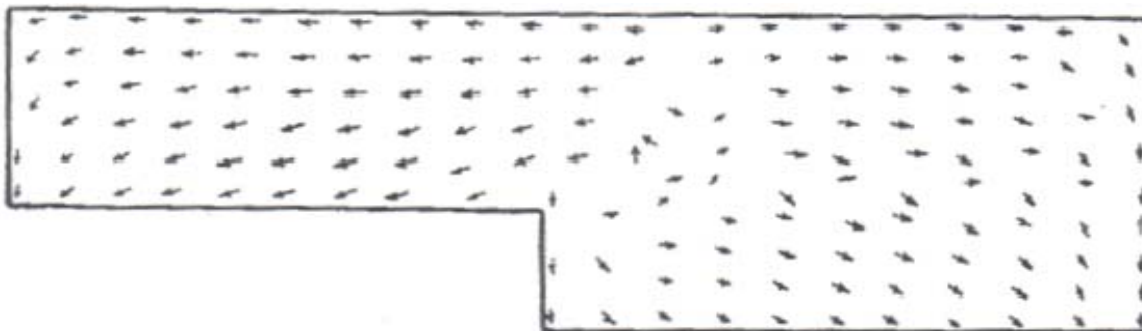


Рис. 3. Распределение вектора скорости рабочего тела в вертикальной симметрии в КС с фигурным днищем поршня, полученное численным методом

Fig. 3. Gases flowfield distribution in vertical plan of symmetry in combustion chamber with crooked surface of piston

15° ПКВ после ВМТ

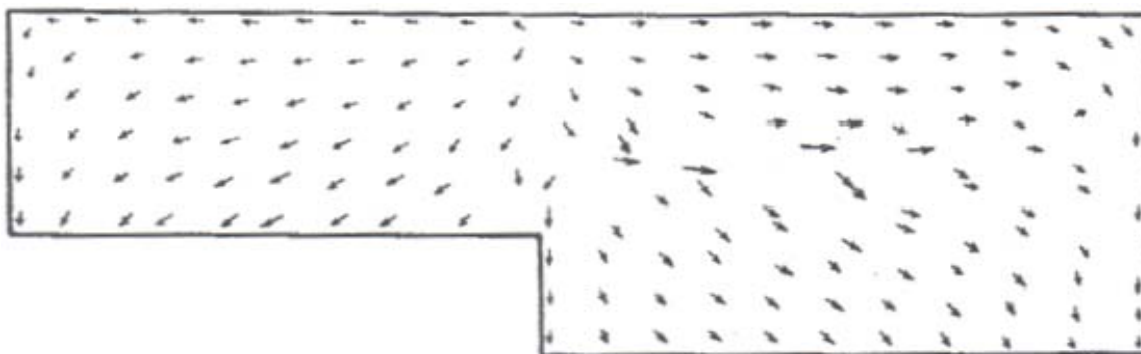


Рис. 4. Распределение вектора скорости рабочего тела в вертикальной симметрии в КС с фигурным днищем поршня, $P_{me} = 0,61$ МПа, $n = 1700$ мин⁻¹, масштаб вектора скорости 2,5-10 м/с

Fig. 4. Gases flowfield distribution in vertical plan of symmetry in combustion chamber with crooked surface of piston, $P_{me} = 0,61$ МПа, $n = 1700$ мин⁻¹, scale vector of velocity 2,5 mm – 10 m/s

20° ПКВ после ВМТ

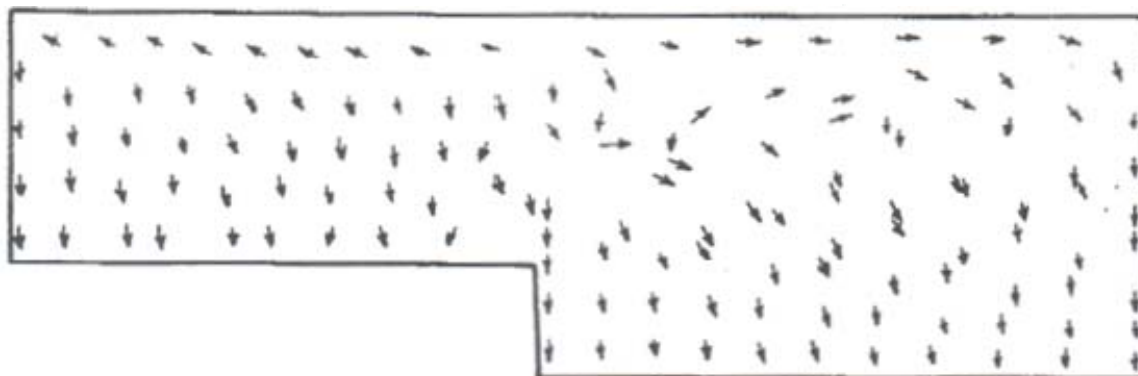


Рис. 5. Распределение вектора скорости рабочего тела в вертикальной симметрии в КС с фигурным днищем поршня, $P_{me} = 0,61$ МПа, $n = 1700$ мин⁻¹, масштаб вектора скорости 2,5-10 м/с

Fig. 5. Gases flowfield distribution in vertical plan of symmetry in combustion chamber with crooked surface of piston, $P_{me} = 0,61$ МПа, $n = 1700$ мин⁻¹, scale vector of velocity 2,5 mm – 10 m/s

Во-вторых, с количественной точки зрения величина локальной скорости рабочего тела в случае с фигурным днищем поршня существенно отличается от таковой, полученной при численном решении на ЭВМ для плоского днища поршня. Причем максимальные скорости рабочего тела наблюдаются в районе кромки КС в поршне и составляют 11-19 м/с. Указанные расчетные значения локальных скоростей рабочего тела хорошо согласуются с результатами исследований, выполненных с применением других, отличных от нашей, математических моделей [8].

Заключение

Рассмотренные поля скоростей рабочего тела были использованы для расчета нестационарных локальных конвективных тепловых потоков на поверхности деталей КС в рамках предложенной в [1] математической модели. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по указанным выше тепловым потокам показало их различие в пределах 10-15 %, что следует признать вполне приемлемым при проектировании и доводке современных высокофорсированных дизельных двигателей.

Список литературы

1. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 221 с.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
3. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Процессы теплообмена в камере сгорания дизельных двигателей. Эксперимент и математическое моделирование. – Saarbrücken (Germany): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 112 с.
4. Bopp S., Vatidis C., Whitelaw J.H. In cylinder velocity measurements with a mobile fiber optic LDA system // SAE Techn Pap. Ser. – 1990. № 900055. – P. 1-12.
5. Bozza F., Cameretti M.C., Tuccillo R. Numerical simulation of in-cylinder processes and duct flow in a light duty diesel engine // Fourth International Symposium on Small Diesel Engines. – Journal of Polish CIMAC. – Vol. 2, №. 1. Warsaw, Poland, 1996. – P. 51-56.
6. Amsden A. KIVA-3V: a block – structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves. Los Alamos National Lab. Rep. LA-13313 – MS, 1997.
7. Bargende M., Putter R.G. Ermittlung der Ladungs bewegung in motorischen Brennraumen durch Messung instationarer Oberflächen temperaturverläufe // MTZ. – 1986. № 12. – P. 533-538.
8. Crary B., Kikuta K., Chikahisa T. et al. Causes of calculation instabilities and their counter – measures for KIVA, a three-dimensional program for combustion and fluid flow in I.C. engines // Mene. Fac. Eng. Hokkaido Univ. – 1992. – Vol. 18, № 3. – P. 1-13.

Сведения об авторах: Руднев Борис Иванович, доктор технических наук, профессор; Повалихина Ольга Владимировна, доцент, e-mail: povalichina@mail.ru.