

УДК 621.43

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ДИЗЕЛЯ

А.А. Бабич, дир., С.А. Громов, нач. инж. центра, ГП «Житомирский бронетанковый завод», А.М. Левтеров, к.т.н., с.н.с., Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков

Аннотация. Рассмотрены современные методы математического моделирования рабочих процессов дизеля, проведен обзор математических моделей, используемых для моделирования. Приведен анализ возможностей современных программных комплексов для моделирования рабочих процессов в дизельных двигателях.

Ключевые слова: математическая модель, вычислительная гидродинамика, дизельный двигатель, рабочий процесс, численные методы.

СУЧАСНІ МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕСІВ ДИЗЕЛЯ

О.О. Бабич, дир., С.А. Громов, нач. інж. центру, ДП «Житомирський бронетанковий завод», А.М. Левтеров, к.т.н., с.н.с., Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків

Анотація. Розглянуто сучасні методи математичного моделювання робочих процесів дизеля, проведено огляд математичних моделей, використаних для моделювання. Приведено аналіз можливостей сучасних програмних комплексів для моделювання робочих процесів у дизельних двигунах.

Ключові слова: математична модель, обчислювальна гідродинаміка, дизельний двигун, робочий процес, чисельні методи.

MODERN METHODS OF DIESEL ENGINE OPERATION PROCESSES MATHEMATICAL MODELLING

A. Babich, Dir., S. Gromov, Head of Eng. Centre, S E «Zhytomyr Armour Plant», A. Lyevtyerov, Ph. D. (Eng.), Sr. Researcher, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the NAS of Ukraine, Kharkiv

Abstract. Modern methods of mathematical modelling of operation processes of a diesel engine are considered, the review of mathematical models used for modelling is carried out. Analysis of possibilities of modern program complexes for modelling the operation processes occurring in diesel engines is resulted.

Key words: mathematical model, computing hydrodynamics, diesel engine, working process, numerical methods.

Введение

Основными тенденциями в современном дизелестроении являются увеличение литровой мощности, повышение топливной экономич-

ности и улучшение экологических показателей дизельных двигателей [1].

Основными путями повышения литровой мощности являются увеличение частоты

вращения коленчатого вала двигателя и увеличение давления наддува. Первый подход требует совершенствования конструкции деталей кривошипно-шатунного механизма (КШМ) и использования новых сверхпрочных материалов, из-за необходимости снижения подвижных масс КШМ. Второй подход является более перспективным, но требует не только доводки конструкции агрегатов наддува, но и совершенствования систем управления, как наддувом, так и всем дизелем.

Как следует из ряда публикаций [2–4], при высоких значениях литровой мощности особенно остро стоит вопрос о компромиссе между топливной экономичностью, экологическими показателями и показателями надежности дизеля.

Анализ публикаций

Согласно данным работы [1] основными требованиями к рабочему циклу дизелей с высокой литровой мощностью являются:

- высокий КПД, который обеспечивается качественным смесеобразованием и сгоранием увеличенных (более 300 мг/цикл) цикловых доз топлива; при этом смесеобразование необходимо обеспечить в ограниченные временные интервалы, что делает топливные системы типа Common Rail наиболее перспективным вариантом. Сокращение продолжительности впрыска достигается путем увеличения давления впрыскивания до уровня 200–210 МПа, а организация эффективного сгорания реализуется путем повышения коэффициентов избытка воздуха [1];
- повышение надежности дизеля достигается путем рационального выбора степени сжатия, конструктивными параметрами КШМ для выбранного уровня форсирования, управляемой топливоподачей и применением современных материалов для изготовления деталей дизеля [1–3];
- улучшение экологических показателей достигается, в первую очередь, улучшением параметров смесеобразования (гомогенизации смеси), ограничением интенсивности тепловыделения в начальном периоде процесса сгорания топлива, применением управляемой рециркуляции отработавших газов и использованием системы нейтрализации вредных выбросов [1].

Использование методов математического моделирования рабочих процессов для доводки конструкции современных дизелей и оценки их параметров на стадии создания новых модификаций является перспективным направлением.

В первых работах, посвященных моделированию рабочего цикла дизеля, расчет проводился со значительными допущениями и выполнялся приближенно [5]. Изначально проводился расчет идеального процесса по термодинамическому циклу Дизеля, а далее – пересчет на действительные условия с использованием двух поправочных коэффициентов для перехода от теоретического среднего индикаторного давления к действительному и от теоретического КПД – к действительному [5].

В дальнейшем для моделирования рабочих процессов ДВС получила распространение методика Гриневецкого–Мазинга как единая общая система [5]. Гриневецкий в своем тепловом расчете предварительно задавался температурой остаточных газов T_{Γ} и коэффициентом наполнения цилиндра η_{H} и дал формулы для вычисления температуры начала сжатия T_a и коэффициента остаточных газов γ_{Γ} [5]. Мазинг, в свою очередь, предложил принимать по оценке T_{Γ} и γ_{Γ} , а вычислять T_a и η_{H} , введя в систему уравнений Гриневецкого температуру T^0 (воздуха, нагретого стенками цилиндра) [5]. Достоинством классической методики расчета явилась ее универсальность как для двух-, так и для четырехтактных двигателей с наддувом и без него [5].

Согласно данным работы [5] классическая методика Гриневецкого–Мазинга не учитывает опережение начала подачи топлива; теплоотвод от сжимаемого заряда к стенкам и головке цилиндра; диапазоны рекомендуемых значений исходных данных носят условный характер, поэтому дополнительные исследования по совершенствованию этой методики путем сочетания расчетных и экспериментальных методов, направленных, в первую очередь, на углубленный анализ индикаторных диаграмм, являются актуальными. Использование расчетных методов для оценки параметров рабочих процессов позволяет существенно сократить затраты времени на разработку новой конструкции ДВС и доводку существующей.

Современные методики математического моделирования рабочих процессов позволяют оценивать влияние режимных и конструктивных факторов, а также состава топлива на экономические, индикаторные и экологические показатели ДВС [6–9]. При этом чем более подробно математическая модель описывает внутрицилиндровые процессы в ДВС, тем выше надежность и адекватность получаемых результатов математического моделирования. Также программный продукт должен позволять решать сложные оптимизационные задачи по многим параметрам – для поиска компромиссного решения между топливной экономичностью, токсичностью и показателями надежности двигателя.

Наиболее важным, при математическом моделировании рабочих процессов дизеля, является поиск наиболее рациональных значений конструктивных и режимных параметров, которые позволят добиваться максимальной топливной экономичности при снижении токсичности отработавших газов.

Цель и постановка задачи

Целью работы является исследование современных методов математического моделирования рабочего цикла дизеля.

В работе ставились такие задачи:

- провести литературный обзор по современным методам математического моделирования рабочего цикла дизеля;
- оценить возможности используемых методов, их трудоемкость и информативность получаемых результатов;
- оценить пути снижения трудоемкости моделирования рабочего цикла дизеля с использованием современных программных комплексов;
- сделать выводы и дать рекомендации о перспективах использования численных методов для исследования рабочего цикла дизеля.

Основные этапы и результаты исследования

При оптимизации конфигурации камеры сгорания и выборе конструкции топливной аппаратуры необходимо найти решение, которое одновременно обеспечивало бы снижение расхода топлива и снижение уровня выбросов

оксидов азота. Использование простого метода перебора конструктивных параметров, как правило, не позволяет добиться хорошего результата для задач с большим количеством влияющих факторов.

Для поиска наиболее приемлемого компромиссного результата ядро программы, реализующее математическую модель рабочих процессов, должно обладать высоким быстродействием, т.к. речь идет о расчете многих тысяч вариантов.

Согласно данным работы [10] в общем случае доводка двигателя, обеспечивающая высокие технико-экономические показатели, может рассматриваться как задача поиска экстремума функции многих переменных, где в качестве целевой функции выступает удельный эффективный расход топлива или другие показатели, а в качестве независимых переменных – степень сжатия, давление наддува и др.

Так, например, один из современных программных комплексов ДИЗЕЛЬ-РК предназначен для математического моделирования и компьютерной оптимизации рабочих процессов двух- и четырехтактных ДВС, как с турбонаддувом, так и с приводными компрессорами [11].

Программа позволяет проводить исследования процессов всех типов двигателей: дизелей с непосредственным впрыском; бензиновых с искровым зажиганием: бензиновых карбюраторных, бензиновых с впрыском в коллектор или в клапанный канал, газовых, газовых с форкамерой.

Программа ДИЗЕЛЬ-РК позволяет проводить [12]:

- построение расчетной внешней скоростной характеристики двигателя;
- расчетное определение и оптимизацию расхода топлива;
- расчет и оптимизацию процесса сгорания и состава отработавших газов двигателя;
- определение порога детонации;
- оптимизацию фаз газораспределения;
- расчет и оптимизацию рециркуляции отработавших газов;
- выбор и оптимизацию параметров турбонаддува и перепуска газов;
- перевод дизельного двигателя на газ.

Расчетная схема рабочего процесса поршневого двигателя представлена на рис. 1.

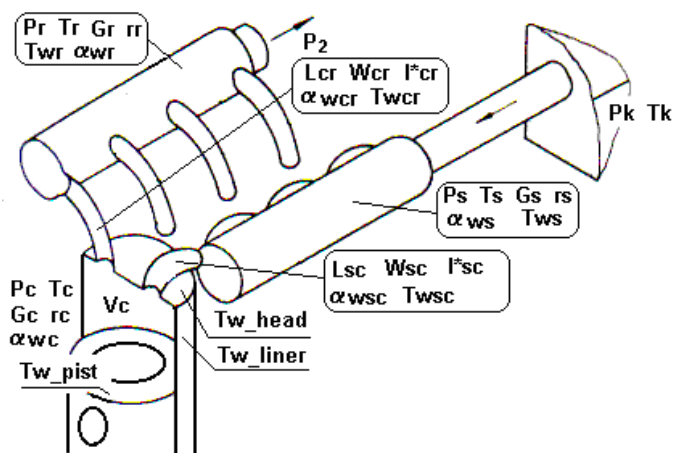


Рис. 1. Расчетная схема рабочего процесса поршневого двигателя (программа ДИЗЕЛЬ-РК [12]): P – давление; T – температура; G – масса; r – состав рабочего тела; α_w – коэффициент теплоотдачи; W – скорость; I – энтальпия; L – длина; V – объем

Программа ДИЗЕЛЬ-РК принадлежит к классу «термодинамических» программ: цилиндры и коллекторы двигателя рассматриваются как открытые термодинамические системы (ОТД), обменивающиеся между собой массой и энергией. Течение газа в каналах, соединяющих ОТД, рассматривается как нестационарное. Параметры газа в цилиндрах и коллекторах двигателя определяются путем пошагового решения системы разностных уравнений сохранения энергии, массы, а также уравнения состояния, записанных для открытых термодинамических систем. Учитывается зависимость свойств рабочего тела от состава и температуры.

Используемый метод разностных уравнений превосходит традиционные по точности и скорости. Математическая модель газообмена учитывает нестационарное течение газа в каналах, особенности конструкций двухтактных ДВС, влияние соседних цилиндров и устройство преобразователя импульсов. Это позволяет проводить расчетную оптимизацию фаз газораспределения, а также определять наилучшую конфигурацию окон двухтактных двигателей [12].

Теплообмен моделируется отдельно для разных поверхностей, температуры которых определяются путем решения задачи теплопроводности. Смесеобразование и сгорание в дизелях рассчитываются по методу профессора Н.Ф. Разлейцева. Метод, в дальнейшем доработанный А.С. Кулешовым, учитывает особенности характеристики впрыска и мелкость распыливания, динамику развития топливных струй, взаимодействие струй с воз-

душным вихрем и стенками, а также ориентацию струй в камере сгорания [11]. При этом учитываются условия развития каждой топливной струи и образованных струями пристеночных потоков, а также их взаимодействие между собой.

Разработанный Разлейцевым метод позволяет рассчитывать эмиссию сажи и твердых частиц в зависимости от условий смесеобразования и сгорания. Возможности программы [12] позволяют оптимальным образом подобрать конфигурацию камеры сгорания, ориентацию топливных струй, диаметры и количество сопловых отверстий, интенсивность закрутки заряда и характеристику впрыска. Основные этапы описания расчетной области камеры сгорания дизеля представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что в программе ДИЗЕЛЬ-РК [12] реализована возможность точного описания конфигурации камеры сгорания в поршне, параметров распылителя форсунки и его расположения в камере сгорания, а также описания закона топливоподачи и условий взаимодействия топливных факелов с воздушным вихрем и стенками камеры сгорания. Кроме штатного (дизельного) топлива, в программе ДИЗЕЛЬ-РК [12] реализована возможность моделировать рабочие процессы дизеля на альтернативных топливах – этиловых и метиловых эфирах, а также имеется возможность создавать самостоятельную базу данных по альтернативным топливам, варьируя элементарный состав топлива (С, Н и О) и теплофизические свойства [12].

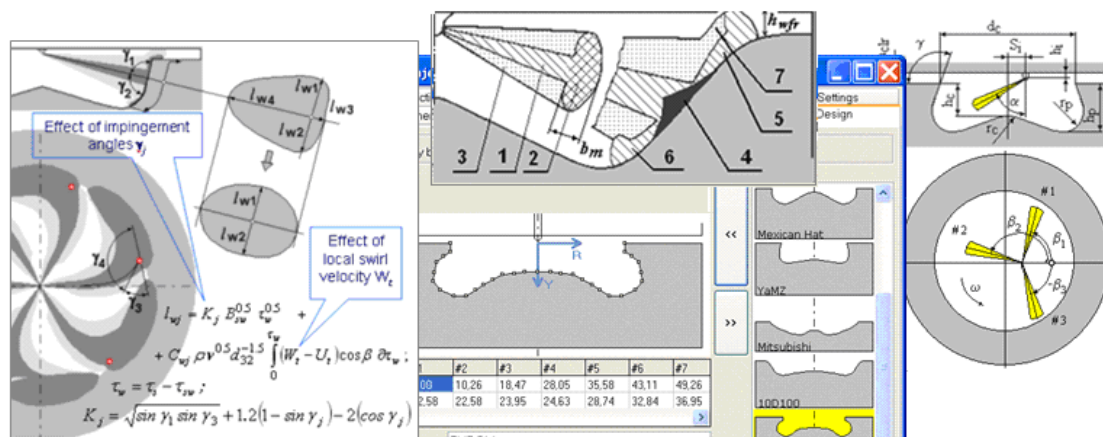


Рис. 2. Основные этапы описания расчетной области камеры сгорания дизеля

Использование современных CFD-программных комплексов для численного моделирования рабочих процессов дизеля позволяет повысить точность результатов моделирования. CFD – computational fluid dynamic – вычислительная гидродинамика – один из наиболее перспективных методов для моделирования рабочих процессов ДВС и дизелей в частности [13–15].

Моделирование рабочих процессов дизеля в последнее время проводится в плоской и трехмерной постановке с использованием таких программных комплексов, как AVL, Fier и Fluent [13–15].

Рассмотрение задачи по моделированию рабочих процессов в плоской постановке позволяет рассматривать задачи в виде набора тестовых задач, имеющих только оценочный характер, а для трехмерной постановки возможны варианты осесимметричной, когда рассматривается только сектор камеры сгорания дизеля, описывающий объем, в котором распространяется только один топливный факел [13–15], или рассмотрение полноразмерной задачи всей камеры сгорания. Расчетная сетка, описывающая конфигурацию камеры сгорания, впускные и выпускные каналы представлены на рис. 3.

Представленная на рис. 3 расчетная сетка позволяет моделировать рабочие процессы дизеля в трехмерной нестационарной постановке, декартовых координатах, с учетом движения поршня и клапанов, и моделировать весь рабочий цикл от 0 до 720 град. п.к.в. С точки зрения трудоемкости – это наиболее сложная из возможных рассматри-

ваемых постановок, т.к. расчетная сетка обычно насчитывает сотни тысяч, а иногда и миллионы расчетных ячеек, а расчет может длиться до нескольких суток.

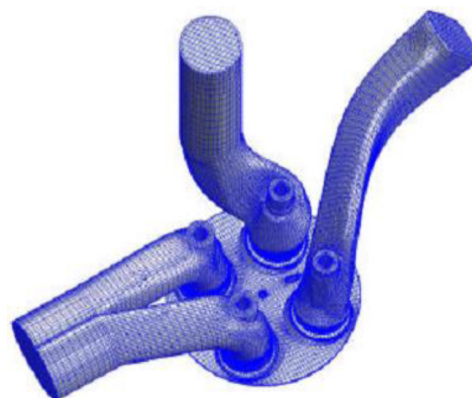


Рис. 3. Расчетная сетка, описывающая конфигурацию камеры сгорания, впускные и выпускные каналы [13]

Расчетная сетка, описывающая сектор камеры сгорания для моделирования рабочих процессов дизеля в осесимметричной постановке, представлена на рис. 4.



Рис. 4. Расчетная сетка, описывающая фрагмент камеры сгорания для моделирования рабочих процессов дизеля в осесимметричной постановке [13]

Такая расчетная сетка может использоваться для осесимметричной постановки, в случае симметричной ориентации топливных факелов в камере сгорания относительно оси цилиндра; при этом, в отличие от полноразмерной расчетной сетки (рис. 3), решение задачи в такой постановке позволяет значительно сократить затраты машинного времени и быстрее добиться результата.

Рассмотренные выше подходы по численному моделированию рабочих процессов дизеля требуют специальных алгоритмов перестроения расчетной сетки вблизи подвижных границ, описывающих процессы движения поршня, впускных и выпускных клапанов. При этом при перемещении поршня вниз новые расчетные ячейки генерируются встроенным сеточным генератором, а при движении поршня вверх они сначала сжимаются, а потом деактивируются – уничтожаются.

Для моделирования процесса горения в цилиндре дизеля в большинстве программных комплексов используются такие модели:

- модель разложения вихря (Eddy Dissipation) [16];
- модель пламени (Flamelet Model) [17];
- модель, описывающая скорости химических реакций в пламени (Finite Rate Chemistry);
- объединенная модель (Combined Model);
- модель горения углеводородных топлив (Hydrocarbon Fuel Model).

Для описания турбулентных течений в цилиндре ДВС обычно используют $k-\epsilon$ модель [8]. При моделировании процесса теплообмена между рабочим телом и стенками цилиндра обычно используют модель полной энергии (Total Energy) [18], что позволяет достаточно точно моделировать процесс теплообмена для сжимаемых жидкостей и газов и учитывать эффект нагрева рабочего тела в пограничном слое при движении потока с большими скоростями [18].

Результаты моделирования распространения топливного факела в камере сгорания дизеля представлены на рис. 5. Из рис. 5 видно, что при моделировании процесса впрыска топлива в камеру сгорания с использованием методов CFD-моделирования исследователи получают возможность не только интегрально (по расчетной индикаторной диаграмме), но и дискретно (визуально) оценивать слож-

ные внутрицилиндровые процессы и углубленно изучать процессы смесеобразования в камере сгорания дизеля.

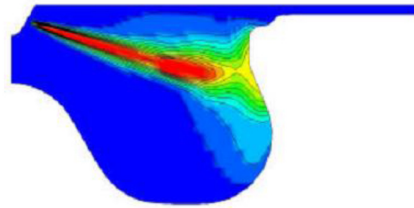


Рис. 5. Моделирование распространения топливного факела в камере сгорания дизеля [13]

Результаты моделирования процесса горения дизельного топлива в камере сгорания дизеля представлены на рис. 6.

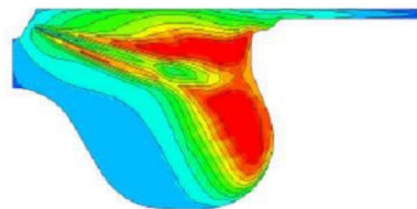


Рис. 6. Результаты моделирования процесса горения дизельного топлива в камере сгорания дизеля [13]

Из результатов, представленных на рис. 6, видны характер взаимодействия топливного факела со стенкой камеры сгорания, особенности испарения и сгорания топлива и распространение фронта пламени по объему камеры сгорания, а также распределение участков с локальными коэффициентами избытка воздуха, большими стехиометрического.

Выводы

Использование методов математического моделирования рабочих процессов для доводки конструкции современных дизелей и оценки их параметров на стадии создания новых модификаций является перспективным направлением.

Использование современных программных комплексов для CFD-моделирования рабочих процессов дизеля обладает целым рядом преимуществ, как по точности описания конфигурации камеры сгорания, так и по описанию самих внутрицилиндровых процессов. Основными недостатками методов CFD-моделирования рабочих процессов дизеля являются значительные затраты машинного времени, отсутствие встроенной функ-

ции многокритериальной оптимизации и необходимость в значительных затратах времени на сбор и подготовку исходных данных для модели рабочего процесса дизеля новой конструкции. Сочетание численных методов, реализованных в специализированных программных комплексах для моделирования процессов в ДВС с углубленным изучением внутрицилиндровых параметров дизеля с методами CFD-моделирования, позволяет добиться наилучшего результата с минимальными затратами времени.

Литература

1. Лазарев Е.А. Особенности организации рабочего цикла в дизеле с высокой литровой мощностью / Е.А. Лазарев, В.С. Мурзин, В.Е. Лазарев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 36–43.
2. Автомобильные двигатели с турбонаддувом / Н.С. Ханин, Э.В. Аболтин, Б.Ф. Лямцев и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 330 с.
3. Лаврик А.Н. Расчет и анализ рабочего цикла ДВС на различных топливах: монография / А.Н. Лаврик. – Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 1985. – 104 с.
4. Лазарев Е.А. Основные принципы, методы и эффективность средств совершенствования процесса сгорания топлива для повышения технического уровня тракторных дизелей: монография / Е.А. Лазарев. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2010. – 289 с.
5. Каргин С.А. Разработка методики расчета показателей рабочего цикла дизелей при различных способах смесеобразования / С. А. Каргин, А. П. Исаев, Искендерли Турал Искендер оглы // ИЗВЕСТИЯ ВолгГТУ. – 2012. – Том 4, Вып. № 12. – С. 69–72.
6. Dahlén L. CFD Studies of Combustion and In-Cylinder Soot Trends in a DI Diesel Engine/ L. Dahlén, A. Larsson. – Comparison to Direct Photography Studies. – SAE 2000-01-1889, 2000.
7. Epping K. The Potential of HCCI Combustion for High Efficiency and Low Emissions/ K. Epping, S. Aceves, R. Bechtold, J. Dec. – SAE Technical Paper 2002-01-1923, 2002.
8. AVL FIRE, Feel's Manual Version 7, AVL LIST. – GmbH, Graz, Austria, 2000.
9. Левтеров А.М. Метод исследования характеристик поршневых ДВС на альтернативных топливах / А.М. Левтеров, Л.И. Левтерова, Н.Ю. Гладкова // Вестник НТУ «ХПИ»: зб. наук. пр. Сер.: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2011. – Вып. 42. – С. 99–106.
10. Иващенко Н.А. Моделирование процессов топливоподачи и проектирование топливной аппаратуры дизелей / Н.А. Иващенко, В.А. Вагнер, Л.В. Грехов. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И. И. Ползунова, 2002. – 166 с.
11. Кулешов А. С. Программный комплекс для расчёта и оптимизации двух- и четырёхтактных КДВС / А. С. Кулешов, А. Н. Каримов, Н. Ф. Разлейцев // Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС: тезисы докладов V науч.-практ. семинара. – Владимир: Изд-во ВПИ, 1995. – С. 31–33.
12. Кулешов А.С. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов ДВС / А.С. Кулешов, Л.В. Грехов. – М.: МГТУ, 2000. – 64 с.
13. Weiser K. 3D-CFD Моделирование сгорания и Теплообмена в Быстроходном Дизеле/ K. Weiser, A. Ennemoser // Тезисы доклада, Валенсия, Испания 11–13.09.2002. – С. 22–36.
14. AVL BOOST Manual, AVL LIST. – GmbH, Graz, Austria, 2002.
15. AVL FIRE" (feel's Manual Version 7, AVL LIST. – GmbH, Graz, Austria, 2000.
16. Magnussen B.F. The Eddy Dissipation Concept for Turbulent Combustion Modelling. Its Physical and Practical Implications, Presented at the First Topic Oriented Technical Meeting, International Flame Research Foundation, Ijmuiden / B.F. Magnussen. – The Netherlands, Oct. 1989.
17. Peters N. Turbulent Combustion, Cambridge monographs on mechanics / N. Peters. – Cambridge University Press, 2000.
18. Абрамчук Ф.И. Программный комплекс для моделирования внутрицилиндровых процессов ДВС / Ф.И. Абрамчук, А.Н. Авраменко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – Вып. 2. – С. 7–12.

Рецензент: Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 25 августа 2016 г.