

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ДВУХТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Н.В. Лобов

Приведено краткое описание методики построения трехмерной газодинамической модели двухтактного двигателя внутреннего сгорания, а также результаты ее использования для улучшения технических характеристик последнего.

Процесс газообмена в двухтактных двигателях весьма специфичен и существенно отличается от газообмена четырехтактных. Для принудительного вытеснения продуктов сгорания из цилиндра двигателя в данном случае используется не поршень, а поступающий свежий заряд. Поэтому доводка газозоообменного тракта (ГВТ) двухтактного двигателя чрезвычайно сложна и трудоемка. Требуются большие объемы опытно-конструкторских работ, связанные с настройкой и изменением конструкции ГВТ [1, 2]. При использовании только экспериментальных методов все это является чрезвычайно длительной и дорогой процедурой. Сокращению сроков разработки новых двигателей способствовало бы наличие достоверной и полной информации о сложных, нестационарных газодинамических процессах происходящих в их полостях. Общеизвестным и наиболее перспективным путем сокращения затрат в этом случае является использование вычислительных технологий и ЭВМ. При этом сам вычислительный процесс при обеспечении должного уровня достоверности может рассматриваться как численный эксперимент и относится к экспериментально-теоретическим методам исследования [3].

Известные одномерные нестационарные методы расчета двигателя, получившие широкое распространение в 60-90 годах [4-8], не дают возможности воспроизводить в полном объеме сложную картину газодинамических течений внутри двигателя. Полученные с их помощью результаты расчета имеют низкую степень достоверности при моделировании сложных отрывных течений во впускных и выпускных окнах, местах резкого сужения и расширения потока, т.е. там, где имеет место течение газа через местные сопротивления. В настоящее время создаются математические модели, которые на достаточно высоком уровне описывают течение газа и соответствующие рабочие процессы в отдельных элементах двигателя. Речь идет о многомерных

газодинамических моделях [9-14 и др.]. В этих моделях в качестве граничных условий используются экспериментальные данные [15-17] или данные, полученные из расчетов по моделям более низкого уровня [1, 18, 19]. При этом возникают трудности методически правильной организации экспериментальных продувок, проблемы математически правильного описания полученных граничных условий. Все это снижает достоверность получаемых расчетных данных. Существенно повысить эффективность доводки двигателя на этапе проектирования позволили бы пространственно-трехмерные математические модели сквозного расчета.

Исходя из этого, существующую проблему, связанную с совершенствованием двухтактных двигателей, можно сформулировать как отсутствие высокоточных, эффективных математических моделей, позволяющих получать полную и достоверную картину о протекающих в их системах газодинамических процессах и позволяющих оптимизировать конструкцию ГВТ двигателя на этапе проектирования с помощью численного эксперимента.

Основы использования численных экспериментов в отечественной практике применительно к двухтактным ДВС были заложены А.С. Орлиным и М.Г. Кругловым [20-23]. Исследованию газодинамических процессов в поршневых двигателях посвящены труды ряда ученых: Г. Зайферта, Р. Бенсона, Д.А. Мунштукова, Б.А. Киселева, О.Г. Красовского, Б.П. Рудого, С.В. Камкина, Г. Блэера, С.Р. Березина, Ю.А. Гришина, Р.Р. Силлата и т.д. Общим для всех выше перечисленных ученых является то, что достигнутые ими результаты по совершенствованию ДВС были получены при использовании вычислительной техники и вычислительных методов газовой динамики. По мере развития программных средств и ЭВМ происходило усложнение технических задач, с их помощью решаемых. Первые газодинамические модели двигателя были од-

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ДВУХТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

номерными (1950 – 1980 годы). На смену им приходят двухмерные и трехмерные газодинамические модели. В настоящее время при решении сложных задач двигателестроения, когда имеются многочисленные разветвления газодинамических потоков, используют комбинированные модели. При этом такая математическая модель включает в себя «сшитые» определенным образом одномерные и многомерные фрагменты расчета. Общим вектором дальнейшего развития газодинамических методов расчета ДВС остается моделирование многомерных нестационарных задач. Для реализации этой цели необходим выбор оптимального во всех отношениях вычислительного метода.

Широкое распространение в отечественной и мировой практике получил метод контрольных объемов (МКО), реализованный в таких наиболее известных коммерческих программах как Star-CD [24], KIVA-2,3 [25], AVL FIRE [13, 16], Flow Vision [9] и др. Развернутое описание метода дано в работах [26-28]. Эти коммерческие программы обладают высокими вычислительными возможностями в части моделирования нестационарных газодинамических процессов в ДВС. Однако, несмотря на несомненные достоинства, они не получили широкого распространения в нашей стране. Основной причиной этому, с одной стороны, является высокая стоимость программного продукта и высокие требования к вычислительным ресурсам ЭВМ, с другой стороны, низкая покупательная способность российского рынка. Достоверным фактом является и то, что сам вычислительный код МКО закрыт для пользователя. Являясь элементом know-how, данный компьютерный код нигде не опубликован. Фактически, коммерческий программный пакет является «черным ящиком» с инструкцией для пользователя. Поэтому для построения математической модели двухтактного двигателя был использован отечественный аналог этого метода – метод крупных частиц (МКЧ) [29, 30]. Проведенное тестирование МКЧ показало, что при относительной простоте вычислительного кода, он не уступает коммерческим программам высшего уровня по точности воспроизведения структуры газодинамического потока [31]. Основное преимущество МКЧ над другими методами заключается в том, что он, используя общепринятые в мировой практике принципы дискретизации области интегрирования, и заложенное в его основу обеспечение точного интегрального сохранения таких величин, как масса, количество движения и

энергия на любой группе контрольных объемов, еще включает в себя и алгоритм прямого не итерационного решения системы уравнений.

При построении пространственно-трехмерной математической модели двухтактного одноцилиндрового бензинового двигателя, была реализована следующая расчетная схема двигателя (см. рис. 1). Особенностью данной математической модели двигателя было то, что двигатель рассматривался как единая система, в которой имелись системы впуска и выпуска, цилиндр с функциональными каналами и кривошипная камера.

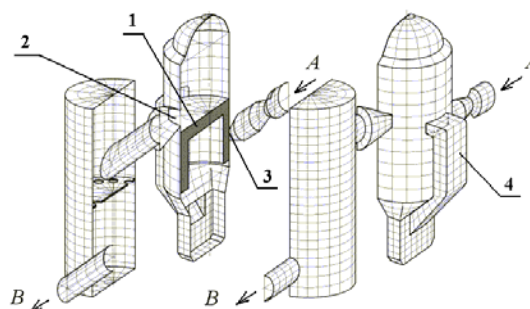


Рис. 1. Объемное представление расчетной схемы одноцилиндрового двухтактного бензинового двигателя внутреннего сгорания: 1 – поршень, 2 – выпускной канал, 3 – впускной канал, 4 – продувочный канал, А, В – направление движения заряда

В качестве исходной газодинамической системы дифференциальных уравнений была взята система уравнений Эйлера, записанная в дивергентном виде. В нее вошли: уравнение неразрывности (сохранения массы); уравнения сохранения импульса по осям координат; уравнение сохранения полной удельной энергии и уравнение неразрывности (сохранения массы) для продуктов сгорания. Для замыкания системы было использовано уравнение состояния для идеального газа.

При построении математической модели двигателя были приняты следующие допущения:

1. Рабочее тело – совершенный газ (идеальный в термодинамическом смысле), который в разные моменты времени состоит из двух компонентов: свежего заряда и продуктов сгорания.

2. Шероховатость труб и каналов не учитывается.

3. Реальный процесс горения топлива заменен эквивалентным подводом тепловой

энергии по закону Вибге ко всем ячейкам, находящимся в камере сгорания.

4. Процесс подачи топлива карбюратором представляется квазистационарной моделью в виде фиксированного в процессе расчета соотношения расхода топлива к расходу воздуха.

5. Температура стенок цилиндра, каналов систем впуска и выпуска, а также глушителя, принимается постоянной.

6. Процесс теплообмена в цилиндре описывается моделью Вошни.

В процессе реализации численного интегрирования исходной системы дифференциальных уравнений с помощью МКЧ вся расчетная область покрывалась фиксированной в пространстве Эйлеровой расчетной сеткой. Сетка состояла из прямоугольных элементарных ячеек - объемов. Общее количество таких ячеек в процессе исследования не превышало 150-180 тысяч. Все вычислительные операции производились для половины двигателя. При построении математической модели ДВС имели место следующие основные типы граничных условий: непроницаемая, неподвижная граница (твердые стенки конструкции); непроницаемая, подвижная граница (верхняя и нижняя торцевые поверхности поршня) и проницаемая неподвижная граница (открытые концы труб на впуске и выпуске). Подробное описание способа постановки граничных условий для выше приведенных типов границ приведено в работах [32, 33]. Разбиение расчетной области на область интегрирования и граничную с ней область осуществлялось по специальному алгоритму. В соответствии с этим алгоритмом, все ячейки, не пересекающие граничных контуров внутренних полостей двигателя, относились к расчетной области. Для обеспечения единообразия вычислений вдоль всей расчетной области, вне зависимости от типа границы, был введен одиночный слой так называемых фиктивных ячеек, или граничный слой.

Разработанная компьютерная программа была протестирована, а достоверность получаемых расчетных данных оценена с помощью большого количества экспериментальных данных. Для тестирования программы использовались индикаторные диаграммы двигателя, снятые одновременно в трех местах: в цилиндре, в кривошипной камере и системе выпуска, при его работе по внешней скоростной характеристике, а также расходные характеристики (расход воздуха и топлива). Степень совпадения расчетных и экспе-

риментальных кривых достаточно высокая [33].

Моделирование пространственных газодинамических процессов внутри двигателя, когда последний рассматривается как единая система, позволило на более высоком количественном и качественном уровне осуществить оптимизацию газоздушного тракта двигателя [34], оценить эффективность процесса газообмена и спрогнозировать уровень шумовой эмиссии [35].

Для иллюстрации вычислительных способностей разработанной программы приведены два примера. Первый - по доводке продувочных и выпускных окон цилиндра двигателя. Второй - по снижению уровня шума, производимого двигателем. Исследования выполнены при отработке конструкции отечественного серийного двигателя бензомоторной пилы "Урал-2Э".

В первом случае был проведен расчет для серийного исполнения цилиндра двигателя и его модифицированной версии. Основные параметры геометрии цилиндра, которые изменялись в ходе численного эксперимента, представлены на рис. 2. Это форма и размеры выпускного окна, а также угол продольного наклона продувочного окна.

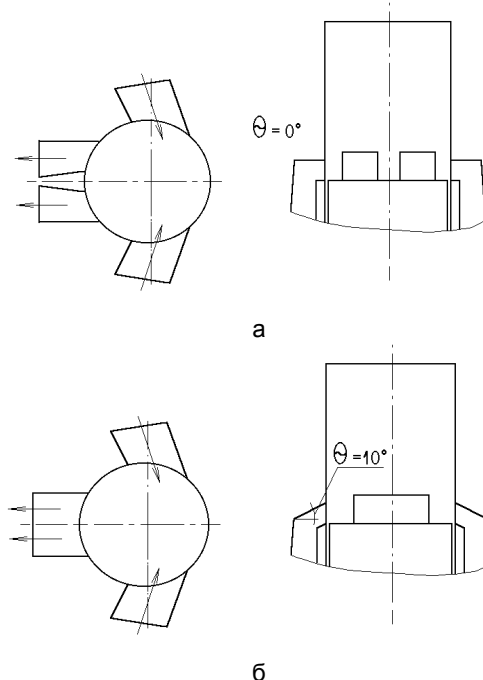


Рис. 2. Варианты исполнения цилиндра двухтактного двигателя с кривошипно-камерной продувкой реализованные в расчете: а) серийный вариант цилиндра; б) модифицированный вариант

Анализ расчетных данных показал, что в результате объединения двух выпускных ка-

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ДВУХТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

налов в один (см. рис. 2), произошло снижение потерь на выпуске за центральной перегородкой выпускного канала. Формирующийся в первой фазе процесса выпуска (режим свободного истечения газа) вихрь за центральной перегородкой выпускного канала значительно уменьшал эффективное - живое сечение. После устранения этих потерь, произошло увеличение общего расхода воздуха через двигатель. Изменение угла наклона в месте соединения продувочного канала с цилиндром, привело к реализации более рациональной схемы продувки цилиндра. Это, в свою очередь, позволило уменьшить количество остаточных газов в цилиндре. Одновременно с этим уменьшились потери свежего заряда при продувке цилиндра. Общим положительным результатом проведенного сравнительного расчета явилось то, что произошло увеличение коэффициента наполнения цилиндра на 4-5%, явившееся результатом улучшения сразу двух показателей: увеличения подачи свежего заряда и уменьшения потерь свежей смеси при продувке.

При доводке конструкции двигателя "Урал-2Э" с целью снижения уровня шума во внимание принималось следующее. Источниками шума у ДВС подобного класса являются: шум впуска, шум выпуска, корпусной шум, шум от сгорания и механический шум. Поскольку разработанная математическая модель позволяла расчетным образом оценивать только характер течения газа в газоздушном тракте двигателя, то основное внимание в исследовании было уделено минимизации уровня шума выпуска отработавших газов и шума от поступающего в двигатель свежего воздуха. В качестве параметра оценки использовалась амплитуда массового расхода газа. Исследования, проведенные Рудым Б.П. [36], показали, что при увеличении амплитуды расхода на входе и выходе из двигателя шум возрастает и наоборот.

В ходе совместных опытно-конструкторских работ (ОКР) с ФГУП «Машзавод им. Ф.Э. Дзержинского» г. Перми с использованием разработанной модели были выполнены численные расчеты двигателя "Урал-2Э" с серийным (объем внутренней полости 570 см³, рис.3,а) и модифицированным глушителем (930 см³, рис.3,б). При этом оценивалось влияние конструкции глушителя на эффективные параметры его работы, на параметры газообмена и, в частности, потери свежего заряда при продувке.

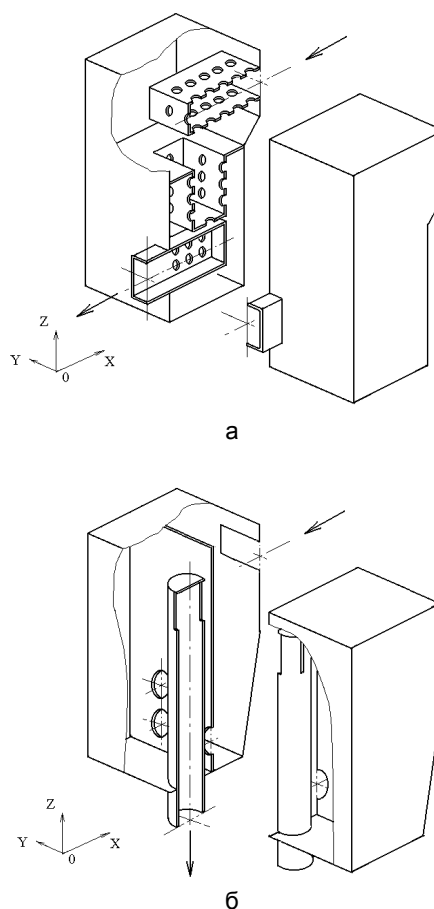


Рис. 3. Исследованные глушители бензопильной "Урал-2Э": а) серийный вариант; б) модифицированный вариант

На рис.4. приведены результаты расчета массового расхода газа на выходе. У двигателя с модифицированным глушителем амплитуда расхода оказалась значительно меньше. При этом было зафиксировано снижение среднего индикаторного давления при использовании модифицированного глушителя, а также повышение коэффициента использования свежего заряда.

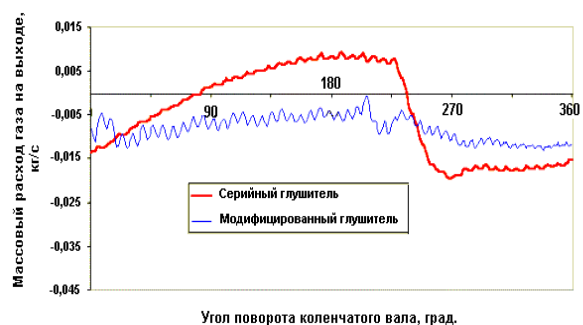


Рис. 4. Изменение массового расхода газа на выходе из двигателя

Выполненные расчеты позволили на этапе численной обработки конструкции двигателя утверждать, что применение модифицированного глушителя должно привести к снижению уровня шума производимого двигателем и снижению мощности.

Натурные испытания, проведенные на заводе, подтвердили данный прогноз. Двигатель с серийным глушителем показал общий уровень шума равный 108 дБа, с модифицированным – 105 дБа. Иначе говоря, шум удалось уменьшить почти в 2 раза. Снижение уровня шума было основной задачей проводимой ОКР. Было зафиксировано также, что использование модифицированного глушителя привело к 2 %-ому снижению мощности.

Выводы

1. Представленные результаты использования пространственно-трехмерной математической модели двухтактного двигателя при численной обработке его конструкции доказали ее эффективность. Достоверность и точность воспроизведения структуры газодинамических потоков в полостях двигателя в данном случае значительно выше в сравнении с известными одномерными моделями.

2. Комплексный подход в исследовании газодинамических течений внутри ДВС, когда двигатель рассматривается как единая система, состоящая из системы впуска и выпуска, цилиндра с функциональными каналами и кривошипной камеры, позволяет на принципиально ином, более высоком количественном и качественном уровне оптимизировать конструкцию двигателя и оценивать перспективность разработки еще на стадии проектирования.

3. Разработанная программа может быть полезна при совершенствовании конструкции впускного и выпускного тракта двигателя, оптимизации характера течения газа внутри цилиндра и фаз газообмена. Последующее развитие математической модели связано с использованием турбулентных моделей процесса сгорания и механизма дробных ячеек.

4. После соответствующей модификации данная разработка в равной степени актуальна и для совершенствования конструкции ДВС всех других типов и назначений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Blair G.P. Design and Simulation of Two-Stroke Engines. – Commonwealth Drive Warrendale: SAE, 1996. – 591 p.
2. The Potential of Small Loop-Scavenged

Spark-Ignition Single-cylinder Two-Stroke Engines/ By Franz J. Laimboeck. – Warrendale, Pa., 1991. – 73 p.

3. Давыдов Ю.М., Егоров М.Ю. Численное моделирование нестационарных и переходных процессов в активных и реактивных двигателях. – М.: Нац. Академ. прикладных наук России, 1999. – 272 с.

4. Губайдуллин И.С., Загайко С.А. Моделирование рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания в интерактивной системе имитационного моделирования «Альбея». – Уфа: Изд. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та, 1997. – 42 с.

5. Круглов М.Г., Яушев И.К., Гусев А.В. Метод распада разрыва в применении к расчету газозооного тракта ДВС // Двигателестроение. – 1980. – № 8. – С. 19–21.

6. Лобов Н.В., Черепанов Л.Б. Результаты применения лицензионного пакета программ GT-Power для создания одномерной газодинамической модели двухтактного одноцилиндрового бензинового микродвигателя// Деп. рук. ВИНТИ. – 2000. – №2132-ВОО. – 35 с.

7. Силлат Р.Р. Интегрированная система для расчетного исследования рабочего процесса двухтактных карбюраторных двигателей внутреннего сгорания// Труды ТПИ (Таллин). – 1985. – №597. – С. 77–85.

8. Силлат Р.Р. Исследование газообмена двухтактного двигателя с применением математического моделирования: Дис...канд. техн. наук. – Таллин, 1977. –180 с.

9. Аксенов А.А., Коньшин В.Н. Программный комплекс Flow Vision для моделирования гидродинамических течений в ДВС // Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС: Материалы VIII МНПК. – Владимир, 2001. – С.344-348.

10. Гришин Ю.А. Газодинамическое совершенствование проточной части двигателей внутреннего сгорания: Дис...д-ра техн. наук. – М., 2000. – 435 с.

11. Пелепейченко В.И. Моделирование турбулентного движения заряда в цилиндре двигателя внутреннего сгорания на основе метода крупных частиц // Деп. рук. ГНТБ Украины. – 1994. – № 127. -Ук 95. – 13 с.

12. Пелепейченко В.И. Модификация метода крупных частиц для расчета трехмерного нестационарного движения заряда в цилиндре ДВС// Деп. рук. ГНТБ Украины. – 1994. – № 129. -Ук 95. – 13 с.

13. Скрипник А.А. AVL FIRE – важный инструмент в процессе разработки и доводки ДВС // Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС: Материалы VIII МНПК. – Владимир, 2001. – С. 233–234.

14. Ahmadi-Befrui B., Brandstatter W., Kratochwill H. Multidimensional Calculation of the Flow Processes in a Loop-Scavenged Two-Stroke Cycle Engine // SAE Paper (Warrendale, Pa.). – 1989. – № 890841. – 16 p.

15. Численное исследование течений в двигателях внутреннего сгорания методом крупных

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ДВУХТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

- частиц/ Ю.М. Давыдов, М.Г. Круглов, А.А. Меднов, В.А. Нефедов – М.: Вычислительный центр АН СССР, 1983. – 59 с.
16. Hori H., Ogawa T., Kuriyama T. CFD In-Cylinder Flow Simulation of an Engine and Flow Visualization// SAE Paper (Warrendale, Pa.). – 1995. –№ 950288. – 15 p.
17. Riegler U., Mahr B. Berechnung der Stroemung und der Verbrennung in einem Ottomotor am Beispiel eines Zweitaktmotors// Star-CD Anwendertreffen Deutschland. – Fellbach, 1997. – S. 45–51.
18. Хмелев Р.Н. Исследование влияния газодинамических процессов на функционирование ДВС: Дис...канд. техн. наук. – Тула, 2002. – 144 с.
19. Matthias B. Ladungswechselberechnung am Zweitakt-Motor: Dissertation. – Dresden. – 1995. – 101 s.
20. Круглов М.Г., Меднов А.А. Газовая динамика двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1988. – 360 с.
21. Круглов М.Г. Термодинамика и газодинамика двухтактных двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машгиз, 1963. – 272 с.
22. Круглов М.Г., Меднов А.А. Исследование течений газа в двигателях внутреннего сгорания // Численное исследование актуальных проблем машиностроения и механики сплошных и сыпучих сред методом крупных частиц; В 5 т. / Под ред. Ю.М. Давыдова. – М.: Нац. Академ. прикладных наук России, 1995. – Т.2. – С. 311–362.
23. Орлин А.С., Круглов М.Г. Комбинированные двухтактные двигатели. – М.: Машиностроение, 1968. – 576 с.
24. Star-CD Version 2.2: Manuals. – London: Computational Dynamics Ltd., 1993. – 350 p.
25. Amsden A., O'Rourke P.J., Butler T. D.: KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays. – Los Alamos: National Laboratory, 1989. –312 p.
26. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
27. Noll B. Numerische Stroemungsmechanik. – Berlin: Springer-Verlag, 1993. – 221 s.
28. Versteeg H.K., Marasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. – London: Wiley, 1995. –258 p.
29. Давыдов Ю.М. Крупных частиц метод. – В кн.: Мат. энциклопедия, Т.3, 1982. – с. 125-129.
30. Белоцерковский О.М., Давыдов М.Ю. Метод крупных частиц в газовой динамике. – М.: Наука, 1982. – 392 с.
31. Лобов Н.В. Оценка эффективности использования метода крупных частиц при решении тестовой задачи // Двигателестроение. – 2003. – №2. – С.24–25.
32. Лобов Н.В. Трехмерная математическая модель двухтактного одноцилиндрового бензинового ДВС // Строительные и дорожные машины. – 2003. – №2. – С.40–42.
33. Лобов Н.В. Моделирование рабочего процесса в двухтактном одноцилиндровом двигателе внутреннего сгорания, Пермь: Изд-во ПермГТУ, 2003. – 82 с.
34. Лобов Н.В. Оценка эффективности процесса газообмена в двухтактном двигателе с кривошипно-камерной продувкой // Ползуновский вестник. – 2004. – №1. – С.225–229.
35. Оценка эффективности работы глушителя двухтактного бензинового ДВС // Строительные и дорожные машины. – 2004. – № 6. – С.41–42.
36. Рудой Б.П. Галлиулин Ф.Ф. Концепция проектирования выпускного тракта ДВС по шумовым характеристикам // Двигатель-97: Материалы МНТК.– М., 1997. – С.93.