

на правах рукописи

ЧЕРНЫШЁВ Виктор Сергеевич

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОСЛОЙНОГО СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ  
В ЦИЛИНДРЕ ДВИГАТЕЛЯ

Специальность 05.04.02 - Тепловые двигатели

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2001

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном  
техническом университете.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Галышев Юрий Витальевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Кита-  
нин Эдуард Леонтьевич

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Красовский Олег Григорьевич

Ведущая организация: ООО «Топливные системы»

Защита состоится « 25 » декабря 2001 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертаци-  
онного совета Д 212.229.09 при Санкт-Петербургском государственном техни-  
ческом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая  
29; Главное здание

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке универ-  
ситета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » ноября 2001 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
Доктор технических наук, доцент

Хрусталёв Б.С.

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Растущие цены на энергоносители заставляют производителей выпускать высокоэкономичные автомобили. Кроме того, к современным двигателям внутреннего сгорания предъявляются жесткие требования по экологической безопасности. Все это ставит перед необходимостью искать новые пути организации рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания.

Одной из наиболее актуальных задач в двигателестроении является создание двигателей с послойным смесеобразованием при непосредственном впрыске топлива в цилиндр. В этом направлении достигнуты значительные успехи. Так бензиновые двигатели, оборудованные такой системой питания, имеют низкий расход топлива и удовлетворяют жестким экологическим требованиям EURO III. Это объясняется тем, что такой способ смесеобразования позволяет эффективно сжигать топливно-воздушные смеси с коэффициентом избытка воздуха больше 2.

Одновременно всё больше внимания уделяется использованию в двигателях природного газа, что позволяет решить проблемы связанные с дефицитом жидкого топлива и с ужесточением экологических требований к двигателям. Применение послойного смесеобразования в двигателе, работающем на газовом топливе, позволяет еще более развить эти преимущества.

На основании изложенного можно сделать вывод о безусловной актуальности работ, связанных с анализом послойного смесеобразования в газовых двигателях.

Одной из основных проблем является организация движения воздушного заряда в цилиндре двигателя, которое должно обеспечить создание в районе свечи зажигания зоны с обогащенной смесью.

Изучение процессов внутри цилиндра возможно при помощи натурального эксперимента, однако, это требует прецизионных средств измерения (лазерная анемометрия). Более доступным является численный эксперимент с применением апробированных математических моделей. Он позволяет получить все необходимые параметры процессов с достаточной степенью точности и при сравнительно малых затратах.

Целью работы является совершенствование рабочего процесса газового двигателя путем организации послойного смесеобразования с использованием методов математического моделирования.

В соответствии с целью работы сформулированы основные задачи диссертационного исследования:

1. создать математическую модель двумерного нестационарного течения сжимаемого газа в цилиндре ДВС, провести расчетное и экспериментальное тестирование предложенной модели;
2. выполнить расчетное исследование процессов газообмена сжатия и смесеобразования в четырехтактном газовом двигателе с непосредственным впрыском;
3. провести анализ путей конструктивного обеспечения послойного смесеобразования в газовом двигателе в широком диапазоне рабочих режимов.

Научная новизна. Получены новые данные о газодинамических процессах происходящих в четырёхтактном газовом двигателе с послойным смесеобразованием.

Разработана и реализована с помощью метода крупных частиц математическая модель двумерного нестационарного течения рабочего тела в цилиндре ДВС на тактах выпуска, наполнения, сжатия и смесеобразования.

Практическая значимость. Даны практические рекомендации для проектирования газовых двигателей с послойным смесеобразованием, по конфигурации камеры сгорания, расположению свечи зажигания и форсунки, по давлению впрыска, по опережению и продолжительности впрыска газа.

Апробация работы. Основные положения работы были представлены на XIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и теплообмена в энергетических установках», а также на научно – технических конференциях студентов и аспирантов С-ПбГТУ в 1997, 1998, 1999 годах.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 статей и докладов.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, 4-х разделов, заключения, список литературы включает 83 наименований, содержит 165 машинописные страницы основного текста, 36 рисунков.

## II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, определяется предмет и цели исследования.

В первой главе приведен анализ существующих методов моделирования газодинамических процессов в цилиндре двигателя.

1) Моделирование течения в цилиндре в квазистационарной постановке задачи (термодинамический расчет). В основе квазистационарных методов расчета газообмена используются интегральные уравнения законов сохранения энергии и массы и уравнение состояния потока газов в элементах газоздушного тракта двигателя.

2) Моделирование нестационарных одномерных потоков газа с источниками и стоками. Стоки имитируют истечение газа из цилиндра, а источники – поступление газа в цилиндр. Смешение потоков и обмен импульсом и энергией происходят только в объемах действия источников и стоков. Действие такого рода источников и стоков распространяется не на весь объем цилиндра, а только на область, примыкающую к органам впуска и выпуска. В пространстве, где они отсутствуют, имеет место послойное вытеснение.

Одномерная постановка задачи не получила существенного распространения для расчета течения в цилиндре двигателя.

3) Двух - и трехмерное течение газа. Современное состояние развития численных методов и ЭВМ позволяет ставить и решать многомерные задачи газовой динамики.

Использование математических моделей позволяет получать поля скоростей, давлений, плотностей, температур, концентраций компонентов рабочего тела. Возможна визуализация картин течения, позволяющая наблюдать отрывные и застойные зоны.

Для анализа расслоения газа впрыснутого непосредственно в цилиндр использование квазистационарных подходов не правомочно, в связи с явной нестационарностью задачи. Применение одномерной модели не позволяет получить данные по распределению газа по пространству цилиндра. Трехмерная постановка задачи требует экстремально больших затрат вычислительных ресурсов.

Во второй главе рассмотрена методика расчета газодинамических процессов в цилиндре двигателя.

На основе анализа физических особенностей исследуемых процессов и сопоставления различных путей их математического моделирования

признано целесообразным использовать нестационарную схему сквозного счета, где вычисления проводятся без предварительного выделения особенностей, поверхностей разрыва и т. п.

Одним из наиболее эффективных методов решения задач газодинамики является метод крупных частиц разработанный Ю.М. Давыдовым и О.М. Белоцерковским. Этот метод позволяет решать системы квазилинейных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих нестационарное турбулентное течение сжимаемого вязкого теплопроводного газа в пространстве с подвижными стенками, используя сравнительно малые вычислительные ресурсы.

Основная идея модифицированного метода крупных частиц состоит в расщеплении по физическим процессам исходной нестационарной системы уравнений Навье-Стокса.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu A \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho uv}{\partial x} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu A \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u E}{\partial x} + \frac{\partial \rho v E}{\partial y} + \frac{\partial p u}{\partial x} + \frac{\partial p v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu A \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) u + \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) v + \mu \frac{\partial}{\partial x} (BJ + u^2) \right\}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu A \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) u + \mu \frac{\partial}{\partial y} (BJ + v^2) \right\}$$

Среда здесь моделируется системой из крупных частиц, совпадающих в данный момент времени с ячейкой эйлеровой сетки. Метод явный.

Граничные условия ставились следующим образом. На неподвижных поверхностях соответствующих стенкам камеры сгорания и головке цилиндра – непротекание и прилипание потока, на поверхности поршня и

клапанов – подвижного непротекания, и прилипания по оси перпендикулярной направлению движения.

Важной особенностью численного моделирования реального процесса внутри цилиндра является наличие движущейся границы, соответствующей движению поршня и клапанов.

С целью сохранения консервативности расчетной схемы необходимо учитывать изменение параметров, обусловленное перемещением границы.

На основе этих принципов был разработан алгоритм расчета подвижной границы для нестационарной задачи с учетом сложной формы поршня и клапанов.

Впрыскивание топлива моделируется занесением в ячейку соответствующую соплу форсунки, массы газа, имеющей соответствующие теплофизические характеристики. Скорость рассчитывается согласно формуле истечения. Интенсивность впрыскивания определяется заданным законом подачи топлива.

Третья глава посвящена описанию расчетного и экспериментального тестирования предложенной математической модели.

Для апробации модели были проведены многоуровневые тестовые расчёты, как отдельных блоков программы, так и методики в целом.

Первоначально был протестирован предложенный алгоритм расчёта подвижной границы. Для этого был произведен расчет образования и движения ударной волны, возникающей при движении поршня в закрытой трубе. Полученные данные сравнивались с аналитическим решением данной задачи. Так, давление за ударной волной определяется из формулы для ударной адиабаты Гюгонио. Максимальное расхождение результатов 1%.



Затем был проведен расчет одномерной модели цилиндра. Математическая модель продемонстрировала устойчивость и консервативность. Показано линейное распределение скорости по оси цилиндра, что соответствует существующему аналитическому решению такой задачи, которое определяет скорость рабочего тела в цилиндре в зависимости от скорости поршня.

Вторая часть тестирования включала в себя проверку адекватности математической модели двумерного нестационарного движения вязкого газа в цилиндре двигателя

В качестве тестовой задачи был проведен расчет затопленной струи. Полученные результаты сравнивались с решением задачи о затопленной струе, полученной на кафедре аэродинамики С-ПбГТУ на базе  $k-\varepsilon$  модели с пристеночными функциями.

Результаты расчета доказали целесообразность использование в качестве моделирующих уравнений Навье-Стокса с опытным коэффициентом турбулентной вязкости одинаковым во все области.

Полученные результаты удовлетворительно совпадают с данными расчета системы уравнений с использованием двухпараметрической модели турбулентности.

На рис.1 показаны картина течения воздуха при решении задачи о затопленной струе. Линии тока показывают направление течения потока воздуха.

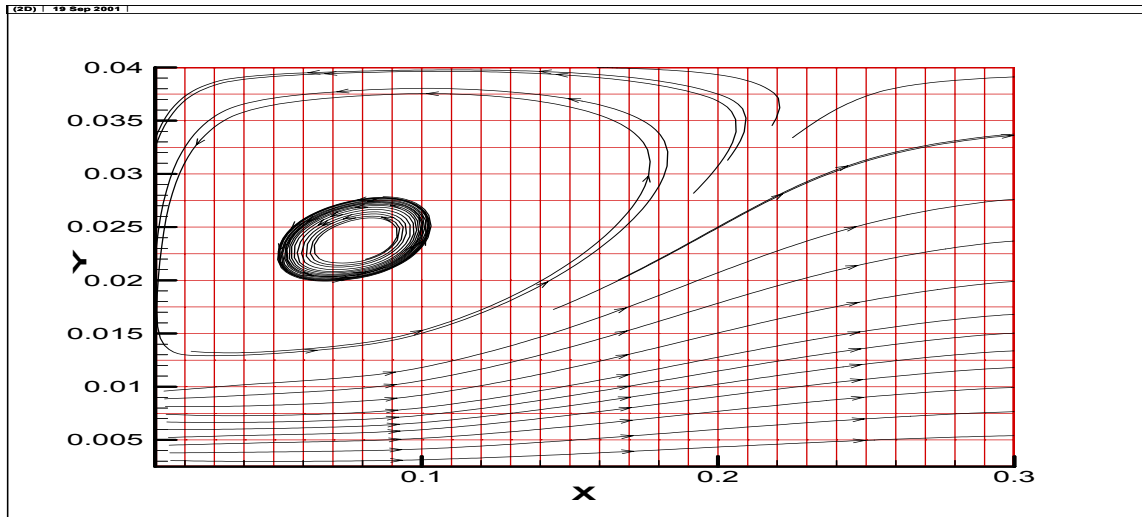


Рис.1

Для определения адекватности данной модели при расчёте течения в клапане было произведено моделирование течения в круглой трубе с местным сопротивлением в виде шайбы. В ходе расчетного эксперимента определялся коэффициент местного сопротивления, который сравнивался с экспериментальными данными приведенными в справочной литературе.

Был произведен расчет течения в трех вариантах с разными геометрическими соотношениями: расстояние между входным каналом и шайбой, перекрытие шайбой впускного канала.

Наибольшая полученная погрешность составляет 5%, что позволяет говорить о том, что результаты, получаемые при численном эксперименте, количественно совпадают с реальной картиной течения.

В заключение был проведен расчёт тактов выпуска и наполнения на модели, схематично представляющей реальный цилиндр ДВС. Данные, полученные с помощью предлагаемого метода, практически совпали с результатами моделирования той же задачи с помощью пакета STAR-CD, который использует  $k-\epsilon$  модель турбулентности.

Для проверки адекватности предложенной математической модели реальным газодинамическим процессам в цилиндре двигателя, был проведен натурный эксперимент. Экспериментальная установка является моделью цилиндра двухтактного двигателя, и предназначена для проведения статических продувок. Установка состоит из стеклянного цилиндра диаметром 112мм и высотой 450мм. Он установлен на ресивер с впускными окнами, куда нагнетается воздух, сверху закрыт крышкой, имитирующей выпускной коллектор, в которой закреплен выпускной клапан. В стенке цилиндра просверлены пять отверстий. В каждой из них, с помощью шарового зонда, производился замер давления и скорости потока в шести точках по радиусу: около стенки цилиндра и в пяти точках через 10мм до центра. Замеры производились при различном перекрытии впускных окон и высоте подъёма выпускного клапана. Для каждого варианта было проведено численное моделирование и сопоставление экспериментальных данных с результатами расчетов давления и скорости потока в соответствующих точках.

Полученные результаты расчетов качественно и количественно совпадают с данными экспериментальной продувки, что подтверждает работоспособность предложенной математической модели.

В четвертой главе описано расчетное исследование процессов расщепления топливовоздушной смеси в цилиндре двигателя.

В качестве объекта исследования был выбран четырехтактный двигатель с принудительным воспламенением размерностью  $S/D$  9,2 / 9,2 см.

Анализ качества протекания внутрицилиндровых процессов оценивался на основе анализа пространственного распределения и динамики изменения расчетных полей давления, плотности, температуры, скоростей рабочего тела и концентраций составляющих его компонент.

Обеспечение гарантированного зажигания при применении непосредственного впрыска газа в цилиндр двигателя с плоским поршнем возможно лишь в случае максимальной подачи и при опережении, соответствующем началу процесса сжатия. За длительный временной интервал, соответствующий периоду сжатия, топливно-воздушная смесь становится гомогенной и успешно воспламеняется. С уменьшением цикловой подачи коэффициент избытка воздуха увеличивается, что приведет к пропускам вспышек или даже полному отсутствию воспламенения на частичных режимах.

Для расслоения впрыснутого газа необходимо организовать движение воздушного заряда, таким образом, чтобы воздушный вихрь увлекал за собой газ и перемещал его в зону свечи зажигания, образуя там обогащенную смесь. Достичь данного эффекта возможно только при помощи правильной конфигурации днища поршня и головки цилиндров.

Для выполнения поставленной задачи было проведено расчетное исследование влияния различных конструктивных и режимных факторов на показатели качества смесеобразования.

Были проанализированы несколько вариантов камер сгорания: плоская, с симметричной и асимметричной полостями, с наличием и отсутствием конусности. Исследовались вихревое движение воздуха, скорости движения потока свежего заряда, зоны распространения вихря, продолжительность его существования.

Рассматривались различные конструктивные решения для расположения свечи зажигания и форсунки. Угол наклона форсунки согласовывался с характером течения воздуха.

По результатам этих исследований была предложена камера сгорания, представленная на рис. 2.

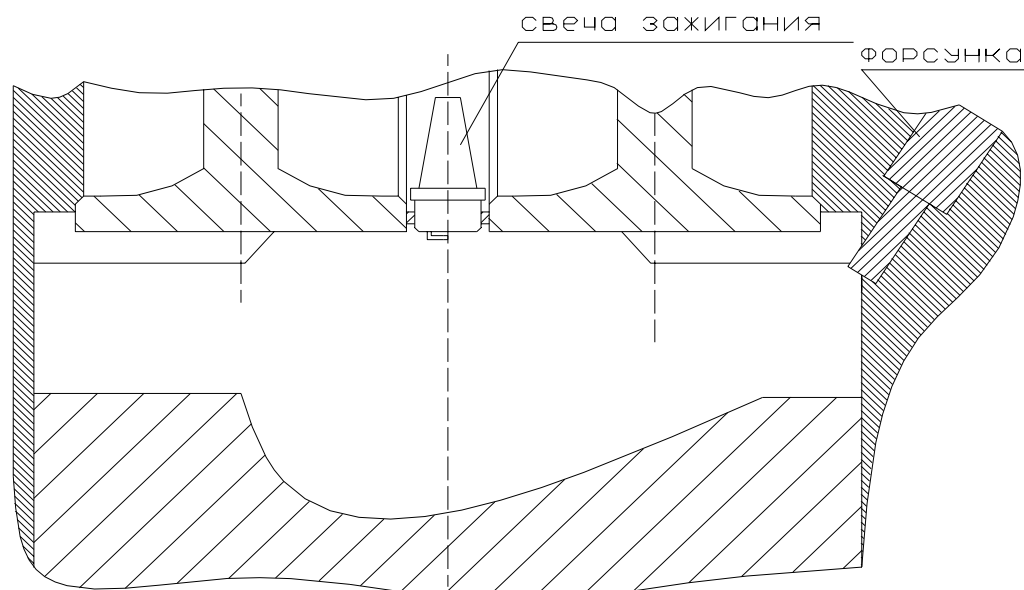


Рис.2

Особенностью данной камеры является наличие полости в районе свечи зажигания. Она образована профилированным днищем поршня. Вихрь свежего заряда, возникший в процессе впуска, сохраняется в течение всего процесса сжатия. Это позволяет использовать его энергию для перемещения топлива в район свечи зажигания. Кроме того, в процессе смесеобразования участвует лишь тот воздух, что находится в этой полости. В результате становится возможным уменьшить цикловую подачу, при сохранении воспламеняемого состава смеси в зоне свечи. Еще одной важной особенностью является практически полное отсутствие топлива возле стенок гильзы цилиндра, что улучшит экологические показатели двигателя, за счет снижения уровня выброса СН, в связи с отсутствием обрыва цепной реакции сгорания на стенках гильзы.

Для предложенной камеры сгорания было проведено численное исследование процесса расслоения впрыснутого газа.

Основная задача проведенного исследования - добиться расслоения впрыснутого топлива на всех эксплуатационных режимах, которое обеспечит гарантированное воспламенение топливно-воздушной смеси.

Критериями качества расслоения топлива, являются коэффициент избытка воздуха в районе свечи зажигания, в момент подачи искры и распределение топлива по объёму камеры сгорания. Необходимо чтобы локальный коэффициент избытка воздуха находился в диапазоне 0,8-1,3, что соответствует максимальной скорости сгорания газа. Кроме того, газ должен быть распределен по пространству таким образом, чтобы не было зон с переобогащенной или очень бедной смесью.

Установлено, что изменение давления впрыска приводит к изменению интенсивности впрыска, и следовательно влияет на концентрацию ядра заряда топлива. При разработке системы топливоподдачи, необходимо стремиться к минимизации давления впрыска, для более эффективного использования объёма баллона и уменьшения затрат энергии на создание давления впрыска.

Для рассматриваемой конструкции двигателя было найдено минимальное давление впрыска 2,9 МПа, которое обеспечивает требуемый локальный коэффициент избытка воздуха при минимальной цикловой подаче.

Одним из самых важных факторов, влияющих на картину распределения топлива, является угол опережения впрыска. Для его расчета необходимо согласовать угол опережения зажигания, цикловую подачу, скоростной режим. На малых цикловых подачах отклонение от оптимального значения всего на один градус ПКВ может привести к увеличению локального коэффициента избытка воздуха выше допустимого уровня.

Зависимость угла опережения впрыска от коэффициента избытка воздуха на различных скоростных режимах

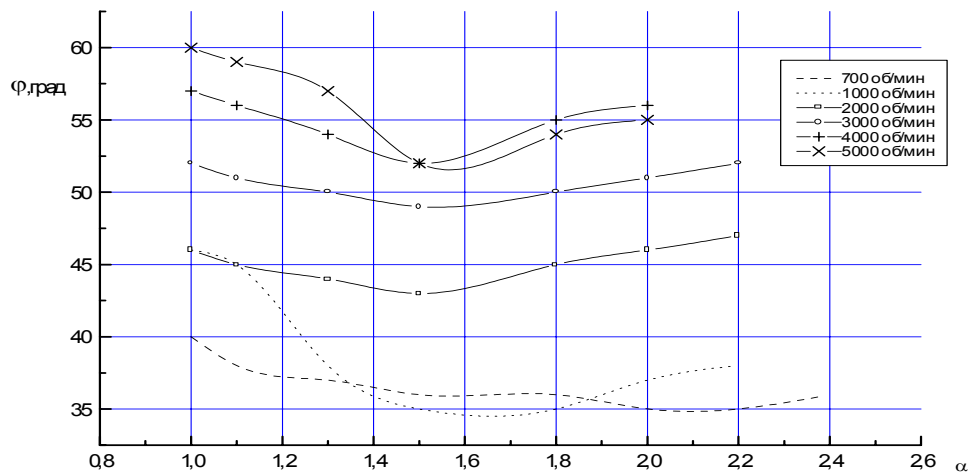
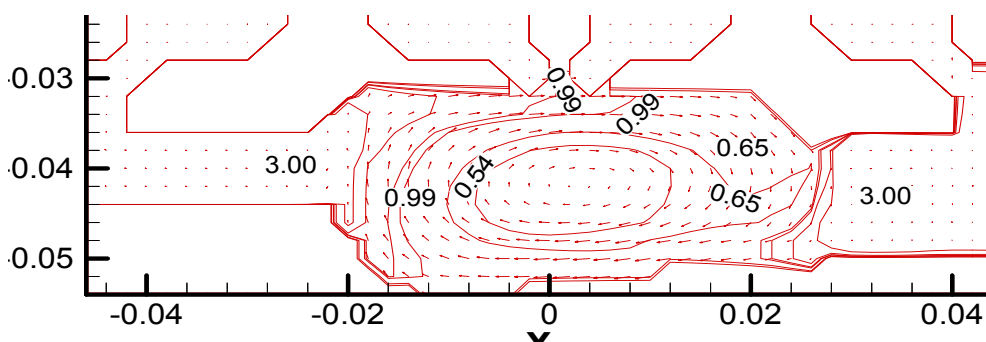


Рис.3

Зависимость угла опережения впрыска от коэффициента избытка воздуха на различных скоростных режимах носит нелинейный характер. Это обусловлено изменением концентрационных полей топливного заряда в зависимости от цикловой подачи. Приведенная зависимость может использоваться как алгоритм для системы управления двигателем.

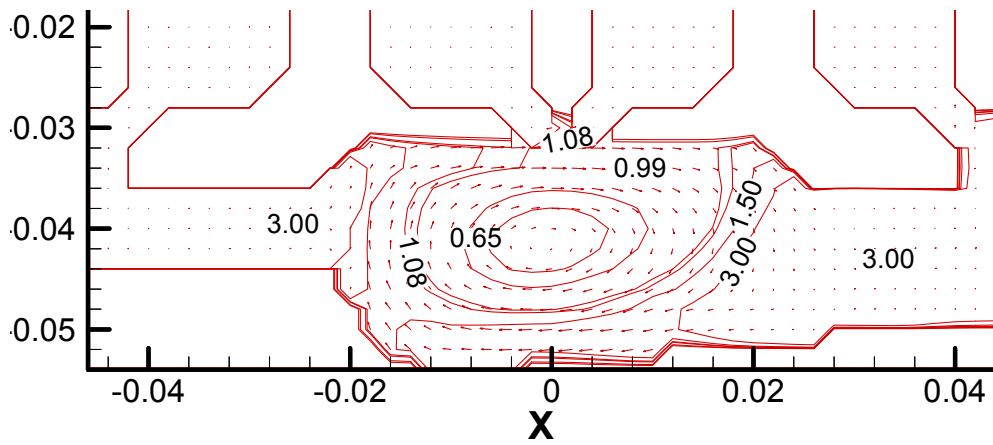
На рис.4-6 приведены распределения коэффициента воздуха по объёму камеры сгорания при различных цикловых подачах, опережение впрыска соответствует рис.3 при 4000 об/мин.

На рис.7 представлено поле, в случае если угол опережения отличается от оптимального. Видно, что в этом случае локальный коэффициент избытка воздуха выше допустимого.



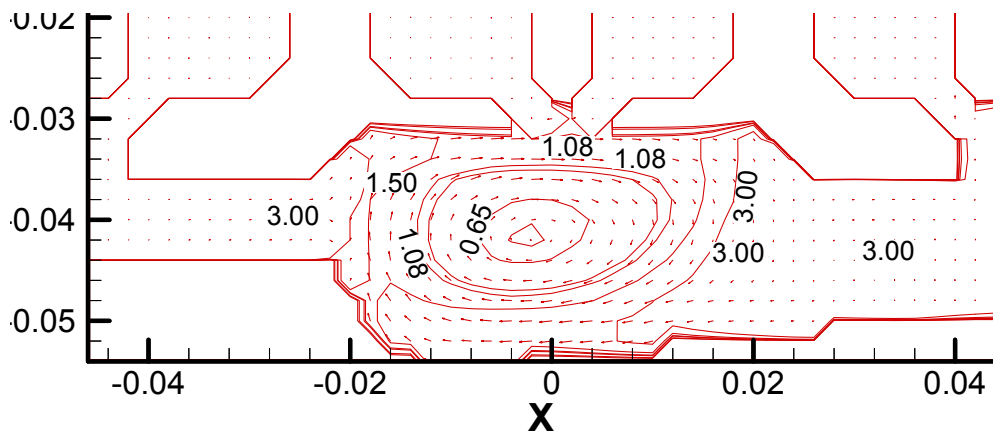
суммарный коэффициент избытка воздуха 1,0

рис.4



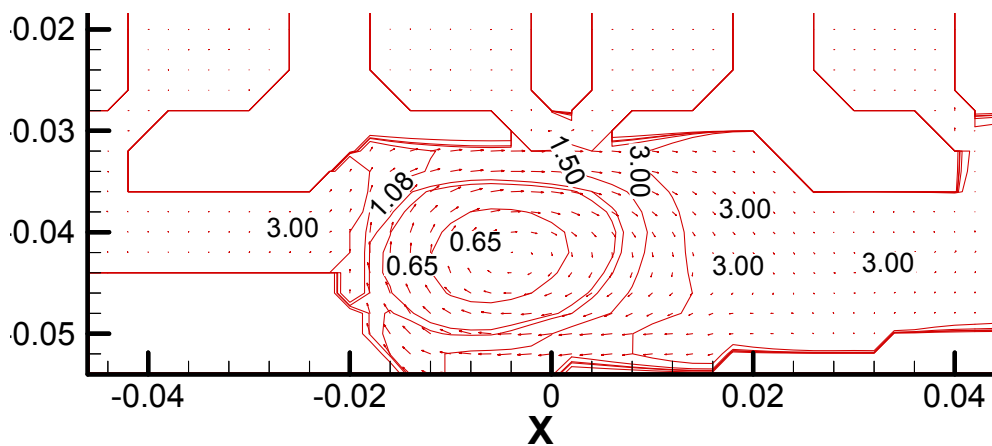
суммарный коэффициент избытка воздуха 1,5

рис.5



оптимальный угол опережения впрыска,  $\alpha_{\text{сум}}=2,0$

рис.6



неоптимальный угол опережения впрыска,  $\alpha_{\text{сум}}=2,0$

рис.7



По результатам исследования была предложена камера сгорания, обеспечивающая расслоение заряда в большом диапазоне эксплуатационных режимов, и алгоритм управления системами впрыска и зажигания.

### III. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработанная математическая модель, её алгоритмическое и программное обеспечение для расчета двумерного нестационарного течения сжимаемого газа в цилиндре ДВС на тактах выпуска, наполнения, сжатия и непосредственного впрыска газа, позволяет описывать развитие во времени пространственной структуры внутрицилиндровых течений рабочего тела, которая характеризуется динамикой изменения полей распределения давления, плотности, температуры, скоростей и концентраций составляющих его компонентов.

2. На основе проведенного всестороннего тестирования расчетной методики подтверждена возможность качественного и количественного моделирования газодинамических процессов в цилиндре двигателя с различной конфигурацией камеры сгорания.

3. Результаты численного эксперимента позволили проанализировать взаимодействие между основными процессами в камере сгорания и поиске практических путей совершенствования рабочего процесса. Установлено влияние формы камеры сгорания и параметров впрыска газа на концентрационные поля газовой смеси. Показана возможность организации послойного смесеобразования при непосредственном впрыске газа в цилиндр двигателя с искровым зажиганием.

4. Для двигателя размерностью 92/92 мм подобрана форма камеры сгорания, расположение форсунки, закон подачи газа, обеспечивающие

послойное смесеобразование и воспламенение газовой смеси в широком диапазоне частот и нагрузок при изменении суммарного коэффициента избытка воздуха от 0,9 до 2,3.

Публикации по теме диссертации:

1) Чернышёв В.С., Влияние конструкции впускных и выпускных систем на характеристики газообмена и показатели работы автомобильного двигателя. Научно – техническая конференция студентов и аспирантов: XXV неделя науки С-ПбГТУ– С-Пб.: С-ПбГТУ, 1996. – 289 с.

2) Чернышёв В.С., Исаков Ю.Н., Постановка задачи расчета пространственного течения в цилиндре двигателя. Научно – техническая конференция студентов и аспирантов: XXVI неделя науки С-ПбГТУ– С-Пб.: С-ПбГТУ, 1997. – 327с

3) Чернышёв В.С., Исаков Ю.Н., Влияние формы камеры сгорания на характер движения воздушного заряда. Научно – техническая конференция студентов и аспирантов: XXVII неделя науки С-ПбГТУ– С-Пб.: С-ПбГТУ, 1998. – 312с

4) Чернышёв В.С., Бравин В.В., Исаков Ю.Н., Расчёт скорости газа в цилиндре с движущимся поршнем. Научно – техническая конференция студентов и аспирантов: XXVIII неделя науки С-ПбГТУ– С-Пб.: С-ПбГТУ, 1999. – 343с

5) Галышев Ю.В., Бравин В.В., Чернышёв В.С., Численное моделирование процессов газообмена в поршневых двигателях внутреннего сгорания. Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Труды XIII Школы - семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. Том 2. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 540 с.