

На правах рукописи

ТЮНИН АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ



**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА
В ПОЛОСТИ ВПУСКНОГО КАНАЛА
ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Специальность 05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор
Шапошников Юрий Андреевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Пышнограй Григорий Владимирович
доктор физико-математических наук,
профессор
Алтухов Юрий Александрович

Ведущая организация: Институт конструкторско-технологической
информатики РАН, г. Москва

Защита состоится «26» февраля 2010 г. в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.005.04 в ГОУ ВПО «Алтайский государственный университет» по адресу: 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного университета по адресу: 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

Автореферат разослан «25» января 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д. ф.-м. н., профессор



С.А. Безносюк

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Двигателестроение относится к одной из наиболее науко- и капиталоемких отраслей машиностроения. Создание новых и модернизация существующих двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является актуальной проблемой, необходимость решения которой обусловлена тенденцией роста требований к их характеристикам, а именно: повышение удельной мощности, улучшение экономических и экологических показателей, а также снижение материальных затрат при проектировании.

Успешное решение указанных проблем в значительной степени зависит от понимания процессов, протекающих в двигателе, и от возможной точности их прогнозирования и расчета с использованием математических методов.

Газодинамические процессы в проточных частях двигателя характеризуются сложным трехмерным, а во многих случаях и нестационарным течением рабочего тела, связанным как с геометрией проточной части, так и с особенностями компоновки и рабочего процесса двигателя.

В традиционной методике проектирования значительную долю (до 30-50% общих затрат) составляют затраты на экспериментально-доводочные исследования и испытания, а также на устранение выявленных в результате испытаний дефектов. Поэтому задача автоматизации процесса проектирования, включающая задачу углубленных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований сложных физических явлений, имеющих место во впускном канале двигателя, приобретает особую актуальность.

Степень изученности темы исследования. Моделирование течений в каналах основывается, главным образом, на решении уравнений Навье-Стокса и Рейнольдса. Разработка новых разностных алгоритмов для численного интегрирования этих уравнений стимулируется, с одной стороны, возрастающими требованиями к точности численных расчетов, а с другой стороны, необходимостью проведения расчетов во всем проточном тракте за

приемлемое время. Использование неравномерных сеток с малыми пространственными шагами ставит проблему создания неявных разностных схем с большим запасом устойчивости и эффективной разрешимостью, сопоставимой с явными алгоритмами. Необходимость проведения многовариантных расчетов диктует высокие требования к быстродействию алгоритмов и экономичному расходованию памяти компьютерной системы. Немаловажным аспектом является универсальность численного метода, то есть его применимость для широкого класса задач.

Из основополагающих работ по исследованию и моделированию газодинамических процессов в ДВС следует отметить труды Р.З. Кавтарадзе, В.Г. Зубкова, Н.Р. Брилинга, Б.Х. Драганова, А.С. Орлина.

Значительная часть работ, в которых применяются вычислительные методы, посвящена исследованию процессов динамики и теплообмена в областях достаточно простой формы (прямоугольной, цилиндрической и т.п.). Такие задачи имеют определенное прикладное значение и обычно являются тестовыми для проверки работоспособности новых математических моделей. Однако реальная геометрия каналов, встречающихся на практике, далеко не всегда имеет простую форму.

Особый практический интерес представляют каналы, имеющие нерегулярную криволинейную границу (диффузоры, волновые и винтовые каналы). Ранее расчеты подобных каналов проводились с использованием криволинейных координат и расчетных сеток, адаптированных к границам области течения. Однако задача построения криволинейной сетки сама по себе является достаточно сложной.

Таким образом, можно утверждать, что математическое моделирование газодинамических процессов в областях сложной конфигурации, которому посвящена настоящая работа, является актуальным направлением современной гидродинамики.

В настоящей работе использованы фундаментальные подходы в области автоматизированного проектирования И.П. Норенкова, И. Сазерленда,

В.А. Осипова, М. Принса, А.И. Половинкина, Ю.М. Соломенцева, а также результаты теоретических, экспериментальных и численных исследований газодинамических процессов в областях сложной конфигурации М.Г. Круглова, Д.Д. Матиевского, С.Г. Черного, К.Г. Белоконь, А.М. Бубенчикова, Ю.А. Гришина, В.А. Лашко, Л.А. Васильева, Г.Г. Черных, Б. Лаундера, Д. Сполдинга, Д. Андерсона, Р. Плетчера и других отечественных и зарубежных ученых.

Выявленные проблемы инженерного анализа рассматриваемых технических объектов определили необходимость разработки методики и средств поддержки вычислительного эксперимента при проектировании впускных каналов ДВС. Это позволило сформулировать цель работы и поставить научную задачу.

Целью работы является разработка инженерной методики численного моделирования течения газа в полости впускного канала двигателя внутреннего сгорания.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

- исследование существующих средств и методов моделирования газодинамических процессов в областях произвольной конфигурации;
- построение математической модели турбулентного движения газового потока во впускном канале ДВС;
- разработка алгоритма расчета потерь давления в канале на основе вычислительного эксперимента;
- проведение серии вычислительных экспериментов на основе разработанной математической модели;
- исследование адекватности математической модели путем сравнения с данными, полученными в результате промышленных испытаний;
- модификация инженерной методики проведения газодинамических испытаний впускных каналов ДВС на основе разработанной математической модели.

Положения, выносимые на защиту:

– построение математической модели, описывающей газодинамические процессы во впускном канале ДВС, на базе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса для вязкого несжимаемого газа;

– рекомендации по конструированию расчетной сетки и выбору моделей турбулентности, подходящих для расчета течения во впускном канале винтового типа;

– методика проведения и результаты численного моделирования турбулентного течения вязкого несжимаемого газа в полости впускного канала.

Предметом исследования является впускной канал головки цилиндров дизеля Д-448 производства ОАО «ПО «Алтайский моторный завод»», локальные и интегральные газодинамические характеристики потока.

Методы исследования. В работе используется математическое моделирование газодинамических процессов, методы численного решения дифференциальных уравнений в частных производных и систем нелинейных дифференциальных уравнений. Общей методологической основой исследования является системный подход.

Научная новизна. На основании анализа доминирования факторов моделирования течения газа в полости впускного канала ДВС разработана новая вычислительная технология исследования газодинамических процессов в каналах сложных геометрических форм, позволяющая обосновывать выбор конструктивных параметров при проектировании проточных трактов ДВС, а также применять ее при решении технических проблем, связанных с исследованием широкого класса пространственных турбулентных сложных течений газа.

Обоснованы рекомендации по конструированию расчетной сетки, обеспечивающие достижение приемлемой для инженерных целей точности расчетов.

Практическая ценность. Показано, что корректное численное моделирование стационарного турбулентного течения газа во впускном канале

двигателя внутреннего сгорания по точности определения локальных и интегральных характеристик не уступает экспериментальным данным. Тем самым обоснована возможность существенного сокращения затрат на экспериментальную доводку новых моделей каналов. Результаты и методика численного моделирования могут использоваться для решения задач оптимизации геометрической формы впускных каналов.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается корректностью постановок рассматриваемых задач, использованием апробированных вычислительных алгоритмов и расчетных схем, а также соответствием расчетов экспериментальным данным, полученным на испытательной установке.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации обсуждались на юбилейной 60-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава (Барнаул, 2002 г.), научно-технической конференции молодых преподавателей, аспирантов, студентов (Барнаул, 2004 г.), научно-технической конференции «Повышение качества продукции и эффективности производства» (Курган, 2006 г.), всероссийской научно-методической конференции «Математическое образование в регионах России» (Барнаул, 2008 г.),

Отдельные разделы работы докладывались на заседаниях кафедр «Автомобили и автомобильное хозяйство» и «Системы автоматизированного проектирования» Алтайского государственного технического университета, на кафедре вычислительной математики и программирования Алтайской государственной педагогической академии.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе одна работа в издании, рекомендованном ВАК России.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 143 наименования. Работа изложена на 138 страницах текста, включает 24 рисунка и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы. Дана характеристика состояния проблемы, поставлены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая ценность результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приводится анализ научно-технической литературы, посвященной методам экспериментального и численного исследования газодинамических процессов в каналах сложных геометрических форм.

При проектировании впускных каналов основной задачей является получение газодинамических характеристик потока рабочего тела, обеспечивающих удовлетворительную наполняемость цилиндров двигателя во всем рабочем диапазоне последнего. Это достигается соответствующим выбором геометрии элементов проточной части канала.

Физический эксперимент является важным источником информации об особенностях течений газа во впускном канале. Однако исследования такого рода становятся все более затруднительными, дорогостоящими, а иногда и просто невозможными. Получаемая в ходе эксперимента информация далеко не всегда обладает достаточной полнотой. В связи с этим в настоящее время в инженерной практике возрастает роль численного моделирования.

Численное моделирование течений газа в проточных частях ДВС позволяет детально исследовать характеристики потока в любой его точке, а также определять величины гидродинамических потерь, связанных с образованием пограничных слоев, возникновением отрывных зон и т.д. Кроме того, последовательно и целенаправленно видоизменяя форму канала в процессе численного эксперимента, можно найти такую его конфигурацию, которая в наибольшей степени будет отвечать предъявляемым требованиям.

Проведенный анализ предметной области позволил сформулировать цели и задачи исследования.

Во **второй главе** описана математическая постановка задачи, которая

включает систему осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса для случая турбулентного трехмерного течения вязкого несжимаемого газа.

Прежде всего, отмечается, что характер потока в канале зависит от его конструкции. На структуру потока в канале влияет также неравномерность поля скорости на входе в канал, нестационарность течения, форма клапана.

Во впускных каналах возможны три варианта течения. Первый вариант течения – безотрывный – наблюдается в каналах с гидродинамически целесообразной формой проточной части. Безотрывное течение возможно во впускных каналах при малых подъемах клапана. Предположение о безотрывном течении является условным, так как в любом случае поток отрывается от стержня клапана или от выступа направляющей клапана.

Для второго варианта течения характерно наличие у стенок канала локализованных областей отрыва пограничного слоя. В основном имеет место режим трехмерного нестационарного отрыва, отличающегося изменением во времени интенсивности и положения зоны отрыва.

Третий вариант течения отличается наличием в потоке проникающих отрывов. Такое течение наблюдается во впускных каналах при относительно больших величинах открытия клапана. Отрыв потока от стенок приводит к тому, что часть периметра клапанной щели оказывается вне основного потока. В этой части клапанной щели происходит обратное течение из цилиндра в канал. При открытии клапана происходит струйный отрыв, т.е. отрыв потока от выпуклой и вогнутой поверхностей канала и от поверхности седла клапана.

Таким образом, течение в каналах имеет ярко выраженный пространственный характер, поэтому корректное описание течения газа во впускном канале возможно только с привлечением модели, опирающейся на систему трехмерных уравнений Навье-Стокса.

Принято считать, что уравнения Навье-Стокса полностью описывают турбулентные явления, происходящие в потоке газа. Однако для реализации такой возможности при численном моделировании необходима чрезвычайно

мелкая сетка, достаточная для разрешения турбулентных вихрей наименьших масштабов. Вследствие этого прямое численное моделирование турбулентности для задач, имеющих практический интерес, в настоящее время не представляется возможным.

Одним из способов исключения локальных мелкомасштабных пульсаций в уравнениях Навье-Стокса является осреднение по времени. Метод осреднения по правилам Рейнольдса предполагает запись уравнений переноса осредненного по времени потока со всеми предполагаемыми масштабами турбулентности. Такой подход значительно уменьшает вычислительные ресурсы, необходимые для решения численной задачи. В том случае, если осредненный поток является стационарным, то основные уравнения не содержат производных по времени и установившееся решение получается более экономичным.

В декартовой системе координат (x_1, x_2, x_3) осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса с замыканием по гипотезе Буссинеска в случае несжимаемого газа и изотермического процесса записываются в виде:

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0;$$

– уравнения движения для трех проекций:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(p + \frac{2}{3} k \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} v_e),$$

где

$$\tau_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}; \quad v_e = \nu + \nu_t;$$

u_i – осредненные компоненты вектора скорости; p – осредненное давление;

k – кинетическая энергия турбулентности; ν – кинематическая вязкость;

ν_t – турбулентная вязкость.

При осреднении по времени, в уравнениях Навье-Стокса появляются новые члены, которые можно интерпретировать как градиенты «кажущихся»

(рейнольдсовых) напряжений, связанных с турбулентным движением. Полученная система уравнений оказывается незамкнутой, поэтому с помощью дополнительных гипотез, называемых моделями турбулентности, необходимо связать рейнольдсовые напряжения с характеристиками турбулентного течения.

В данной работе для моделирования турбулентности применяются двухпараметрические модели семейства k - ε – «RNG» и «Standard».

В стандартной («Standard») k - ε -модели турбулентная кинетическая энергия находится из уравнения:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k u_j - \nu_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = G - \varepsilon - \frac{2\nu k}{y^2},$$

где ε – скорость диссипации турбулентности, y – расстояние до ближайшей твердой стенки;

$$\nu_k = \nu + \nu_t; \nu_t = C_\mu l_v \frac{k^{1/2}}{\varepsilon}; \varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l_\varepsilon}; G = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j};$$

$$l_v = C_l y \left(1 - \exp\left(-\frac{k^{1/2} y}{A_v \nu}\right) \right); l_\varepsilon = C_l y \left(1 - \exp\left(-\frac{k^{1/2} y}{A_\varepsilon \nu}\right) \right).$$

Скорость диссипации турбулентной кинетической энергии определяется из уравнения переноса:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\varepsilon u_j - \nu_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k},$$

где

$$\nu_\varepsilon = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}.$$

Эмпирические константы в приведенных выше уравнениях равны:

$$C_\mu = 0,09, C_{\varepsilon 1} = 1,45, C_{\varepsilon 2} = 1,92, C_l = 0,42 C_\mu^{-3/4},$$

$$A_\varepsilon = 2C_l, A_v = 70, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1,3.$$

В модели «RNG» параметры турбулентности вычисляются из следую-

щих уравнений:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k u_j - v_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = G - \varepsilon;$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\varepsilon u_j - v_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = C_{\varepsilon 1}^* \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k},$$

где

$$v_k = v + \frac{v_t}{\sigma_k}; v_\varepsilon = v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon}, v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; G = v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j};$$

$$C_{\varepsilon 1}^* = C_{\varepsilon 1} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}; \eta = \sqrt{\frac{G}{C_\mu \varepsilon}}.$$

Эмпирические константы в данной модели следующие:

$$C_\mu = 0,085, C_{\varepsilon 1} = 1,42, C_{\varepsilon 2} = 1,68, \sigma_k = 0,719,$$

$$\sigma_\varepsilon = 0,719, \eta_0 = 4,38, \beta = 0,012.$$

Для дискретизации исходных уравнений в работе применяется метод конечных объемов (МКО). Одним из важных свойств МКО является то, что в нем заложено точное интегральное сохранение таких величин, как масса, количество движения и энергия на любой группе конечных объемов и, следовательно, на всей расчетной области. Это свойство проявляется при любом числе узловых точек, а не только в предельном случае большого их числа. Таким образом, даже решение на грубой сетке удовлетворяет точным интегральным балансам.

Численное решение системы уравнений проводится на разнесенной сетке (см. рис. 1). Это означает, что различные зависимые переменные определяются в разных точках сетки.

На рис. 1 видно, что давление определяется в центре ячейки, а компоненты скорости – на границах. Такая процедура делает сетку удобной для проведения дискретизации по методу конечных объемов.

Для решения системы дискретизированных уравнений в данной работе применяется итерационный алгоритм SIMPLE. Основная идея SIMPLE-

подобных алгоритмов заключается в том, что для расчета давления используется разностное уравнение, полученное из дискретных аналогов уравнений количества движения и неразрывности. Градиент давления определяется по значениям давления в двух соседних узлах, что позволяет избежать рассогласования полей скорости и давления.

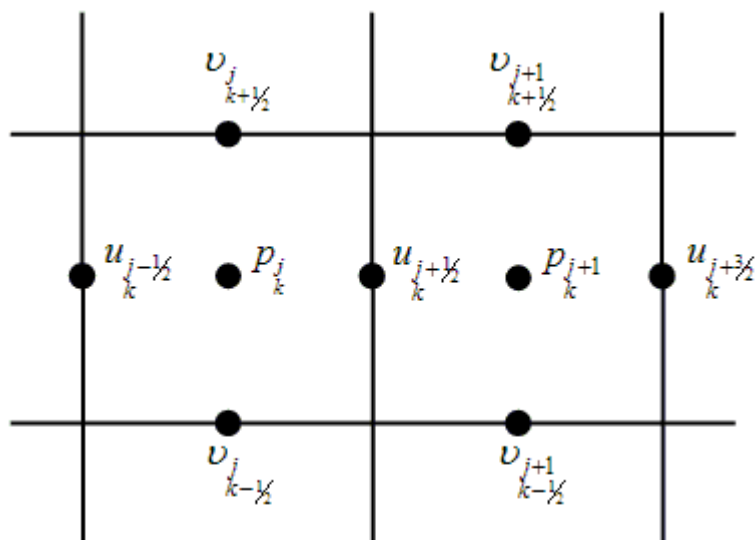


Рис. 1. Разнесенная расчетная сетка

В **третьей главе** приводится описание методики газодинамических испытаний впускного тракта 43/91, применяемой на ОАО «Производственное объединение “Алтайский моторный завод”» (ОАО «ПО АМЗ»). Данная методика распространяется на головки цилиндров всех типов двигателей, выпускаемых ОАО «ПО АМЗ» и устанавливает программу и методы сравнительных, контрольных и доводочных испытаний впускных и выпускных каналов на безмоторном стенде.

При испытании объектов методика позволяет определять следующие параметры:

- сопротивление объекта испытаний (потеря давления на исследуемом участке) в зависимости от расхода воздуха и подъема клапана;
- момент количества движения воздушного заряда.

Перечисленные параметры определяются путем прямых измерений потерь давления на требуемом участке и замером реактивного момента на

спрямляющей решетке. Все измерения проводятся при установившемся режиме.

Показаны основные недостатки, присущие экспериментальным методам исследования в общем и методике 43/91 в частности.

Приводится методика построения твердотельной модели объекта исследования, включающей впускной патрубков, впускной канал, клапан и камеру сгорания (см. рис. 2).

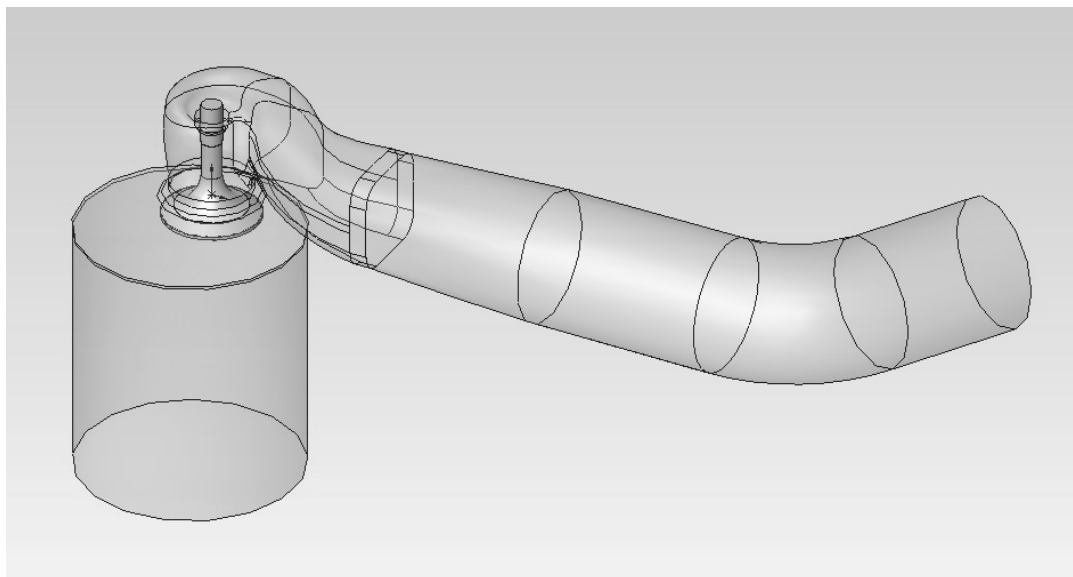


Рис. 2. Твердотельная модель объекта исследования

Показано, что общие принципы автоматизации проектирования поверхностей изделий в машиностроении предусматривают комплексный подход, заключающийся в том, что процессы проектирования, воспроизведения экспериментальных образцов и их испытания, а также изготовление изделий серийного производства должны базироваться на единой математической модели.

На практике, при геометрическом профилировании канала, используется график изменения площадей поперечных сечений. Существует семейство графиков площадей поперечных сечений каналов, соответствующих различным значениям величины подъема клапана.

Одним из основных преимуществ автоматизированного способа проектирования каналов ДВС является возможность моделирования непрерывных

семейств поперечных сечений и продольных направляющих, и получения информации о любом их количестве в виде таблиц координат или чертежей шаблонов.

Рассмотрена проблема построения расчетных сеток, которая является ключевой с точки зрения практического применения методов численного расчета течений газа.

По результатам серии тестовых расчетов сформулированы следующие рекомендации по построению расчетной сетки:

- следует избегать ячеек, вытянутых в направлении градиента рассчитываемого параметра;

- не следует допускать сильной скошенности ячеек (углы, образованные сеточными линиями, должны отличаться от прямых не более чем на 45°);

- разница между длинами сторон соседних ячеек – не более 25%;

- необходимо сгущение сетки в области клапана и клапанной щели, как минимум с коэффициентом 0,25;

- для корректного описания пристеночных слоев необходимо существенное сгущение узлов расчетной сетки к поверхности. Чтобы снизить погрешность вычислений, в этой области рекомендуется строить сетку с прямоугольными ячейками.

Дополнительно приводятся рекомендации, касающиеся размерности расчетной сетки:

- на сетках малой размерности (менее 50000 ячеек) значения коэффициента потерь давления в канале сильно завышены. Это, видимо, связано с недостаточной точностью расчета пограничного слоя и участка течения в клапанной щели;

- при использовании сеток большой размерности (более 250000 ячеек) в рамках стационарной постановки не удалось свести итерационный процесс к решению.

Проведена серия расчетов трехмерного течения во впускном канале при различных высотах поднятия впускного клапана, получены следующие ре-

зультаты:

1) построены картины течения газа во внутренней полости впускного канала и на выходе из него;

2) рассчитаны основные характеристики потока (распределение давления, скорости, турбулентности и т.д.).

В расчетах использовалась сетка размерностью около 155000 ячеек (в зависимости от высоты поднятия клапана). При этом время расчета одного варианта на компьютере на базе процессора, работающего на частоте 1,8 ГГц, с оперативной памятью 2 Гб составляло порядка 40 минут.

Проводилось сравнение расчетного перепада давления в канале со значениями, полученными на реальной установке (см. рис. 3).

Погрешность рассчитывалась по следующей формуле:

$$\Delta P^* = \frac{|\Delta P_{\text{экс}} - \Delta P_{\text{расч}}|}{|\Delta P_{\text{экс}}|} \times 100\% .$$

Результаты расчетов приведены в таблицах 1 и 2, а также на рис. 3.

В таблицах 1 и 2 приняты следующие обозначения: Н – высота поднятия клапана, $P_{\text{вх}}$ – давление на входе в канал, $P_{\text{вых}}$ – давление на выходе из канала, $\Delta P_{\text{расч}}$ – перепад давления в канале (расчетное значение), $\Delta P_{\text{экс}}$ – перепад давления в канале (экспериментальное значение).

Таблица 1

Результаты расчета (модель «Standart» $k-\varepsilon$)

Н, мм	$P_{\text{вх}}$, Па	$P_{\text{вых}}$, Па	$\Delta P_{\text{расч}}$, Па	$\Delta P_{\text{экс}}$, Па	ΔP^*
2	17978,80	6822,57	11156,23	10297,04	8,3%
4	25602,21	12950,25	12651,96	10002,83	26,5%
6	21631,93	11175,52	10456,41	9120,23	14,7%
8	18432,02	7247,7	11184,27	9806,70	14,0%
10	21330,09	11408,15	9921,94	10885,44	8,9%
12	16651,49	7523,91	9127,58	10198,97	10,5%

Результаты расчета (модель «RNG» $k-\epsilon$)

Н, мм	$P_{вх}$, Па	$P_{вых}$, Па	$\Delta P_{расч}$, Па	$\Delta P_{эксп}$, Па	ΔP^*
2	18114,34	7010,70	11103,62	10297,04	7,7%
4	24837,23	13435,48	11401,75	10002,83	14,0%
6	21512,75	11446,88	10065,87	9120,23	10,4%
8	18719,18	8578,60	10140,58	9806,70	3,4%
10	21723,84	11842,10	9881,74	10885,44	9,2%
12	16209,18	7344,35	8864,83	10198,97	13,1%

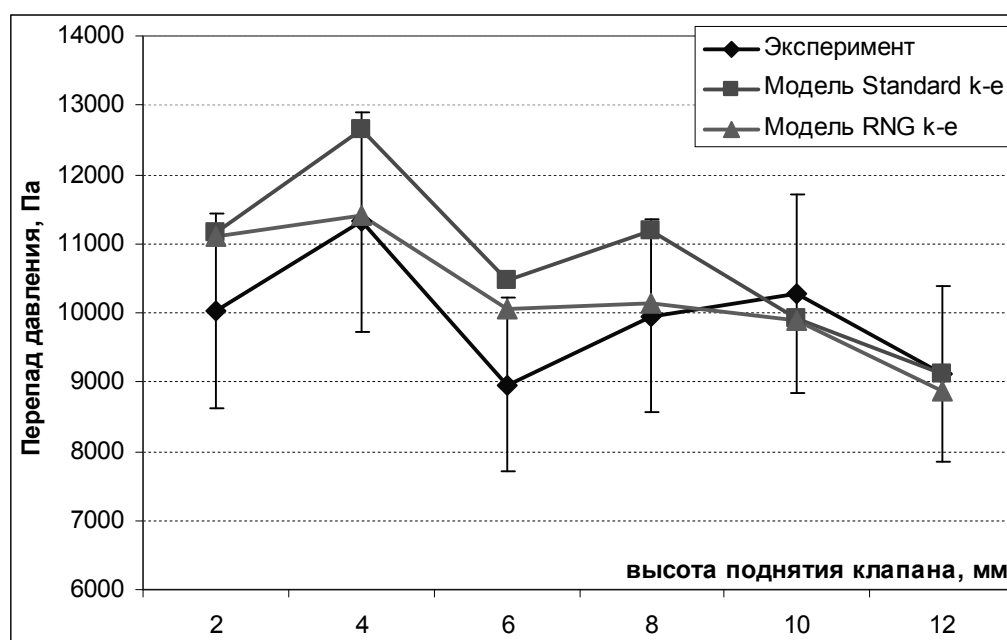


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Анализ картин течения показывает:

- отсутствие отрывных и локальных зон завихрения вдоль всего профиля канала и клапана для всех исследованных высот поднятия клапана;
- хорошее согласование геометрии канала с профилированием деталей клапанной щели, что обеспечивает равномерность распределения потока по периметру щели.

Так, в левой части рис. 4 приведен профиль скоростей в области клапанной щели, полученный на основе экспериментальных исследований. В

правой части рис. 4 изображено поле скоростей, полученное в результате расчета (высота поднятия клапана – 10 мм).

Выполненные расчеты показали приемлемую точность и надежность предлагаемого метода. Приведенные результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными.

По результатам расчетов можно сделать вывод, что использование модели турбулентности «RNG» $k-\varepsilon$ обеспечивает более высокую точность расчетов по сравнению со стандартной моделью.

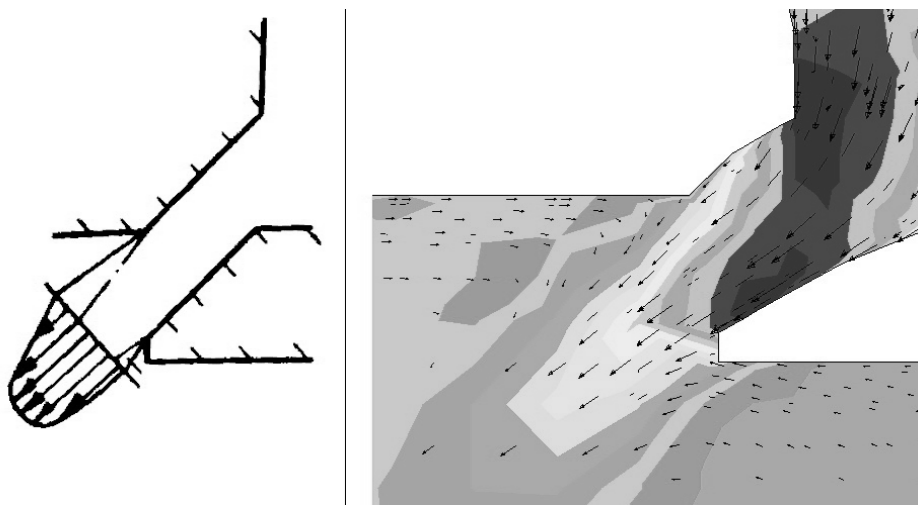


Рис. 4. Профиль скоростей в области клапанной щели впускного канала

В **четвертой главе** рассмотрены вопросы разработки инженерной методики численного исследования течений во впускных каналах на основе разработанной математической модели.

Применяя системный подход, можно считать, что двигатель представляет собой сложную систему, поэтому разработка новых перспективных дизелей сопряжена с организацией большого комплекса теоретических, опытно-конструкторских и экспериментальных работ.

Анализ технически достижимого и рационального уровня автоматизации процесса разработки дизелей позволяет наметить четыре основных направления автоматизации:

- 1) информационное обслуживание разработок;
- 2) моделирование конструкций и анализа их работы;

- 3) испытание и исследование опытных образцов;
- 4) управление разработками.

В целях продвижения на ОАО «ПО АМЗ» современных технологий проектирования впускных каналов был разработан расчетный комплекс (см. рис. 5), состоящий из нескольких взаимосвязанных частей, каждая из которых реализована посредством специализированного программного обеспечения.

Расчетный комплекс можно определить как информационную компьютерную среду, организованную в соответствии с собственной концепцией и состоящую из систем твердотельного моделирования, моделей, выполненных с использованием этих программ, оригинальных расчетных моделей и методик.

Комплекс предназначен как для выполнения проектирования впускных каналов ДВС, так и в целом для модельного сопровождения этапов жизненного цикла изделия.

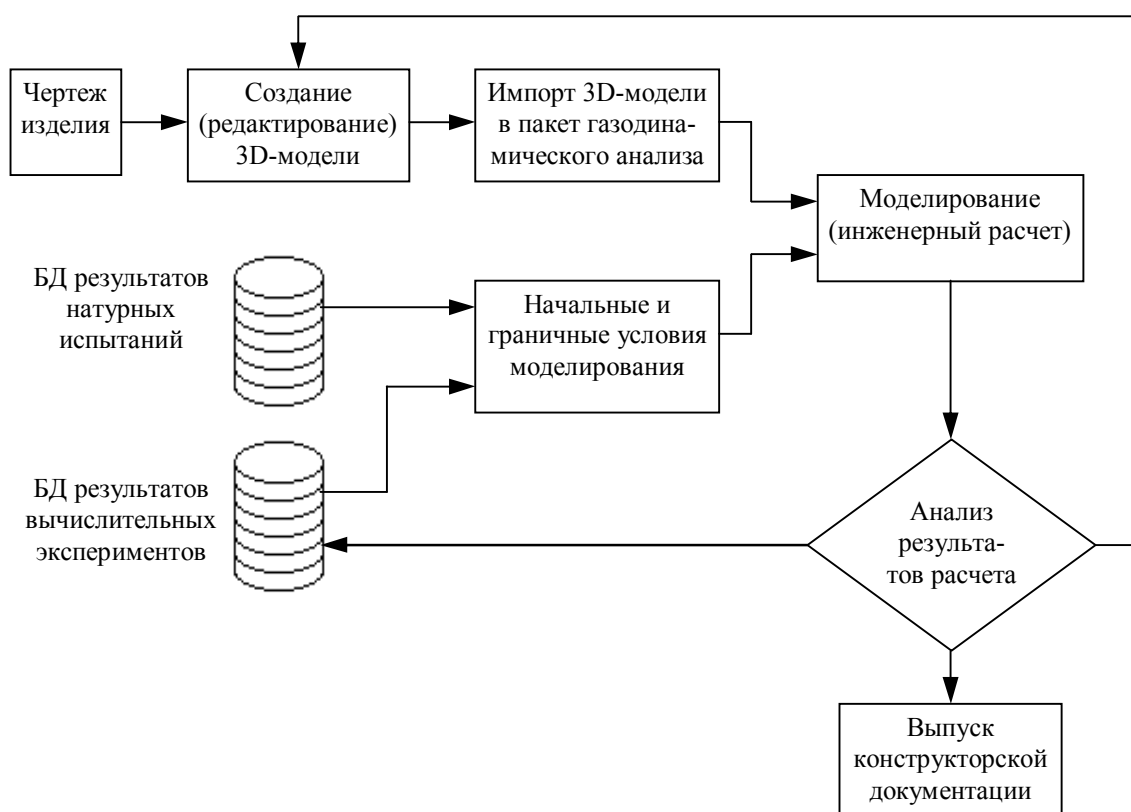


Рис. 5. Обобщенная структура расчетно-моделирующего комплекса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена задача расчета параметров пространственного турбулентного потока во впускном канале ДВС на основе разработки вычислительной технологии, включающей математическую модель на базе системы уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу. Решение данной задачи имеет существенное значение для применения математического моделирования при изучении газодинамических процессов в проточных частях ДВС.

Предлагаемая вычислительная технология обеспечивает приемлемые для инженерных расчетов время и точность расчета, поэтому продуктивна для конструкторской практики.

В диссертационном исследовании получены следующие выводы:

1. Обоснован выбор математической модели для описания газодинамических процессов во впускном канале головки цилиндров дизельного двигателя Д-448 в случае вязкого несжимаемого газа.

2. Разработана методика создания твердотельной модели объекта исследования, включающего полость впускного канала винтового типа.

3. Сформулированы рекомендации по конструированию трехмерной расчетной сетки и выбору модели турбулентности семейства $k-\varepsilon$, обеспечивающих получение решения задачи определения газодинамических характеристик потока с заданной точностью за приемлемое время.

4. Выполнена серия расчетов турбулентных течений газа во впускном канале дизельного двигателя Д-448. Получены поля скоростей, давлений, турбулентной энергии в полости впускного канала.

5. Подтверждена адекватность математической модели и корректность принятых допущений путем сопоставления полученных результатов с данными эксперимента.

6. Проведена модификация инженерной методики расчетов параметров течения во впускном канале двигателя, базирующаяся на результатах вычислительного эксперимента.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Тюнин, А.В. Применение вычислительного эксперимента при моделировании газового потока в выпускном канале дизеля / А.В. Тюнин, И.В. Лёвкин // Юбилейная 60-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава, посвященная 60-летию АлтГТУ. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2002. – С. 18 (авт. – 0,1 п.л.).

2. Тюнин, А.В. Применение вычислительного эксперимента при моделировании газового потока в выпускном канале дизеля / И.В. Лёвкин, А.В. Тюнин / Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2003. – 14 с. : илл. – Деп. в ВИНТИ 14.04.2003 г., № 697-В2003 (авт. – 0,35 п.л.).

3. Тюнин, А.В. Информационная технология для конструирования и доводки проточных каналов ДВС / А.В. Тюнин // Сборник тезисов научно-технической конференции молодых преподавателей, аспирантов, студентов. – Барнаул, 2004. – С. 26-27 (авт. – 0,2 п.л.).

4. Тюнин, А.В. Построение впускных каналов винтового типа средствами пакета «SolidWorks» / А.В. Тюнин // Повышение качества продукции и эффективности производства : материалы научно-технической конференции. Вестник Курганского гос. ун-та. – Курган, 2006. – С. 51-52 (авт. – 0,2 п.л.).

5. Тюнин, А.В. Математическое моделирование потоков во впускном трубопроводе ДВС / А.В. Тюнин // Научные разработки автотранспортного факультета Алтайскому краю. – Барнаул, 2007. – С. 53-57 (авт. – 0,4 п.л.).

6. Тюнин, А.В. Математическое моделирование газового потока во впускном тракте дизеля / А.В. Тюнин // Математическое образование в регионах России : материалы всероссийской научно-методической конференции. – Барнаул : БГПУ, 2008. – С. 93-96 (авт. – 0,3 п.л.).

7. Тюнин, А.В. Некоторые вопросы конструирования расчетных сеток / А.В. Тюнин // Математическое образование в регионах России : материалы всероссийской научно-методической конференции. – Барнаул : БГПУ, 2008. –

С. 89-92 (авт. – 0,3 п.л.).

8. Тюнин, А.В. О моделях турбулентности, применяемых для расчета потока во впускном канале ДВС / А.В. Тюнин // Математическое образование в регионах России : материалы всероссийской научно-методической конференции. – Барнаул : БГПУ, 2008. – С. 85-89 (авт. – 0,3 п.л.).

9. Тюнин, А.В. Моделирование течений газа во впускном канале ДВС / И.В. Лёвкин, А.В. Тюнин // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – Новочеркасск : Изд-во ЮРГТУ, 2008. – №5. – С. 73-75 (авт. – 0,2 п.л.).

10. Тюнин, А.В. Расчетная методика впускного канала двигателя внутреннего сгорания / Ю.А. Шапошников, А.В. Тюнин // Ползуновский вестник. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 44-50 (авт. – 0,2 п.л.).