

УДК 612.43.013

А.А. Хандримайлов, инж., В.Г. Солодов, д-р техн. наук

## СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ЗАРЯДА В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ НА ТАКТЕ ВПУСКА И СЖАТИЯ

### Введение

Процесс объемно-пленочного смесеобразования в дизельных двигателях с полуразделенными камерами сгорания осуществляется за счет организации вихревого движения воздушного заряда. Одной из важных задач при разработке двигателя является определение характеристик газового потока в камере сгорания в момент впрыска топлива для согласования с параметрами топливной аппаратуры. Перспективным методом исследования характеристик потока в цилиндре и камере сгорания дизеля является численное моделирование процессов наполнения и сжатия, которое позволяет получать решения газодинамических задач в областях сложной геометрии, визуализировать структуру течения, получать количественную оценку характеристик потока.

### 1. Постановка задачи

Задачей данной работы являлось численное моделирование нестационарного трехмерного вязкого газового течения во впускных каналах, цилиндре и камере сгорания на такте впуска и сжатия. Основная цель – исследование газодинамических характеристик воздушного заряда в камере сгорания дизельного двигателя, разрабатываемого Харьковским конструкторским бюро двигателестроения [1, 2]. При этом в работе изучались следующие вопросы: формирование впускными каналами тангенциального движения воздушного заряда в цилиндре относительно его оси; согласование результатов нестационарного расчета с данными статических продувок и расчетов рабочего процесса; исследование структуры газового потока в камере сгорания в конце такта сжатия и процесса ее формирования.

### 2. Объект исследования

В данной работе исследовалась одноцилиндровая модель двигателя, включающая два двухфункциональных впускных канала, работающие впускные клапаны, область цилиндра и камеру сгорания в подвижном поршне (рис. 1).

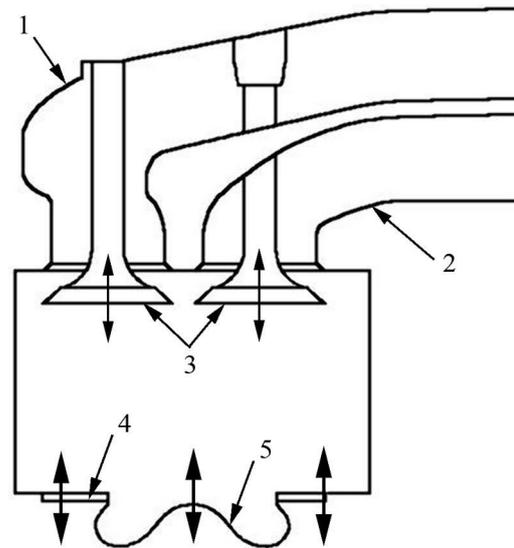


Рис. 1. Объект численного исследования:  
 1 – впускной винтовой канал;  
 2 – впускной тангенциальный канал;  
 3 – работающие впускные клапаны;  
 4 – выемки под клапаны в днище поршня;  
 5 – камера сгорания в подвижном поршне

Вопросы конфигурации впускных каналов, их аэродинамического исследования и доводки, рассмотрены в работах [1, 2].

### 3. Численная модель исследования

Описание сеточной модели, численный анализ и обработка результатов выполнены с использованием программного комплекса MTF5® [3].

Солвер использует неявную разностную схему [4] 2-го порядка точности по времени, 3-го порядка по пространственным координатам. Расчет развития процесса обеспечивается дуальным интегрированием по времени. Турбулентные эффекты описаны с помощью модифицированной дифференциальной модели турбулентности Спаларта-Аллмараса с поправками для вращающихся течений [4]. Твердые стенки предполагались адиабатическими, на них задавалось условие прилипания и равенство нулю эффективной вихревой вязкости.

Принципиальная конфигурация сеточной модели, метод деформирования сетки, а также описание законов движения впускных клапанов и поршня рассмотрены в работе [4].

Результаты тестирования солвера в стационарной и нестационарной постановках представлены в работах [4, 5].

В качестве начальных условий для расчета задавались полное давление и температура в расчетной области модели, соответствующие результатам аналитического расчета рабочего процесса. На входной границе впускных каналов давление и температура торможения оставались постоянными. Их значения соответствовали осредненным параметрам во впускном коллекторе, которые определялись аналитически. В работе не рассматривался период перекрытия клапанов и не учитывалось газодинамическое влияние предыдущего цикла работы двигателя. Расчеты проводились без учета теплообмена воздушного заряда со стенками модели.

Мощность сеточной модели при положении поршня в верхней мертвой точке составляла ~ 400 тыс. ячеек, и увеличивалась по мере движения поршня к нижней мертвой точке. Сетка являлась гексаэдральной (рис. 2) с организацией сгущения вблизи твердых границ расчетной области. Размер минимальной ячейки пограничного слоя ~ 0.01 мм.

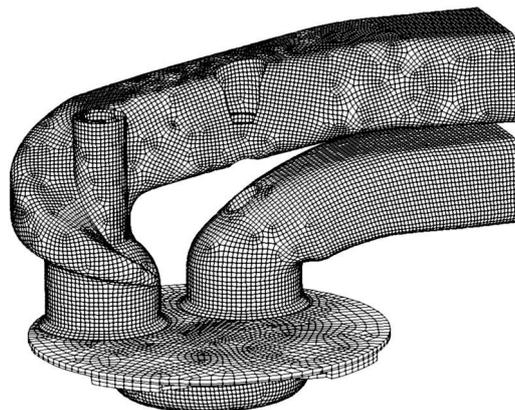


Рис. 2. Исходная сеточная модель

## 4. Результаты расчета

### 4.1. Такт впуска

На рис. 3 представлен график изменения расхода в клапанных щелях в процессе наполнения. Экспериментальные данные получены методом статической продувки впускных каналов для различных подъемов клапанов при соответствующем перепаде давления.

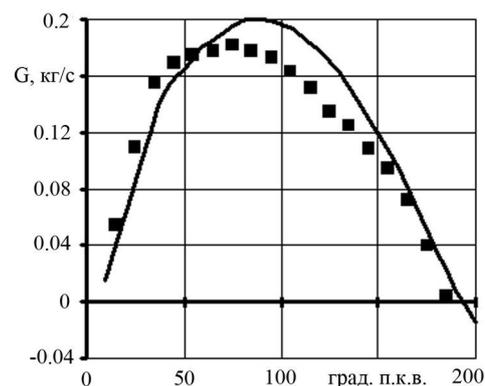


Рис. 3. График изменения расхода в клапанных щелях в процессе наполнения (■ – экспериментальное исследование на статических моделях; — – численный расчет)

Различия экспериментальных данных и результатов расчета вызваны, предположительно, некоторыми геометрическими отличиями впускных кана-

лов численной модели и экспериментальной установки, возникшими из-за технологических особенностей создания каналов.

На рис. 4 представлены графики осредненного полного давления в цилиндре на такте впуска, построенные по результатам численного моделирования и данным расчета рабочего процесса.

Различие графиков полного давления на начальном участке такта впуска объясняется погрешностью задания начальных условий для численного расчета.

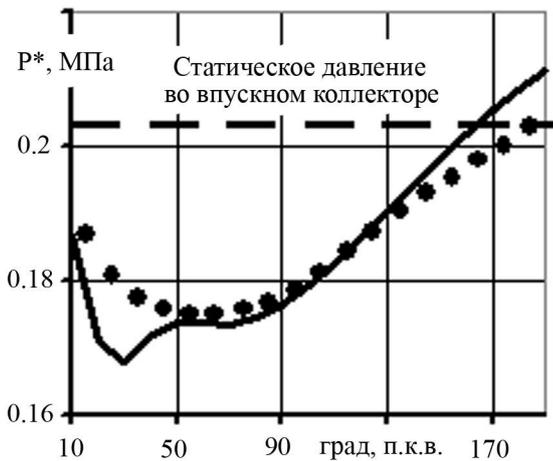


Рис. 4. График осредненного полного давления в цилиндре на такте впуска (● – расчет рабочего процесса; — – численный расчет)

Взаимодействие потоков, истекающих из щели тангенциального и винтового каналов, между собой и со стенкой цилиндра приводит к образованию сложной структуры внутрицилиндрового течения. Течение в клапанной щели впускных каналов можно разделить на положительные, отрицательные и нейтральные зоны, которые отличаются влиянием на процесс вихреобразования в цилиндре. Для рассматриваемой конфигурации головки блока цилиндров распределение таких зон представлено на рис. 5 (вид модели сверху).

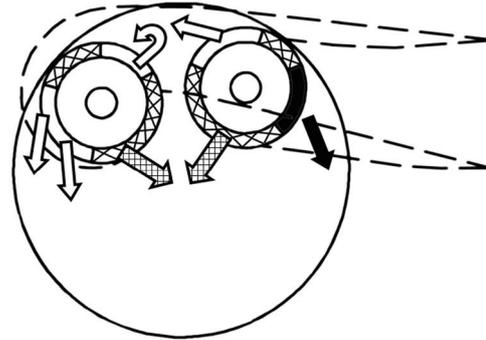


Рис. 5. Распределение зон течения воздуха в клапанной щели (□ – положительная зона; ▨ – нейтральная зона; ■ – отрицательная зона)

Границы представленных зон течения в клапанной щели на протяжении процесса наполнения изменяются незначительно. В клапанной щели тангенциального канала расположена одна положительная зона истечения воздуха, которая участвует в образовании тангенциальной закрутки заряда в цилиндре. Там же расположена отрицательная зона, участвующая в генерировании противоположно направленного вихря, который в значительной мере снижает величину внутрицилиндровой закрутки заряда. Течение в одной из двух положительных зон винтового канала взаимодействует с потоком из тангенциального канала и изменяет свое направление, за счет чего данная зона отнесена к положительным. Наибольшую площадь клапанной щели занимают зоны, которые не оказывают существенного влияния на закрутку заряда, а участвуют только в наполнении цилиндра. Одни из них образуются вследствие соударения противоположно направленных потоков из клапанных щелей каналов, другие – при взаимодействии потока со стенкой цилиндра.

На такте впуска воздушный заряд, имеющий максимальные тангенциальные скорости располагается у стенки цилиндра и разделяется на два участка: первый находится около крышки головки цилиндров, второй – у днища поршня.

В камере сгорания на такте впуска не создается определенной структуры течения. Величина танген-

циальной скорости заряда в камере сгорания на порядок меньше максимальной в цилиндре.

#### 4.2. Такт сжатия

На рис. 6 представлены данные об осредненном полном давлении в цилиндре на такте сжатия.

В начале и середине такта сжатия заряд с максимальной величиной тангенциальной скорости сосредоточен у стенки цилиндра. Такое распределение заряда вызвано направлением истечения воздуха из клапанных щелей впускных каналов и силами инерции.

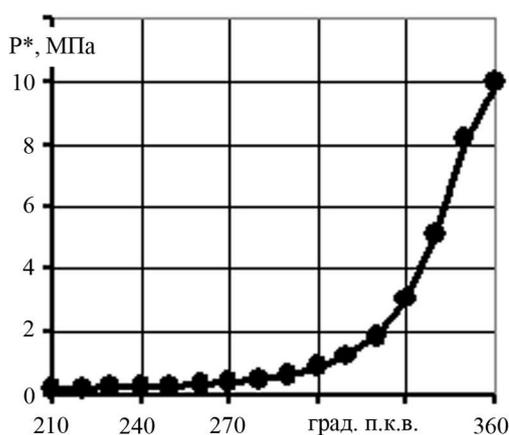


Рис. 6. График осредненного полного давления в цилиндре на такте сжатия (● — расчет рабочего процесса; — — численный расчет).

Графики изменения осредненных по массе компонент скорости в цилиндре на такте сжатия

представлены на рис. 7 ( $v_{j\text{отн}} = \frac{\sum_{i=1}^N v_{ji} \cdot m_i}{\sum_{i=1}^N m_i} \cdot v_{\text{max}}$ ),

где  $j$  — индекс компоненты скорости,  $i$  — номер ячейки).

Величина осредненной осевой скорости пропорциональна скорости движения поршня. Величина осредненной радиальной скорости заряда на начальном участке такта сжатия равна нулю из-за отсутствия преимущественного направления радиального

течения. По мере приближения поршня к ВМТ заряд начинает вытесняться из надпоршневого пространства в объем камеры сгорания, при этом величина осредненной радиальной скорости начинает возрастать.

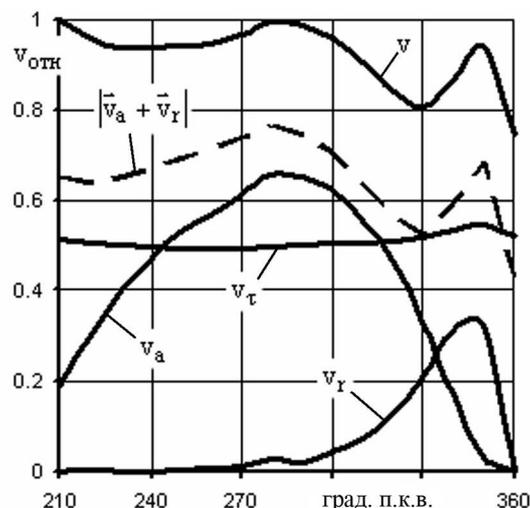


Рис. 7. Графики изменения осредненных компонент скорости в цилиндре на такте сжатия:

- $v$  — полная скорость;
- $v_a$  — осевая компонента скорости;
- $v_r$  — радиальная компонента скорости;
- $v_\tau$  — тангенциальная компонента скорости;
- $|\vec{v}_a + \vec{v}_r|$  — модуль векторной суммы осевой и радиальной компонент скорости

Наиболее интенсивно процесс вытеснения происходит на участке от 320° до 350°. Таким образом, заряд с наибольшей тангенциальной скоростью, находящийся у стенки цилиндра, вначале сжимается поршнем, а затем вытесняется в объем камеры сгорания. Рассматриваемый этап такта сжатия (от 320° до ВМТ) является определяющим в формировании структуры движения заряда в объеме камеры сгорания. Процесс вытеснения заряда из надпоршневого пространства в силу геометрической формы камеры сгорания сопровождается формированием торoidalного вихря. Об интенсивности движения заряда в радиально-осевых плоскостях камеры сгорания в конце такта сжатия можно судить по величине моду-

ля векторной суммы радиальной и осевой компонент скорости (рис. 7). К концу такта сжатия заряд с максимальными тангенциальными скоростями располагается в верхней части объема камеры сгорания. В области у стенок и на дне камеры сгорания тангенциальная скорость заряда приближается к нулю.

На рис. 8 представлена характерная структура распределения тангенциальной скорости в камере сгорания для 355° п.к.в. в одном из радиально-осевых сечений.

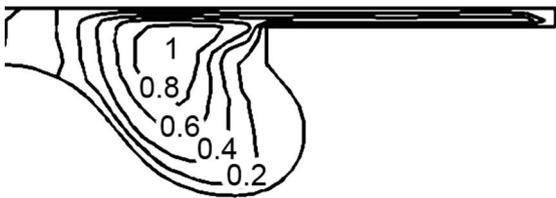


Рис. 8. Контуры тангенциальной скорости в радиально-осевой плоскости камеры сгорания ( $\frac{v_{\tau}}{v_{\tau \max}}$ )

Представленная структура распределения тангенциальной скорости характерна для всех радиально-осевых сечений, однако неравномерность по величине в окружном направлении для данной модели достигает ~ 30%.

На рис. 9 представлена характерная структура тороидального вихря в камере сгорания в виде векторов скорости для 355° п.к.в. в одном из радиально-осевых сечений.

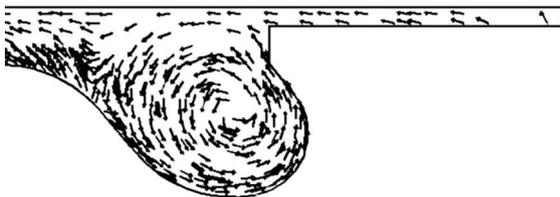


Рис. 9. Поле векторов скорости равной длины в радиально-осевой плоскости камеры сгорания

Величина радиально-осевой скорости в области у стенок и дне камеры сгорания, в среднем, превышает значения тангенциальной скорости в 3 раза.

### Заключение

Представлены результаты численного моделирования нестационарного течения газа во впускных каналах, цилиндре и камере сгорания дизеля на такте впуска и сжатия. Проведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными и результатами аналитических расчетов. Полученные результаты могут быть использованы для согласования с параметрами топливной аппаратуры.

Авторы выражают благодарность к.т.н. Грицюку А. В., инж. Опалеву В. А. за полезные обсуждения.

### Список литературы:

1. Расчетное и экспериментальное исследование газодинамических характеристик впускного тракта и цилиндра дизеля ИДТНА2 / В.Г. Солодов, Ю.В. Стародубцев, А.А. Хандримайлов, А.В. Грицюк, В.А. Опалев // *Автомобильный транспорт: Сб. науч. тр. – Харьков: Изд-во ХНАДУ. – 2005. – Вып. 16. – С. 253–256.*
2. Исследование газодинамических характеристик впускных каналов дизеля при его разработке / А.В. Грицюк, С.А. Алехин, В.А. Опалев, В.Г. Солодов, А.А. Хандримайлов // *Тр. 10 междунар. науч.-практической конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей».* – Владимир: ВлГУ. – 2005. – С. 113–124.
3. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В. Научно-прикладной программный комплекс MTFs® для расчета трехмерных вязких турбулентных течений жидкостей и газов в областях произвольной формы. Сертификат гос. регистрации авт. прав, УГААСП, №5921, 16.07.2002.
4. Хандримайлов А.А. Численное моделирование нестационарного газового течения при наполнении цилиндра ДВС // *Вестник ХНАДУ: Сб. науч. тр. – Харьков: Изд-во ХНАДУ. – 2005. – Вып. 29. – С. 209–212.*
5. Хандримайлов А.А. Исследование структуры газового потока в щели впускного клапана ДВС // *Вестник ХНАДУ: Сб. науч. тр. – Харьков: Изд-во ХНАДУ. – 2004. – Вып. 26. – С. 28–31.*