

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА ВО ВПУСКНОМ КАНАЛЕ ДВС

Ю.А. Шапошников, А.В. Тюнин

В статье рассматривается численное моделирование течения газа во впускном канале ДВС, что позволит детально исследовать характеристики потока в любой его точке, а также определять величины гидродинамических потерь. Моделирование течений в канале основывается главным образом на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Выполненные расчеты показали приемлемую точность и надежность предлагаемого метода.

Численное моделирование течений газа в проточных частях ДВС позволит 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.

С помощью численного моделирования можно найти решение задачи за сравнительно короткое время при невысокой и постоянно уменьшающейся стоимости расчетов. Очевидно, что численное моделирование течений газа не отменяет физический эксперимент и не должно ему противопоставляться.

Ключевые слова: моделирование, впускной канал, течение газов, характеристики потока, отрывные зоны, физический эксперимент.

Эффективность работы ДВС существенно зависит от совершенства процессов, протекающих в их проточных частях и, прежде всего, от конструкции впускных и выпускных каналов. Совершенствование геометрии внутренних поверхностей впускных каналов ДВС позволяют добиться увеличения мощности и улучшить экологические показатели [2], что является актуальной задачей.

Численное моделирование течений газа в проточных частях ДВС позволит 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.

С помощью численного моделирования можно найти решение задачи за сравнительно короткое время при невысокой и постоянно уменьшающейся стоимости расчетов. Очевидно, что численное моделирование течений газа не отменяет физический эксперимент и не должно ему противопоставляться. В конечном итоге лишь сопоставление результатов расчета с данными физического

эксперимента свидетельствует об адекватности численного моделирования [1, 4].

Одним из важных аспектов численного моделирования является сравнение результатов вычислений с данными эксперимента. Совершенствование численных методов и исследование диапазона их применимости - актуальная задача, успешное решение которой может происходить только во взаимодействии с экспериментом. В ряде случаев численное моделирование способно заменить эксперимент, однако в большинстве случаев они дополняют друг друга.

Математическая модель в первую очередь должна быть достоверной, поэтому с целью возможности проверки адекватности, в дальнейшем рассматривается модель впускного тракта не реального двигателя, а испытательной установки. Для снижения вычислительных затрат, поток моделируется как несжимаемый, процесс считается изотермическим.

Моделирование течений газа в каналах основывается главным образом на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Метод осреднения по Рейнольдсу 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 [1].

Одной из существенных особенностей уравнений Навье-Стокса является их пространственно-эллиптический характер, обусловленный влиянием вязкости во всем поле течения. В связи с этим для решения этих уравнений необходимо использовать типичные для эллиптических уравнений методы решения [1].

Уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу для несжимаемого газа при статической температуре имеют вид [3]:

- уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0; \quad (1)$$

- уравнения движения для трех проекций:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\tau}_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}), \quad (2)$$

где $\bar{\tau}_{ij}$ вычисляется по формуле:

$$\bar{\tau}_{ij} = m \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right); \quad (3)$$

- уравнение энергии для статической температуры:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho c_p \bar{T} \bar{u}_j) = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \overline{u'_j \frac{\partial p'}{\partial x_j}} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \rho c_p \overline{T' u'_j} \right) + \Phi, \quad (4)$$

где диссипативная функция Φ выражается как:

$$\Phi = t_{ij} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}. \quad (5)$$

В представленных уравнениях: ρ - плотность; p - давление; u - компоненты вектора скорости; μ - коэффициент динамической вязкости; c_p - удельная теплоемкость при постоянном давлении; T - температура; k - коэффициент теплопроводности.

Для замыкания предлагается использовать модель турбулентности RNG k - ϵ . Модель RNG k - ϵ была разработана на основе строгих статистических методов (Renormalization Group Theory), она аналогична стандартной k - ϵ модели, но имеет ряд существенных отличий:

- дополнительное условие в уравнении скорости турбулентной диссипации ϵ улучшает точность решения высоконапряженных потоков;

- дополнительный параметр, учитывающий циркуляцию турбулентности, улучшает точность расчета течений с закруткой потока, что особенно актуально для впускного канала;

- RNG-теория предлагает аналитическую формулу турбулентных чисел Прандтля, в то время как в стандартной k - ϵ модели данный параметр является константой.

Указанные особенности делают RNG k - ϵ модель более точной и надежной для широкого диапазона турбулентных течений, чем в случае со стандартной k - ϵ моделью.

Турбулентная кинетическая энергия k , и скорость диссипации ϵ , представлены следующими уравнениями переноса:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right]. \quad (7)$$

Константы в уравнениях (6) - (7) имеют следующие значения:

$$C_{\epsilon 1} = 1,44; \quad C_{\epsilon 2} = 1,92; \quad C_\mu = 0,09; \quad \sigma_k = 1,0; \quad \sigma_\epsilon = 1,3$$

Для дискретизации исходных дифференциальных уравнений используется метод конечных объемов (МКО), согласно которому значения физических параметров задаются в центрах расчетных ячеек, а уравнения сохранения записываются в интегральной форме для каждой ячейки. Основным достоинством этого подхода является сохранение консервативности дискретизированных уравнений. Дискретизация проводится по противопоточной схеме первого порядка (UD) [4].

Решение системы алгебраических уравнений, полученных в результате дискретизации исходной системы, производилось с использованием алгоритма SIMPLE [5, 6].

Проведена серия расчетов трехмерного течения во впускном канале при различных высотах поднятия впускного клапана.

Исходные данные задавались в соответствии с экспериментальной методикой исследования потока во впускном канале (см. таблицу 1).

Получены следующие результаты:

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.).

Таблица 1 - Исходные данные

Высота поднятия клапана, Н, мм	Расход воздуха, Q, кг/с	Давление на входе, P _{вх} , Па
2	0,0431	18114,3255
4	0,0847	24837,2270
6	0,1139	21512,7520
8	0,1414	18719,1770
10	0,1633	21723,8405
12	0,1711	16209,1840

Проводилось сравнение расчетного перепада давления в канале со значениями, полученными на реальной установке (см. таблицу 2 и рисунок 1).

Погрешность рассчитывалась по формуле (8).

$$\Delta P^* = \frac{|\Delta P_{\text{эксп}} - \Delta P_{\text{расч}}|}{|\Delta P_{\text{эксп}}|} \quad (8)$$

Таблица 2 - Результаты расчетов

Давление на выходе, P _{вых} , Па	Перепад давления эксп., ΔP _{эксп} , Па	Перепад давления расч., ΔP _{расч} , Па	Погрешность, ΔP*
7010,70	10297,03	11103,62	7,83%
13435,48	10002,83	11401,74	13,99%
11446,87	9120,23	10065,87	10,37%
8578,60	9806,70	10140,57	3,40%
11842,09	10885,43	9881,74	9,22%
7344,35	10198,96	8864,83	13,08%

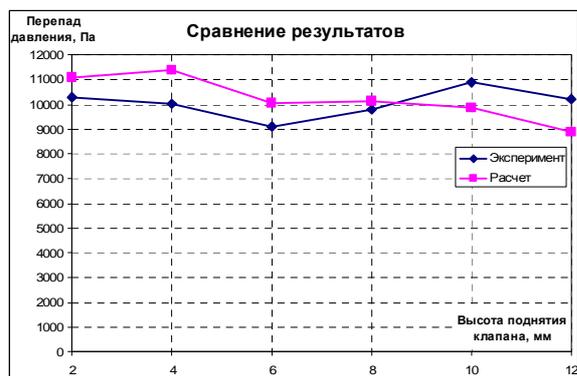


Рисунок 1 - Сравнение экспериментальных и расчетных результатов

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

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что рациональное сочетание расчета и эксперимента позволяет расширить границы исследований, уменьшить объем экспериментов и значительно ускорить доводочные работы по созданию и совершенствованию перспективных двигателей внутреннего сгорания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вабищевич, П.Н. Численные методы решения нестационарных уравнений Навье-Стокса в естественных переменных на частично разнесенных сетках / Вабищевич П.Н., Павлов А.Н., Чурбанов А.Г. // Математическое моделирование. - 1997. - Т.9, N 4. - С.85-114.
2. Драганов, М.Г. Конструирование впускных и выпускных каналов двигателей внутреннего сгорания / Б.Х. Драганов, М.Г. Круглов, В.С. Обухова. - Киев: Высшая школа, 1987. - 175 с.
3. 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.
4. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: в 2-х т. / К. Флетчер. - М.: Мир, 1991. Т.1 - 504 с.; Т. 2 - 552 с.
5. Черный, С.Г. Численное моделирование течений в турбомашинах. / Черный С.Г., Чирков Д.В., Лапин В.Н., Скороспелов В.А., Шаров СВ. - Новосибирск: Наука-2006.-202 с.
6. Шапошников, Ю.А. Расчетная методика впускного канала двигателя внутреннего сгорания/ Ю.А. Шапошников, А.В. Тюнин. - Ползуновский вестник.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. - С. 44-50.

Шапошников Ю.А., д.т.н., профессор, каф. Автомобили и автомобильное хозяйство
Тюнин А.В., аспирант каф. Автомобили и автомобильное хозяйство
 e-mail: ffris@mail.ru
 ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,
 656038, Барнаул, просп. Ленина, 46,
 тел. (83852) 290822.