

Р. Д. Еникеев, К. Н. Гарипов, Р. Ф. Зиннатуллин

РАСЧЕТ СВЕРХЗВУКОВЫХ НЕИЗОБАРИЧЕСКИХ СТРУЙ В ПАКЕТЕ STAR-CD

Проведено исследование влияния относительного размера ячейки на результаты расчета сверхзвуковой неизобарической струи в пакете Star-CD. Показано, что для достижения приемлемой точности относительный размер расчетной ячейки в сверхзвуковой области должен быть порядка 0,015. Проведено сравнение расчетов с различными моделями турбулентности (RSM, k-ε, SST, k-ω). Установлено, что модель k-ε позволяет обеспечить с достаточной точностью расчет распределения концентрации паров топлива в предкамере двигателя с унифицированным рабочим процессом. *Поршневой ДВС; рабочий процесс; сверхзвуковые неизобарические струи*

ВВЕДЕНИЕ

На кафедре двигателей внутреннего сгорания Уфимского государственного авиационного технического университета разрабатывается перспективный (унифицированный) рабочий процесс поршневых ДВС [1]. Требования, предъявляемые к данному рабочему процессу:

- объединение лучших качеств двух типов поршневых двигателей: топливную экономичность дизеля, удельную мощность бензинового;
- возможность работы на всей номенклатуре современных товарных топлив (от дизельного до высокооктановых бензинов) и топлив из растительного сырья.

Рабочий процесс двигателя реализуется за счет искрового воспламенения топливовоздушной смеси, формируемой нерасчетной сверхзвуковой двухфазной струей, впрыскиваемой в цилиндр двигателя в конце такта сжатия (рис. 1). В зависимости от режима работы такого двигателя необходимо реализовать различную степень неоднородности топливовоздушной смеси: от расслоенного заряда – на холостом ходе, до равномерного распределения топлива в объеме камеры сгорания – при максимальной нагрузке. При этом при любом режиме работы двигателя в районе искрового разряда должна находиться топливовоздушная смесь в концентрационных пределах воспламенения. Для этого требуется детальное изучение смесеобразования в камере сгорания двигателя.

Особую сложность при расчете смесеобразования в камере сгорания двигателя с унифицированным рабочим процессом представляет сверхзвуковой неизобарический участок струи, в котором присутствуют скачки уплотнения.

Необходимо отметить, что в условиях поршневого ДВС расчет такой струи проводится в рамках моделирования совокупности процессов, определяющих протекание внутрицилиндровых процессов, таких как, например, впуск, сжатие, движение клапанов, горение и т. д. Данную задачу целесообразно решать в рамках имеющихся пакетов прикладных программ, таких как Star-CD, Fluent и т. п. Данные особенности существенно ограничивают диапазон применяемых моделей, методов решения, типов сеток и т. д. Особую важность приобретает время расчета процесса.

На данный момент при моделировании внутрицилиндровых процессов ПДВС применяются расчетные сетки с характерным размером ячейки порядка 1 мм. Очевидно, что для сквозного расчета скачков уплотнения такой размер не подходит. Необходимо локальное измельчение сетки в неизобарическом участке струи.

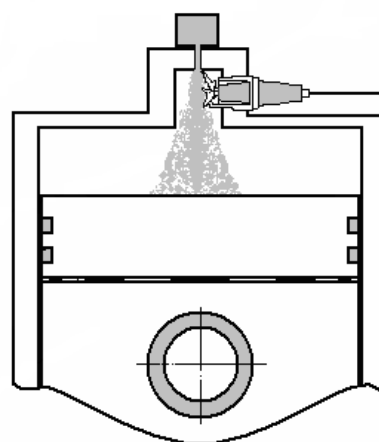


Рис. 1. Схема камеры сгорания ПДВС с унифицированным рабочим процессом

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основная цель исследования – определение относительного размера ячейки (отношение характерного размера ячейки к диаметру сопла), позволяющего рассчитывать с достаточной точностью скачки уплотнения в сверхзвуковой струе.

В работе [3] представлены результаты экспериментального исследования воздушной струи со степенью нерасчетности ($N = 14,2$), превышающей таковую в исследуемой струе и сходим числом Маха на срезе сопла ($M = 1$).

Геометрия сопла газогенератора из работы [3] показана на рис. 2.

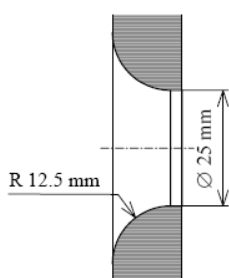


Рис. 2. Геометрия сопла газогенератора [3]

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты проводились с использованием пакета Star-CD 4.14. Пакет Star-CCM+ 6.02 использовался как генератор сеток и пост – процессор. В расчете применялась гексаэдральная сетка (рис. 3).

Использовались следующие граничные условия (рис. 3):

- stagnation – давление и температура торможения;
- pressure – температура и давление окружающего пространства;
- cyclic – периодическое граничное условие.

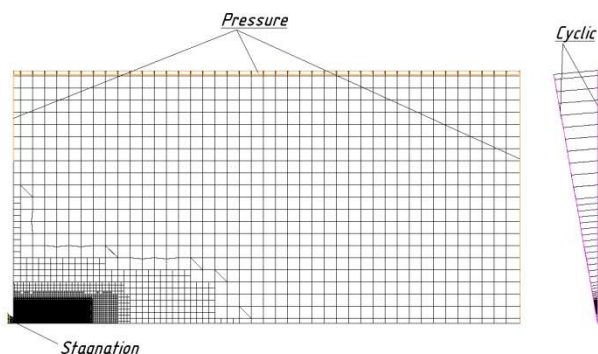


Рис. 3. Расчетная сетка и граничные условия

В качестве теплофизических свойств (теплоемкость, теплопроводность, вязкость) использовались стандартные полиномы теплофизических свойств азота, встроенные в пакет Star-CD [4]. В качестве критерия остановки расчета задавался уровень невязок 0,0001.

Параметры решателя

	Коэффициент релаксации	Число внутренних итераций	Относительная погрешность
pressure	0,1	1000	0,05
momentum	0,2	100	0,1
density	0,2	100	0,1
temperature	0,2	100	0,1

Применяемая схема конечно-разностной аппроксимации – против потока (*Upwind differencing*). Параметры решателя представлены в таблице. Использовалась модель турбулентности – $k-\epsilon$, как наиболее часто применяемая при расчете внутрицилиндровых процессов.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 4, 5, 6, 7 представлены результаты расчетов струи при четырех относительных размерах ячейки в районе «бочки»: 0,01, 0,015, 0,03, 0,06. При использовании относительного размера 0,06 за диском Маха образуется нефизичный вихрь (рис. 7). При использовании относительного размера 0,03 расчетное расстояние до диска Маха хорошо согласуется с экспериментальными данными (рис. 4 и рис. 6). При использовании относительного размера 0,01 и 0,015 графики на рис. 4 практически совпадают, поэтому использование ячейки относительного размера меньше 0,015 нецелесообразно.

Необходимо отметить, что результаты расчетов в области перед диском Маха отличаются от экспериментальных данных. Это связано с тем, что PIV система, используемая в экспериментах, позволяет адекватно измерять скорости ниже 1500–1600 м/с [3].

Можно заметить, что модель турбулентности позволяет рассчитывать скачки уплотнения в сверхзвуковой струе с достаточной точностью (погрешность расчета расстояния до диска Маха не превышает 2 %), тогда как течения за диском Маха рассчитывается с большей погрешностью. Это можно объяснить тем, что модель турбулентности $k-\epsilon$ не учитывает влияние сжимаемо-

сти на диссипацию. Предполагается, что пульсации давления, возникающие в слое смешения при взаимодействии дозвуковых и сверхзвуковых объемов газа, вызывают дополнительную диссипацию [2]. При расчетах на более грубых сетках увеличивается влияние сеточной вязкости, которая, по-видимому, и вызывает дополнительную диссипацию. Таким образом, модель турбулентности $k-\varepsilon$ с более грубой сеткой может показывать более близкие к экспериментам данные в области за диском Маха.

Было предложено дополнительно проверить модель турбулентности RSM , SST и $k-\omega$.

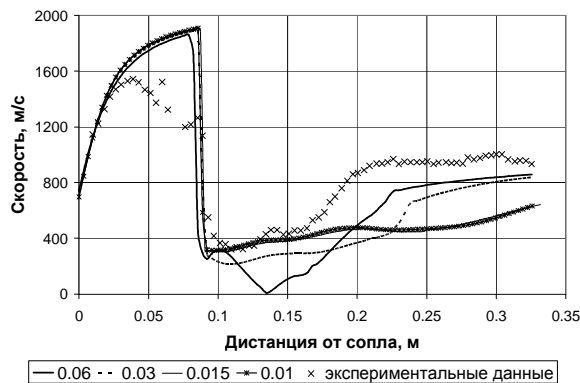


Рис. 4. Изменение модуля скорости вдоль оси струи при различных размерах ячейки

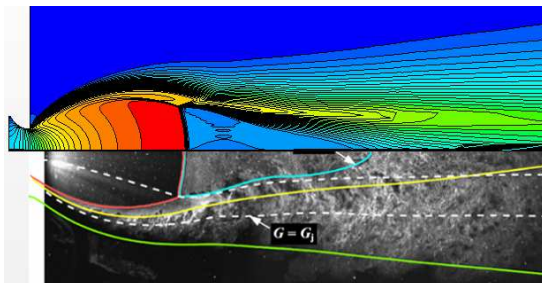


Рис. 5. Шлирен-фотография струи, совмещенная с расчетной картиной распределения скорости при относительном размере ячейки – 0,015

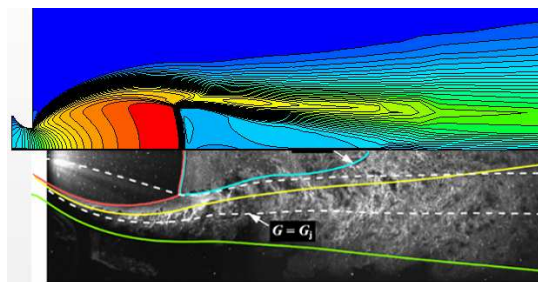


Рис. 6. Шлирен-фотография струи, совмещенная с расчетной картиной распределения скорости при относительном размере ячейки – 0,03

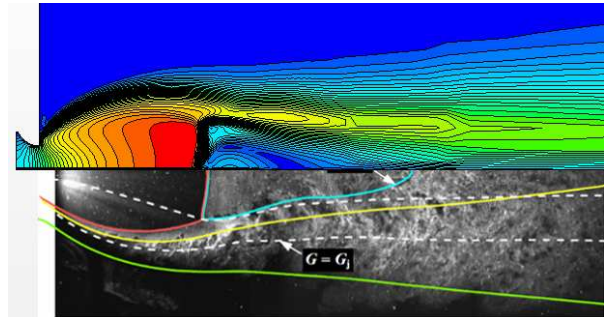


Рис. 7. Шлирен-фотография струи, совмещенная с расчетной картиной распределения скорости при относительном размере ячейки – 0,06

Модель RSM показала нефизичное обратное движение потока за диском Маха (рис. 8 и рис. 9). Расчет с моделью SST не сошелся на неструктурированной сетке. Результаты расчетов с использованием модели турбулентности SST на структурированной сетке, которая создана с использованием сеточного генератора $ICEM-CFD$, представлены на рис. 8 и рис. 10. Расчет с моделью $k-\omega$ не сошелся, как на структурированной сетке, так и на неструктурированной сетке. Хотя модель SST показала более близкие результаты к экспериментальным данным, использование структурированной сетки при расчете камеры сгорания ПДВС является трудновыполнимой задачей.

Таким образом, единственная модель, которая показала результат, близкий к экспериментальным данным на неструктурированной сетке, это модель $k-\varepsilon$.

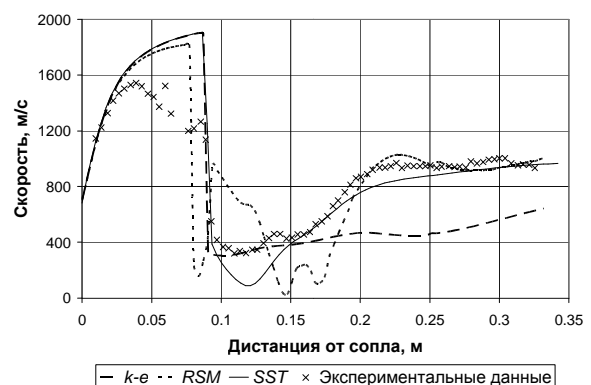


Рис. 8. Изменение модуля скорости вдоль оси струи при различных моделях турбулентности

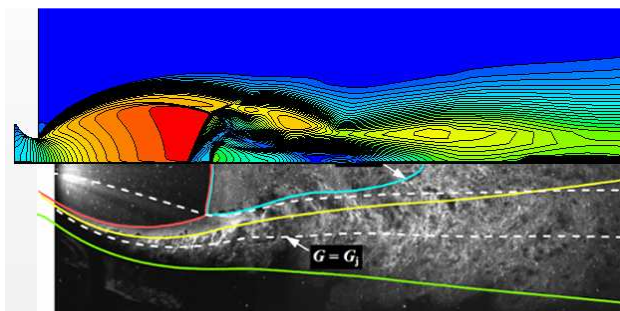


Рис. 9. Шлирен фотография струи, совмещенная с рассчитанной картиной распределения скоростей при помощи модели турбулентности RSM

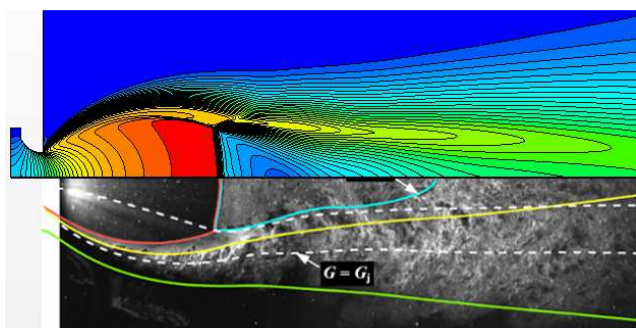


Рис. 10. Шлирен фотография струи, совмещенная с рассчитанной картиной распределения скоростей при помощи модели турбулентности SST на структурированной сетке

Основной целью расчета камеры сгорания ПДВС с унифицированным рабочим процессом является расчет смесеобразования топлива с воздухом в районе искрового разряда. Если погрешность расчета скорости за диском Маха не оказывает влияние на процесс смесеобразования, то данная погрешность не имеет существенного значения в рамках данного исследования. Для подтверждения этой гипотезы были проведены дополнительные расчеты, целью которых являлся расчет распределения концентрации паров топлива по периферии предкамеры при модели турбулентности SST и $k-\varepsilon$.

В расчете моделировалась только предкамера двигателя. Результаты данных расчетов приведены на рис. 11. Искровой зазор свечи зажигания располагается на расстоянии 4–5 мм от начала предкамеры, в этой зоне разница между массовыми долями паров топлива на разных моделях турбулентности не превышает 10 %.

Можно сделать вывод, что модель турбулентности $k-\varepsilon$ подходит для расчета распределения концентрации паров топлива в предкамере ПДВС с унифицированным рабочим процессом.



Рис. 11. Изменение массовой доли паров топлива на периферии предкамеры для модели турбулентности $k-\varepsilon$ и SST

ВЫВОДЫ

1. Рекомендуемый относительный размер ячейки при расчете сверхзвуковой неизобарической струи (отношение характерного размера ячейки к диаметру сопла) ≈ 0.015 .

2. Использование модели турбулентности $k-\varepsilon$ приводит к погрешностям расчета скорости в районе за диском Маха. Несмотря на это модель $k-\varepsilon$ подходит для расчета распределения концентрации внутри предкамеры ПДВС с унифицированным рабочим процессом. Наиболее точное решение было получено при использовании модели турбулентности SST на структурированной сетке, но такой тип сеток проблематично использовать при расчете камеры сгорания, поэтому рекомендуется для такого типа расчетов использовать модель турбулентности $k-\varepsilon$ и неструктурированную сетку.

3. В условиях расчета камеры сгорания двигателя абсолютный размер ячейки в районе «бочки» при относительном размере 0,015 составит 40 мкм, а количество ячеек только в «бочке» – около 8 млн. «Сквозной» расчет рабочего процесса поршневого двигателя, который должен быть нестационарным, становится при имеющихся в настоящий момент вычислительных мощностях, практически нереализуемым. Для его осуществления целесообразно введение для расчета течения в «бочке» дополнительных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гарипов М. Д.** Унифицированный рабочий процесс поршневых ДВС: Дис... канд. техн. наук. Уфа, 2004. 105 с.
2. **Молчанов А. М.** Расчет сверхзвуковых изобарических струй с поправками на сжимаемость в модели турбулентности // Вестник МАИ. Т. 16, № 1. С. 38–48.
3. **Chauveau C., Davidenko D.M., Sarh B., Gokalp I., Avrashkov V, Fabre C.** PIV Measurements in an Underexpanded Hot Free Jet. 13th IntSymp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal, 26-29 June, 2006.
4. Methodology STAR-CD Version 4.14. CD-adapco, 2010. 390 с.

ОБ АВТОРАХ

Еникеев Рустем Далилович, зав. каф. двигателей внутр. сгорания. Д-р техн. наук (2009, УГАТУ). Иссл. вобл. систем газообмена, перспект. раб. проц. ДВС.

Гарипов Кирилл Назифович, мл. науч. сотр. Дипл. магистр по энергомашиностроению (УГАТУ, 2008). Иссл. в области перспект. раб. процессов ДВС.

Зиннатуллин Рустемхан Фагитович, лаборант. Дипл. бакалавр по энергомашиностроению (УГАТУ, 2009). Иссл. в области перспект. раб. проц. ДВС.