

УДК 532.222.2;519.6

**ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА КРУПНЫХ ВИХРЕЙ  
ДЛЯ РАСЧЕТА ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ**

© 2011 г.

*Д.А. Любимов*

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва

lyubimov@ciam.ru

*Поступила в редакцию 16.05.2011*

Рассмотрены возможности использования метода крупных вихрей (Large Eddy Simulation – LES) для расчета сложных турбулентных струй. Для экономии ресурсов при совместном расчете течения в сопле и струе внутри сопла расчет проводился с помощью осредненных уравнений Навье–Стокса (Reynolds Average Navier – Stokes – RANS), вне сопла использовался LES. Были исследованы различные варианты сложных турбулентных струй. Получено растекание в трансверсальном направлении первоначально круглой пристеночной струи, «переворот осей» в прямоугольной струе. Продемонстрированы возможности RANS/LES методов при расчете турбулентных сжимаемых струй из сопел различной формы, исследовано влияние геометрии сопла на характеристики турбулентности в струе. Получено возможное объяснение подъема высокочастотного шума в шевронных соплах.

*Ключевые слова:* метод крупных вихрей, турбулентные струи, численный метод высокого разрешения, влияние геометрии сопла на течение в струе.

Исследование несжимаемых струй было выполнено с помощью варианта метода DES [1], который относится к классу RANS/LES методов. Был использован метод, детали численной реализации которого описаны в [2]. В [2] приведены результаты численного моделирования течения в турбулентных затопленных и пристеночных струях при числах Рейнольдса  $Re = 0.2–1.0 \cdot 10^4$ . Применение разностной схемы высокого порядка аппроксимации по пространству, неявной схемы по времени, в сочетании с эффективной подсеточной моделью турбулентности позволило с приемлемой точностью выполнить расчеты на сетках с  $0.3–0.5 \cdot 10^6$  ячеек. При этом некоторые практически интересные параметры течения можно получить за относительно малое число шагов по времени: смоделировать «переворот осей» в свободной прямоугольной струе и описать анизотропное растекание вдоль стенки в направлении, перпендикулярном оси струи, истекающей из круглого сопла. Эти экспериментальные явления не удается моделировать с помощью RANS и стандартных моделей турбулентности. Было получено, что порядок величины корреляционного коэффициента

$$\langle v'w' \rangle / (\langle v'^2 \rangle \langle w'^2 \rangle)^{0.5} \approx 0.1–0.2.$$

Полученное распределение константы Кармана для пристеночной струи близко к 0.4. Это позволяет использовать «законы стенки» при

расчете пристеночных течений с реальными числами  $Re$ .

Расчет околосвуковых струй в значительной степени нужен для оценки эффективности устройств для снижения шума струи. Такие устройства сильно влияют на поле течения около среза сопла. Это делает важным описание турбулентного течения в слое смешения около среза сопла и создание реалистических условий на срезе сопла. Последнее невозможно без расчета течения в сопле.

Для совместного расчета течений в соплах и струях реалистических конфигураций был использован эффективный RANS/ILES-метод [3]. Точность метода была достигнута за счет использования монотонной разностной схемы 5-го порядка MP5 [4] для конвективных членов в уравнениях Навье–Стокса. Использование монотонной схемы позволяет рассчитывать сверхзвуковые течения со скачками уплотнения. В методе [3] схемная вязкость выполняет роль подсеточной (Implicit LES – ILES). Вследствие «численного перехода», характерного для RANS/LES методов [3], на малых расстояниях от среза сопла наблюдалось превышение уровня пульсаций скорости  $u'$  по сравнению с экспериментальными данными. Вместе с тем удалось исследовать различные тонкие эффекты, которые трудно обнаружить экспериментально. Для конических сопел было получено влияние числа  $M$  и температуры струи

на срезе сопла на уровень пульсаций параметров течения в слое смешения струи. Изменение температуры в диапазоне  $T_j/T_a = 0.9-2.7$  и  $M_a = 0.5-0.9$  не приводит к заметному изменению уровня пульсаций скорости [3]. Увеличение температуры в 2.7 раза приводит к росту уровня пульсаций давления в струе примерно в два раза [5]. Для сверхзвуковой струи ( $M_a = 1.4$ ) установлено, что длина начального участка максимальный и уровень пульсаций продольной и поперечных компонент скорости на расчетном и нерасчетном режимах истечения примерно одинаковы. Уровень пульсаций давления, напротив, зависит от режима истечения: при нерасчетном режиме пиковые значения пульсаций в два раза превышают полученные при расчетном режиме истечения. На расчетном режиме истечения уровень пульсаций близок к значениям для дозвуковой струи с  $M_a = 0.9$  [5].

Для двухконтурного сопла расчет также хорошо совпадает с известными экспериментальными данными. Было получено, что слияние слоев смешения струй двигателя и вентилятора приводит к заметному росту пульсаций продольной компоненты скорости, в то время как уровень пульсаций поперечных компонент скорости сохраняется постоянным [3].

С помощью RANS/ILES [3] метода было исследовано влияние геометрии сопла на течение в струе. Для дозвуковых струй из шевронных сопел, различающихся углами наклона шевронов [5], получено, что уровень пульсаций компонент скорости слабо зависит от температуры струи. На малых расстояниях он несколько выше, чем у струи из круглого сопла на тех же режимах. Для сопла с углом наклона шевронов, равным углу наклона стенки сопла, и для круглого сопла длина начального участка одинакова. Начиная с  $X/D = 1.0$ , для этих сопел уровень пульсаций продольной скорости примерно одинаков на обоих режимах истечения струй. Для сопла с загнутыми внутрь потока шевронами, начиная с  $X/D = 2.0$ , уровень пульсаций скорости ниже, чем у круглой струи на соответствующем режиме истечения. Здесь  $D$  – диаметр сопла. Для струй из шевронных сопел наблюдается рост пульсаций давления с температурой. Однако заметной и однозначной зависимости уровня пульсаций давления от геометрии шевронов по отношению к этому параметру в круглой струе не обнаружено.

Для сопла двухконтурного турбореактивного двигателя с центральным телом было исследовано влияние несоосности сопел газогенератора и вентилятора на течение в выхлопной струе [5]. Установлено, что наиболее чувствительной к

несоосности является энергия турбулентности. Так, несоосность в 4% от диаметра сопла газогенератора вызывает увеличение энергии турбулентности на 25–30%. Азимутальная неравномерность в распределении энергии турбулентности при этом достигает 70%.

Описанные выше расчеты сжимаемых струй проводились при  $Re = 0.5-5.0 \cdot 10^6$  на сетках с  $0.5-1.3 \cdot 10^6$  ячеек. Дальнейшее повышение точности расчетов с помощью RANS/ILES метода [3] было достигнуто использованием в нем монотонной разностной схемы 9-го порядка MP9 [4]. Это позволило значительно повысить разрешение метода при расчетах до- и сверхзвуковых струй [6].

Получить реалистические нестационарные условия на срезе сопла удалось с помощью использования VLES (Very Large Eddy Simulation – VLES) для расчета течения в пограничном слое сопла вместо RANS. Использование VLES/ILES метода со схемой MP9 [6] позволило получить нестационарный пограничный слой на срезе сопла с параметрами, близкими к параметрам турбулентного пограничного слоя на грубых сетках при использовании «функции стенки». Значительно улучшилось совпадение с экспериментом по параметрам турбулентности в слое смешения струи на малых расстояниях от среза по сравнению с RANS/ILES методом. Картина перехода от пограничного слоя в сопле к слою смешения в струе близка к той, что наблюдалась в эксперименте. Удалось устранить нефизичный подъем в распределении пульсаций скорости и давления, вызванный «численным переходом», типичный для RANS/ILES методов.

С помощью VLES/ILES метода со схемой MP9 было исследовано влияние геометрии шевронов на течение в струе [6]. По сравнению с расчетами с помощью RANS/ILES методом заметно улучшилось совпадение с экспериментом по уровню максимальных пульсаций скорости и давления в слое смешения. Выявлена возможная причина подъема шума на высоких частотах, который наблюдался в эксперименте для исследованных в расчетах сопел. Генерация высокочастотных волн давления происходит на «лепестках» струи из шевронного сопла, а интенсивность его пропорциональна их длине. Расчеты VLES/ILES методом проводились при  $Re = 1.0 \cdot 10^5$  на сетках с  $2.0-2.3 \cdot 10^6$  ячеек.

#### Список литературы

1. Spalart P.R., Jou W.-H., Strelets M., Allmaras S.R. / Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid

- RANS/LES Approach // In: First AFOSR Intern. Conf. on DNS/LES, USA, 1997. P. 669–676.
2. Любимов Д.А. Возможности использования прямых методов для численного моделирования турбулентных струй // АМГ. 2003. №3. С. 14–20.
3. Любимов Д.А. Разработка и применение эффективного RANS/ILES-метода для расчета сложных турбулентных струй // ТВТ. 2008. Т. 46, №2. С. 271–282.
4. Suresh A., Huynh H.T. Accurate monotonicity-preserving schemes with Runge–Kutta time stepping // J. of Computational Physics. 1997. V. 136, №1. P. 83–99.
5. Любимов Д.А. Исследование с помощью комбинированного RANS/ILES-метода влияния геометрии сопла и режима истечения на характеристики турбулентности выхлопных струй // ТВТ. 2009. Т. 47, №3. С. 412–422.
6. Любимов Д.А. Возможности моделирования турбулентных струй методом крупных вихрей // Авиадвигатели XXI века: Сб. тез. III Междунар. научно-технич. конф. М., ЦИАМ. 2010. С. 870–873.

### THE POSSIBILITIES OF USING LARGE EDDY SIMULATION TO CALCULATE COMPLEX TURBULENT JETS

*D.A. Lyubimov*

The possibilities of using large eddy simulation (Large Eddy Simulation – LES) to calculate complex turbulent jets are considered. To conserve resources for simultaneous calculation of flows in nozzles and jets, the averaged Navier–Stokes equations (Reynolds Average Navier – Stokes – RANS) were used to calculate the flow within the nozzle; LES was used outside the nozzle. Various types of complex turbulent jets have been investigated. Spreading in the transverse direction was received for initially circular wall jet, «revolution of axes» in a rectangular jet was also observed. The potential of RANS/LES methods for calculating turbulent compressible jets from nozzles of different shapes, the influence of nozzle geometry on the characteristics of turbulence in the jet is demonstrated. A possible explanation of the increase of high-frequency noise in the chevron nozzles is given.

*Keywords:* large eddy simulation, turbulent jet, high resolution numerical method, the influence of nozzle geometry on the jet flow.