

СРАВНЕНИЕ ДВУХ ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИХ МЕТОДИК ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МОДЕЛИРОВАНИЮ СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ ИЗ ДВУХКОНТУРНОГО СОПЛА

© 2019 г. *С.М. Босняков^{1,4}, А.В. Волков^{1,4}, А.П. Дубень²,
В.И. Запругаев³, Т.К. Козубская², С.В. Михайлов^{1,4},
А.И. Трошин^{1,4}, В.О. Цветкова²*

¹ Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского,
г. Жуковский, Московская обл.

² Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва

³ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, Новосибирск

⁴ Московский физико-технический институт, Долгопрудный
ai-troshin@yandex.ru, Alexey.Duben@gmail.com

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-08-01436 А и № 18-31-00368 мол_а. Результаты работы ИПМ им. М.В. Келдыша РАН были получены с использованием вычислительных ресурсов ОВК НИЦ «Курчатовский институт».

DOI: 10.1134/S0234087919100101

Представлены результаты расчетов истекающей из двухконтурного сопла струи, полученные с помощью различных вычислительных алгоритмов, разрабатываемых в ЦАГИ и ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Применены вихреразрешающие подходы семейства DES на базе численных методов повышенной точности. Рассматриваемое течение исследовалось экспериментально в ИТПМ СО РАН. Струя была осесимметричной с точностью до влияния поддерживающих пилонов, холодной, дозвуковой на выходе из внутреннего контура и сверхзвуковой – из внешнего. Проведено сопоставление расчетных данных с экспериментом и между собой.

Ключевые слова: струя, двухконтурное сопло, вихреразрешающий подход.

COMPARISON OF TWO HIGHER ACCURACY UNSTRUCTURED SCALE-RESOLVING APPROACHES APPLIED TO DUAL-STREAM NOZZLE JET SIMULATION

*S.M. Bosniakov^{1,4}, A.V. Wolkov^{1,4}, A.P. Duben², V.I. Zapryagarev³, T.K. Kozubskaya²,
S.V. Mikhaylov^{1,4}, A.I. Troshin^{1,4}, V.O. Tsvetkova²*

¹ Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Moscow region

² Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow

³ Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk

⁴ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

Dual-stream nozzle jet computations conducted using different numerical algorithms developed in TsAGI and KIAM RAS are presented. Scale-resolving approaches of DES family based on higher accuracy numerical methods are applied. The flow considered was studied experimentally at ITAM SB RAS. The jet was axisymmetric up to the influence of the supporting pylons, cold, subsonic at the inner nozzle exit and supersonic at the outer nozzle exit. The computational data is compared with the experiment and with each other.

Key words: jet, dual-stream nozzle, scale-resolving approach.

Введение

В настоящее время разрабатываются двигатели сверхбольшой степени двухконтурности [1-4], что влияет на все конструктивные элементы указанных двигателей, включая сопла, к которым предъявляются повышенные требования по уровням потери тяги и степени подавления шума. Для численного воспроизведения течений возле таких конфигураций необходимо обеспечить одновременное моделирование вязкого турбулентного истечения газа из сопла и процесса образования звуковых волн. При этом предъявляются высокие требования к точности результатов расчета. Это возможно в случае применения вихререзающих методов, основанных на схемах повышенной точности. Цель данной работы заключается в проверке работоспособности и валидации двух подходов, использующих разные принципы повышения точности решения. Валидация осуществляется путем сопоставления расчетных данных с результатами специально подготовленного эксперимента.

В литературе имеются описания экспериментов со струями, истекающими из двухконтурных сопел: от глубоко дозвуковых [5] до транс- и сверхзвуковых [6,7]. К сожалению, воспользоваться опубликованными данными для целей валидации расчетных программ не удастся вследствие ограниченности доступного материала. Для преодоления указанной проблемы в настоящей работе использован модельный эксперимент, специально подготовленный по техническому заданию авторов программ. Он был проведен на струйном модуле аэродинамической трубы Т-326 ИТПМ СО РАН [8].

Вихререзающее моделирование уже достаточно давно применяется для расчета турбулентных струй. В литературе можно найти большое коли-

чество работ, констатирующих успешное применения различных методик, реализующих как методы (I)LES, так и гибридные RANS-LES подходы, для оценки не только характеристик ближнего поля струй, но и создаваемого ими шума в дальнем поле. В настоящее время вихререзрывающее моделирование всё более активно применяется как российскими, так и зарубежными исследователями для расчета более сложных турбулентных струй, истекающих из двухконтурных сопел [9-13].

Как отмечено ранее, в статье приводятся результаты валидации двух программ. Первая из них разрабатывается в ЦАГИ. Она реализует гибридный RANS-LES подход DES [14], который хорошо зарекомендовал себя для решения нестационарных задач аэродинамики и аэроакустики и активно развивается в настоящее время. Эффективная реализация указанного метода сопряжена с численным подходом на основе компактной конечно-элементной схемы разрывного метода Галеркина (PMГ) [15] с базисными функциями. Нестационарные варианты указанной схемы активно изучаются и применяются для решения как академических, так и практических задач [16, 17]. В дальнейшем первая программа и соответствующий расчет будут сокращенно именоваться как DDES-PMГ.

Вторая программа разрабатывается в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Реализованный в рамках неё вихререзрывающий алгоритм строится на конечно-объемной схеме повышенной точности на основе квазиодномерной реконструкции переменных (Edge-Based Reconstruction, EBR) [18,19]. Её особенностью является то, что, фактически оставаясь схемой второго порядка, за счет расширенных шаблонов она позволяет получать результаты с большей точностью в терминах абсолютной ошибки, особенно на гладких вычислительных сетках с регулярной структурой. Указанный подход хорошо зарекомендовал себя при решении широкого круга задач, включая задачи аэроакустики. В дальнейшем вторая программа и соответствующий расчет сокращенно именуется как DDES-EBR.

1. Описание эксперимента

Модель сопла изображена на рис.1 слева. Она представляет собой осесимметричное двухконтурное конвергентное сопло с центральным телом. Через сопло проходит холодный газ, подаваемый из форкамеры. Перепад давлений между контурами обеспечивается сеткой, установленной во внутреннем контуре. Реализуется течение со следующими типами струй: внешняя – сверхзвуковая недорасширенная (число Маха на срезе 1.0), внутренняя – дозвуковая. Введем обозначения: p_{01} и p_{02} – давление торможения

во внутреннем и внешнем контурах соответственно, T_0 – температура торможения в струе, p_c и T_c – статические давление и температура в рабочей части трубы. Выбран следующий режим течения: $p_{01}/p_c=1.72$, $p_{02}/p_c=2.25$, $T_0/T_c=0.985$. Числа Рейнольдса струй $Re_i = \rho_i U_i D_i / \mu(T_i)$, где $i=1, 2$ – номер контура, D_i – диаметр среза, U_i , ρ_i , T_i – скорость, плотность и температура на срезе, можно оценить как $Re_1=0.96 \cdot 10^6$, $Re_2=2.87 \cdot 10^6$. Следует отметить, что осесимметричность течения ограничивалась наличием пилонов, поддерживающих конструкцию внешнего контура сопла.

Поток исследовался с помощью пневмоприемника полного давления (трубка Пито) и термоанемометра постоянного сопротивления. Датчики размещались на пилоне трехосевого измерительного координатника с точностью позиционирования не хуже ± 20 мкм. Оптическая визуализация течения выполнялась шлирен-методом с использованием теневого прибора ИАБ-451 (пример на рис.1 справа).

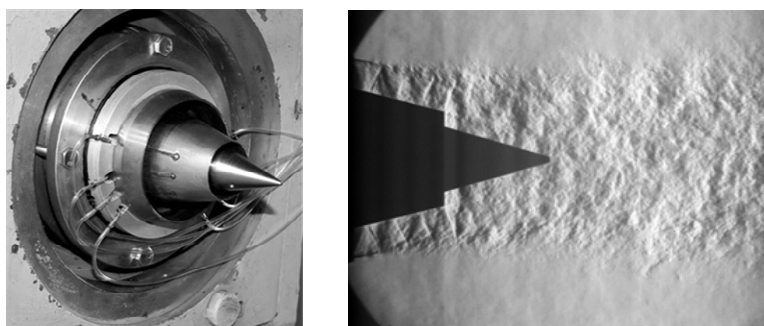


Рис.1. Общий вид модельного сопла (слева) и мгновенная шлирен-фотография течения в струе, вертикальный нож (справа).

В эксперименте получены профили полного давления и относительные уровни пульсаций массового расхода воздуха в поперечных сечениях начального участка струи. Исследованы также спектры массового расхода в нескольких фиксированных точках. Следует отметить, что давление Пито p_t совпадает с давлением торможения потока при дозвуковом течении газа и с давлением торможения за прямым скачком уплотнения – в сверхзвуковом. Соответствующие формулы пересчета приведены ниже.

$$p_t = p \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right)^{\kappa / (\kappa - 1)} \quad \text{при } M \leq 1,$$

$$p_t = p \left[\left(\frac{\kappa + 1}{2} \right)^{\kappa + 1} M^{2\kappa} / \left(\kappa M^2 - \frac{\kappa - 1}{2} \right) \right]^{1 / (\kappa - 1)} \quad \text{при } M > 1.$$

2. Численный подход DDES-PMГ (ЦАГИ)

Численный подход DDES-PMГ ЦАГИ реализован в программном коде Zoom [20, 21]. В настоящее время код работает на неструктурированных гексаэдральных сетках с кусочно-линейными либо кусочно-параболическими ребрами.

Решается система уравнений Навье-Стокса методом SA- DDES [22] с подсеточным масштабом, адаптированным к слоям смешения [23]. Система уравнений имеет структуру

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}(\mathbf{U}, \mathbf{G}) = \mathbf{S}(\mathbf{U}, \mathbf{G}), \quad (1)$$

где \mathbf{U} – столбец консервативных переменных, \mathbf{G} – вектор их градиентов, \mathbf{F} – вектор потоков, \mathbf{S} – столбец источниковых членов. Кратко рассмотрим построение PMГ для такой системы. Консервативные переменные в каждой ячейке раскладываются по базисным функциям $\phi_m(\mathbf{x})$, $m = 1, \dots, K_f$:

$$\mathbf{U}(\mathbf{x}, t) = \sum_{m=1}^{K_f} u_m(t) \phi_m(\mathbf{x}). \quad (2)$$

Неизвестными выступают коэффициенты разложения $u_m(t)$, $m = 1, \dots, K_f$. В программе Zoom используется ортонормированная система многочленов степеней до K включительно. Такая система дает возможность аппроксимировать достаточно гладкие решения с порядком точности $K + 1$. В представленных ниже расчетах использовалась схема с $K = 3$ (4 порядок точности).

После подстановки (2) в (1), умножения полученной системы на базисную функцию $\phi_j(\mathbf{x})$ и ее интегрирования по объему ячейки Ω получается система уравнений для коэффициентов разложения:

$$\frac{du_j}{dt} + \oint_{\Sigma} \hat{\mathbf{F}} \cdot \mathbf{n} \phi_j(\mathbf{x}) d\Sigma = \int_{\Omega} \mathbf{F} \cdot \nabla \phi_j(\mathbf{x}) d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{S} \phi_j(\mathbf{x}) d\Omega. \quad (3)$$

Здесь Σ – поверхность ячейки, \mathbf{n} – ее внешняя нормаль. В выкладках применена теорема Остроградского-Гаусса и учтено, что в ортонормированном базисе $\int_{\Omega} \phi_m(\mathbf{x}) \phi_j(\mathbf{x}) d\Omega = \delta_{mj}$. Интегралы в (3) вычисляются с помощью

квадратурных формул Гаусса. Численные потоки на грани ячейки $\hat{\mathbf{F}}$ определяются из решения задачи Римана о распаде произвольного разрыва. В настоящих расчетах использовалось точное итерационное решение этой задачи по методу Годунова.

В Zoom система (3) решается явным 5-шаговым методом Рунге-Кутты [24]. Диффузионные члены аппроксимируются по методу BR2 [25]. На скачках уплотнения применяется монотонизация решения согласно [26]. Более детальное описание метода можно найти в [20,21].

Для расчетов струи, истекающей из двухконтурного сопла, была построена сетка с кусочно-параболическими ребрами, содержащая 220 тысяч ячеек. С учетом количества базисных функций $K_f = 20$ это дает 4.4 млн. степеней свободы. Именно это значение следует сравнивать с числом ячеек в конечно-объемных методах. Характерный продольный и поперечный шаг сетки в изучаемой области: $h_x = h_y \approx 0.024D_2$. Общий вид сетки показан на рис.2. Вычислительный домен включает в себя подводящие каналы, сопла и начальный участок струи. Сетка охватывает полную окружность по азимуту и содержит в этом направлении 48 ячеек.

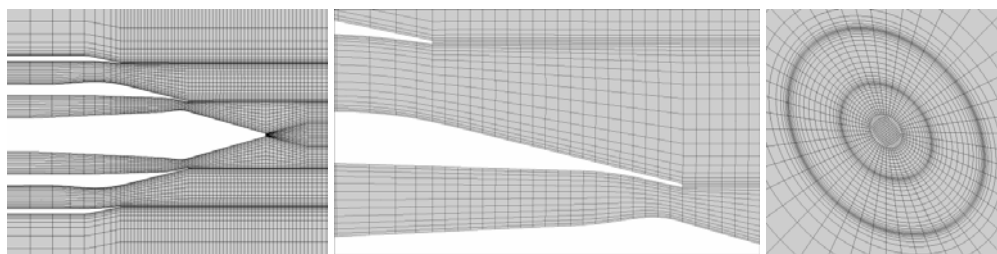


Рис.2. Расчетная сетка для РМГ. Слева – общий вид в окрестности сопла, в центре – крупный план кромок, справа – сечение плоскостью, перпендикулярной оси струи.

На входе во внешний контур задавались неоднородные профили параметров. Они были получены в предварительном RANS-расчете по модели SST [27], ориентированном на корректное воспроизведение потерь полного давления в сопле за счет выбора длины подводящих каналов. Во внутреннем контуре были заданы однородные входные профили: согласно экспериментальным данным, пограничные слои там были тонкими. На внешних границах расчетной области было установлено мягкое граничное условие на основе анализа инвариантов Римана, на выходной границе – постоянное статическое давление. На стенках сопла использовались пристеночные функции. Благодаря этому шаг сетки вблизи стенок был выбран достаточно большим: его значение в переменных закона стенки составляло примерно $y^+ \cong 200$.

Течение устанавливалось в течение 10 конвективных единиц времени t_c (отношение диаметра внешнего контура к скорости истечения струи из него), после чего статистика набиралась в течение $50 t_c$.

3. Численный подход DDES-EBR (ИПМ)

Численный подход DDES-EBR реализован в программном комплексе NOISEtte [28]. Моделирование струи из двухконтурного сопла проводилось с помощью двухэтапного подхода, описанного, в частности, в [29]. В рамках данного подхода на первом этапе (этап RANS) методом RANS проводится расчет течения струи вместе с соплом. Далее (этап LES) проводится численное моделирование только струи с помощью вихререзающего метода, при этом расчетная область начинается от среза сопла, где задаются стационарные профили, полученные на этапе RANS. Такой подход снижает общие вычислительные затраты, поскольку он позволяет не разрешать вязкий подслой пограничного слоя на срезе сопла и, следовательно, использовать более грубую сетку в нормальном к стенке направлении (пристеночные шаги могут быть в 10-20 раз больше). Расчет течения струи из двухконтурного сопла проводился на втором (LES) этапе. Соответствующие профили на срезе сопла задавались из данных предварительных расчетов методом RANS с моделью замыкания SST.

Для моделирования течения использовалась модификация гибридного RANS-LES подхода DDES, описанная в [30]. Данный метод за счет использования специального подсеточного масштаба $\tilde{\Delta}_\omega$, адаптированного к слоям смешения (более подробно см. [23,30]), и алгебраической LES модели WALE обеспечивает быстрый «численный» переход от стационарного RANS к развитому LES решению в слоях смешения возле среза сопла. Это особенно важно, когда применяется двухэтапный подход [28] для расчета турбулентных струй.

Для расчета конвективных потоков использовалась построенная на основе EBR гибридная численная схема [31,32], эффективно сочетающая противопоточную, центрально-разностную и монотонизированную WENO-EBR [19] аппроксимации. При этом WENO активируется только в области скачков уплотнения. Аппроксимация диффузионных потоков осуществляется на основе конечно-элементного метода Галёркина ($K=1$).

Для интегрирования по времени использовалась неявная схема второго порядка точности с линеаризацией по Ньютону разностной системы уравнений. На каждой временной итерации проводилось 2-3 итерации по Ньютону до сходимости по относительной невязке примерно на два порядка. Для решения системы алгебраических уравнений использовался метод би-сопряженных градиентов. Максимальное число Куранта для всей области равно 10. Почти во всей расчетной области (за исключением зон возле стенок на расстоянии $< 0.003D_2$ от стенки) значение данного параметра не превышало 1.

На входных поверхностях на срезе сопла задавались значения всех газодинамических параметров (в случае дозвукового входа давление сносилось из внутренней ячейки), которые, как было указано выше, брались из предварительного RANS расчета. На внешней входной границе ставились условия невозмущенного потока, при этом, во избежание численных проблем, задавался слабый внешний поток с числом Маха $M = 10^{-4}$. На выходных границах держалось постоянное статическое давление, остальные переменные сносились по характеристике. Всюду на твердых поверхностях использовались граничные условия на основе пристеночных функций, при этом безразмерное значение первого пристеночного шага в переменных закона стенки не превышало 100.

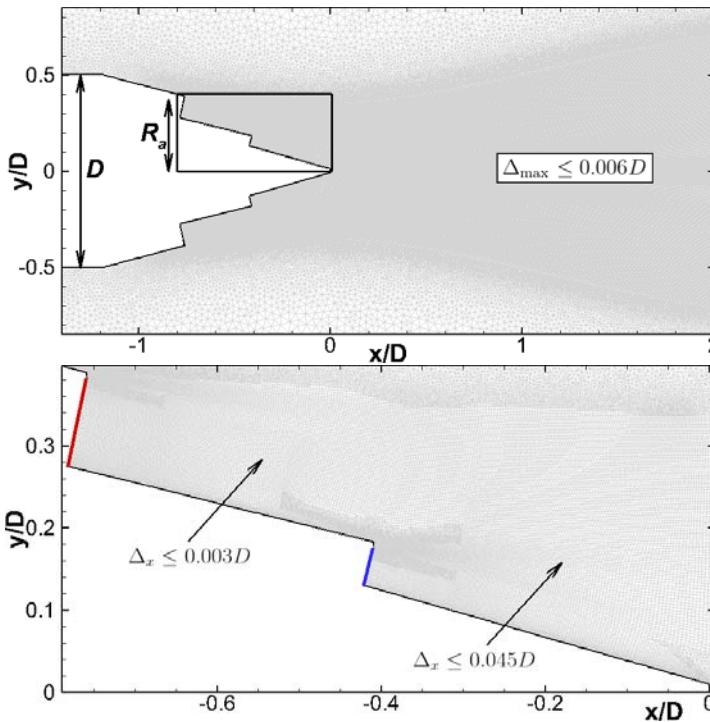


Рис.3. Фрагмент вычислительной сетки для расчета NOISEtte.

Расчетная область для задачи представляет собой цилиндр длиной $100D$ (вдоль оси X , совпадающей с направлением течения струи вниз по потоку; D – внешний диаметр сопла), где входная область внешнего потока находилась на расстоянии $11.5D$ от законцовки центрального тела вверх по потоку, а выходная – на расстоянии $88.5D$ вниз по потоку. Боковые границ находились на расстоянии $75D$ от оси струи.

На рис.3 представлены фрагменты неструктурированной вычислительной сетки, использованной для моделирования рассматриваемого течения, в центральном сечении вдоль потока. Как видно из рисунка, в области струи сетка была преимущественно гладкой, здесь основными топологическими элементами были гексаэдры, что было сделано для достижения максимальной точности. Первый пристеночный шаг сетки возле твердых поверхностей был равен $5 \cdot 10^{-4} D$. Максимальное значение шага в области возмущенного турбулентного потока не превышало $6 \cdot 10^{-3} D$. Коэффициенты разбега и сгущения во всей области были не более 1.1. При этом в направлении вниз по потоку от кромок внешнего и внутреннего контуров сопла, значение данного коэффициента было равно 1.013. Итоговый размер трехмерной неструктурированной вычислительной сетки составил 26.7 млн. узлов, в азимутальном направлении сетка содержала 200 слоёв.

Для получения результатов расчета сначала в течение $10D/c_\infty$ (здесь c_∞ – характерная скорость звука на бесконечности) моделировался «переходный» период до получения статистически установившегося течения. Далее проводилось накопление статистики в течение времени $10D/c_\infty$. Осреднение газодинамических полей течения для последующего сравнения производилось как по времени, так и по пространству в азимутальном направлении.

Для проведения расчета в гибридном MPI+OpenMP режиме одновременно было задействовано 80 узлов с 12-ядерными процессорами Intel Xeon E5-2680v3 (960 ядер CPU) суперкомпьютера «НРС4» НИЦ «Курчатовский институт». Время моделирования $10D/c_\infty$ составляло примерно 12 часов (вычислительная ёмкость – 11520 ядрочасов).

Таблица 1. Параметры вычислительных сеток.

Расчет	N_n , млн.	n_{az}	Δ_{max}^j/D	Δ_{az}^{j1}/D	Δ_{az}^{j2}/D	Δ_w^1/D	$\Delta t c_\infty/D$
DDES-PMГ	4.4	48	$6.4 \cdot 10^{-2}$	$3.0 \cdot 10^{-2}$	$6.4 \cdot 10^{-2}$	$2.7 \cdot 10^{-3}$	$9.7 \cdot 10^{-3}$
DDES-EBR	26.7	200	$5.6 \cdot 10^{-3}$	$5.6 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$4.4 \cdot 10^{-4}$

Параметры расчетных сеток представлены в табл.1. Здесь введены следующие обозначения: N_n – число узлов вычислительной сетки (число степеней свободы в DDES-PMГ расчете), n_{az} – число ячеек в азимутальном направлении, Δ_{max}^j – максимальный шаг сетки в области возмущенного потока струи, Δ_{az} – шаг сетки в азимутальном направлении возле кромки сопла (верхний индекс $j1$ – внутренний контур, $j2$ – внешний контур), Δ_w^1 – величина первого пристеночного шага, Δt – шаг по времени (c_∞ – скорость звука на бесконечности).

4. Сравнение результатов

На рис.4 и 5 представлены мгновенные картины течения, полученные в расчетах DDES-PMГ и DDES-EBR соответственно. На рис.4 приведены поля числа Маха (слева) и температуры (справа), на рис.5 – поля числа Маха (слева) и модуля завихренности (справа). Из рисунков видно, что картина течения, полученная с помощью DDES-EBR, ввиду использования сетки большего размера, характеризуется более быстрой «турбулизацией» слоёв смешения, образующихся вниз по потоку от кромок как внешнего, так и внутреннего контуров сопла, а также меньшим характерным размером разрешаемых турбулентных структур.

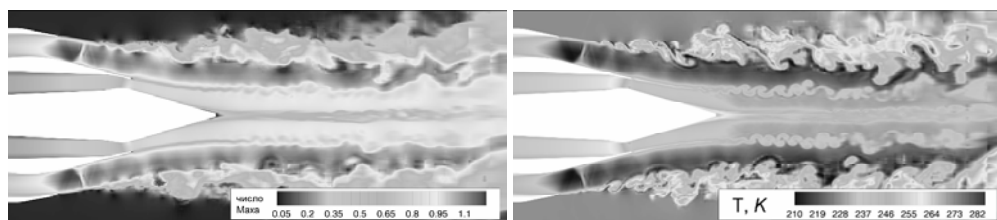


Рис.4. Мгновенные поля течения в центральном поперечном сечении струи, полученные в расчете DDES-PMГ: число Маха (слева), температура (справа).

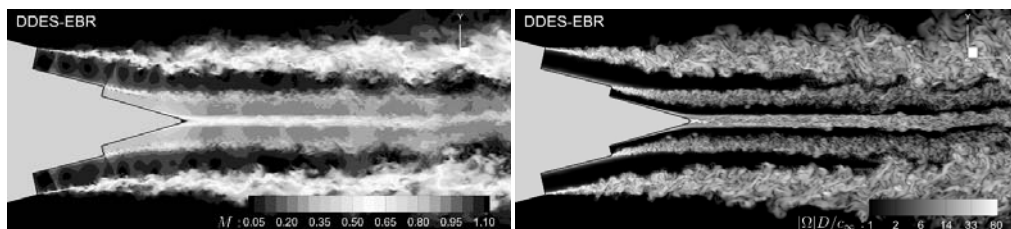


Рис.5. Мгновенные поля течения в центральном поперечном сечении струи, полученные в расчете DDES-EBR: число Маха (слева), модуль завихренности (справа).

На рис.4 и 5 можно видеть упорядоченные квазидвумерные структуры на начальном участке внутреннего слоя смешения, однако длина такого участка заметно больше в случае DDES-PMГ расчета, при котором наблюдается «затянутость» перехода к нестационарному режиму в целом. Это свидетельствует о недостаточности сеточного разрешения в данной области. Тем не менее необходимо отметить, что обе методики позволяют уловить основные газодинамические особенности течения струи из двухконтурного сопла: скачковые структуры в потоке из внешнего контура, слои смешения на кромках обоих контуров, их взаимодействие на некотором расстоянии от законцовки центрального тела, а также смешение струи с внешним воздухом вниз по потоку.

На рис.6 и 7 ударно-волновая структура струи, полученная в DDES-PMГ расчете и расчете DDES-EBR соответственно, сравнивается с экспериментальной ширен-фотографией. Из рис.6 видно, что в струе, исходящей из внешнего контура, скачки несколько длиннее, чем в эксперименте, что можно объяснить неточностью в задании входных профилей параметров. При этом расчет DDES-EBR (рис.7) позволяет получить более близкую к экспериментальной ударно-волновую картину. По всей видимости, это связано с лучшим разрешением слоя смешения внешнего контура, что способствует его более быстрой «турбулизации» и, соответственно, более корректному предсказанию течения в данной области. Далее, ниже вниз по потоку, ударно-волновая структура приближается к экспериментальной.

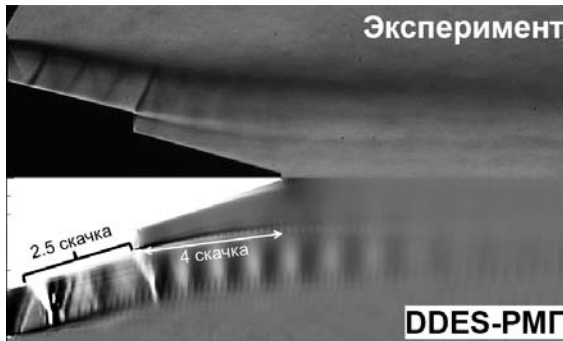


Рис.6. Ударно-волновая структура струи: сравнение DDES-PMГ расчета (осредненное распределение продольного градиента плотности, снизу) с экспериментом (сверху).

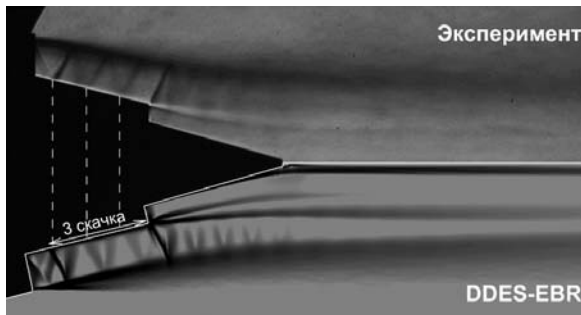


Рис.7. Ударно-волновая структура струи: сравнение DDES-EBR расчета (осредненное распределение модуля градиента плотности, снизу) с экспериментом (сверху).

Поперечные сечения струи, в которых приводятся экспериментальные профили давления Пито в сравнении с расчетными, показаны на рис.8. Начало координат находится на срезе центрального тела. Все размеры здесь и далее на рис.9 приводятся к радиусу внешнего контура сопла R_a ($R_a \cong 0.38D$).

На рис.9 представлены расчетные и экспериментальные профили осредненного по времени давления Пито, отнесенного к давлению торможения в форкамере p_0 . Для сравнения добавлены результаты стационарного RANS-расчета по модели SST.

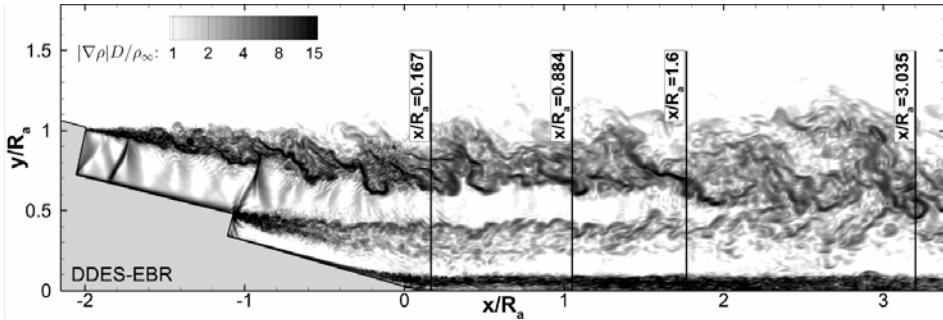


Рис.8. Расположение поперечных сечений.

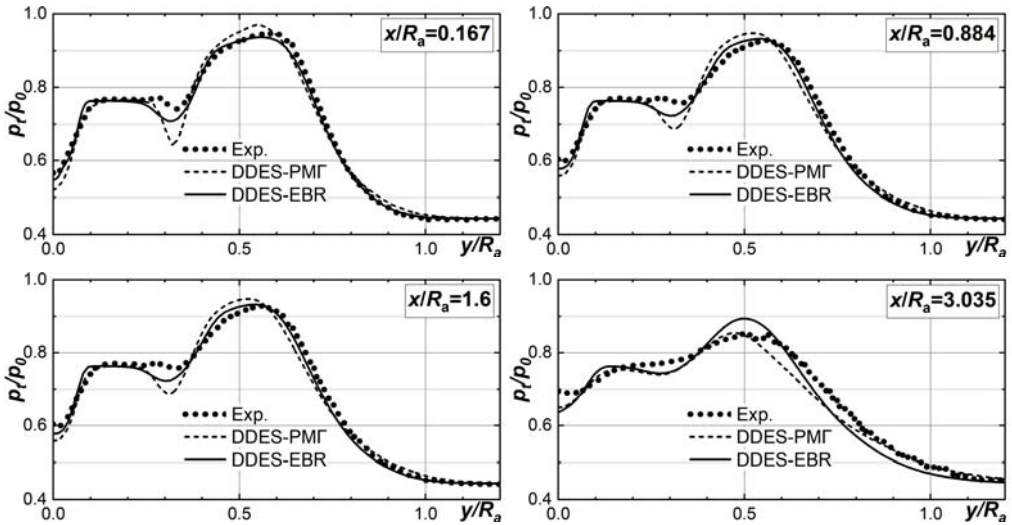


Рис.9. Осредненные профили давления Пито в поперечных сечениях струи.

Из графиков на рис.9 видно, что все рассматриваемые методики позволяют получить результаты, более или менее качественно согласующиеся с экспериментальными данными. Максимальное отклонение не превышает 10%. При этом для первых двух профилей (рис.9, сверху) на расстоянии $x/R_a < 1$ от законцовки центрального тела, заметно, что результаты DDES-EBR лучше совпадают с экспериментом, особенно в области истечения из внешнего контура струи (при $y/R_a > 0.35$). На больших расстояниях вниз по потоку (рис.9, снизу) наблюдается большая согласованность данных, полученных с помощью вихреразрешающих расчетов как между собой, так и с

экспериментальными данными. По всей видимости, это объясняется тем, что сеточного разрешения тонкого слоя смешения, образующегося из дозвукового контура сопла, как в расчете DDES-PMГ, так и DDES-EBR, было недостаточно. Рассогласование расчетных и экспериментальных данных в области внутреннего слоя смешения (при $0.2 < y/R_a < 0.4$) наблюдается на всём его протяжении, толщина которого в вихреразрешающих расчетах оказалась завышенной. Можно сказать, что вихреразрешающее моделирование позволяет более или менее точно предсказывать смешение струи с окружающим воздухом в дальнем сечении струи.

Заключение

Представленные в статье расчёты, в целом, демонстрируют большой потенциал современных вихреразрешающих гибридных подходов семейства DES для моделирования сложных струйных течений в конфигурациях, приближенных к промышленным. Численные методы повышенной точности и, в частности, используемые в работе разрывный метод Галёркина и EBR схемы для неструктурированных сеток, позволяют при этом получать неплохие по точности результаты на сетках умеренной размерности за относительно небольшое время, которое вместе с ожидаемым ростом производительности многопроцессорных вычислительных систем в будущем будет только сокращаться.

Вместе с тем следует отметить, что авторам пока не удалось добиться отличного согласования со всеми имеющимися экспериментальными данными. По всей видимости, причина выявленных расхождений кроется в рассогласовании граничных условий на выходе из сопла в физическом и вычислительном экспериментах, а также в отсутствии осевой симметрии в экспериментальной постановке. Сопоставление численных и экспериментальных результатов также выявило необходимость использования в расчетах вычислительных сеток с лучшим разрешением. В дальнейшем планируется провести дополнительные (экспериментальные и численные) исследования для решения обнаруженных проблем. При этом будет учтена необходимость согласования расчетных сеток для более адекватного сопоставления расчетных данных с помощью различных вычислительных методик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Vlasenko, S. Bosniakov, S. Mikhailov, A. Morozov, A. Troshin. Computational approach for investigation of thrust and acoustic performances of present-day nozzles // Prog. Aerosp. Sci., 2010, v.46, №4, p.141-197.
2. A. Savelyev, N. Zlenko, E. Matyash, S. Mikhaylov, A. Shenkin. Optimal design and installation of ultra high bypass ratio turbofan nacelle // AIP Conf. Proc., 2016, v.1770, №030123.

3. *J.F. Groeneweg, E.J. Rice.* Aircraft turbofan noise // *J. Turbomachinery*, 1987, v.109, p.130-141.
4. *Н.А. Зленко, С.В. Михайлов, А.А. Савельев, А.В. Шенкин.* Методика оптимального аэродинамического проектирования мотогондолы ТРДД с большой степенью двухконтурности // *Уч. Записки ЦАГИ*, 2015, т.46, №6, с.20-38.
N.A. Zlenko, S.V. Mikhailov, A.A. Savelev, A.V. Shenkin. Metodika optimalnogo aerodinamicheskogo proektirovaniia motogondoly TRDD s bolshoi stepeniю dvukhkonturnosti // *Uch. Zapiski TsAGI*, 2015, t.46, №6, s.20-38.
5. *N.W.M. Ko, A.S.H. Kwan.* The initial region of subsonic coaxial jets // *J. Fluid Mech.*, 1976, v.73, pt.2, p.305-332.
6. *E. Murakami, D. Papamoschou.* Mean Flow Development in Dual-Stream Compressible Jets // *AIAA J.*, 2002, v.40, №6, p.1131-1138.
7. *R.I. Sujith, R. Ramesh, S. Pradeep, S. Sriram, T.M. Muruganandam.* Mixing of high speed coaxial jets // *Exp. Fluids*, 2001, v.30, №3, p.339-345.
8. *В.И. Запрыгаев, Н.П. Киселев, А.А. Пивоваров.* Газодинамическая структура осесимметричной сверхзвуковой недорасширенной струи // *Изв. РАН. МЖГ*, 2015, №1, с.95-107.
V.I. Zapryagaev, N.P. Kiselev, A.A. Pivovarov. Gasdynamic structure of an axisymmetric supersonic underexpanded jet // *Fluid Dynamics*, 2015, v.50(1), p.87-97.
doi:10.1134/S001546281501010X
9. *A.P. Markesteijn and S.A. Karabasov.* GPU CABARET Solutions for the CoJen Jet Noise Experiment // 2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA AVIATION Forum, (AIAA 2018-3921) doi:10.2514/6.2018-3921
10. *V.A. Semiletov, P.G. Yakovlev, S.A. Karabasov, G.A. Faranosov, V.F. Kopiev.* Jet and jet-wing noise modelling based on the Cabaret Miles flow solver and the Ffowcs Williams – Hawkings method // *Intern. J. of Aeroacoustics*, 2016, v.15(6-7), p.631-645. doi: 10.1177/1475472X16659387
11. *Л.А. Бендерский, Д.А. Любимов.* Применение RANS/ILES метода высокого разрешения для исследования сложных турбулентных струй // *Уч. Зап. ЦАГИ*, 2014, т.45, №2, с.22-36;
L.A. Benderskii, D.A. Liubimov. Primenenie RANS/ILES metoda vysokogo razresheniia dlia issledovaniia slozhnykh turbulentnykh strui // *Uch. Zap. TsAGI*, 2014, t.45, №2, s.22-36.
12. *J. Verrière, F. Gand, S. Deck.* Zonal detached-eddy simulations of a dual-stream jet // *AIAA J.*, 2016, v.54, No. 10, p.3176-3190. doi:10.2514/1.J054896
13. *M.L. Shur, P.R. Spalart, M.K. Strelets.* Noise Prediction for Underexpanded Jets in Static and Flight Conditions // *AIAA J.*, 2011, v.49, No. 9, p.2000-2017.
14. *P.R. Spalart.* Detached-eddy simulation // *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, 2009, v.41, p.181-202.
15. *F. Bassi, S. Rebay.* A high-order accurate discontinuous finite element method for the numerical solution of the compressible Navier-Stokes equations // *J. Comp. Phys*, 1997, v.131, p.267-279.
16. *R. Hartmann.* Wall-resolved and wall-modeled ILES based on high-order DG // *Proc. ECCOMAS (ECCM-ECFD) 2018 Conference, Glasgow, UK*, 14 p.
17. *J.-B. Chapelier, M. de la Llave Plata, E. Lamballais.* Development of a multiscale LES model in the context of a modal DG method // *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 2016, v.307, p.275-299.
18. *P. Bakhvalov, I. Abalakin, T. Kozubskaya,* Edge-based reconstruction schemes for unstructured tetrahedral meshes // *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 2016, v.81(6), p.331-356.
19. *P. Bakhvalov, T. Kozubskaya.* EBR-WENO scheme for solving gas dynamics problems with discontinuities on unstructured meshes // *Comp. Fluids*, 2017, v.157, p.312-324.

20. С.М. Босняков, С.В. Михайлов, В.Ю. Подаруев, А.И. Трошин. Нестационарный разрывный метод Галеркина высокого порядка точности для моделирования турбулентных течений // Мат. моделирование, 2018, т.30, №5, с.37-56;
S.M. Bosnyakov, S.V. Mikhaylov, V.Yu. Podaruev, A.I. Troshin. Unsteady Discontinuous Galerkin Method of a High Order of Accuracy for Modeling Turbulent Flows // Mathematical Models and Computer Simulations, 2019, v.11, Issue 1, p.22-34.
21. I.S. Bosnyakov, S.V. Mikhaylov, V.Yu. Podaruev, A.I. Troshin, V.V. Vlasenko, A.V. Wolkov. Application of high-order discontinuous Galerkin method to LES/DES test cases using computers with high number of cores // Proc. 23rd AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, USA, Denver, Colorado, 5–9 June 2017, 13 p.
22. P.R. Spalart, S. Deck, M.L. Shur, K.D. Squires, M.Kh. Strelets, A. Travin. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities // Theor. Comp. Fluid Dyn., 2006, v. 20, p.181-195.
23. M.L. Shur, P.R. Spalart, M.K. Strelets, A.K. Travin. An enhanced version of DES with rapid transition from RANS to LES in separated flows // Flow Turbulence Combust., 2015, v.95, №4, p.709-737.
24. B. van Leer, W.T. Lee, P.L. Roe, K.G. Powell, C.H. Tai. Design of optimally smoothing multistage schemes for the Euler equations // Comm. Appl. Numer. Meth., 1992, v.8, №10, p.761-769.
25. F. Bassi, S. Rebay, G. Mariotti, S. Pedinotti, and M. Savini. A high-order accurate discontinuous finite element method for inviscid and viscous turbomachinery flows // Proc. 2nd European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, Belgium, Antwerpen, 1997, p.99-109.
26. P.-O. Persson, J. Peraire. Sub-cell shock capturing for discontinuous Galerkin methods // Proc. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, USA, Reno, 9–12 January 2006, 14 p.
27. F.R. Menter. Improved two-equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows // NASA TM-103975, 1992.
28. И.В. Абалакин, П.А. Бахвалов, А.В. Горобец, А.П. Дубень, Т.К. Козубская. Параллельный программный комплекс NOISETTE для крупномасштабных расчетов задач аэродинамики и аэроакустики // Выч. методы и программир., 2012, т.13, с.110-125.
I.V. Abalakin, P.A. Bakhvalov, A.V. Gorobets, A.P. Duben, T.K. Kozubskaya. Parallel research code NOISETte for large-scale computations of aerodynamics and aero-acoustics problems // Vychisl. Metody Programm., 2012, v.13(3), p.110-125.
29. M.L. Shur, P.R. Spalart, M.Kh. Strelets, A.V. Garbaruk. Analysis of jet-noise-reduction concepts by large-eddy simulation // Intern. J. of Aeroacoustics, 2007, v.6, p.243-285.
30. C. Mockett, M. Fuchs, A. Garbaruk, F. Thiele, M. Shur, M. Strelets, A. Travin, P. Spalart. Two non-zonal approaches to accelerate RANS to LES transition of free shear layers in DES // Notes on Numerical Fluid Mechanics. 2015. Vol. 130. pp. 187-201.
31. А.П. Дубень. Вычислительные технологии для моделирования сложных пристеночных турбулентных течений на неструктурированных сетках // Матем. моделирование, 2013, т.25, № 9, с.4-16.
A.P. Duben. Computational technologies for simulation of complex near-wall turbulent flows using unstructured meshes // Mathematical Models and Computer Simulations, 2014, v.6 (2), p.162–171. doi:10.1134/S2070048214020045
32. A. Duben, T. Kozubskaya. Jet Noise Simulation Using Quasi-1D Schemes on Unstructured Meshes // AIAA-paper 2017-3856, 2017.

Поступила в редакцию 04.03.2019

После доработки 04.03.2019

Принята к публикации 08.04.2019