

УДК 533.6:519.6:532.517.4:532.522.2

Исследование RANS/ILES методом высокого разрешения эффективности применения синтетических струй для управления отрывным течением в открытой каверне при дозвуковых скоростях внешнего потока

Любимов Д. А.¹, Федоренко А. Э.^{1,*}

^{*}alena.e.fedorenko@gmail.com

¹Центральный Институт Авиационного Моторостроения
им. П.И.Баранова, Москва, Россия

Представлены результаты численного моделирования дозвукового обтекания открытой трехмерной полости (каверны) при помощи RANS/ILES метода высокого разрешения. Исследована возможность управления течением в каверне с помощью синтетических струй. Рассмотрено два варианта расположения щелей для выхода синтетических струй: перед каверной и внутри нее на передней стенке. Было изучено пять режимов для струй (совокупность значений амплитуды скорости и частоты). Получены зависимости уровня пульсаций статического давления и температуры на нижней и задней стенках каверны от режимных параметров и положения щелей для выхода синтетических струй. Проведено сравнение результатов расчетов для квазидвумерной и трехмерной каверны по параметрам течения и турбулентности, а также по эффективности синтетических струй.

Ключевые слова: каверна, синтетическая струя, RANS/ILES

Введение

Задача об обтекании открытой полости – каверны – внешним потоком имеет большое практическое значение в приложениях, связанных с авиацией. К подобным полостям относятся: ниши для уборки шасси, различного вооружения и др. При обтекании таких полостей внешним потоком в них возникают нестационарные течения с высоким уровнем турбулентных пульсаций параметров течения: давления и температуры. Методы RANS, которые сейчас широко используются, не могут быть применены к этой задаче, поскольку не позволяют рассчитать турбулентные пульсации давления и температуры, которые важны для практических приложений. Выходом является использование вихреразрешающих подходов [1-5].

Актуальным является снижение уровня этих пульсаций. Используются различные пассивные «механические» способы управления течениями: установка спойлеров, цилиндров и иных преград в потоке перед каверной [4,6]. Однако описанные способы

управления течением неудобны: они либо дополнительно увеличивают сопротивление, если постоянно установлены, либо требуют дополнительных механизмов и места для их размещения в нерабочем состоянии. Более перспективными являются газодинамические способы управления течением. Одним из вариантов такого управления может быть выдув струй перед каверной, либо внутри ее [7-9]. Применение выдува струй уменьшает турбулентные пульсации течения в каверне и шум, который при этом генерируется. В этом случае требуется рабочее тело и магистрали для его подвода. Указанных недостатков лишены системы с нулевым суммарным массовым расходом рабочего тела [10-11]. В этом случае работа устройства управления течением сводится к чередующимся фазам выдува газа в поток из замкнутой полости за счет изменения ее объема с последующим всасыванием в нее низкоэнергетического потока из внешнего потока или каверны (в зависимости от расположения таких устройств). Полость сообщается только с внешним потоком, поэтому суммарный по времени расход газа равен нулю. Струи, образующиеся при работе таких устройств, в англоязычной литературе называются «синтетическими» (synthetic jet), а устройства, которые их создают, – генераторами синтетических струй (ГСС). ГСС могут быть достаточно компактны, их можно установить непосредственно около места выхода синтетических струй. Чаще всего синтетические струи применяются для управления внешними течениями, например для устранения отрывов на крыльях самолетов. Синтетические струи также применяются для управления отрывными течениями в диффузорах [12-15]. Известны примеры использования синтетических струй для управления течением в каверне [16].

Для численного исследования эффективности синтетических струй для управления турбулентными течениями также наиболее эффективно использование вихреразрешающих методов. Однако следует помнить, что подобные методы требуют больших вычислительных ресурсов. Современные мощности вычислительной техники позволяют применять для практических задач только метод моделирования крупных вихрей – LES – Large Eddy Simulation. В этом случае разрешаются только крупные турбулентные вихри, которые определяют особенности конкретного течения. Уменьшить необходимые вычислительные мощности можно, если использовать LES только в той части области, где течение не удастся описать с помощью RANS, а в остальной части расчетной области для расчета течения использовать подходы, основанные на решении уравнений RANS. Использование комбинированных RANS/LES методов позволяет на умеренных сетках решать сложные задачи с приемлемой для практических приложений точностью [2-5,9]. Дополнительно повысить точность расчета без увеличения числа ячеек расчетной сетки можно, если использовать методы высокого разрешения. Например, в работе [17] расчеты обтекания дозвуковым и сверхзвуковым потоком казидвумерной каверны выполнялись на сетках, содержащих 0.7×10^6 ячеек. Для расчетов был использован комбинированный RANS/LES метод [18], в котором для вычисления параметров на гранях ячеек для метода Роу была использована монотонная схема пятого порядка MP5 [19]. В работах [20,21] для расчета обтекания трехмерной и квазидвумерной

каверн и исследования применения эффективности синтетических струй для управления течением в квазидвумерной каверне был использован RANS/ILES метод [22], в котором для расчета параметров на гранях ячеек была использована схема 9го порядка MP9 [19]. Высокое разрешение метода позволило выполнить расчеты на сетках с $(1.1-1.3) \times 10^6$ ячеек с приемлемой точностью.

Целью настоящей работы было исследование влияния синтетических струй на течение в трехмерной каверне, которая обтекается внешним дозвуковым потоком. Расчеты выполнялись с помощью RANS/ILES метода высокого разрешения [22]. Установлено влияние режимных параметров ГСС и положения щелей для выхода синтетических струй на параметры течения и турбулентности в каверне. Были получены поля пульсаций статического давления и статической температуры на стенках каверны как без синтетических струй, так и при их наличии.

1. Описание метода расчета

Для расчетов был использован комбинированный RANS/ILES метод высокого разрешения, описанный в [22]. Уравнения Навье–Стокса, описывающие течения сжимаемого газа, а также уравнение переноса для модели турбулентности были записаны в консервативной форме для криволинейной системы координат, сеточные линии которой совпадали с границами расчетной области и поверхностью объекта исследования. Для аппроксимации конвективных членов в разностных аналогах уравнений Навье–Стокса была использована монотонная схема с разностями против потока высокого разрешения и с малой схемной вязкостью. Конвективные потоки на гранях расчетных ячеек вычислялись с помощью модифицированной схемы Роу, описанной в [22]:

$$\mathbf{f}_{i+1/2} = 0.5[\mathbf{f}(\mathbf{q}_L) + \mathbf{f}(\mathbf{q}_R)] - 0.5\alpha|\mathbf{A}|(\mathbf{q}_R - \mathbf{q}_L) \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{f}_{i+1/2}$, $\mathbf{f}(\mathbf{q}_L)$, $\mathbf{f}(\mathbf{q}_R)$ – векторы конвективных членов уравнений с левой и правой стороны грани ячейки соответственно, $|\mathbf{A}|$ – «модуль» матрицы Якоби, α – коэффициент, регулирующий уровень схемной вязкости. Параметры течения $\mathbf{q}_L$ и $\mathbf{q}_R$ вычислялись на гранях ячеек с помощью монотонной схемы 9-го порядка MP9 с разностями против потока [18]. Применение монотонной разностной схемы позволяет рассчитывать сверхзвуковые течения со скачками уплотнения. Параметр α в диффузионной части выражения (1) определяет уровень схемной вязкости. При $\alpha_{\max} = 1$ выражение (1) соответствует оригинальной схеме Роу. При $\alpha < 1$ получается комбинация центрально-разностной и противопоточной схем с пониженной схемной вязкостью. Минимальное значение $\alpha_{\min} = 0.3$ было выбрано из соображений устойчивости схемы. В описываемом методе отсутствует явная SGS-модель турбулентности, а ее функцию выполняет схемная вязкость (LES с неявной SGS-моделью – ILES). Такой подход позволяет использовать монотонные схемы высокого разрешения. С помощью метода ILES течение описывалось только вдали от твердых границ. Для описания пограничного слоя на стенках использовались нестационарные уравнения Навье–Стокса с моделью турбулентности Спаларта–Аллмараса [23].

Переход от RANS к ILES осуществлялся с помощью модификации расстояния в диссипативном члене в уравнении для модели турбулентности [23 Spalart 1994] таким образом, чтобы турбулентная вязкость обращалась в ноль. Новое расстояние $\tilde{d}$ вычислялось по формулам [22]:

$$\begin{aligned}\tilde{d} &= d, \text{ при } d \leq C_{ILES}\Delta_{\max} \\ \tilde{d} &= 0, \text{ при } d > C_{ILES}\Delta_{\max}\end{aligned}\quad (2)$$

В соотношениях (2): d – истинное расстояние от стенки до центра рассматриваемой ячейки, $C_{ILES}=0.65$, $\Delta_{\max}$ – максимальный размер этой ячейки сетки. Величина C_{ILES} в RANS/ILES методе определяет положение перехода от RANS к ILES.

Конвективные потоки на гранях расчетных ячеек в разностном аналоге уравнения для модели турбулентности определялись с помощью скалярного аналога (1) с $\alpha = 1$, при этом параметры q_R и q_L вычислялись с помощью схемы WENO5 [19].

Диффузионные потоки в уравнениях Навье-Стокса и в уравнении для модели турбулентности вычислялись на гранях ячеек с помощью центральных разностей второго порядка.

Прочие детали реализации численного метода описаны в работе [22].

2. Граничные условия

Для задач, которые рассмотрены в статье, использовались расчетные сетки, которые имели большой шаг в направлении по нормали к входной, выходной и внешней границам расчетной области. Это обеспечивает затухание акустических возмущений у границ расчетной области и дает возможность применять упрощенные стационарные граничные условия, заимствованные из методов RANS, основанные на результатах теории характеристик. При расчетах трехмерной каверны на входной, внешней и боковых границах расчетной области задавались полные параметры течения, угол наклона вектора скорости и величина турбулентной вязкости. Для квазидвумерной каверны на боковых границах расчетной области ставилось условие периодичности. На выходной границе расчетной области задавалось постоянное статическое давление, а для остальных параметров течения задавались нулевые производные по нормали к границе. На стенках сопла в зависимости от значения Y^+ в центре ближайшей к стенке ячейки параметры определялись на основании «законов стенки» или условия прилипания.

Особого внимания заслуживает постановка граничных условий при моделировании синтетических струй. Для моделирования синтетических струй использовалось модифицированное граничное условие на части стенки, соответствующей щели для выхода синтетической струи [13]: нормальная к стеке компонента скорости изменялась по гармоническому закону струи: $V_n = q \times \sin(2 \times \pi \times f \times t)$. Здесь q и f – амплитуда и частота синтетических струй, t – время. Такое условие обеспечивает приемлемую точность расчетов [14] и позволяет избежать затратного и сложного расчета течения в полости генератора синтетических струй.

3. Результаты расчетов

Общий вид каверны показан на рис. 1.

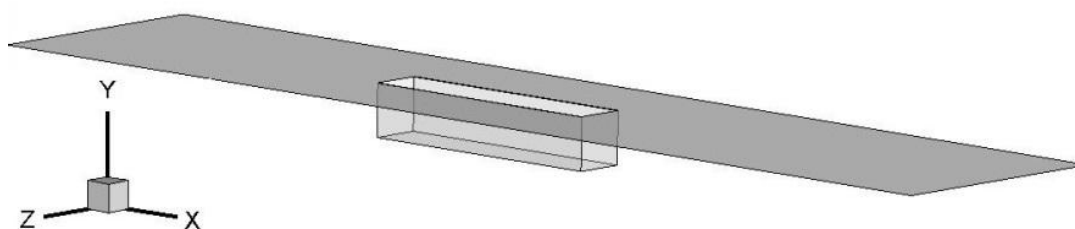


Рис. 1. Общий вид каверны

Геометрические размеры каверны были следующими. Длина каверны: $L=5D$, ширина: $W=D$, где D – глубина каверны. Расчеты проводились в двух постановках. В первом случае рассматривались трехмерная каверна, на боковых стенках которой задавались описанные выше условия, соответствующие твердой стенке. Расчетная сетка в этом случае была сгущена к боковым стенкам. Во втором случае на боковых стенках было использовано условие периодичности, сетка в трансверсальном направлении была равномерная, а ширина расчетной области равнялась D . Такая постановка соответствует каверне бесконечной ширины – квазидвумерной каверне. Фрагменты расчетных сеток для обоих вариантов показаны на рис. 2.

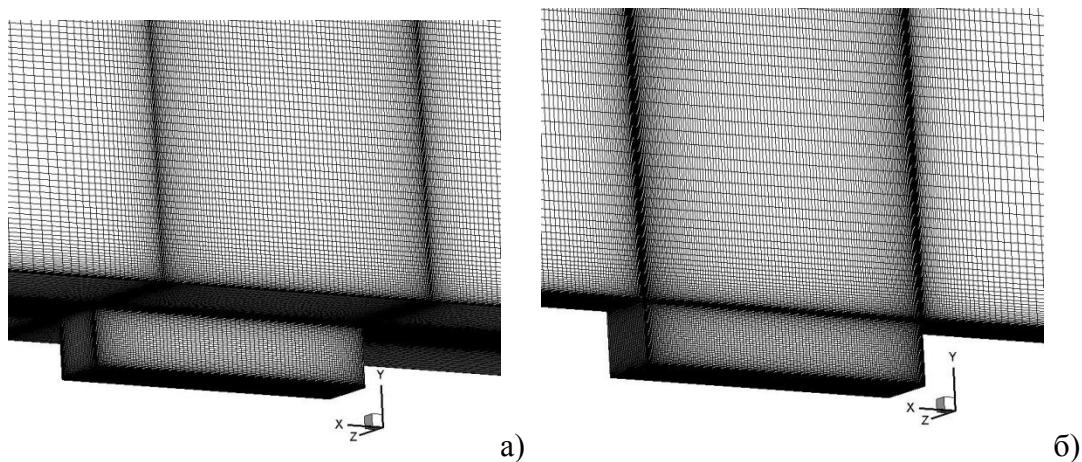


Рис. 2. Фрагмент сетки около трехмерной (а) и квазидвумерной (б) каверны

Вначале был выполнен расчет пространственной каверны при числе Маха набегающего потока $M=0.85$ и полной температуре $T_1=300\text{K}$ с числом Рейнольдса $Re=1.4 \times 10^6$. Число Рейнольдса, вычислялось по глубине каверны и скорости набегающего потока $U_1=291\text{м/с}$. Плотность на ходе равнялась $\rho_1=1.16\text{кг/м}^3$. Общее количество ячеек было 2.6×10^6 , из которых 0.2×10^6 ячеек приходилось на каверну.

На рис. 3 показаны мгновенные изоповерхности градиента плотности и поле производной статического давления по времени $\partial P/\partial t$, полученные при расчете обтекания трехмерной каверны. Взаимодействие нестационарного слоя смешения с дозвуковым внешним потоком вызывает разгон последнего, что приводит к образованию ударных волн. Нестационарное турбулентное течение вызывает увеличение толщины слоя смешения над каверной. Это также видно на рис. 3.

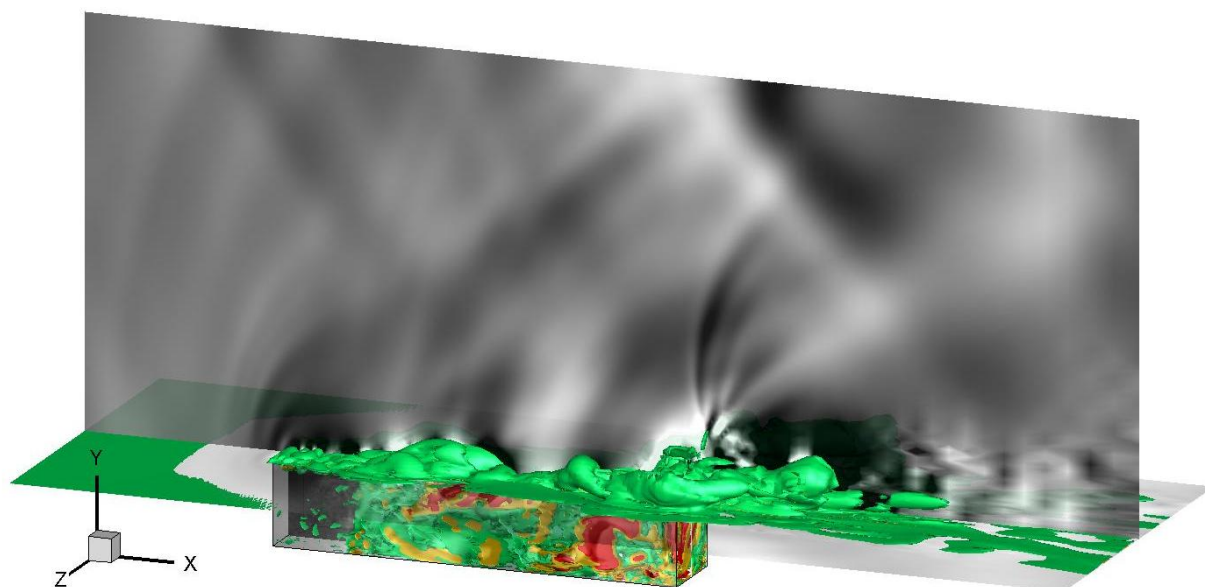


Рис. 3. Изоповерхности градиента плотности (цветные) и поле $\partial P/\partial t$ (черно-белое) в продольной вертикальной плоскости симметрии при обтекании пространственной каверны

Как уже отмечалось во введении, вместо очень затратного расчета течения в ГСС, схема которого показана на рис. 4, было использовано модифицированное граничное условие, описанное выше, на стенке в том месте, где располагались щели для выхода синтетических струй [23].

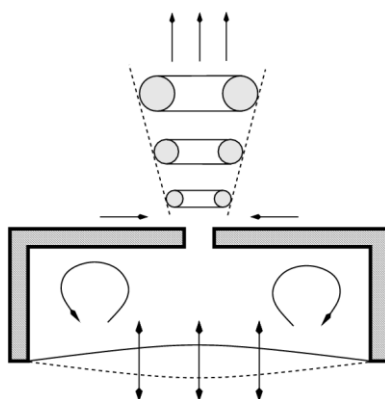


Рис. 4. Схема генератора синтетических струй

Расчеты течения в трехмерной каверне выполнялись на структурированной сетке, с числом ячеек 2.6×10^6 . Число Re было 1.4×10^6 . Щель для выхода синтетических струй располагались как перед каверной на расстоянии $0.1D$ от ее передней кромки, так и внутри ее на передней стенке на расстоянии $0.9D$ от дна каверны (рис 5).

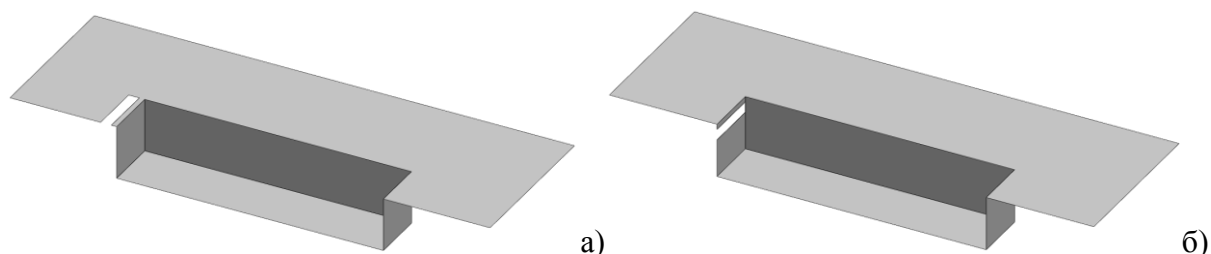


Рис. 5. Варианты положения щели для выдува синтетической струи: а) – перед каверной и б) – внутри каверны

Таблица. Параметры струй

Расположение щели	Размеры щелей	Номер варианта	Частота, Гц	Амплитуда, м/с
Внутри	$1D \times 0.2D$	1	100	50
		2	200	50
Снаружи	$1D \times 0.2D$	3	20	20
		4	100	50
		5	200	50

Для обоих вариантов положения щелей было исследовано несколько режимов ГСС. Они приведены в таблице. На рис. 6 показаны поля мгновенного распределения скорости в продольной плоскости симметрии каверны ($z=0$). Видно, что течение в слое смещения и внутри каверны имеет турбулентный характер. В зависимости от положения щели для выдува синтетической струи и ее режимных параметров картина течения в каверне меняется, и это можно наблюдать даже на мгновенных распределениях скорости. Так при расположении щели для выдува синтетической струи внутри каверны (варианты №1 и №2 из таблицы) изменения течения незначительны. При расположении щели перед каверной ее воздействие на течение меняется. В этом случае она несколько приподнимает пограничный слой и, как следствие, слой смещения перед каверной. Этот механизм воздействия синтетических струй на течение соответствует описанному в работе [25]. Видно, что картина течения зависит не только от амплитуды синтетических струй, но и от их частоты (варианты №4 и №5). Интересно отметить, что для этих режимов на полях мгновенного распределения скорости видны акустические волны (вариант №4,5), распространяющиеся вверх по потоку.

Количественный анализ результатов расчетов показал, что для всех исследованных режимов синтетические струи снижали уровень пульсаций статического давления и температуры на нижней и задней стенках каверны. Это можно видеть на рис. 7 и рис. 8, где распределения приведены в продольном сечении в плоскости симметрии каверны.

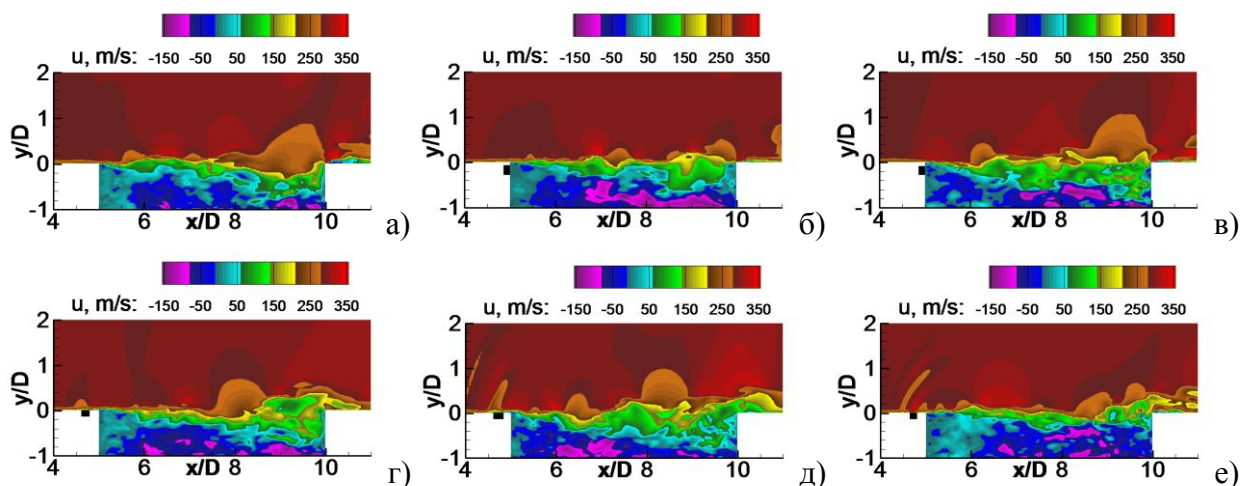


Рис. 6. Мгновенные поля продольной скорости для всех исследованных режимов: а) – без струй, б) – вариант 1, в) – вариант 2, г) – вариант 3, д) – вариант 4, е) – вариант 5а

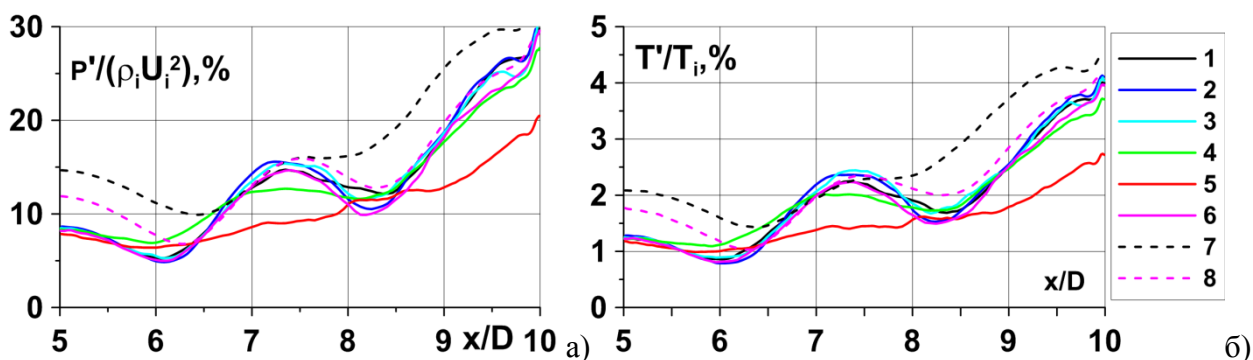


Рис. 7. Влияние синтетических струй на распределение на нижней стенке каверны пульсаций статического давления (а) и статической температуры (б): 1) – без струй, 2) – вариант 1, 3) – вариант 2, 4) – вариант 3, 5) – вариант 4, 6) – вариант 5, 7) - квазидвумерная задача [19,20], 8) - квазидвумерная задача+синтетическая струя снаружи (200 Гц, 50 м/с) [19,20]

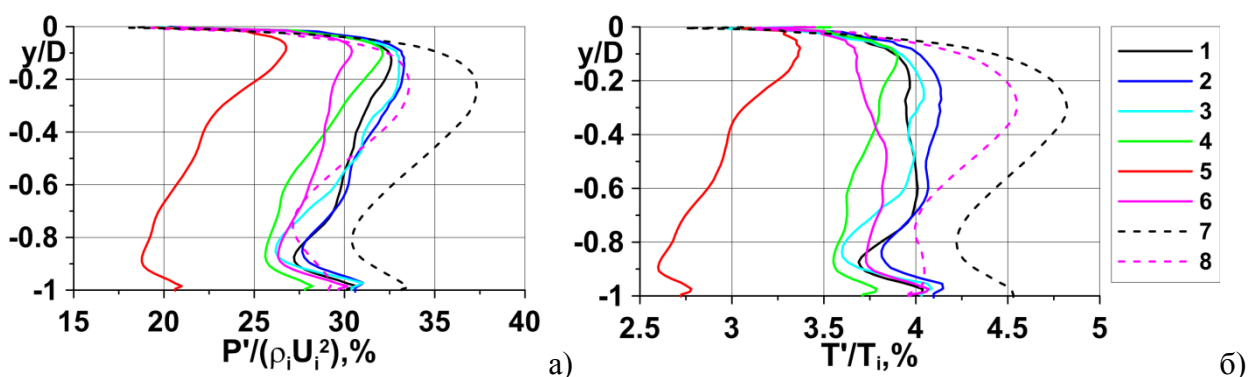


Рис. 8. Влияние синтетических струй на распределение на задней стенке каверны пульсаций статического давления (а) и статической температуры (б): 1) – без струй, 2) – вариант 1, 3) – вариант 2, 4) – вариант 3, 5) – вариант 4, 6) – вариант 5, 7) - квазидвумерная задача [19,20], 8) - квазидвумерная задача+синтетическая струя снаружи (200 Гц, 50 м/с) [19,20]

Пульсации течения на этих рисунках отнесены к соответствующим параметрам потока на входе в расчетную область, которые имеют индекс «i». На рисунках видно, что эффективность синтетических струй зависит от их режимных параметров и положения щелей для их выхода. Так для вариантов №1 и №2, когда щель была расположена внутри каверны на ее передней стенке, влияние синтетической струи на распределение пульсаций статического очень незначительно. Более того, для этих вариантов с синтетическими струями наблюдается некоторое увеличение пульсаций статического давления и температуры на задней стенке каверны при $-0.5 < Y/D < -0.1$. Подтверждением сказанного может служить рис. 9, где показаны поля пульсаций статического давления в сечении $z=0$ для всех исследованных режимов. Видно, что поля пульсаций статического давления внутри каверны за исключением окрестности задней стенки для вариантов №1 и №2 практически такие же, как у варианта без струй. В случае расположения щели для выдува синтетической струи перед каверной её влияние на течение в каверне и уровень пульсаций заметно сильнее. Это наблюдается даже для режима №3 с низкой амплитудой. А самый эффективный – вариант №4. Для варианта №4 на нижней стенке каверны наблюдается монотонное распределение пульсаций давления и температуры по длине каверны. Нужно отметить, что наибольшее снижение уровня пульсаций давления и температуры наблюдается на задней стенке, на нижней стенке этот эффект проявляется слабее. Это хорошо видно на рис. 9.

Для оценки влияния ширины каверны на эффективность синтетических струй на рис. 7 и рис. 8 также представлены каверны с результатами расчетов в квазидвумерной постановке с $L/d = 5$ при $Re = 6.8 \times 10^6$, для которой в [20,21] были выполнены расчеты настоящим методом. Количество ячеек для этой задачи равнялось 1.13×10^6 , из которых 0.28×10^6 приходилось на каверну. Видно, что в зависимости от постановки задачи (трехмерная или квазидвумерная каверна) синтетические струи оказывают различное влияние на распределение пульсаций параметров течения по высоте каверны. В трехмерной каверне синтетические струи изменяют не только уровень пульсаций, но и неравномерность их распределения по высоте. При этом для варианта №5, для которого проводилось сравнение для трехмерной каверны снижение уровня пульсаций несколько меньше.

Пульсации течения на этих рисунках отнесены к соответствующим параметрам. Однако такое сравнение не совсем полное. Это обусловлено тем, что в трехмерной каверне параметры течения и турбулентные пульсации зависят от трансверсальной координаты z . В квазидвумерной постановке такая зависимость отсутствует. Причем в трехмерной каверне зависимость от координаты z наиболее сильно проявляется около задней стенки каверны.

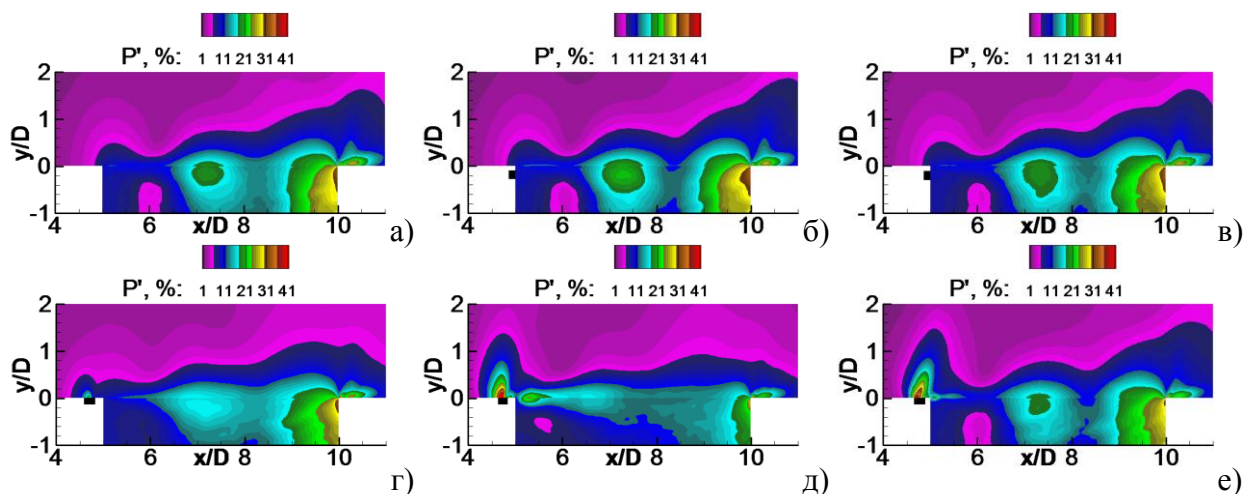


Рис. 9. Влияние режимных параметров и положения синтетической струи на поле пульсаций статического давления (отнесены к $ri_{Ui2/2}$): а) – без струй, б) – вариант 1, в) – вариант 2, г) – вариант 3, д) – вариант 4, е) – вариант 5

Подтверждением являются рис. 10 и рис. 11, на которых показаны поля пульсаций статического давления и температуры на стенках каверны. Отсутствие симметрии относительно плоскости $z=0$ является следствием недостаточного времени осреднения у некоторых вариантов. Однако приведенные результаты позволяют получить достаточное представление об особенностях распределения пульсаций статического давления и температуры в трехмерной каверне и влияния на них синтетической струи. Видно, что в базовом варианте каверны без синтетической струи максимумы пульсаций статического давления и температуры находятся на некотором расстоянии от продольной плоскости симметрии каверны. Для вариантов №1 и №2 наблюдается заметное увеличение пиковых значений пульсаций статического давления на задней стенке каверны и увеличения области с высоким уровнем пульсаций. При этом на течение влияет не только амплитуда, но и частота синтетической струи: вариант №1 вызывает большее увеличение пульсаций на задней стенке, чем вариант №2. Интересно отметить, что для пульсаций температуры это проявляется более заметно, чем для пульсаций статического давления. Синтетическая струя, которая выдувается из щели расположенной на передней стенке каверны вызывает увеличение пульсаций температуры не только на задней стенке, но и на боковых. Этот эффект сильнее выражен для варианта №1 (рис. 11).

Для вариантов, когда щель для выхода синтетической струи расположена перед каверной наблюдается совершенно иная картина. Во всех случаях наблюдается снижение пульсаций статического давления и температуры. Однако обращает на себя внимание тот факт, что синтетическая струя увеличивает неоднородность в трансверсальном направлении. При этом в продольной плоскости симметрии уровень пульсаций становится заметно меньше, чем в базовом варианте без синтетической струи. Однако на некотором удалении от нее все равно остаются пики пульсаций давления и температуры. На рис. 10 и

рис. 11 видно, что наиболее эффективным оказался вариант №4. В этом случае заметно снижается уровень пульсаций не только в продольной плоскости симметрии и на боковых стенках каверны, но и пиковые значения на ее задней стенке. Количественный анализ результатов, представленных на рис. 10 и рис.11, показал, что пиковое значение пульсаций статического давления на задней стенке каверны для базового варианта без струй составляет 35.2%. У вариантов №№1-5 соответственно 37.4%, 36.3%, 34.5%, 29.9% и 35.4%. Пиковое значение пульсаций статической температуры на задней стенке каверны без струй составляет 4.4% и 4.7%, 4.5%, 4.3%, 3.8% и 4.5% для вариантов №№1-5 соответственно. Видно, что эти значения существенно отличаются от тех, которые приведены на рис. 7 и рис. 8.

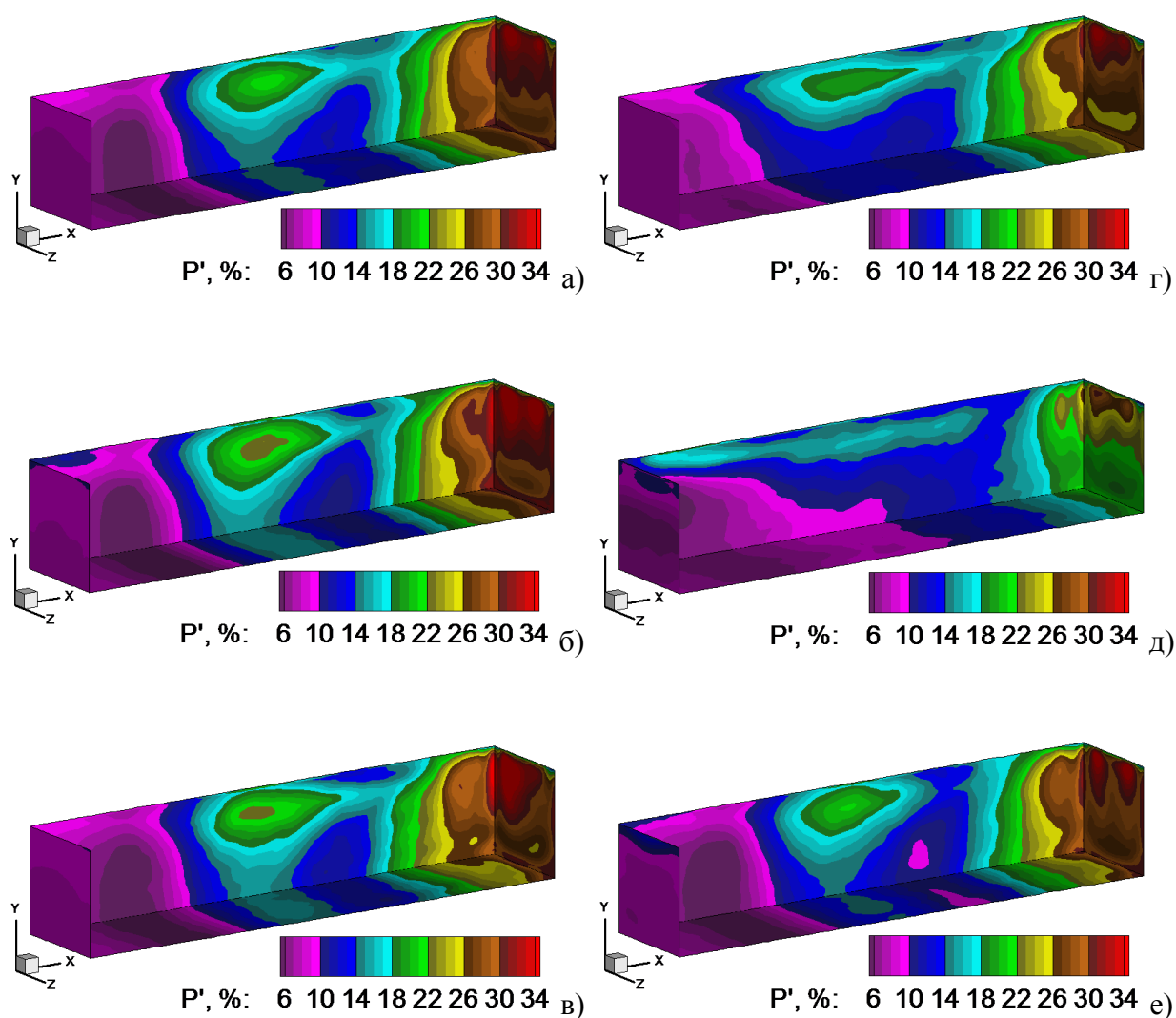


Рис. 10. Влияние режимных параметров и положения синтетической струи на пульсации статического давления на стенках каверны (отнесены к $\rho U_i^2/2$): а) – без струй, б) – вариант 1, в) – вариант 2, г) – вариант 3, д) – вариант 4, е) – вариант 5

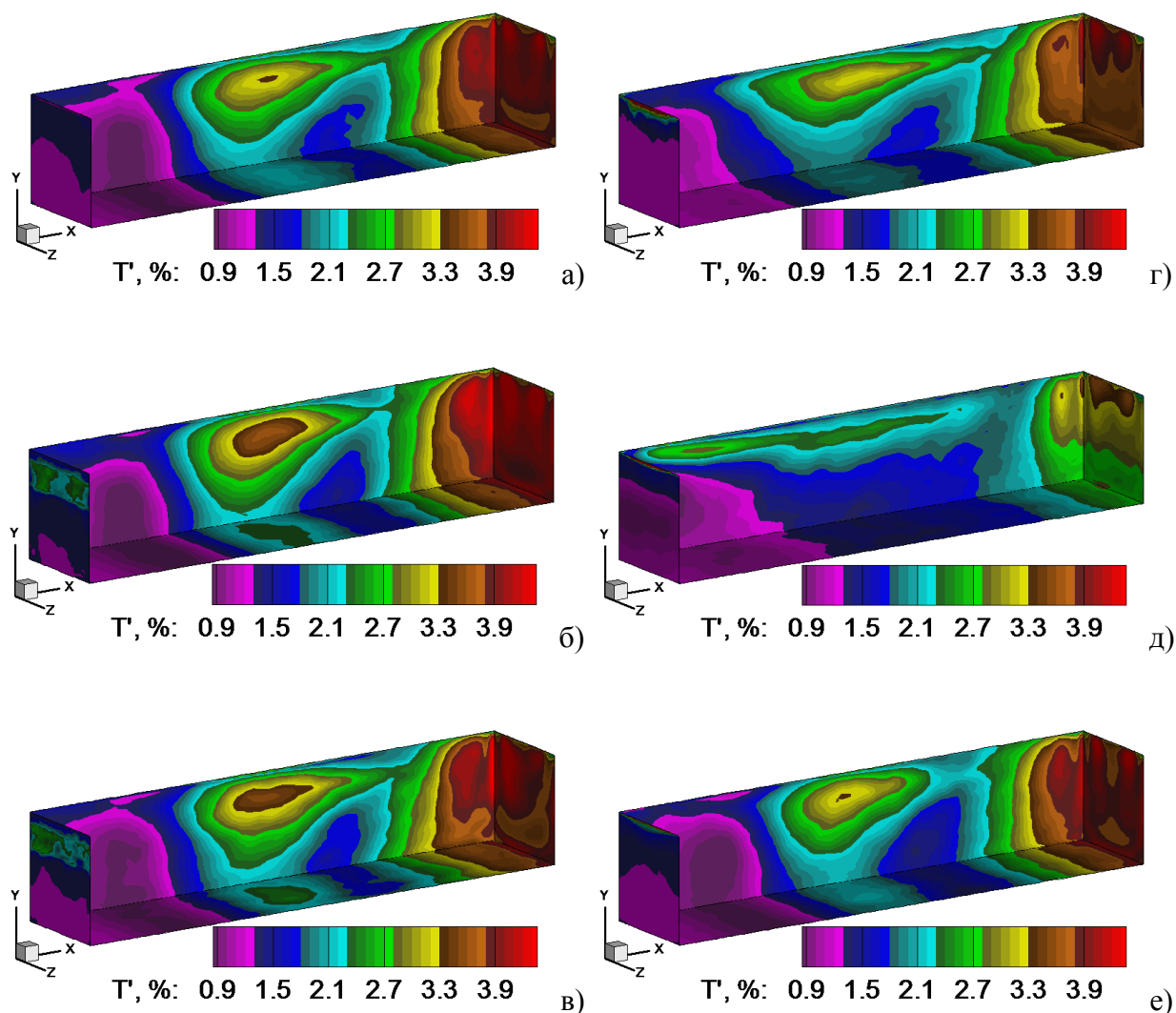


Рис. 11. Влияние режимных параметров и положения синтетической струи на пульсации статической температуры на стенках каверны для всех исследованных режимов (отнесены к T_i): а) – без струй, б) – вариант 1, в) – вариант 2, г) – вариант 3, д) – вариант 4, е) – вариант 5

Заключение

С помощью RANS/ILES метода высокого разрешения выполнены расчеты обтекания трехмерной каверны внешним потоком и исследована эффективность применения синтетических струй для управления течением в них. Расчеты проводились на сетке 2.6×10^6 ячеек для числа Рейнольдса 1.4×10^6 . Было исследовано два положения щели для выхода синтетической струи: перед каверной и на передней стенке внутри нее. В обоих случаях расчеты проводились для различных значений амплитуды и частоты синтетической струи.

Установлено, что наиболее эффективное положение щели для выхода синтетической струи – позиция перед каверной. При расположении щели внутри каверны на ее передней

стенке наблюдается увеличение пиковых пульсаций статического давления и статической температуры по сравнению с базовым вариантом без синтетической струи.

Получено, что на эффективность синтетических струй влияет не только амплитуда, но и частота. Так для синтетически струи с частотой 100Гц (вариант №4) наблюдался значительно больший эффект, чем для струи с $f=200\text{Гц}$ (вариант №5). В обоих случаях амплитуда струи была 50м/с. По сравнению с базовым вариантом без струй для варианта №4 получено снижение почти в полтора раза максимальных пульсаций статического давления и температуры на задней стенке каверны в продольной плоскости симметрии. На задней стенке каверны снижение пиковых значений пульсаций статического давления было с 35.2% до 29.9%, статической температуры с 4.4% до 3.8%. При этом значительно уменьшились размеры областей с высоким уровнем пульсаций указанных параметров на стенках каверны.

Анализ результатов расчетов показал, что для оценки пульсаций давления и температуры, а также исследования средств управления течением в каверне, ширина которой в несколько раз меньше, чем ее длина, нельзя использовать упрощенные квазидвумерные расчеты. Распределение пульсаций давления и температуры на задней стенке каверны, где они обычно максимальны, носит существенно трехмерный характер. Это нужно учитывать при обработке результатов расчетов и расположении различных датчиков для регистрации тех или иных параметров при экспериментальных исследованиях подобных объектов.

Кроме того, сравнение результатов расчетов течения в трехмерной каверне и квазидвумерной с теми же продольными геометрическими размерами показало, что уровень турбулентных пульсаций течения в продольной плоскости симметрии трехмерной каверны в зависимости от параметра и сечения до 50% ниже, чем в квазидвумерной каверне.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №15-08-01996-А.

Список литературы

1. Gloerfelt X., Bogey C., Bailly C. Juve D. Aerodynamic noise induced by laminar and turbulent boundary layers over rectangular cavities // AIAA Paper. 2002. Art. no. 2002-2476. DOI: [10.2514/6.2002-2476](https://doi.org/10.2514/6.2002-2476)
2. Hamed A., Basu D., Das D. Detached Eddy Simulations of Supersonic Flow Over Cavity // AIAA Paper. 2003. Art. no. 2003-549. DOI: [10.2514/6.2003-549](https://doi.org/10.2514/6.2003-549)
3. Nayyar P., Barakos G.N., Badcock K.J. Analysis and Control of Weapon Bay Flows // RTO-MP-AVT-123- Flow-Induced Unsteady Loads and the Impact on Military Applications. NATO / RTO, 2005. P. 24-1 – 24-25.
4. Lawson S.J., Barakos G.N. Review of numerical simulations for high-speed, turbulent cavity flows // Progress in Aerospace Science. 2011. Vol. 47, no. 3. P. 186-216. DOI: [10.1016/j.paerosci.2010.11.002](https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2010.11.002)

5. Wang H.B., Sun M.B., Wu H.Y., Wang Z.G. Hybrid RANS/LES Simulations of Two and Three Dimensional Supersonic Cavity Flows // Journal of Energy and Power Engineering. 2011. Vol. 5. P. 97-104.
6. Levasseur V., Sagaut P., Mallet M., Chalot F. Unstructured Large Eddy Simulation of the passive control of the flow in a weapon bay // Journal of Fluids and Structures. 2008. Vol. 24, no. 8. P. 1204–1215. DOI: [10.1016/j.jfluidstructs.2008.06.016](https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2008.06.016)
7. Rona A. Control of Transonic Cavity Flow Instability by Streamwise Air Injection // AIAA Paper. 2004. Art. no. 2004- 682. DOI: [10.2514/6.2004-682](https://doi.org/10.2514/6.2004-682)
8. Sarkar S., Mandal R. Effects of Synthetic Jet in Suppressing Cavity Oscillations // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2012. Vol. 6, no. 7. P. 110-118.
9. Hamed A., Das K., Basu D. Numerical Simulations of Fluidic Control for Transonic Cavity Flows // AIAA Paper. 2004. Art. no. 2004- 429. DOI: [10.2514/6.2004-429](https://doi.org/10.2514/6.2004-429)
10. Pinzon C.F., Agarwal R.K. An Experimental and Computational Study of a Zero-Net-Mass-Flux (ZNMF) Actuator // AIAA Paper. 2008. Art. no. 2008- 559. DOI: [10.2514/6.2008-559](https://doi.org/10.2514/6.2008-559)
11. Qin N., Hia H. Detached Eddy Simulation of a Synthetic Jet for Flow Control // Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part I - journal of Systems and Control Engineering. 2008. Vol. 222, no. 2. P. 373-380. DOI: [10.1243/09596518JSCE513](https://doi.org/10.1243/09596518JSCE513)
12. Кашкин Ю.Ф., Любимов Д.А., Макаров А.Ю., Пудовиков Д.Е., Торохов С.А. Численное и экспериментальное исследование применения синтетических струй для управления течением в пространственных каналах // Теоретическая и прикладная газовая динамика. В 2 т. Т.1 / под. ред. С.Ю. Крашенинникова. М.: Торус пресс, 2010. С. 190-205. (Труды ЦИАМ; вып. 1341).
13. Любимов Д.А. Исследование влияния струй с нулевым массовым расходом на течение в криволинейном диффузоре // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 4. С. 557-567.
14. Lyubimov D., Makarov A., Potekhina I. Experimental and numerical research of unsteady flow in curvilinear channel with active flow management using “synthetic” jets // Proc. of the 28th International congress of the aeronautical science (Brisbane. Australia, 23-28 September 2012). Paper no. 932.
15. Потехина И.В., Любимов Д.А. Численное исследование управления с помощью синтетических струй отрывными течениями в переходных межтурбинных диффузора // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 1. С. 68–86. DOI: [10.7463/0115.0753472](https://doi.org/10.7463/0115.0753472)
16. Takahashi H., Liu F., Palavicini M., Oyarzun M., Griffin J., Ukeiley L., Cattafesta L. Progress on Active Control of Open Cavities // AIAA Paper. 2011. Art. no. 2011-1221. DOI: [10.2514/6.2011-1221](https://doi.org/10.2514/6.2011-1221)
17. Любимов Д.А., Потехина И.В., Федоренко А.Э. Численное исследование с помощью RANS/ILES-метода высокого разрешения течения в открытой полости при до- и сверхзвуковых скоростях внешнего потока // XXIV Научно-техническая конференция

- по аэродинамике (пос. Володарского, Моск. обл., 28 февраля - 1 марта 2013 г.): матер. ЦАГИ, 2013. С. 168-169.
18. Любимов Д.А. Разработка и применение эффективного RANS/ILES-метода для расчета сложных турбулентных струй // Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46, № 2. С. 271-282.
19. Suresh A., Huynh H. T. Accurate Monotonicity-Preserving Schemes with Runge-Kutta Time Stepping // Journal of Computational Physics. 1997. Vol. 136. P. 83-99. DOI: [10.1006/jcph.1997.5745](https://doi.org/10.1006/jcph.1997.5745)
20. Бендерский Л.А., Любимов Д.А., Потехина И.В., Федоренко А.Э. Исследование сложных турбулентных течений с помощью RANS/ILES-метода высокого разрешения // Четырнадцатая Международная школа-семинар «Модели и методы аэродинамики» (г. Евпатория, 4-13 июня 2014 г.): матер. М.: МЦНМО, 2014. С. 25-27.
21. Бендерский Л.А., Любимов Д.А., Потехина И.В., Федоренко А.Э. Применение RANS/ILES-технологии высокого разрешения для расчета пристеночных струй и слоев смешения // Пятая Всероссийская конференция «Вычислительный эксперимент в аэроакустике» (г. Светлогорск, Калининград. обл., 22-27 сентября 2014 г.): тез. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2014. С. 39-43.
22. Любимов Д.А. Разработка и применение метода высокого разрешения для расчета струйных течений методом моделирования крупных вихрей // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, № 3. С. 450–466.
23. Spalart P.R., Allmaras S.R. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows // La Recherche Aerospaciale. 1994. No. 1. P. 5-21. (also: 30th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 1992. Art. no. 92-0439. DOI: [10.2514/6.1992-439](https://doi.org/10.2514/6.1992-439)).
24. Aram S., Mittal R. Computational Study of the Effect of Slot Orientation on Synthetic Jet-Based Separation Control // International Journal of Flow Control. 2011. Vol. 3, no. 2-3. P. 87-110.

Investigation of Synthetic Jets Efficiency to Control Cavity Flotation with Subsonic External Flow by High-Resolution RANS / ILES Method

D.A. Lyubimov¹, A.E. Fedorenko^{1,*}

[*alena.e.fedorenko@gmail.com](mailto:alena.e.fedorenko@gmail.com)

¹Central Institute of Aviation Motors n.a. P.I. Baranov, Moscow, Russia

Keywords: cavity, synthetic jet, RANS/ILES

Cavities often found in airplanes: a niche for the landing gear, various weapons, etc. Reducing fluctuations of pressure and temperature in the cavity is a relevant practical problem. The article presents simulation results of external subsonic flow around the cavity ($M = 0.85$, $T = 300K$). Calculations were performed using the high-resolution RANS/ILES (Reynolds Averaged Navier-Stokes - RANS, Implicit Large Eddy Simulation - ILES) method. To control flow the authors propose to use synthetic jets. Synthetic jets are produced by periodic ejection and suction of fluid from a slot induced by the movement of a diaphragm (generator of synthetic jets) inside a cavity. They are compact and efficient and do not require a special working body and the ways for its supply. Instead of calculating the flow in the synthetic jet generator was used the modified boundary condition on the wall where the output slots was positioned. Under consideration there were two variants of slots for synthetic jets output: in front of the cavity and inside the cavity on the front wall. The frequency and amplitude values of the synthetic jet specified a mode of each jet. For a jet inside the cavity two modes have been reviewed, namely: 100 Hz and 50m/s, 200Hz and 50m/s. For jet in front of the cavity three modes have been reviewed, specifically: 20Hz and 20m/s, 100Hz and 50m/s, 200Hz and 50m/s. Analysis of calculation results showed that for all modes under examination, the synthetic jets reduced fluctuation of static pressure and temperature on the bottom and back walls of the cavity. The mode with parameters 200Hz, 50 m/s and synthetic jet located in front of the cavity was the most efficient. Furthermore, we compared the results of calculations for two-and three-dimensional cavities, which have the same length and depth. Research has shown that the simplified quasi-two-dimensional calculations cannot be used to evaluate the pressure and temperature fluctuations. This is due to, essentially, three-dimensional distribution of temperature and pressure fluctuations on the back wall of the cavity where they are, usually, maximal.

References

1. Gloerfelt X., Bogey C., Bailly C. Juve D. Aerodynamic noise induced by laminar and turbulent boundary layers over rectangular cavities. *AIAA Paper*, 2002, art. no. 2002-2476. DOI: [10.2514/6.2002-2476](https://doi.org/10.2514/6.2002-2476)
2. Hamed A., Basu D., Das D. Detached Eddy Simulations of Supersonic Flow Over Cavity. *AIAA Paper*, 2003, art. no. 2003-549. DOI: [10.2514/6.2003-549](https://doi.org/10.2514/6.2003-549)
3. Nayyar P., Barakos G.N., Badcock K.J. Analysis and Control of Weapon Bay Flows. *RTO-MP-AVT-123- Flow-Induced Unsteady Loads and the Impact on Military Applications*. NATO / RTO, 2005, pp. 24-1 – 24-25.
4. Lawson S.J., Barakos G.N. Review of numerical simulations for high-speed, turbulent cavity flows. *Progress in Aerospace Science*, 2011, vol. 47, no. 3, pp. 186-216. DOI: [10.1016/j.paerosci.2010.11.002](https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2010.11.002)
5. Wang H.B., Sun M.B., Wu H.Y., Wang Z.G. Hybrid RANS/LES Simulations of Two and Three Dimensional Supersonic Cavity Flows. *Journal of Energy and Power Engineering*, 2011, vol. 5, pp. 97-104.
6. Levasseur V., Sagaut P., Mallet M., Chalot F. Unstructured Large Eddy Simulation of the passive control of the flow in a weapon bay. *Journal of Fluids and Structures*, 2008, vol. 24, no. 8, pp. 1204–1215. DOI: [10.1016/j.jfluidstructs.2008.06.016](https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2008.06.016)
7. Rona A. Control of Transonic Cavity Flow Instability by Streamwise Air Injection. *AIAA Paper*, 2004, art. no. 2004- 682. DOI: [10.2514/6.2004-682](https://doi.org/10.2514/6.2004-682)
8. Sarkar S., Mandal R. Effects of Synthetic Jet in Suppressing Cavity Oscillations. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2012, vol. 6, no. 7, pp. 110-118.
9. Hamed A., Das K., Basu D. Numerical Simulations of Fluidic Control for Transonic Cavity Flows. *AIAA Paper*, 2004, art. no. 2004- 429. DOI: [10.2514/6.2004-429](https://doi.org/10.2514/6.2004-429)
10. Pinzon C.F., Agarwal R.K. An Experimental and Computational Study of a Zero-Net-Mass-Flux (ZNMF) Actuator. *AIAA Paper*, 2008, art. no. 2008- 559. DOI: [10.2514/6.2008-559](https://doi.org/10.2514/6.2008-559)
11. Qin N., Hia H. Detached Eddy Simulation of a Synthetic Jet for Flow Control. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part I - journal of Systems and Control Engineering*, 2008, vol. 222, no. 2, pp. 373-380. DOI: [10.1243/09596518JSCE513](https://doi.org/10.1243/09596518JSCE513)
12. Kashkin Yu.F., Lyubimov D.A., Makarov A.Yu., Pudovikov D.E., Torokhov S.A. Numerical and experimental study of the usage of synthetic jets to control flow in the spatial channels. *Teoreticheskaya i prikladnaya gazovaya dinamika. V 2 t. T.1* [Theoretical and Applied Gas Dynamics. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, Torus Press, 2010, pp. 190-205. (*Trudy TsIAM* [Proc. of Baranov Central Institute of Aviation Motors]; iss. 1341). (in Russian).
13. Lyubimov D.A. Investigation of Impact of Jets with Zero-Net-Mass Flux on Flow in Curvilinear Diffusers. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2011, vol. 49, no. 4, pp. 557-567. (English version of journal: *High Temperature*, 2008, vol. 49, no. 4, pp. 539-549. DOI: [10.1134/S0018151X11030126](https://doi.org/10.1134/S0018151X11030126)).

14. Lyubimov D., Makarov A., Potekhina I. Experimental and numerical research of unsteady flow in curvilinear channel with active flow management using “synthetic” jets. *Proc. of the 28th International congress of the aeronautical science*, Brisbane. Australia, September 23-28, 2012, paper no. 932.
15. Potekhina I.V., Lyubimov D.A. Numerical Study of Separated Flows Control in the Intermediate Turbine Diffusers via Synthetic Jets. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, no. 1, pp. 68-86. DOI: [10.7463/0115.0753472](https://doi.org/10.7463/0115.0753472) (in Russian).
16. Takahashi H., Liu F., Palavicchini M., Oyarzun M., Griffin J., Ukeiley L., Cattafesta L. Progress on Active Control of Open Cavities. *AIAA Paper*, 2011, art. no. 2011-1221. DOI: [10.2514/6.2011-1221](https://doi.org/10.2514/6.2011-1221)
17. Lyubimov D.A., Potekhina I.V., Fedorenko A.E. Numerical study using RANS / ILES-method of high-resolution flow in an open cavity at subsonic and supersonic velocities of external flow. *24 Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya po aerodinamike* [Proc. of the 24th Scientific and technical conference on aerodynamics], Volodarskogo vill., Moscow region, February 28 - March 1, 2013. Moscow, Central Aerohydrodynamic Institute, 2013, pp. 168-169. (in Russian).
18. Lyubimov D.A. Development and applications of the efficient hybrid RANS/ILES approach for the calculation of complex turbulent jets. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2008, vol. 46, no. 2, pp. 271-282. (English version of journal: *High Temperature*, 2008, vol. 46, no. 2, pp. 243-253. DOI: [10.1134/s10740-008-2014-x](https://doi.org/10.1134/s10740-008-2014-x)).
19. Suresh A., Huynh H. T. Accurate Monotonicity-Preserving Schemes with Runge-Kutta Time Stepping. *Journal of Computational Physics*, 1997, vol. 136, pp. 83-99. DOI: [10.1006/jcph.1997.5745](https://doi.org/10.1006/jcph.1997.5745)
20. Benderskii L.A., Lyubimov D.A., Potekhina I.V., Fedorenko A.E. The study of complex turbulent jets using RANS / ILES-high-resolution methods. *Chetyrnadtsataya Mezhdunarodnaya shkola-seminar “Modeli i metody aerodinamiki”* [Proc. of the 14th International School-Seminar “Models and Methods of Aerodynamics”], Evpatoria, July 4-13, 2014. Moscow, MTsNMO Publ., 2014, pp. 25-27. (in Russian).
21. Benderskii L.A., Lyubimov D.A., Potekhina I.V., Fedorenko A.E. Application of RANS / ILES-high resolution technology to calculate the near-wall jets and mixing layers. *Pyataya Vserossiiskaya konferentsiya “Vychislitel'nyi eksperiment v aeroakustike”* [Abstr. of the 5th International Conf. “Computational Experiment in AeroAcoustics”], Svetlogorsk, Russia, September 22-27, 2014. Moscow, Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, 2014, pp. 39-43. (in Russian).
22. Lyubimov D.A. Development and application of a high-resolution technique for Jet flow computation using large eddy simulation. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2012, vol. 50, no. 3, pp. 450–466. (English version of journal: *High Temperature*, 2012, vol. 50. No. 3, pp. 420-436. DOI: [10.1134/S0018151X12020101](https://doi.org/10.1134/S0018151X12020101)).

23. Spalart P.R., Allmaras S.R. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows. *La Recherche Aeronautique*, 1994, no. 1, pp. 5-21. (also: *30th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 1992, art. no. 92-0439. DOI: [10.2514/6.1992-439](https://doi.org/10.2514/6.1992-439)).
24. Aram S., Mittal R. Computational Study of the Effect of Slot Orientation on Synthetic Jet-Based Separation Control. *International Journal of Flow Control*, 2011, vol. 3, no. 2-3, pp. 87-110.