

УДК 533.697.3:629.7.036.3:519.6

Численное исследование управления с помощью синтетических струй отрывными течениями в переходных межтурбинных диффузорах

Потехина И. В.^{1,*}, Любимов Д. А.¹

[*potekhina@ciam.ru](mailto:potekhina@ciam.ru)

¹Центральный институт авиационного моторостроения
им.П.И. Баранова, Москва, Россия

Синтетические струи являются перспективным средством активного газодинамического управления потоком. Они уменьшают или ликвидируют отрывные зоны, возникающие при течении в криволинейных диффузорах. Это становится важным в связи с тенденцией уменьшения размеров диффузорных переходных каналов. В данной статье представлено численное исследование с помощью RANS/ILES-метода высокого разрешения влияния синтетических струй на отрывное течение в стандартном и «агрессивном» (его длина на 20% меньше стандартного) межтурбинных диффузорах. Проведены параметрические исследования влияния амплитуды и частоты синтетических струй на течение. Было получено, что использование синтетических струй в рассмотренных диффузорах позволяет улучшить их характеристики, а для «агрессивного» диффузора приблизить их к уровню стандартного.

Ключевые слова: межтурбинный диффузор, S-образный диффузор, турбулентный отрыв потока, синтетические струи, RANS/ILES-метод, активное управление течением

Введение

Для современных авиационных турбореактивных двигателей (ТРД) характерна тенденция к компактности отдельных их элементов. В частности, это относится к переходным диффузорным каналам между ступенями турбины. В [1] отмечается, что важным направлением является повышение эффективности и сокращение размеров переходных диффузорных каналов между элементами ТРД, например, между ступенями компрессора или турбины. Повышение «агрессивности» диффузоров, т.е. сокращение длины при сохранении радиальных размеров и отношения площадей входного и выходного сечений, приводит к возникновению отрывных зон и обусловленному их наличием ухудшению характеристик диффузоров. Типичные примеры отрывных течений в различных переходных межтурбинных каналах представлены в обзоре [2], там же рассмотрены возможные способы воздействия на отрывные течения: активные и пассивные. К пассивным методам относятся генераторы вихрей, которые устанавливаются

на стенках канала перед отрывной зоной [3]. Однако они всегда оказывают воздействие на поток вне зависимости от того, есть ли в этом необходимость, их эффективность сложно регулировать. Более перспективным является активное газодинамическое управление потоком. Обычно это – вдув или отсос газа из диффузора [4,5]. Однако в этом случае требуется рабочее тело, устройство для подвода энергии к нему, магистрали для подачи рабочего тела в зону отрыва для систем с выдувом в пограничный слой. Для систем с отсосом – устройство для создания пониженного давления, магистраль для отвода воздуха и система его выброса. Этих недостатков лишены устройства с нулевым суммарным массовым расходом рабочего тела [6]. Возникающие при работе таких устройств струи обычно называются «синтетическими». В этом случае работа системы активного управления сводится к чередующимся тактам выдува газа из замкнутой полости за счет изменения ее объема с последующим затем всасыванием низкоэнергетического потока из диффузора. Указанная полость сообщается только с проточной частью диффузора, поэтому суммарный по времени расход газа равен нулю. Устройство для создания синтетических струй обычно называется генератором синтетических струй (ГСС).

Для практики важно выбрать наиболее эффективный вариант устройств для управления отрывными течениями. Традиционно для этого используются экспериментальные подходы. Однако они не позволяют получить информацию обо всем поле течения внутри диффузора. Сложно исследовать течение около средств управления отрывными течениями в силу малости таких устройств. Это стимулировало использование численного исследования отрывных турбулентных течений и средств активного управления ими. Для этой цели предпочтительнее применять методы прямого численного моделирования [7,8]. Это вызвано тем, что точность описания отрывных течений выше с помощью методов прямого численного моделирования, чем при использовании методов, основанных на решении нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS) с моделями турбулентности [9,10]. Кроме того, использование различных вариантов методов прямого численного моделирования (DNS, LES, RANS/LES) позволяет получить характеристики турбулентности, в частности, пульсации параметров течения, что важно для практических приложений. Так, для расчета отрывных турбулентных течений в работе [7] применялся метод LES, различные варианты RANS/LES-методов использовались в [11,12]. В настоящем исследовании используется RANS/ILES-метод высокого разрешения [13]. Под ILES подразумевается LES с неявной SGS-моделью. Данный метод успешно применялся для расчета отрывных течений в диффузорах [1,14], при исследовании синтетических струй [15,16] и объединенном расчетно-экспериментальном исследовании влияния синтетических струй на течение в прямоугольном диффузоре [17].

При моделировании синтетических струй имеется ряд затруднений: для разрешения течения в полости ГСС нужна мелкая сетка, необходимо численно описать подвижную стенку (мембрану). К тому же, форма ГСС и каналов для выхода синтетических струй задается приближенно. Это связано с тем, что реальная геометрия ГСС определяется

конкретной геометрией диффузора и геометрией объекта, для которого он используется. Указанная ситуация стимулирует развитие и использование альтернативных, упрощенных подходов в моделировании ГСС [18,19]. В этом случае расчет течения в ГСС не производится, а на стенке задается модифицированное граничное условие, имитирующее течение на выходе из щелей для выхода синтетических струй. Однако, даже при таком упрощенном подходе требуется мелкая сетка для того, чтобы разрешить с достаточной точностью течение около щелей для выхода синтетических струй. Известно, что точность расчетов можно повысить без увеличения числа ячеек расчетной сетки при использовании численных методов высокого разрешения.

Целями работы были: исследование с помощью RANS/ILES-метода высокого разрешения [13] отрывных турбулентных течений в кольцевых S-образных межтурбинных диффузорах, исследование влияния геометрии диффузора на характеристики течения и турбулентности в них, оценка эффективности использования синтетических струй для улучшения характеристик исследованных диффузоров.

1. Геометрические модели и расчетные сетки

В настоящей работе было рассмотрено два варианта геометрии диффузорных каналов. Геометрия первого из них была близка к типичной для межтурбинных диффузоров современных ТРД. Общий вид канала показан на рис.1а. Кроме того, был рассмотрен «агрессивный» диффузор, длина которого приблизительно на 20% меньше и который имеет такие же радиальные размеры входного и выходного сечений. Продольное сечение исходного и «агрессивного» диффузоров показано на рис.1б. Для уменьшения влияния упрощенных граничных условий во входном и выходном сечениях к криволинейному диффузору были пристыкованы цилиндрические участки длиной 4-5 высот канала, а расчетная сетка около входного и выходного сечений в продольном направлении имела большой шаг.

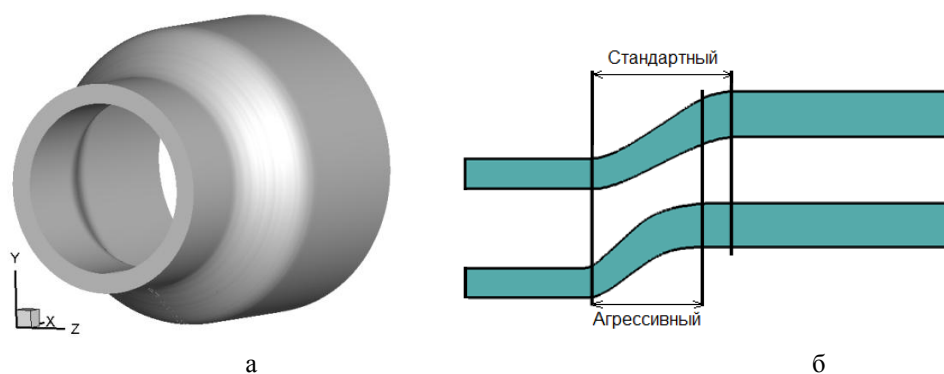


Рис. 1. Геометрия диффузоров: а – общий вид, б – продольное сечение стандартного и «агрессивного» диффузора

Для экономии вычислительных ресурсов расчетная область представляет собой сектор диффузора с углом 15° , включающий в себя две щели для выдува синтетических струй (полный кольцевой диффузор содержит 48 щелей). Такая расчетная область позволяет использовать сетку с малыми размерами расчетных ячеек и более точно описать течение в диффузорном канале при меньших вычислительных затратах, чем при рассмотрении всего канала. Для обоих диффузоров расчетные сетки содержали в продольном, радиальном и азимутальном направлениях 220, 40 и 100 ячеек соответственно, общее число ячеек составляло 0.88×10^6 . Сетка была сгущена к верхней и нижней стенке. Общий вид и фрагмент расчетной сетки для диффузорной части расчетной области показан на рис.2.

На верхней стенке диффузора располагаются две щели для выхода синтетических струй. Форма щелей для выхода синтетических струй определяется механизмом воздействия синтетических струй на пограничный слой. В экспериментальной работе [20] положительный эффект был достигнут при использовании прямоугольных щелей, ориентированных вдоль потока. В работе [21] также показано, что форма и ориентация щелей для выхода синтетических струй в значительной степени определяет их эффективность, а для практических приложений предпочтительнее использовать прямоугольные щели.

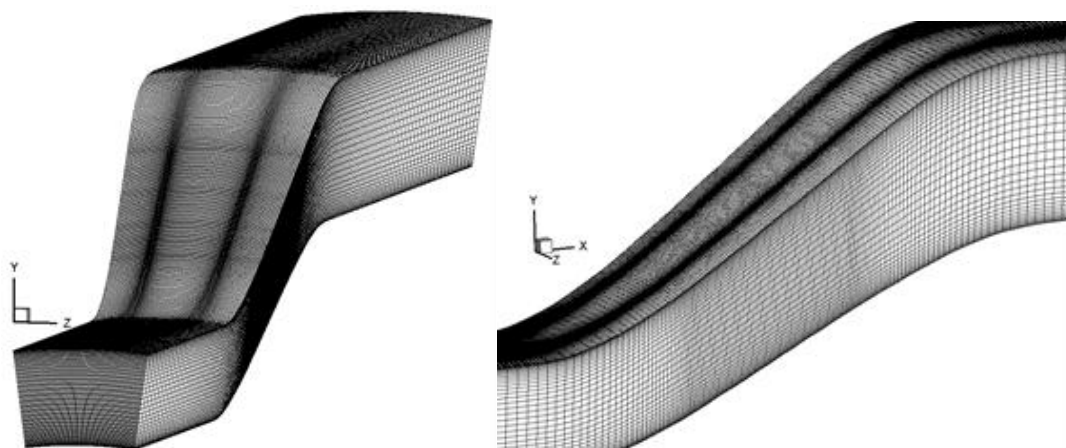


Рис. 2. Расчетная сетка

Анализ литературы позволил сделать вывод, что наиболее эффективно использование щелей, ориентированных вдоль основного потока в диффузоре, кроме того, они должны располагаться в начале отрывной зоны. Синтетические струи в этом случае порождают пару разнонаправленных вихрей большой интенсивности. Они сносятся основным потоком, взаимодействуют с ним и обеспечивают поступление высокоскоростного потока в отрывную зону, что приводит к ее уменьшению или полному исчезновению. Дополнительно это способствует выравниванию распределения параметров в выходном сечении диффузора. При расположении щелей поперек потока вихри в синтетических струях быстро разрушаются вследствие их взаимодействия со

сдвиговым течением в пограничном слое [21]. В настоящей работе были выбраны прямоугольные щели размером 20×0.5 мм, расположенные вдоль потока. Количество ячеек на щель составляло 70 и 5 соответственно.

2. Граничные условия

Граничные условия совпадали с теми, которые были применены в работе [15] при исследовании влияния синтетических струй на отрывное турбулентное течение в прямоугольном диффузоре. На боковых гранях сетки было использовано условие периодичности. На стенках в зависимости от значения Y^+ параметры определялись на основании «законов стенки» или условия прилипания. Использование дополнительных цилиндрических участков постоянного сечения, пристыкованных к входному и выходному сечениям диффузора позволило использовать упрощенные граничные условия, заимствованные из методов RANS, во входном и выходном сечениях расчетной области. Так на входе в расчетную область задавались полные параметры течения и угол наклона вектора скорости, на выходе – постоянное статическое давление и нулевые производные всех параметров течения по нормали к границе. Постановку граничных условий для синтетических струй следует оговорить особо. В ряде работ, посвященных численному моделированию синтетических струй, расчет течения производился не только в диффузоре, но и в каналах для выхода синтетических струй, а также в ГСС [7,11,12]. С учетом того, что размеры каналов для выхода синтетических струй из ГСС много меньше, чем размеры диффузора, требуются очень детальные сетки для расчета течения в ГСС и в каналах для выхода синтетических струй. Однако в работе [12,18] продемонстрировано, что приемлемые результаты по описанию истечения синтетических струй можно получить, если щели для их выдува моделировать с помощью модифицированного граничного условия на стенке диффузора. В настоящих расчетах было использовано простейшее граничное условие [15]. При таком подходе на части стенки в месте выдува струй задавалось однородное по площади распределение параметров течения, меняющееся по времени по гармоническому закону. Это позволяет существенно уменьшить вычислительные затраты. В работе [17] было продемонстрировано, что такой подход обеспечивает удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

3. Метод расчета

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 канала. Для аппроксимации конвективных членов в разностных аналогах уравнений Навье-Стокса была использована монотонная схема с разностями против потока. В настоящем методе конвективные потоки на гранях

расчетных ячеек вычислялись с помощью варианта схемы Роу, подробно описанной в работе [13]:

$$f_{i+1/2} = \frac{1}{2}[f(q_L) + f(q_R)] - \frac{1}{2}\alpha|A|(q_R - q_L) \quad (1)$$

Здесь $f_{i+1/2}$, $f(q_L)$, $f(q_R)$ – векторы конвективных членов уравнений с левой и правой стороны грани ячейки соответственно, $|A|$ – «модуль» матрицы Якоби, α – коэффициент, регулирующий уровень схемной вязкости. Параметры q_L и q_R вычислялись на гранях ячеек с помощью монотонной противопоточной схемы 5-го порядка MP5 [22]. Дополнительное снижение схемной вязкости достигается уменьшением вклада диффузионной части в выражении (1) с помощью параметра α . При $\alpha_{max} = 1$ выражение (1) соответствует оригинальной схеме Роу. При $\alpha < 1$ получается комбинация центрально-разностной и противопоточной схем с уменьшенной схемной вязкостью. Минимальное значение $\alpha_{min} = 0.3$ было выбрано из соображений устойчивости и сохранения монотонности схемы. В настоящем методе отсутствует явная SGS-модель турбулентности. Ее функцию выполняет схемная вязкость (LES с неявной SGS-моделью – ILES).

С помощью метода ILES течение описывалось только вдали от твердых границ. Около стенок решались нестационарные уравнения Навье-Стокса с моделью турбулентности Спаларта-Аллмараса [23].

Конвективные потоки на гранях расчетных ячеек в разностном аналоге уравнения для модели турбулентности вычислялись с помощью скалярного аналога (1) с $\alpha = 1$, а необходимые для этого параметры q_L и q_R вычислялись с помощью схемы WENO-5 [22].

Диффузионные потоки в уравнениях Навье-Стокса и уравнении модели турбулентности вычислялись на гранях ячеек со вторым порядком с помощью центральных разностей.

В области ILES модель турбулентности Спаларта-Аллмараса изменяется таким образом, чтобы турбулентная вязкость равнялась нулю. Это достигается модификацией расстояния в диссипативном члене в уравнении для модели турбулентности Спаларта-Аллмараса [22]. Новое расстояние $\tilde{d}$ вычислялось по формулам [13]:

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

В соотношениях (2) d – истинное расстояние от стенки до центра рассматриваемой ячейки, $C_{ILES} = 0.65$ – константа, определяющая переход от зоны RANS к зоне ILES, Δ_{max} – максимальный размер этой ячейки сетки.

Уравнения интегрировались по времени со вторым порядком точности по неявной схеме [13]. Использование неявной схемы позволяет выбирать шаг по времени с учетом физических ограничений. Был использован так называемый метод «интегрирования по двойному времени» (dual time stepping), описанный в [24]. В этом случае на каждом шаге по времени происходит установление по параметру. При этом на каждой итерации система уравнений неразрывности и движения решалась блочным методом Гаусса-Зейделя, а затем скалярное уравнение – также с помощью метода Гаусса-Зейделя.

4. Результаты расчетов

Были выполнены расчеты диффузоров различной геометрии: стандартного и «агрессивного» без синтетических струй. На входе в расчетную область задавались полное давление $p_0=10^5$ Па и полная температура $T=300$ К. Для обоих диффузоров были выполнены расчеты каналов при различных перепадах давления в них $\Delta p=3000$ Па, 5000 Па, 7500 Па, 10000 Па, что соответствовало изменению чисел Маха M_i на входе в расчетную область для стандартного диффузора в диапазоне 0.30-0.59 и 0.28-0.51 для «агрессивного» диффузора. Число Рейнольдса во всех расчетах было 1.3×10^5 .

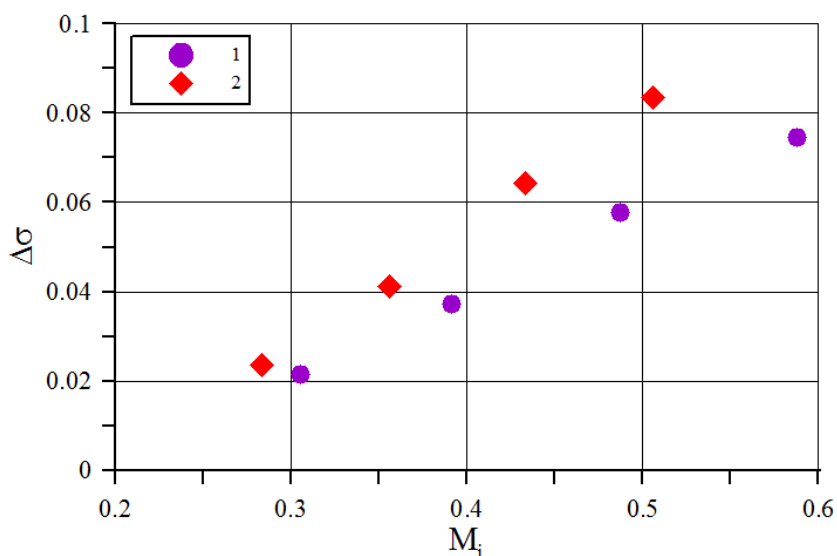


Рис. 3. Уровень потерь полного давления на выходе из диффузора. 1 – стандартный диффузор; 2 – «агрессивный» диффузор

На рис.3 показана зависимость уменьшения потерь полного давления на выходе из диффузора $\Delta\sigma=(1-\sigma)$ от числа Маха на входе M_i для обоих вариантов геометрии. Видно, что у «агрессивного» диффузора уровень потерь полного давления выше, чем у стандартного, и с увеличением скорости потока на входе в диффузор эта разница увеличивается. Такие результаты обусловлены сокращением длины канала и, как следствие, большей кривизной стенок канала, что приводит к более интенсивному отрыву потока. Далее было исследовано влияние воздействия синтетических струй на течение в обоих каналах на режиме $\Delta p=5000$ Па. В ходе расчетов варьировались амплитуда и частота синтетических струй, а также расположение щелей для выхода струй для «агрессивного» диффузора.

Результаты расчетов по уровню снижения потерь полного давления на выходе из диффузоров представлены в таблицах 1 и 2 для стандартного и «агрессивного» канала соответственно. В таблицах приняты обозначения: f – частота ГСС, q – амплитуда скорости синтетической струи, q/U_i – амплитуда струи, отнесенная к скорости на входе в диффузор, M_i – число Маха на входе в диффузор, σ – коэффициент восстановления полного давления на выходе из диффузора, c_μ – коэффициент импульса, равный отношению

суммарного импульса синтетических струй и импульса основного потока, σ – коэффициент восстановления полного давления на выходе из диффузора в последней колонке приведена эффективность синтетических струй, равная отношению разности между значениями σ для текущего варианта и базового без синтетических σ_0 к величине потерь базового канала $(1.0-\sigma_0)$.

Таблица 1. Влияние синтетических струй на потери полного давления в стандартном диффузоре

	f, Гц	q, м/с	q/U _i	M _i	c _μ , %	σ	(σ-σ ₀)/(1.0-σ ₀), %
Без струй	-	-	-	0,390	-	0,9626	-
Со струями	150	70	0,512	0,402	1,00	0,9649	5,96
	150	100	0,692	0,427	1,80	0,9708	21,99
	150	150	0,988	0,450	3,65	0,9794	44,91
	175	70	0,515	0,400	1,01	0,9639	3,50
	200	70	0,515	0,400	1,01	0,9643	4,59

Таблица 2. Влияние синтетических струй на потери полного давления в «агрессивном» диффузоре

	f, Гц	q, м/с	q/U _i	M _i	c _μ , %	σ	(σ-σ ₀)/(1.0-σ ₀), %
Без струй	-	-	-	0,356	-	0,9587	-
Со струями	150	70	0,568	0,362	1,23	0,9590	0,77
	150	100	0,773	0,379	2,29	0,9636	11,95
	150	150	1,092	0,411	4,38	0,9719	32,02
	175	70	0,505	0,372	1,16	0,9633	11,32
	200	70	0,571	0,358	1,26	0,9597	2,43

Анализ результатов, приведенных в табл. 1 и 2, показывает, что воздействие синтетических струй с исследованными параметрами приводит к снижению потерь на выходе из диффузоров для большинства из рассмотренных режимов. Это является подтверждением того, что синтетические струи уменьшают или ликвидируют отрывную зону в диффузоре за счет перемешивания высокоскоростного основного потока с низкоскоростным течением в отрывной зоне. Было установлено, что для стандартного и «агрессивного» вариантов геометрии диффузора увеличение частоты синтетических струй влияет на уровень потерь полного давления на выходе из диффузора немонотонно, имеет локальный максимум эффективности. Для стандартного канала наиболее эффективная частота струй равна 150 Гц, а для «агрессивного» – 175 Гц. Получено, что увеличение амплитуды в исследованном диапазоне (70-150 м/с) заметно улучшает характеристики течения: уровень потерь полного давления на выходе диффузора значительно снижается. Для стандартного диффузора максимальная эффективность струй достигается при амплитуде 150 м/с, уровень потерь снижается на 45% (табл.1). Для «агрессивного» диффузора, как видно из таблицы 2, наиболее эффективными также являются струи с

максимальной амплитудой $q=150$ м/с, в этом случае потери полного давления уменьшаются на 32% по сравнению с вариантом без синтетических струй.

Наглядно влияние синтетических струй на течение показано на рис. 4, где приведены поля осредненной продольной скорости в продольном сечении стандартного диффузора для вариантов без синтетических струй и со струями. На рис. 5 представлено поле этого параметра для «агрессивного» диффузора. В вариантах без струй наблюдается достаточно большая отрывная зона около верхней стенки (рис. 4а и 5а), при наличии синтетических струй она исчезает (рис. 4б) или становится незначительной (рис. 5б). При этом наблюдается выравнивание распределения осредненной скорости по высоте выходного сечения диффузоров.

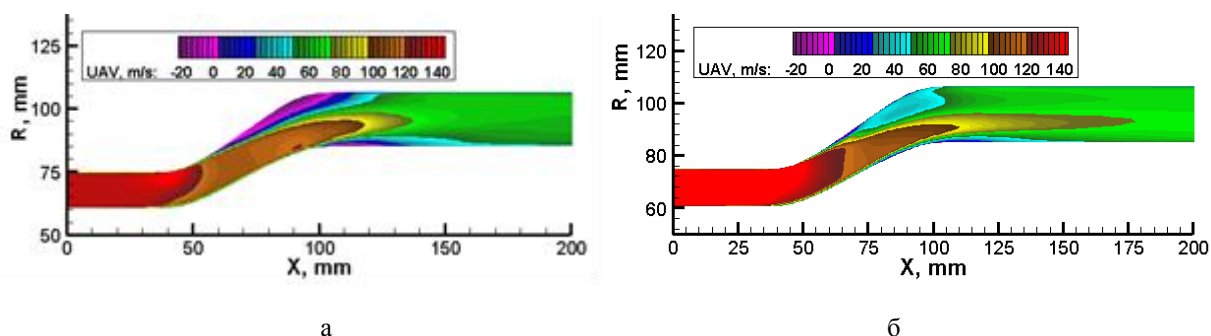


Рис. 4. Распределение осредненной продольной скорости в продольном сечении стандартного диффузора: а – без синтетических струй; б – с синтетическими струями $q=150$ м/с, $f=150$ Гц.

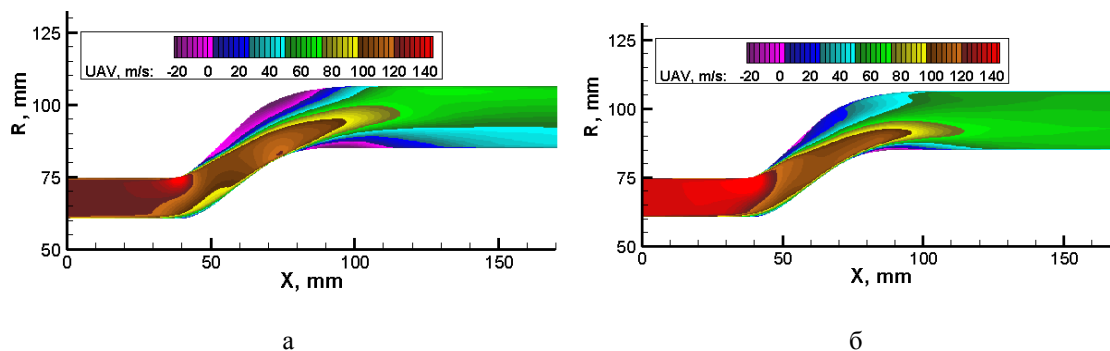


Рис. 5. Распределение осредненной продольной скорости в продольном сечении «агрессивного» диффузора: а – без синтетических струй; б – с синтетическими струями $q=150$ м/с, $f=150$ Гц.

Следует отметить, что в стандартном диффузоре отрывная зона образуется на некотором расстоянии от входа в диффузор (рис. 4а), а в «агрессивном» диффузоре – сразу за входным сечением (рис. 5а). Опыт предыдущих расчетов влияния синтетических струй на отрывные течения в диффузорах [7,10] показал, что наиболее эффективно располагать синтетические струи после поворота течения, непосредственно у начала отрывной зоны. С учетом этого обстоятельства положение начала щелей для выдува синтетических струй для этих диффузоров было различным. Для стандартного диффузора координата начала щелей была $x_{jet}=57.6$ мм. Для «агрессивного» диффузора сначала была

выбрана координата начала щелей $x_{jet}=47.6$ мм, но такое расположение оказалось неэффективным, поскольку отрыв в данном диффузоре более интенсивный, чем в стандартном, и возникает значительно ближе к входу в диффузор. По этой причине щели для выхода струи были помещены сразу за поворотом потока для максимального воздействия на поток, координата начала щелей в этом случае $x_{jet}=40$ мм. В таблице 2 приведены данные для координаты $x_{jet}=40$ мм.

При оценке эффективности синтетических струй необходимо также, чтобы кроме уменьшения потерь и размеров отрывной зоны, они, по меньшей мере, не приводили к увеличению уровня неравномерности в распределении параметров течения на выходе из диффузора и увеличению турбулентных пульсаций параметров, а, напротив, уменьшали эти характеристики. Рассмотрим, как изменяется распределение пульсаций статического давления на выходе из стандартного (рис. 6) и «агрессивного» (рис. 7) диффузоров в зависимости от амплитуды и частоты синтетических струй. На этих рисунках пульсации давления отнесены к скоростному напору на входе в расчетную область.

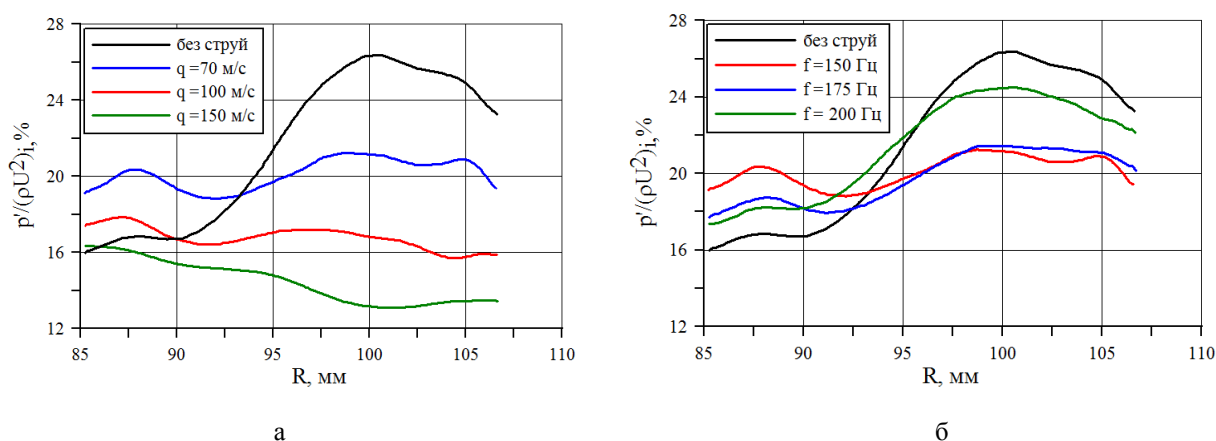


Рис. 6. Радиальное распределение пульсаций статического давления на выходе из стандартного диффузора: а – при различной амплитуде синтетических струй, частота $f=150$ Гц; б – при различной частоте, амплитуда $q=70$ м/с.

На рис. 6а видно, что рост амплитуды синтетических струй при частоте 150 Гц приводит к уменьшению пульсаций давления: при амплитуде 150 м/с в верхней части канала пульсации снижаются в два раза. При наличии синтетических струй распределение пульсаций давления по высоте диффузора становится более равномерным. Для синтетических струй с амплитудой 70 м/с получено, что пульсации давления у верхней стенки при $f=200$ Гц уменьшаются незначительно, на 7 %, а при частотах 150 и 175 Гц снижаются приблизительно на 20% по сравнению с исходным диффузором; их распределение становится более равномерным по высоте канала (рис. 6б). На основании этих данных можно сделать вывод, что увеличение частоты выше 175 Гц является нецелесообразным.

На рис. 7а показано влияние синтетических струй с частотой 150 Гц и различной амплитудой на радиальное распределение пульсаций статического на выходе из

диффузора. Видно, что синтетические струи с амплитудой 70 м/с для «агрессивного» диффузора при частоте 150 Гц являются неэффективными: они приводят к увеличению уровня пульсаций полного давления. Увеличение амплитуды до 150 м/с приводит к снижению уровня пульсаций до 2 раз по всей высоте выходного сечения. При фиксированной амплитуде синтетических струй 70 м/с пульсации статического давления уменьшаются наиболее заметно при частоте 175 Гц – до 1.4 раз (рис.7б). Следует отметить, что уровень пульсаций давления в «агрессивном» диффузорном канале выше, чем в стандартном.

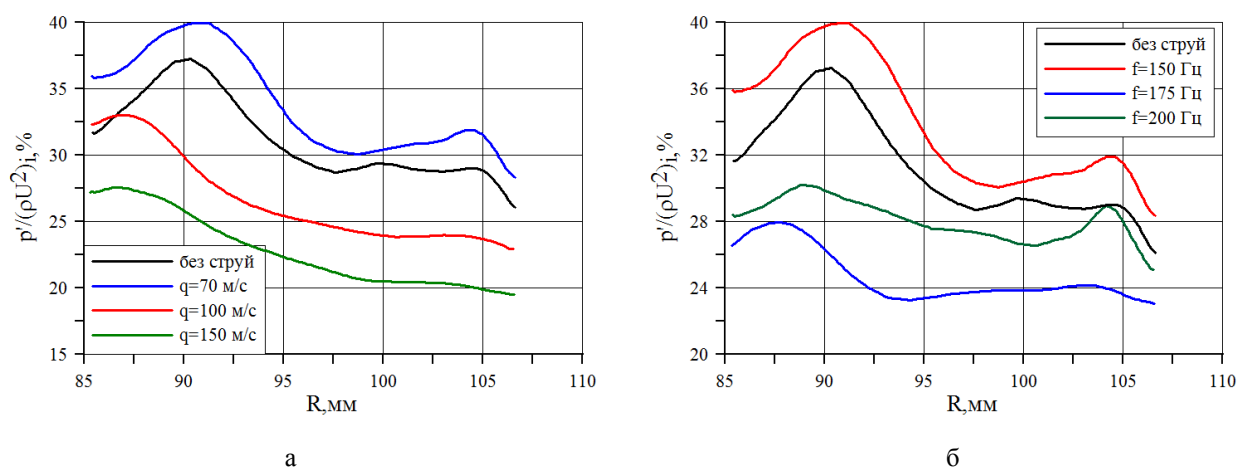


Рис. 7. Радиальное распределение пульсаций статического давления на выходе из «агрессивного» диффузора: а – при различной амплитуде синтетических струй, частота $f=150$ Гц; б – при различной частоте, амплитуда $q=70$ м/с.

Использование «агрессивных» диффузоров, с одной стороны, уменьшает размеры и массу двигателя, а с другой стороны, характеристики таких диффузоров хуже, чем стандартных. Причины этого были описаны выше. В «агрессивных» каналах выше потери полного давления, параметры течения на выходе из диффузора имеют большую неравномерность, выше уровень турбулентных пульсаций. Однако, применение в «агрессивных» диффузорах средств активного управления потоком, в частности, синтетических струй позволяет значительно улучшить характеристики течения в канале. Как было замечено выше, наиболее эффективной для «агрессивного» диффузора оказалась частота 175 Гц, поэтому далее рассмотрим воздействие на течение синтетических струй с данной частотой и с умеренной амплитудой $q=70$ м/с. Такая амплитуда легко может быть достигнута в эксперименте и не требует большого подвода энергии [10].

На рис. 8 можно видеть влияние воздействия синтетических струй с амплитудой $q=70$ м/с и частотой $f=175$ Гц на уровень потерь полного давления для обоих каналов. Получено, что потери полного давления у стандартного диффузора без синтетических струй и у «агрессивного» диффузора с синтетическими струями близки. Следует также отметить, что синтетические струи с указанными параметрами в стандартном диффузоре оказались менее эффективными.

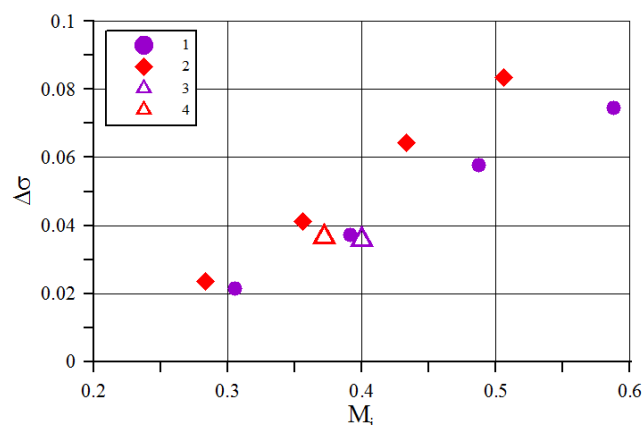


Рис. 8. Уровень потерь полного давления на выходе из диффузора. 1-стандартный диффузор; 2-«агрессивный» диффузор; 3-стандартный диффузор с синтетическими струями $q=70$ м/с, $f=175$ Гц; 4-«агрессивный» диффузор с синтетическими струями $q=70$ м/с, $f=175$ Гц

На рассмотренном режиме было исследовано влияние синтетических струй на радиальное распределение параметров в выходном сечении исследованных диффузоров. Это показано на рис. 9 и рис. 10. Скорость и пульсации скорости, показанные на рис. 9, были отнесены к скорости U_i на входе в диффузор. Пульсации давления (рис. 10а) – к скоростному напору на входе в диффузор. На рис. 9а видно, что профиль относительной скорости на выходе из «агрессивного» диффузора становится близким к профилю скорости стандартного диффузора, а также смещается ядро потока. Это является следствием того, что при использовании синтетических струй отрывные зоны уменьшаются. Влияние синтетических струй на уровень и распределение пульсаций продольной скорости на выходе из диффузоров представлено на рис. 9б. При наличии синтетических струй в «агрессивном» диффузоре уровень пульсаций снижается, и становится близким к уровню пульсаций в стандартном диффузоре, а у верхней стенки становится даже ниже.

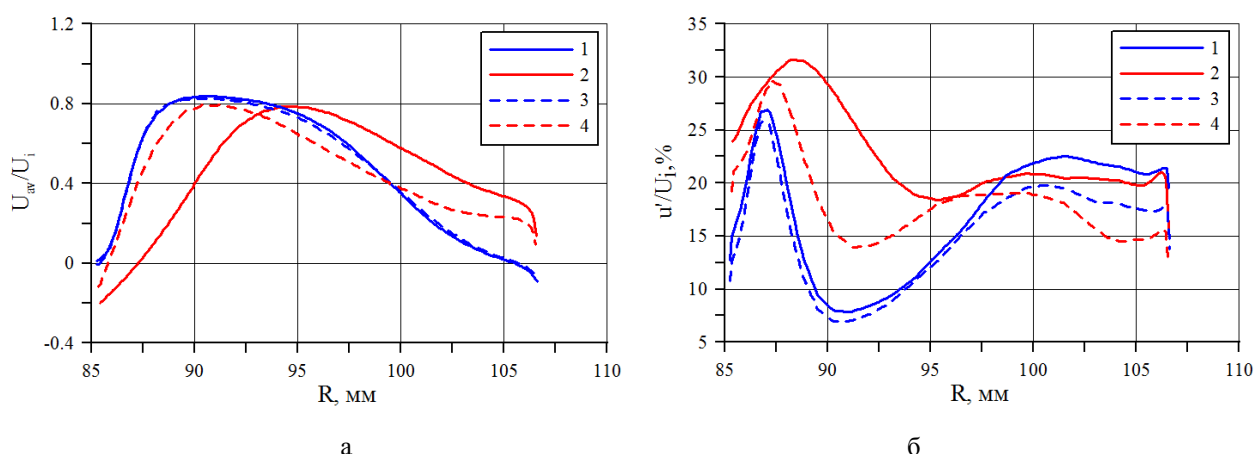


Рис. 9. Радиальное распределение параметров на выходе из диффузора а – относительной продольной скорости, б – пульсаций продольной скорости. 1-стандартный диффузор; 2-«агрессивный» диффузор; 3-стандартный диффузор с синтетическими струями $q=70$ м/с, $f=175$ Гц; 4- «агрессивный» диффузор с синтетическими струями $q=70$ м/с, $f=175$ Гц.

На рис. 10а показано распределение пульсаций статического давления в выходных сечениях стандартного и «агрессивного» диффузоров, как с синтетическими струями, так и без них. Видно, что для стандартного диффузора уровень пульсаций уменьшается в 1.3 раза у верхней стенки. Для «агрессивного» диффузора пульсации уменьшаются в 1.3-1.5 раза по всей высоте диффузора и также становятся ниже уровня пульсаций у верхней стенки стандартного диффузора без воздействия, распределение становится практически равномерным по всей высоте диффузора.

На рис.10б представлены распределения пульсаций температуры для рассмотренных вариантов диффузоров. Получено, что воздействие синтетических струй не приводит к значительному уменьшению пульсаций статической температуры, однако, как в случае стандартного, так и в случае «агрессивного» диффузоров заметно выравнивание уровня пульсаций по высоте.

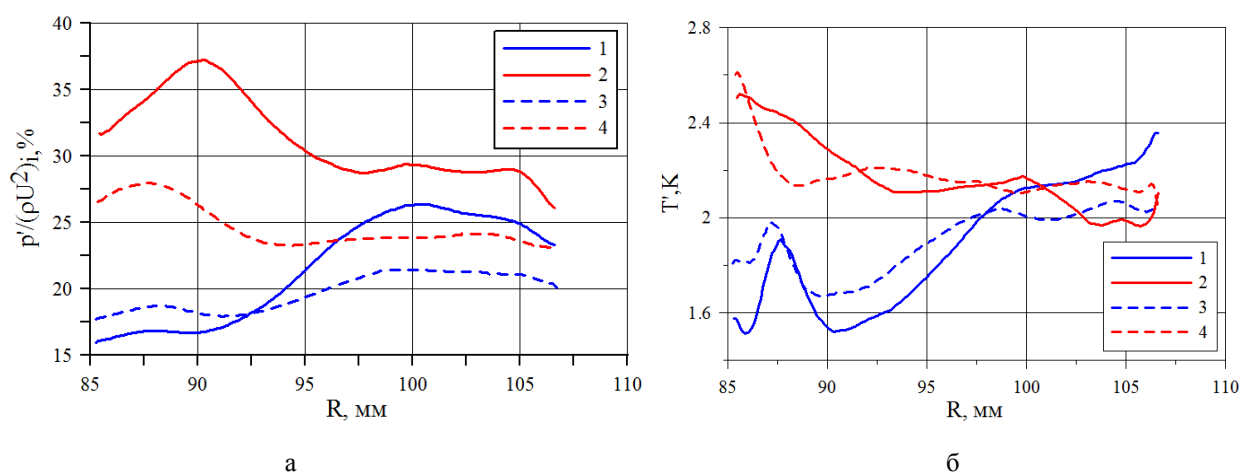


Рис. 10. Радиальные параметров на выходе из диффузора а – пульсаций статического давления, б – пульсаций температуры. 1-стандартный диффузор; 2-«агрессивный» диффузор; 3-стандартный диффузор с синтетическими струями $q=70$ м/с, $f=175$ Гц; 4- «агрессивный» диффузор с синтетическими струями $q=70$ м/с, $f=175$ Гц.

Следует отметить, что представленные результаты по турбулентным пульсациям параметров на выходе из диффузоров достаточно сложно получить экспериментально, а расчет с помощью методов RANS с моделями турбулентности позволит получить лишь часть из них. Однако для практики именно распределение турбулентных пульсаций параметров течения на выходе из диффузора является наиболее важным.

Заключение

С помощью RANS/ILES-метода высокого разрешения были исследованы отрывные турбулентные течения в S-образных межтурбинных диффузорах: стандартном и «агрессивном» (на 20% короче, чем стандартный). Высокое разрешение метода расчета

обеспечивается вычислением параметров на гранях ячеек, необходимых для схемы Роу, с помощью монотонных разностной схемы с разностями против потока 5-го порядка аппроксимации. Это позволило получить приемлемую точность расчетов на сетках порядка 1 млн. ячеек.

Получено, что для обоих исследованных диффузоров наблюдается отрыв потока от верхней стенки. При этом для «агрессивного» диффузора интенсивность отрыва была выше, больше был уровень радиальной неравномерности распределения параметров на выходе из него.

Для обоих диффузоров при перепаде давления $\Delta p = 5000$ Па была исследована эффективность управления отрывными течениями в них с помощью синтетических струй. Расчеты были проведены для синтетических струй с амплитудой 70 м/с и 150 м/с, их частота менялась в диапазоне от 150 до 200 Гц. Кроме того, варьировалось положение щелей для выхода синтетических струй на стенке канала для обеспечения их наибольшей эффективности.

Получено, что использование синтетических струй в указанном диапазоне изменения параметров позволяет уменьшить потери полного давления до 32% для стандартного диффузора и до 45% для «агрессивного». Увеличение амплитуды синтетических струй приводит к уменьшению потерь полного давления и снижению уровня и неравномерности пульсаций статического давления для обоих вариантов геометрии диффузоров. Наиболее эффективная частота для стандартного диффузора была 150 Гц, для агрессивного – 175 Гц. Применение синтетических струй позволило значительно уменьшить отрывную зону в «агрессивном» диффузоре и полностью удалить ее в базовом диффузоре.

Установлено, что использование синтетических струй с $q = 70$ м/с и $f = 175$ Гц в «агрессивном» диффузоре позволяет значительно улучшить его характеристики. В результате их воздействия параметры течения на выходе из такого диффузора становятся близкими к значениям для стандартного диффузора, а иногда даже лучше. Таким образом, применение синтетических струй позволяет значительно уменьшить негативные черты, присущие «агрессивным» диффузорам. Стоит отметить, что на рассмотренном режиме импульс синтетических струй составлял всего лишь 1% от импульса основного потока.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №12-08-00951а.

Список литературы

1. Кашкин Ю.Ф., Коновалов А.Е., Крашенинников С.Ю., Любимов Д.А., Пудовиков Д.Е., Степанов В.А. Экспериментальное и расчётное исследование особенностей течения с отрывом потока в дозвуковых диффузорах // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2009. № 4. С. 91-99.
2. Göttlich E. Research on the aerodynamics of intermediate turbine diffusers // Progress in Aerospace Sciences. 2011. Vol. 47, no. 4. P. 249-279. DOI: [10.1016/j.paerosci.2011.01.002](https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2011.01.002)

3. Lee S., Loth E., Babinsky H. Normal shock boundary layer control with various vortex generator geometries // *Computers & Fluids*. 2011. Vol. 49, no. 1. P. 233-246. DOI: [10.1016/j.compfluid.2011.06.003](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.06.003)
4. Debiassi M., Herberg M.R., Yan Z., Dhanabalan S.S., Tsai H.M., Dhanabalan S. Control of Flow Separation in S-Ducts via Flow Injection and Suction // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (Reno, Nevada, 7-10 January 2008). Paper no. 2008-74. DOI: [10.2514/6.2008-74](https://doi.org/10.2514/6.2008-74)
5. Florea R., Bertuccioli L., Tillman T.G. Flow-control-enabled aggressive turbine transition ducts and engine system analysis // 3rd AIAA Flow Control Conference (San Francisco, California, 5-8 June 2006). Paper no. 2006-3512. DOI: [10.2514/6.2006-3512](https://doi.org/10.2514/6.2006-3512)
6. Holman R., Uttukar Y., Mittal R., Smith B.L., Cattafesta L. Formation criterion for synthetic jets // *AIAA Journal*. 2005. Vol. 43, no. 10. P. 2110-2116. DOI: [10.2514/1.12033](https://doi.org/10.2514/1.12033)
7. Dandois J., Garier E., Sagaut P. Unsteady Simulation of Synthetic Jet in a Crossflow // *AIAA Journal*. 2006. Vol. 44, no. 2. P. 225-238. DOI: [10.2514/1.13462](https://doi.org/10.2514/1.13462)
8. Rizzetta D.P., Visbal M.R., Morgan P.E. A High-Order Compact Finite-Difference Scheme for Large-Eddy Simulation of Active Flow Control (Invited) // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (Reno, Nevada, 7-10 January 2008). Paper no. 2008-526. DOI: [10.2514/6.2008-526](https://doi.org/10.2514/6.2008-526)
9. Iaccarino G. Predictions of a Turbulent Separated Flow Using Commercial CFD Codes // *Journal of Fluid Engineering*. 2001. Vol. 123, no. 4. P. 819-828. DOI: [10.1115/1.1400749](https://doi.org/10.1115/1.1400749)
10. Kaltenbach H.-J., Fatica M., Mittal R., Lund T.S., Moin P. Study of flow in a planar asymmetric diffuser using large-eddy simulation // *Journal of Fluid Mechanics*. 1999. Vol. 390. P.151-185. DOI: [10.1017/S0022112099005054](https://doi.org/10.1017/S0022112099005054)
11. Qin N., Xia 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. 5. P. 373-380. DOI: [10.1243/09596518JSCE513](https://doi.org/10.1243/09596518JSCE513)
12. Arunajatesan S., Oyarzun M., Palavicchini M., Catafesta L. Modeling Zero-Net Mass-Flux-Actuators for Feedback Flow Control // 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition (Orlando, Florida, 5-8 January 2009). Paper no. 2009-743. DOI: [10.2514/6.2009-743](https://doi.org/10.2514/6.2009-743)
13. 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.
14. Любимов Д.А. Применение комбинированного RANS/ILES-метода для исследования отрывных пространственных турбулентных течений в криволинейных диффузорах // *Теплофизика высоких температур*. 2010. Т. 48, № 2. С. 279-289.
15. 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.

16. Lyubimov D.A., Potekhina I.V. Application of the high resolution large-eddy simulation method for the study of the influence of geometrical and gas-dynamic parameters of the synthetic jets on the curved diffuser flow // XVI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (Kazan, Russia, 19-25 August 2012): abstracts. Part 1. P. 180-181.
17. 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.
18. Aram E., Mittal R., Cattafesta L. Toward Simple Boundary Condition Representations of Zero-Net Mass-Flux Actuators in Grazing Flow // Proc. of the 39th AIAA Fluid Dynamics Conference (San Antonio, Texas, 22-25 June 2009). Paper no. 2009-4018. DOI: [10.2514/6.2009-4018](https://doi.org/10.2514/6.2009-4018)
19. Okada K., Oyama A., Fujii K., Miyaji K. Computational study on Effect of Synthetic Jet Design Parameters // International Journal of Aerospace Engineering. 2010. Vol. 2010. Art. ID 364859. DOI: [10.1155/2010/364859](https://doi.org/10.1155/2010/364859)
20. Amitay M., Pitt D., Glezer A. Separation Control in Duct Flows // Journal of Aircraft. 2002. Vol. 39, no. 4. P. 616-620. DOI: [10.2514/2.2973](https://doi.org/10.2514/2.2973)
21. 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.
22. 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)
23. Spalart P.R., Allmaras S.R. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows // La Recherche Aeronautique. 1994. No. 1. P. 5-21. (also 30th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 1992. Paper no. 92-0439. DOI: [10.2514/6.1992-439](https://doi.org/10.2514/6.1992-439)).
24. Rogers S.R., Kwak D. Upwind Differencing Scheme for the Time-Accurate Incompressible Navier-Stokes Equations // AIAA Journal. 1990. Vol. 28, no. 2. P. 253-262. DOI: [10.2514/3.10382](https://doi.org/10.2514/3.10382)

Numerical Study of Separated Flows Control in the Intermediate Turbine Diffusers via Synthetic Jets

I.V. Potekhina^{1,*}, D.A. Lyubimov¹

[*potekhina@ciam.ru](mailto:potekhina@ciam.ru)

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

Keywords: intermediate turbine diffuser, S-shaped diffuser, turbulent separation flow, synthetic jets, RANS/ILES-method, active flow control

The paper studies turbulent separation flows in the intermediate turbine diffusers and their control via synthetic jets using a combined high-resolution RANS/ILES method (Reynolds Averaged Navier-Stokes - RANS, Implicit Large Eddy Simulation - ILES). Calculations were performed for two variants of S-shaped diffusers geometry: standard and "aggressive" (20% shorter than standard) on the grids containing 0.88×10^6 cells. The paper also considers flow modes in diffusers for several values of pressure difference. The effect of diffusers geometry on their flow parameters in them was defined. The effect of synthetic jets on the flow separation and characteristics of flow and turbulence was considered. A parametric study was conducted to define the influence of synthetic jet amplitude and frequency on the flow. Synthetic jets are generated by periodic gas blowing and suction through the slots of the cavity with a movable diaphragm - a generator of synthetic jets. They do not require special working gas and means for its supply are compact and efficient. For studied modes, the levels of total pressure losses and turbulent fluctuations at the diffusers output, as well as distribution of the averaged flow parameters were shown. The flow parameters in the standard and the "aggressive" diffusers both with jets and with no jets in the same mode were compared. It was found that using the synthetic jets in considered diffusers allows us to improve their characteristics and in case of "aggressive" diffuser approximate them closer to the level of the standard.

References

1. Kashkin Yu.F., Konovalov A.E., Krashennnikov S.Yu., Lyubimov D.A., Pudovikov D.E., Stepanov V.A. Experimental and numerical investigation of separated flows in subsonic diffusers. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2009, no. 4, pp. 91-99. (English translation: *Fluid Dynamics*, 2009, vol. 44, is. 4, pp. 555-565. DOI: [10.1134/S0015462809040097](https://doi.org/10.1134/S0015462809040097)).
2. Göttlich E. Research on the aerodynamics of intermediate turbine diffusers. *Progress in Aerospace Sciences*, 2011, vol. 47, no. 4, pp. 249-279. DOI: [10.1016/j.paerosci.2011.01.002](https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2011.01.002)

3. Lee S., Loth E., Babinsky H. Normal shock boundary layer control with various vortex generator geometries. *Computers & Fluids*, 2011, vol. 49, no. 1, pp. 233-246. DOI: [10.1016/j.compfluid.2011.06.003](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.06.003)
4. Debiassi M., Herberg M.R., Yan Z., Dhanabalan S.S., Tsai H.M., Dhanabalan S. Control of Flow Separation in S-Ducts via Flow Injection and Suction. *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, 7-10 January 2008. Paper no. 2008-74. DOI: [10.2514/6.2008-74](https://doi.org/10.2514/6.2008-74)
5. Florea R., Bertuccioli L., Tillman T.G. Flow-control-enabled aggressive turbine transition ducts and engine system analysis. *3rd AIAA Flow Control Conference*, San Francisco, California, 5-8 June 2006. Paper no. 2006-3512. DOI: [10.2514/6.2006-3512](https://doi.org/10.2514/6.2006-3512)
6. Holman R., Uttukar Y., Mittal R., Smith B.L., Cattafesta L. Formation criterion for synthetic jets. *AIAA Journal*, 2005, vol. 43, no. 10, pp. 2110-2116. DOI: [10.2514/1.12033](https://doi.org/10.2514/1.12033)
7. Dandois J., Garier E., Sagaut P. Unsteady Simulation of Synthetic Jet in a Crossflow. *AIAA Journal*, 2006, vol. 44, no. 2, pp. 225-238. DOI: [10.2514/1.13462](https://doi.org/10.2514/1.13462)
8. Rizzetta D.P., Visbal M.R., Morgan P.E. A High-Order Compact Finite-Difference Scheme for Large-Eddy Simulation of Active Flow Control (Invited). *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, 7-10 January 2008. Paper no. 2008-526. DOI: [10.2514/6.2008-526](https://doi.org/10.2514/6.2008-526)
9. Iaccarino G. Predictions of a Turbulent Separated Flow Using Commercial CFD Codes. *Journal of Fluid Engineering*, 2001, vol. 123, no. 4, pp. 819-828. DOI: [10.1115/1.1400749](https://doi.org/10.1115/1.1400749)
10. Kaltenbach H.-J., Fatica M., Mittal R., Lund T.S., Moin P. Study of flow in a planar asymmetric diffuser using large-eddy simulation. *Journal of Fluid Mechanics*, 1999, vol. 390, pp.151-185. DOI: [10.1017/S0022112099005054](https://doi.org/10.1017/S0022112099005054)
11. Qin N., Xia 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. 5, pp. 373-380. DOI: [10.1243/09596518JSCE513](https://doi.org/10.1243/09596518JSCE513)
12. Arunajatesan S., Oyarzun M., Palaviccini M., Catafesta L. Modeling Zero-Net Mass-Flux-Actuators for Feedback Flow Control. *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Orlando, Florida, 5-8 January 2009. Paper no. 2009-743. DOI: [10.2514/6.2009-743](https://doi.org/10.2514/6.2009-743)
13. 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 translation: *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)).
14. Lyubimov D.A. The use of the hybrid RANS/ILES approach for the investigation of three-dimensional separated turbulent flows in curvilinear diffusers. *Teplofizika vysokikh temperatura*, 2010, vol. 48, no. 2, pp. 279-289. (English translation: *High Temperature*, 2008, vol. 48, no. 2, pp. 261-271. DOI: [10.1134/S0018151X10020197](https://doi.org/10.1134/S0018151X10020197)).

15. 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 translation: *High Temperature*, 2008, vol. 49, no. 4, pp. 539-549. DOI: [10.1134/S0018151X11030126](https://doi.org/10.1134/S0018151X11030126)).
16. Lyubimov D.A., Potekhina I.V. Application of the high resolution large-eddy simulation method for the study of the influence of geometrical and gas-dynamic parameters of the synthetic jets on the curved diffuser flow. *Abstr. of the 16th International Conference on the Methods of Aerophysical Research*, Kazan, Russia, 19-25 August 2012. Part 1, pp. 180-181.
17. 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.
18. Aram E., Mittal R., Cattefesta L. Toward Simple Boundary Condition Representations of Zero-Net Mass-Flux Actuators in Grazing Flow. *Proc. of the 39th AIAA Fluid Dynamics Conference*, San Antonio, Texas, 22-25 June 2009. Paper no. 2009-4018. DOI: [10.2514/6.2009-4018](https://doi.org/10.2514/6.2009-4018)
19. Okada K., Oyama A., Fujii K., Miyaji K. Computational study on Effect of Synthetic Jet Design Parameters. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2010, vol. 2010, art. ID 364859. DOI: [10.1155/2010/364859](https://doi.org/10.1155/2010/364859)
20. Amitay M., Pitt D. Glezer A. Separation Control in Duct Flows. *Journal of Aircraft*, 2002, vol. 39, no. 4, pp. 616-620. DOI: [10.2514/2.2973](https://doi.org/10.2514/2.2973)
21. 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.
22. 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)
23. Spalart P.R., Allmaras S.R. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows. *La Recherche Aerospaciale*, 1994, no. 1, pp. 5-21. (also 30th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1992. Paper no. 92-0439. DOI: [10.2514/6.1992-439](https://doi.org/10.2514/6.1992-439)).
24. Rogers S.R., Kwak D. Upwind Differencing Scheme for the Time-Accurate Incompressible Navier-Stokes Equations. *AIAA Journal*, 1990, vol. 28, no. 2, pp. 253-262. DOI: [10.2514/3.10382](https://doi.org/10.2514/3.10382)