

УДК 533.697.23:533.6.011.34:519.633

ИССЛЕДОВАНИЕ RANS/ILES-МЕТОДОМ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ СТРУЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЕМ В S-ОБРАЗНОМ ВОЗДУХОЗАБОРНИКЕ, ИНТЕГРИРОВАННОМ С ПЛАНЕРОМ САМОЛЕТА

© 2020 г. Л. А. Бендерский¹, Д. А. Любимов¹, *, А. А. Терехова¹

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

*E-mail: lyubimov@ciam.ru

Поступила в редакцию 12.07.2019 г.

После доработки 18.10.2019 г.

Принята к публикации 22.10.2019 г.

С помощью комбинированного RANS/ILES-метода высокого разрешения выполнены расчеты течения в дозвуковом S-образном воздухозаборнике с D-образным входным и круглым выходным сечениями. В качестве имитатора планера использована плоская пластина, на которой смонтирован воздухозаборник. В ее начале задан пограничный слой, профиль которого близок к профилю турбулентного пограничного слоя. Расчеты проводились на структурированной сетке, содержащей 7×10^6 ячеек, получено хорошее совпадение с данными эксперимента. Выявлены причины большой неоднородности течения на выходе воздухозаборника, исследована эффективность применения синтетических струй для улучшения его характеристик. Проанализировано влияние режимных параметров синтетических струй и расположения щелей для их выхода на течение в воздухозаборнике.

DOI: 10.31857/S0040364420020039

ВВЕДЕНИЕ

При разработке новых летательных аппаратов (ЛА) перспективным считается интеграция силовой установки с планером ЛА. Часто рассматриваются силовые установки, расположенные в хвостовой части планера или на крыле. Причины такого расположения могут быть различны. Например, уменьшение шума силовой установки на взлете, особенности поверхности, с которой взлетает самолет (гидросамолеты, самолеты, взлетающие с грунтовых аэродромов), специализированные ЛА, у которых силовая установка по компоновочным соображениям интегрирована с планером, большой диаметр вентилятора у двигателей большой тяги. Однако близкое расположение воздухозаборника (ВЗ) к планеру самолета приводит к тому, что в ВЗ попадает толстый пограничный слой, который образовался на элементах планера. Это, в свою очередь, вызывает большую неравномерность течения как в диффузоре ВЗ, так и на выходе из него. Другим фактором, увеличивающим неравномерность распределения параметров в поперечном сечении ВЗ, является его сложная форма, характерная для силовых установок такого типа. Вследствие этого возникают мощные вторичные течения в канале ВЗ. Входное сечение подобных ВЗ может иметь разную форму (полукруг, прямоугольник,

пространственный вход и т.д.), которая трансформируется по длине ВЗ в круглую на входе в компрессор двигателя. В продольном сечении каналы рассматриваемых ВЗ обычно имеют S-образную “серпантинную” форму [1–3]. Трансформация формы поперечного сечения ВЗ, S-образная форма диффузора в продольном направлении приводят к тому, что в нем формируются парные разнонаправленные вихри, интенсивность которых увеличивается по длине диффузора [4]. Их воздействие на течение способствует тому, что пограничный слой со стенок перетекает в ту часть сечения, где интенсивность вихрей максимальна. В результате на выходе из ВЗ образуется большая область низкоскоростного течения с пониженным уровнем полного давления [5–9].

Для улучшения характеристик и уменьшения неравномерности течения в подобных ВЗ применяются различные способы. Часто используются пластинчатые генераторы вихрей, расположенные около входа в ВЗ [3, 8]. Известны примеры выдува микроструй около входа в диффузор ВЗ как постоянной интенсивности [2], так и пульсирующих [6]. Применяется отсос воздуха перед зоной отрыва или низкоскоростного потока около стенки диффузора [10, 11] с последующим его вдувом ниже по потоку [5], а также сочетание отсоса и пластинчатых генераторов вихрей [10]. Пе-

речисленные мероприятия позволяют улучшить характеристики течения на выходе из ВЗ, и прежде всего неравномерность в распределении полного давления. Однако они не лишены определенных недостатков. Так, механические генераторы вихрей, которые устанавливаются на стенках диффузора, всегда оказывают воздействие на поток вне зависимости от того, есть ли в этом необходимость, их эффективность нельзя регулировать. Перспективным является газодинамическое управление течением с помощью выдува в пограничный слой воздуха с высокой энергией или отсоса пограничного слоя, возможна комбинация этих мероприятий. Однако в случае выдува в пограничный слой требуются рабочее тело, устройство для подвода энергии к нему, магистрали для подачи рабочего тела в зону отрыва. Для систем с отсосом необходимы устройство для создания пониженного давления, магистраль для отвода воздуха и система его выброса.

Перечисленных недостатков лишены системы с нулевым суммарным массовым расходом рабочего тела. В этом случае работа устройства газодинамического управления течением сводится к чередующимся фазам выдува воздуха – “синтетической струи” – в поток из замкнутой полости за счет изменения ее объема с последующим затем всасыванием в нее низкоэнергетического потока из диффузора. Полость сообщается только с прочной частью диффузора, поэтому суммарный расход воздуха за каждый цикл работы системы равен нулю. Примеры использования синтетических струй для улучшения течения в серпантинных диффузорах представлены в статьях [12, 13]. В указанных работах в дополнение к синтетическим струям были установлены пластинчатые генераторы вихрей. Известно, что в зависимости от частоты генератора синтетических струй и формы отверстий для их выхода они могут оказывать различное воздействие на основное течение [14]. При использовании низкочастотных синтетических струй они порождают вихри, сходные с теми, которые образуются при использовании пластинчатых генераторов. Наибольшее воздействие на течение достигается, когда отверстия для выхода синтетических струй имеют формы длинных щелей, расположенных в направлении основного течения. При увеличении частоты синтетических струй их воздействие на течение сводится к передаче импульса основному течению, в этом случае важна “дальнобойность” струй. Это может быть достигнуто при использовании квадратных или круглых отверстий для выхода синтетических струй. В работах, посвященных применению синтетических струй для управления в серпантинных диффузорах, отверстия для выхода синтетических струй имели круглую форму. Это свидетельствует о том, что синтетические струи оказывали на поток такое же действие, как и обычные, “кон-

тинувальные” струи. В [15–17] продемонстрированы успешные примеры применения синтетических струй в режиме генераторов вихрей для управления отрывными течениями и улучшения характеристик различных диффузоров между элементами турбо-реактивного двигателя (ТРД). Интересна статья [18], в которой продемонстрировано, что синтетические струи, выполняющие функции генераторов вихрей, могут улучшить характеристики интегрированного с планером самолета сверхзвукового ВЗ.

В настоящей работе представлены результаты расчетов, выполненных для определения эффективности применения синтетических струй при управлении течением в канале дозвукового пространственного серпантинного ВЗ сложной формы, экспериментально исследованного в [1]. Для имитации влияния планера ВЗ был установлен на пластине, на которой задавался толстый пограничный слой. Расчеты проводились RANS/ILES-методом высокого разрешения [18]. Высокое разрешение метода достигалось использованием для вычисления предраспадных параметров на гранях расчетных ячеек в методе Роу сохраняющей монотонность схемы девятого порядка MP9. В области RANS в пограничном слое для замыкания системы уравнений использована модель турбулентности Спаларта–Аллмараса. Положение перехода от RANS к ILES определялось аналогично тому, как это реализовано в методе DES. Применение вихререзающего подхода позволило явным образом описать турбулентные эффекты и определить уровень турбулентных пульсаций параметров течения в канале ВЗ. Выполнено сравнение результатов расчетов с данными эксперимента для исходного ВЗ без синтетических струй. В ходе расчетов исследовано 20 вариантов режимных параметров синтетических струй и расположения щелей для их выхода. Режимные параметры выбирались таким образом, чтобы реализовывался вихревой механизм воздействия синтетических струй на течение в диффузоре ВЗ. Получены характеристики течения на выходе из ВЗ, уровни неравномерности полного давления, турбулентные пульсации скорости и статического давления при разной степени дросселирования как для исходного варианта ВЗ, так и для ВЗ с синтетическими струями.

ГЕОМЕТРИЯ ВЗ, РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Для расчетов был выбран вариант геометрии А серпантинного ВЗ из работы [1]. Этот ВЗ достаточно подробно описан в литературе, для него имеются режимные параметры, данные эксперимента и результаты расчетов других авторов. Внешний вид ВЗ показан на рис. 1. Здесь и далее все линейные размеры отнесены к W – ширине

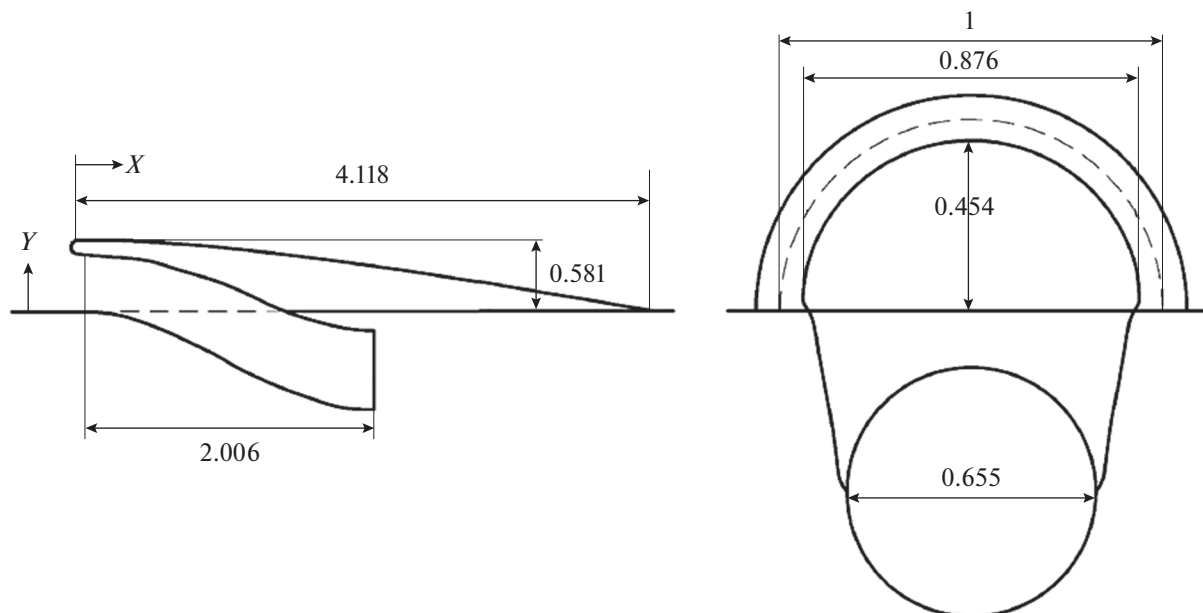


Рис. 1. Общий вид геометрии ВЗ из [1].

входа в ВЗ. Режимные параметры, при которых проводились расчеты, соответствовали тем, которые были в эксперименте [1]. Число Маха внешнего потока составляло 0.83. Полные параметры на входе в расчетную область: $P_{in}^* = 220$ кПа, $T_{in}^* = 144$ К. Число Рейнольдса, вычисленное по скорости набегающего потока и W , $Re = 1.3 \times 10^6$. Статическое давление на выходе из канала ВЗ варьировалось и определяло режим работы ВЗ.

При расчетах использованы следующие граничные условия. На входной и внешней дозвуковых границах расчетной области фиксировались полные параметры потока и угол наклона вектора скорости. На выходной границе внешней части расчетной области задавалось статическое давление, его значение определяло скорость внешнего течения. К выходному сечению диффузора ВЗ был пристыкован цилиндрический канал, на выходе из которого также задавалось постоянное статическое давление, которое определяло расход через ВЗ. Наличие цилиндрического участка позволяет свести к минимуму влияние упрощенных граничных условий и дает возможность получить реалистическое распределение параметров течения в выходном сечении диффузора. На всех твердых поверхностях ставилось комбинированное граничное условие “функция стенки”/прилипание. Выбор типа граничного условия определялся значением Y^+ в центре соседней со стенкой ячейки. В качестве имитатора планера была использована плоская пластина, на которой смонтирован ВЗ. В ее начале задан пограничный слой толщиной δ , $\delta/W = 0.1544$, профиль которо-

го близок к профилю турбулентного пограничного слоя.

Для моделирования синтетических струй использовался упрощенный подход [15, 17]: на части границы, соответствующей щелям для выхода синтетических струй, задавалась компонента скорости под определенным углом к стенке. Ее амплитуда менялась по гармоническому закону. Такой подход позволяет избежать затратного расчета течения в генераторе синтетических струй. Расчеты выполнены для различных значений амплитуды и частоты синтетических струй и нескольких вариантов расположения щелей для выхода синтетических струй.

Все расчеты проводились на структурированной многоблочной расчетной сетке, которая содержала около 7×10^6 ячеек. На рис. 2 показан ее фрагмент.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ТЕЧЕНИЯ В ИСХОДНОМ ВЗ БЕЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ СТРУЙ

Для оценки точности метода и анализа особенностей течения выполнены расчеты течения в ВЗ без синтетических струй при разном статическом давлении на выходе из ВЗ. Это позволило получить дроссельную характеристику ВЗ, которая представлена на рис. 3 и показывает зависимость коэффициента восстановления полного давления σ на выходе из ВЗ от степени дросселирования ВЗ, которое достигается изменением давления в выходном сечении ВЗ. Последнее приводит к изменению коэффициента расхода ϕ на выходе

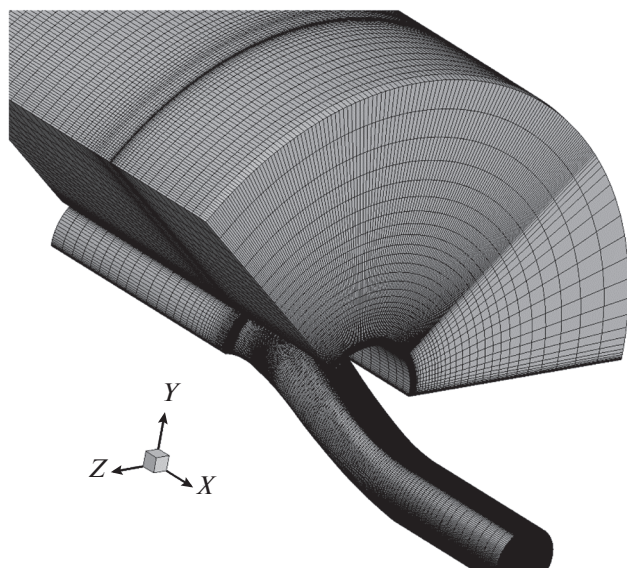


Рис. 2. Фрагмент расчетной области и расчетной сетки.

из ВЗ. Он определяется как отношение расхода воздуха на выходе из ВЗ к расходу в режиме, когда линии тока приходят на переднюю кромку обечайки, коэффициент восстановления полного давления σ — отношение осредненного по площади полного давления на выходе из ВЗ к полному давлению набегающего потока. На рис. 3 также приведены данные эксперимента из работы [1] для этого ВЗ. Наблюдается хорошее совпадение расчетных результатов и эксперимента. Дальнейшие результаты будут представлены для точки на дроссельной характеристике при $\varphi = 0.55$. Для близкого значения $\varphi = 0.556$ имеются экспери-

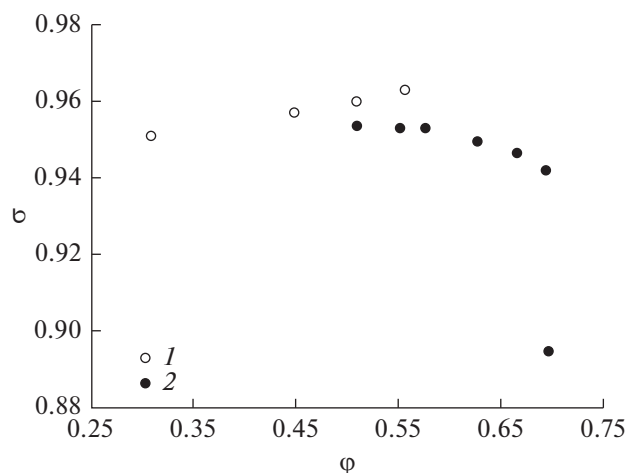


Рис. 3. Дроссельная характеристика на выходе из ВЗ в сечении $X/W = 2.064$: 1 — эксперимент [1], 2 — расчет.

ментальные данные, по-видимому, эта точка является рабочей.

Сравнение распределений вдоль нижней и верхней стенок канала ВЗ осредненного статического давления P_{av} , отнесенного к давлению набегающего потока P_0 , с данными эксперимента [1] приведено на рис. 4. Максимальная погрешность не превышает 7% и наблюдается около верхней стенки в середине диффузора. При $X/W > 1.25$ расчетные и экспериментальные распределения давления близки.

На рис. 5 показана эволюция течения в различных поперечных сечениях ВЗ. На входе в ВЗ течение неравномерно по высоте вследствие толстого турбулентного пограничного слоя (рис. 5а). По мере удаления от входа в ВЗ его толщина еще более возрастает, причем больше всего в центре диффузора, что является следствием воздействия продольных вихрей, о которых говорилось выше (рис. 5б). В окрестности выходного сечения вихри достигают большого размера и вызывают перетекание пограничного слоя в нижнюю часть сечения, в результате там образуется большая низкоскоростная зона с низким уровнем полного давления (рис. 5в). Это можно видеть на рис. 5г, где показано поле осредненной продольной скорости и проекции линий тока для осредненной скорости в этом же сечении ВЗ. Распределение осредненной продольной скорости в сечении ВЗ $Z = 0$ приведено на рис. 5д. На нем видно, как увеличивается по длине диффузора толщина низкоскоростной зоны в его нижней части.

На основе анализа результатов, показанных на рис. 5, можно сделать вывод, что для уменьшения неравномерности на выходе из ВЗ необходимо реализовать такие изменения в структуре течения

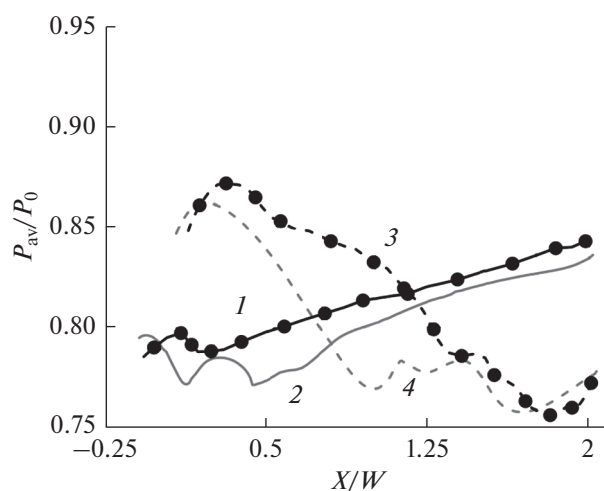


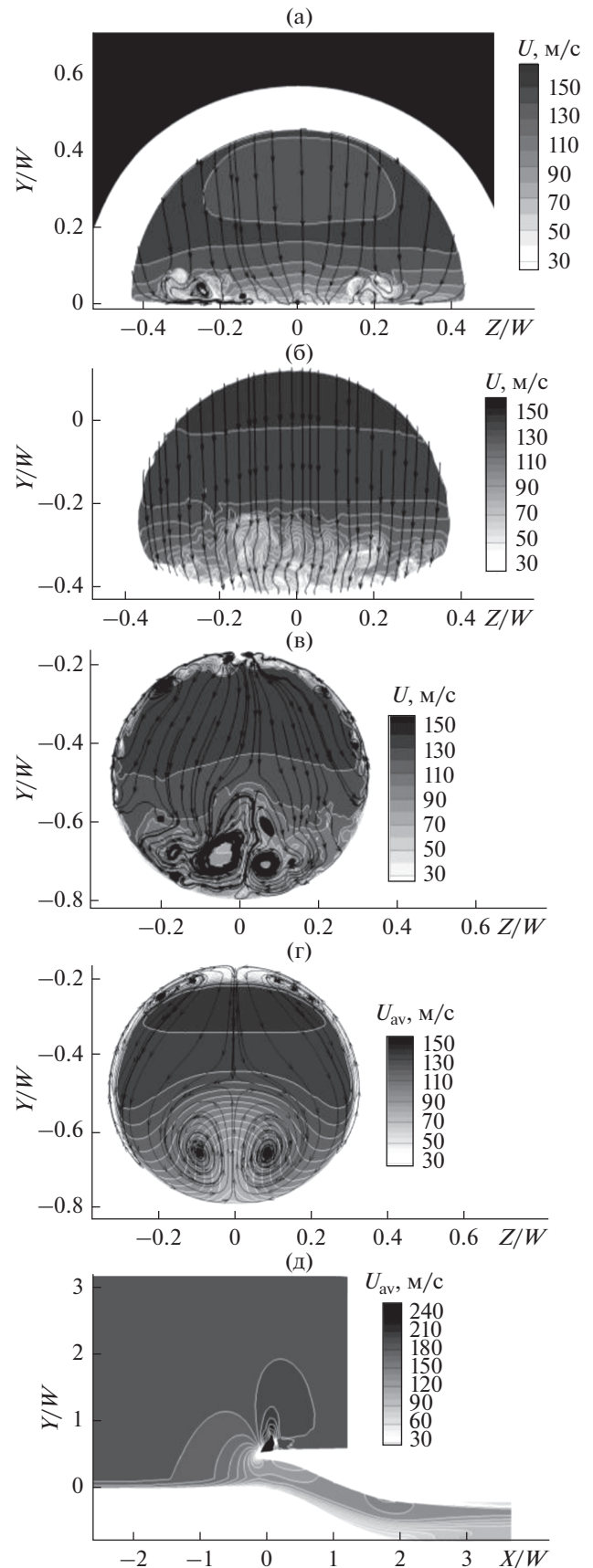
Рис. 4. Распределение статического давления по длине ВЗ на нижней (1, 2) и верхней (3, 4) стенках: 1, 3 — эксперимент при $\varphi = 0.556$; 2, 4 — расчет при $\varphi = 0.55$.

Рис. 5. Поля мгновенных (а)–(в) и осредненного (г) распределений продольной скорости и проекции линий тока в поперечных сечениях ВЗ при $X/W = 0$ (а), 1 (б), 2.37 (в), (г); (д) – поле продольной осредненной скорости в сечении $Z = 0$.

внутри диффузора ВЗ, которые уменьшают интенсивность продольных вихрей, либо устранят их совсем. В работе [5] эффективным способом улучшения течения и снижения неравномерности оказалось сочетание отсоса пограничного слоя с нижней стенки у входа в серпантинный ВЗ с последующим выдувом в диффузор ВЗ через небольшие отверстия. В зависимости от расположения этих отверстий менялась эффективность выдува. В настоящей работе для управления течением использовались синтетические струи. При выборе положения и формы щелей для их выхода учитывались результаты [5]. Режимные параметры синтетических струй выбирались так, чтобы они воздействовали на течение подобно традиционным пластинчатым генераторам вихрей.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ТЕЧЕНИЯ В ВЗ С СИНТЕТИЧЕСКИМИ СТРУЯМИ

Были рассмотрены такие варианты расположения щелей для выхода синтетических струй, чтобы они модифицировали пограничный слой на нижней стенке диффузора ВЗ и создавали много мелких вихрей (рис. 6а), либо формировали вихри с закруткой, противоположной той, которую производят продольные вихри (рис. 6б, 6г), или же несколько “отодвигали” пограничный слой от нижней стенки (рис. 6в). Длина и ширина щелей для выхода синтетических струй в относительных единицах: $L/W = 0.31$ и $H/W = 0.0094$ соответственно. Режимные параметры синтетических струй, приведенные в таблице, задавались как граничное условие на стенке в местах расположения щелей для их выхода. Кроме частоты f и амплитуды q задавался угол α их выхода. Синтетические струи также характеризуются коэффициентом импульса C_u , который определяется как отношение их суммарного импульса за период к импульсу потока на входе в ВЗ. Чем меньше эта величина, тем эффективнее струи. При вариантах расположения струй А, В и D (рис. 6) они были направлены под углом к стенкам диффузора симметрично относительно вертикальной плоскости симметрии диффузора. При варианте С струи направлены вдоль основного течения (оси X). В большинстве случаев частота струй была невысокой $f = 100\text{--}250$ Гц, тогда они воздействовали на основное течение подобно генераторам вихрей. Для вариантов расположения щелей А и С также проводились расчеты при $f = 1000$ Гц. С увеличением частоты синтетические струи приобретают свойства обычных струй. В данном случае пред-



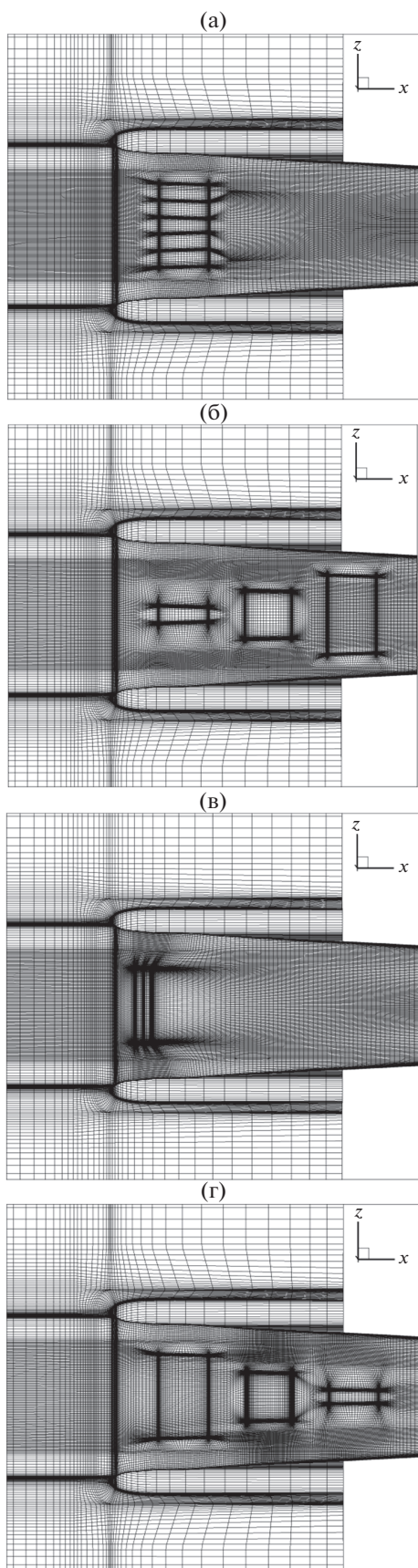


Рис. 6. Расположение щелей для выхода синтетических струй: (а) – №№ 1–6 (вариант А); (б) – №№ 7–12 (В); (в) – №№ 13, 14 (С); (г) – №№ 15–20 (D).

полагалось, что струи добавляют основному течению импульс вдоль оси X , тем самым уменьшают неравномерность течения по высоте диффузора ВЗ и частично ослабляют или замедляют формирование продольных вихрей. Следует отметить, что отказ от затратного расчета течения в полости генератора синтетических струй и замена его упомянутым выше граничным условием позволяют обеспечить приемлемую точность расчетов [17] при существенном сокращении общего числа ячеек расчетной сетки.

Для практических приложений важно знать уровень окружной неравномерности полного давления $\Delta\sigma_0$ на выходе из ВЗ, поскольку его повышенный уровень может нарушить работу компрессора. В настоящих расчетах величина $\Delta\sigma_0$ определялась следующим образом. Реальному полю полного давления ставится в соответствие некоторое поле, зависящее только от полярного угла [19]. Для этого вычисляется среднее значение коэффициента полного давления вдоль различных радиусов

$$\sigma_r = \int_0^1 \sigma_2 \bar{r} d\bar{r}.$$

Далее выделяется сектор пониженного давления, в пределах которого σ_r меньше, чем среднее значение по всему сечению канала $\sigma_{ср}$, и находится среднее значение σ_0 в этом секторе

$$\sigma_0 = \frac{1}{\Phi_2 - \Phi_1} \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} \sigma_r d\Phi.$$

Окружная неравномерность характеризуется относительной протяженностью сектора пониженного давления и средним уменьшением давления в секторе $\Phi_0 = \Phi_2 - \Phi_1$ (Φ_1 и Φ_2 – углы, ограничивающие сектор пониженного давления), $\Delta\sigma_0 = 1 - \sigma_0/\sigma_{ср}$.

Количественное влияние синтетических струй на уровень окружной неравномерности полного давления можно определить с помощью параметра $\delta\sigma_0 = (\Delta\sigma_0 - \Delta_1\sigma_0)/\Delta_1\sigma_0 \times 100$. Здесь $\Delta\sigma_0$ – уровень окружной неравномерности с синтетическими струями, $\Delta_1\sigma_0$ – уровень окружной неравномерности в базовом ВЗ без струй. Значения $\delta\sigma_0$ приведены в таблице.

Помимо $\Delta\sigma_0$ синтетические струи влияют и на другие характеристики ВЗ. На рис. 7 показаны уровень окружной неравномерности (рис. 7а), коэффициент восстановления полного давления (рис. 7б), а также уровни пульсаций продольной

Параметры синтетических струй и их влияние на течение при выходе из ВЗ

№ варианта	Расположение струй	α , °	q , м/с	f , Гц	C_μ , %	$\delta\sigma_0$, %	U_{rms} , %	P_{rms} , %
0	Без струй						3.71	1.03
1	А	30	50	100	0.049	2.42	3.73	1.04
2				200	0.049	3.37	3.79	1.59
3			100	100	0.197	2.76	3.77	1.11
4			150		0.443	-3.63	3.95	1.21
5			150	1000	0.443	5	3.96	1.25
6			200	100	0.787	-48	5.11	1.87
7	В	45	50	100	0.073	1.6	3.67	1.01
8					100	0.292	-5.7	3.97
9			200	0.292		0.03	3.85	2.04
10			150	100	0.657	-13.3	4.35	1.4
11			200		1.168	-25.8	4.77	1.63
12			150	250	0.657	-12.8	4.31	5.37
13	С	26.5	50	1000	0.072	0.25	3.74	1.15
14			100		0.287	3.6	3.84	1.43
15	D	45	50	100	0.049	2.93	3.72	1.04
16					100	0.197	0.84	3.83
17			200	0.197		4.94	4.0	2.8
18			150	100	0.443	-6.95	4.07	1.3
19			200		0.8	-23.16	4.63	1.65
20			150	250	0.443	-7.03	4.2	2.77

скорости (рис. 7в) и статического давления (рис. 7г) на выходе из ВЗ для разных вариантов синтетических струй. Наиболее эффективно снижают уровень окружной неравномерности полного давления на выходе из ВЗ синтетические струи №№ 6, 11 и 19 с максимальной амплитудой (рис. 7а). Они порождают вихри большой интенсивности и наибольшим “дальнодействием”. При варианте А воздействие вихрей на течение максимально, при вариантах В и D, когда щели разнесены по длине ВЗ, оно значительно слабее. Это обусловлено тем, что интенсивность вихрей у каждой пары струй снижается быстрее, чем у матрицы струй в варианте А. Следующая пара воздействует на течение независимо от предыдущей, это ослабляет суммарный эффект воздействия струй на течение. Синтетические струи влияют на течение подобно пластинчатым завихрителям и выступают в роли турбулизаторов. Это представлено на рис. 7в, где приведены пульсации продольной скорости на выходе из ВЗ: чем больше

интенсивность вихрей и снижение $\Delta\sigma_0$, тем больше рост пульсаций скорости. На уровень пульсаций статического давления частота синтетических струй оказывает заметно большее влияние, чем амплитуда. Это видно в таблице и на рис. 7г. Увеличение амплитуды в два раза приводит к росту пульсаций примерно на 20%, а увеличение частоты со 100 до 200 Гц повышает уровень пульсаций в два раза и более.

Синтетические струи с наибольшей эффективностью имеют одинаковые режимные параметры: амплитуду $q = 200$ м/с и частоту $f = 100$ Гц, но отличаются расположением щелей для выхода струй. На практике довольно сложно создать синтетические струи с амплитудой 200 м/с, поэтому были выбраны более реалистичные варианты № 4 и № 10 с амплитудой $q = 150$ м/с и частотой $f = 100$ Гц. У них меньше подъем пульсаций параметров течения и снижение σ на выходе из ВЗ, но и несколько меньше уменьшение окружной неравномерности полного давления. Можно еще

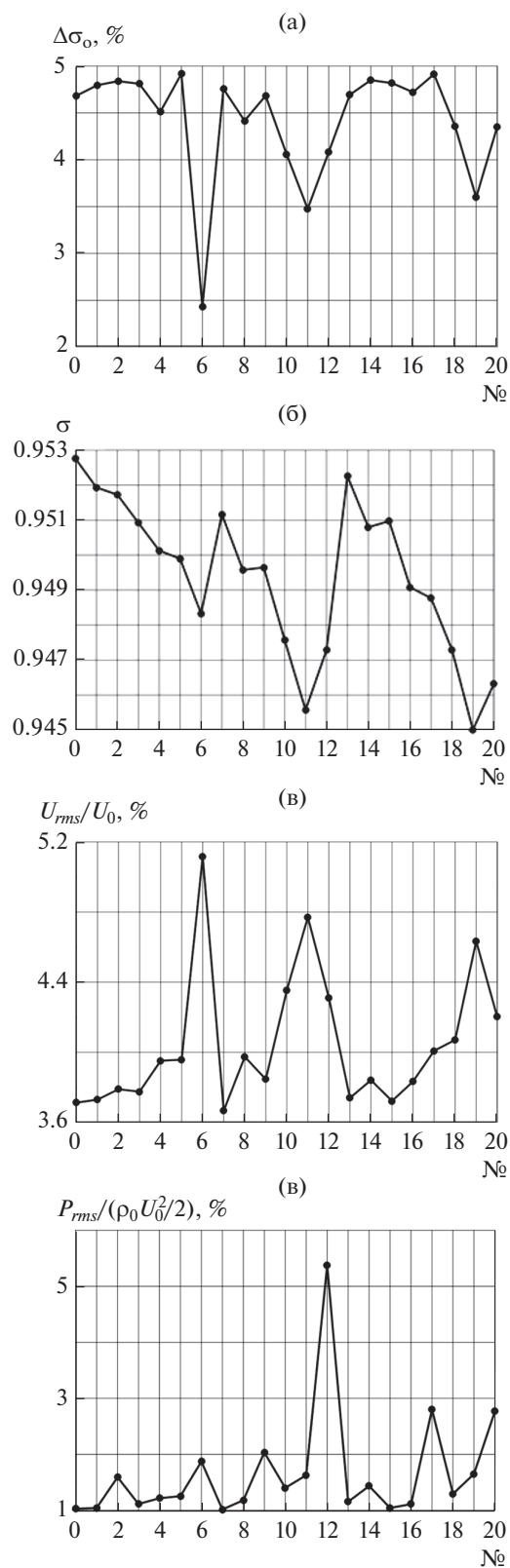


Рис. 7. Влияние режимных параметров синтетических струй и положения щелей для их выхода на характеристики течения и турбулентности на выходе из ВЗ: (а) — уровень окружающей неравномерности полного давления, (б) — коэффициент восстановления полного давления, (в) — уровень пульсаций продольной скорости, (г) — уровень пульсаций статического давления.

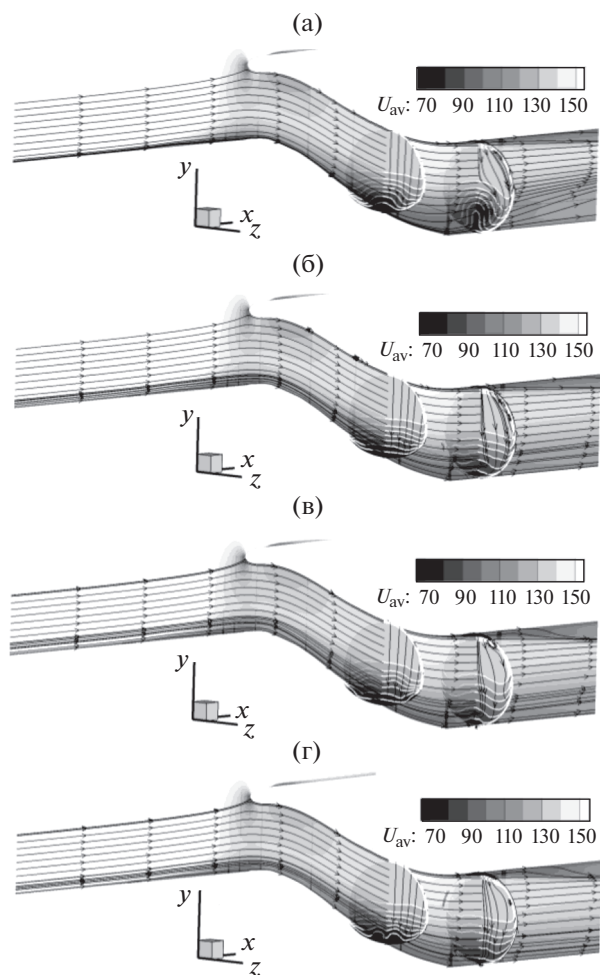


Рис. 8. Влияние положения щелей для выхода синтетических струй с $q = 150$ м/с и $f = 100$ Гц на течение в диффузоре ВЗ: (а) — без струй, (б) — вариант № 4, (в) — № 10, (г) — № 18.

выделить вариант № 18 с такими же режимными параметрами, который тоже снижает неравномерность полного давления, но менее эффективно, чем два других. Высокочастотные синтетические струи, ориентированные поперек потока (варианты 13, 14) практически не оказывают влияния ни на один из параметров, показанных на рис. 7. Возможно, это связано с недостаточной амплитудой струй, но дополнительных расчетов для этих вариантов не проводилось. На рис. 7 и далее (а также в таблице) пульсации продольной скорости U_{rms} и статического давления P_{rms} отнесены соответственно к скорости U_0 и скоростному напору $\rho_0 U_0^2/2$ набегающего потока.

На рис. 8 показано влияние разных вариантов синтетических струй на эволюцию течения в диффузоре ВЗ, приведены поля осредненной продольной скорости, а также проекций линий тока в продольном и нескольких поперечных се-

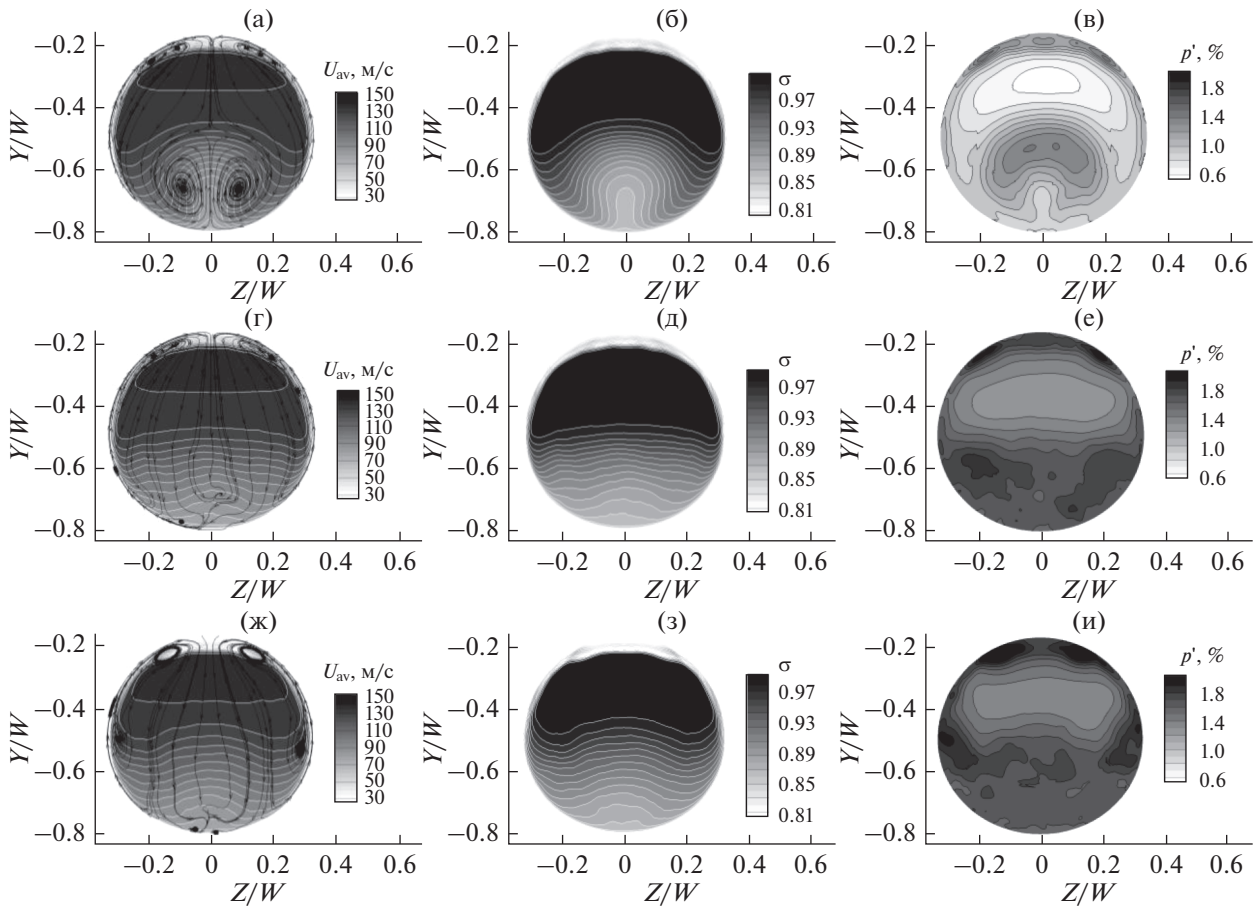


Рис. 9. Влияние синтетических струй на поля осредненной продольной скорости (а), (г), (ж), коэффициента восстановления полного давления (б), (д), (з) и пульсаций статического давления (в), (е), (и): (а)–(в) – ВЗ без струй, (г)–(е) – с синтетическими струями № 4, (ж)–(и) – № 10.

чениях ВЗ для исходного варианта и вариантов со струями №№ 4, 10 и 18. На рис. 8а видно, как по мере удаления от входа ВЗ в диффузоре начинают формироваться продольные вихри, которые приводят к перетеканию пограничного слоя со стенок диффузора в нижнюю часть канала и вытягиванию этой низкоскоростной зоны вверх в окрестности продольной плоскости симметрии. При этом в сечении выхода из ВЗ и ниже по потоку линии тока направлены от стенок к центру канала. Синтетические струи № 4 (вариант расположения А) “разбрасывают” поток около нижней стенки в стороны. Однако их действие ослабевает в окрестности выходного сечения: в центре его нижней части наблюдается небольшая неоднородность в распределении продольной скорости, тем не менее они полностью устраняют продольные вихри (рис. 8б). Вариант синтетических струй № 10 (расположение В) в середине диффузора наиболее сильное влияние оказывает на течение около нижней стенки (рис. 8в). В выходном сечении эти струи практически удаляют продоль-

ные вихри, однако приводят к формированию небольших вихрей около верхней стенки в окрестности выходного сечения ВЗ. Влияние на течение в диффузоре ВЗ синтетических струй № 18 (вариант расположения Д) показано на рис. 8г. В середине диффузора около нижней стенки под действием синтетических струй образуются довольно мощные вихри, которые сильно меняют картину течения около нижней стенки диффузора. Они закручены в противоположную сторону по отношению к продольным вихрям и устраняют их в окрестности выходного сечения.

Детальная информация о воздействии синтетических струй на течение на выходе из ВЗ приведена на рис. 9, показаны поля осредненной скорости с проекциями линий тока, коэффициента восстановления полного давления и пульсаций статического давления. Пульсации статического давления отнесены к скоростному напору набегающего потока и выражены в процентах. Применение синтетических струй № 4 и № 10 позволяет уменьшить высоту низкоскоростной зоны в ниж-

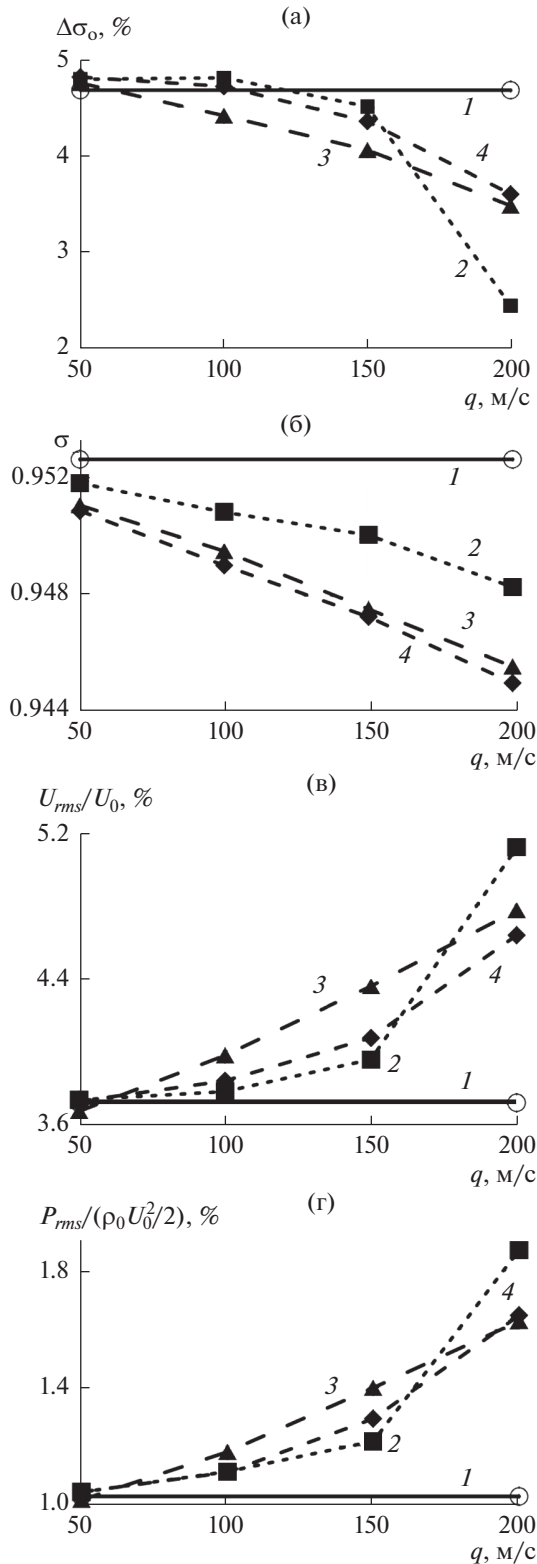


Рис. 10. Влияние амплитуды q синтетических струй с частотой $f = 100$ Гц и положения щелей для их выхода на параметры течения и турбулентности на выходе из ВЗ: (а) — уровень окружной неравномерности полного давления, (б) — коэффициент восстановления полного давления, (в) — уровень пульсаций продольной скорости, (г) — уровень пульсаций статического давления; 1 — без струй, 2 — вариант расположения А, 3 — В, 4 — D.

ней части выходного сечения и устранить продольные парные вихри (рис. 9а, 9г, 9ж). Вследствие этого уменьшаются размеры области с большими потерями полного давления, что видно при сравнении рис. 9б, 9д и 9з. Однако они усиливают по сравнению с вариантом без струй небольшие вихри около верхней стенки ВЗ. Увеличение интенсивности этих вихрей приводит к тому, что в их окрестности наблюдаются пиковые значения пульсаций статического давления, которых не было в базовом ВЗ. Это представлено на рис. 9в, 9е и 9и. Уровень пульсаций давления для варианта со струями выше во всем сечении по сравнению с ВЗ без синтетических струй. Однако его значения не превышают 2% от скоростного напора набегающего потока.

Влияние амплитуды синтетических струй с частотой $f = 100$ Гц и положения щелей для их выхода на характеристики течения на выходе из ВЗ представлено на рис. 10. При увеличении амплитуды синтетических струй уровень $\Delta\sigma_0$ снижается (рис. 10а), происходит это нелинейно. Сильнее всего нелинейность проявляется для варианта А расположения щелей, для варианта В зависимость близка к линейной. В последнем случае потери полного давления возрастают меньше, чем для других вариантов расположения синтетических струй (рис. 10б). Более всего нелинейное влияние амплитуды синтетических струй при конфигурации А заметно для пульсаций продольной скорости (рис. 10в). До $q = 150$ м/с уровень пульсаций возрастает незначительно, а при $q = 200$ м/с увеличивается на 30% по сравнению с базовым ВЗ без струй. Интересно, что для варианта В зависимость уровня пульсаций скорости от амплитуды струй близка к линейной. Подобная картина наблюдается и для пульсаций статического давления (рис. 10г). У варианта расположения щелей D зависимость уровня пульсаций статического давления от амплитуды вновь носит нелинейный характер.

Для практики важно знать влияние синтетических струй при разном дросселировании на коэффициент восстановления полного давления, а также на уровни пульсаций скорости, статического давления и $\Delta\sigma_0$ на выходе из ВЗ. На рис. 11 приведены данные для вариантов без струй, а также со струями №№ 4, 10 и 18, которые определены как наиболее эффективные. Все варианты приводят к небольшому увеличению потерь полного давления, причем с увеличением дросселирования негативное воздействие синтетических струй ослабевает. Влияние синтетических струй на уровень пульсаций продольной скорости наиболее значительно при минимальном дросселировании. Пульсации увеличиваются до 4.5–4.7%. В окрестности рабочей точки $\phi = 0.55$ они

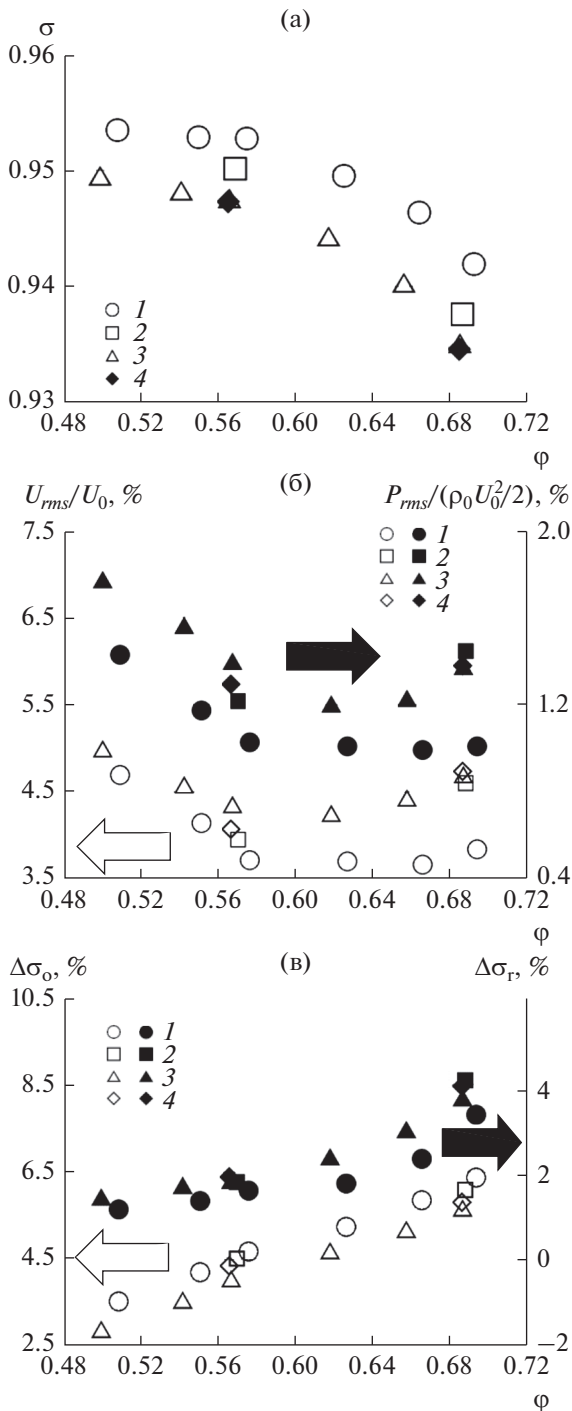


Рис. 11. Влияние дросселирования и синтетических струй на коэффициент восстановления полного давления (а), уровни пульсаций продольной скорости и статического давления (б), окружную и радиальную неравномерности полного давления на выходе из ВЗ (в): 1 – без струй, 2 – вариант струй № 4, 3 – № 10, 4 – № 18.

снижаются до 3.8–4.4%. При дальнейшем увеличении дросселирования прирост пульсаций скорости под воздействием синтетических струй не-

значительный (расчеты проводились только для варианта № 10).

Зависимость турбулентных пульсаций статического давления на выходе из базового ВЗ качественно такая же, как и для пульсаций скорости (рис. 11б). Показанные на рисунке варианты синтетических струй увеличивают уровень пульсаций статического давления. Наибольшее увеличение по сравнению с базовым ВЗ наблюдается при максимальном ϕ . В этом случае уровень пульсаций составляет около 1.4%.

На рис. 11в показана зависимость от степени дросселирования уровней окружной $\Delta\sigma_o$ и радиальной $\Delta\sigma_r$ неравномерностей полного давления в выходном сечении ВЗ. Эти параметры падают при увеличении дросселирования. Для практических приложений критичен уровень окружной неравномерности $\Delta\sigma_o$. У базового ВЗ при минимальном дросселировании $\phi \approx 0.7$ он составляет 6.5%, а при $\phi \approx 0.51$ –3.5%. Применение синтетических струй позволяет снизить уровень окружной неравномерности полного давления на выходе из ВЗ. Наилучший результат достигнут для варианта № 10, менее всего уровень $\Delta\sigma_o$ снижают струи № 4 (рис. 11б). Интересно, что абсолютная величина снижения окружной неравномерности полного давления слабо зависит от степени дросселирования. Нужно отметить, что синтетические струи несколько увеличивают уровень радиальной неравномерности полного давления. Точные количественные результаты по влиянию положения и режимных параметров всех исследованных синтетических струй на параметры течения и турбулентности на выходе из ВЗ приведены в таблице. Коэффициент импульса C_μ у синтетических струй № 10 составлял около 0.66%, а у струй № 4 и № 18 – 0.44%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью RANS/ILES-метода исследованы особенности течения в пространственном дозвуковом ВЗ, интегрированном с планером ЛА, и оценена эффективность газодинамического управления течения с помощью синтетических струй.

Наличие планера приводит к тому, что на вход ВЗ попадает толстый пограничный слой. Анализ результатов расчетов показал, что вследствие особенностей геометрии ВЗ в нижней части диффузора формируются и усиливаются по его длине парные противонаправленные вихри. Они вызывают перетекание пограничного слоя со стенок диффузора к центру нижней его части, что приводит к большой неравномерности параметров течения по высоте сечения и повышенному уровню турбулентных пульсаций в нижней части выходного сечения.

Для базового ВЗ без синтетических струй получено удовлетворительное совпадение результатов расчетов RANS/ILES-методом с данными эксперимента по величине σ в выходном сечении ВЗ и распределению статического давления вдоль верхней и нижней стенок диффузора.

Исследована эффективность использования синтетических струй для управления течением — разрушения продольных вихрей и улучшения характеристик течения на выходе ВЗ. При расчетах менялись амплитуда, частота и угол наклона выдува синтетических струй, а также положение щелей для их выдува. Режимные параметры синтетических струй и форма щелей задавались таким образом, чтобы они воздействовали на течение подобно пластинчатому генератору вихрей и создавали вихри, закрученные в противоположном по отношению к продольным вихрям направлении. Относительный коэффициент импульса синтетических струй C_μ в зависимости от амплитуды струй составлял 0.05–1.17% от импульса на входе в ВЗ.

Показано, что при определенном подборе режимных параметров синтетических струй и положения щелей для их выдува они разрушают парные вихри в нижней части выходного сечения ВЗ. В результате удается уменьшить область с низким уровнем $\sigma \approx 0.86–0.87$ в нижней части сечения и снизить неравномерность в распределении параметров течения.

Влияние синтетических струй на другие параметры течения в выходном сечении ВЗ не столь однозначно. Они повышают уровень пульсаций статического давления в рассматриваемом сечении: для струй № 12 — более чем в 5 раз, для других вариантов — 1.5–2 раза. При этом на уровень пульсаций статического давления влияет в большей степени частота, а не амплитуда.

Получены обобщающие зависимости влияния амплитуды и положения щелей для выхода синтетических струй на характеристики течения на выходе из ВЗ при частоте струй 100 Гц. С увеличением амплитуды при всех вариантах расположения щелей коэффициент восстановления полного давления и коэффициент расхода незначительно уменьшаются. Величина уменьшения зависит от положения щелей. Менее всего амплитуда влияет в варианте А положения щелей. При амплитуде синтетических струй 150 м/с уровень σ снизится не более чем на 0.03%, коэффициент расхода φ — на 1.3%. При этом уровень турбулентных пульсаций скорости практически не увеличится, а уровень пульсаций статического давления возрастет не более чем на 60%, но даже при этом он не превышает 1.6% от скоростного напора набегающего потока. Обнаружено, что зависимость окружной $\Delta\sigma_\theta$ и радиальной $\Delta\sigma_r$ неравномерностей от ам-

плитуды синтетических струй носит сложный характер. Уровень $\Delta\sigma_\theta$ начинает снижаться только при амплитуде струй более 100 м/с, при $q = 150$ м/с уменьшается на 12%. Зависимость $\Delta\sigma_r$ от амплитуды струй носит немонотонный характер. Минимум достигается при $q = 100$ м/с, снижение составляет около 40%. А при $q = 150$ м/с увеличение по сравнению с вариантом без струй — около 11%.

На основе анализа результатов расчетов с учетом практической реализации режимных параметров были определены три самых эффективных варианта синтетических струй: №№ 4, 10 и 18.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ (№ 18-08-00271).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Berrier B.L., Carter M.B., Allan B.G.* High Reynolds Number Investigation of a Flush-Mounted, S-Duct Inlet with Large Amounts of Boundary Layer Ingestion // NASA/TP. 2005. № 213766. 170 p.
2. *Xingya D., Zhaolin F., Jianchao F., Liquan Z., Wei R., Run Z.* Microjet Flow Control in an Ultra-compact Serpentine Inlet // Chin. J. Aeronaut. 2015. V. 28. № 5. P. 1381.
3. *Shu S., Rongwei G.* Serpentine Inlet Performance Enhancement Using Vortex Generator Based Flow Control // Chin. J. Aeronaut. 2006. V. 19. № 1. P. 10.
4. *Anderson B.H., Keller D.J.* Considerations in the Measurement of Inlet Distortion for High Cycle Fatigue in Compact Inlet Diffusers // NASA-TM. 2002. № 211476.
5. *Harouni A.G.* Flow Control of a Boundary Layer Ingesting Serpentine Diffuser Via Blowing and Suction // Aerosp. Sci. Technol. 2014. V. 39. P. 472.
6. *Gorton S.A., Owens L.R., Luther N., Jenkins L.N., Brian G., Allan B.G., Schuster E.P.* Active Flow Control on a Boundary-Layer-Ingesting Inlet // AIAA Paper 2004-1203.
7. *Johnson B.C., Webster R.S., Sreenivas K.* A Numerical Investigation of S-Duct Flows with Boundary-Layer Ingestion // AIAA. 2010-841.
8. *Lee B.J., Liou M.S.* Re-Design of Boundary-Layer-Ingesting Offset Inlet via Passive Flow Control // AIAA Paper 2010-842.
9. *Wellbom S.R., Okiishi T.H.* A Study of the Compressible Flow through a Diffusing S-Duct // NASA-TM. 1993. № 106411.
10. *Keerthi M.C., Kushari A.* Effectiveness of Vortex Generator Jets and Wall Suction on Separated Flows in Serpentine-duct Diffuser // Aerosp. Sci. Technol. 2014. V. 34. P. 12.
11. *Yu J.Y., Liu H.P., Liu L., Li G.Z., Chen F., Song Y.P.* Numerical Investigation on Influence of Suction in S-shaped Inlet to the Rear Fan-stage Performance // AIAA Paper 2016-5055.
12. *Gissen A.N., Vukasinovic B., McMillan M.L., Glezer A.* Distortion Management in a BLI Inlet Diffuser using

- Synthetic-Jet Hybrid Flow Control // AIAA Paper 2011-0035.
13. *Gissen A.N., Vukasinovic B., Glezer A.* Manipulation of Streamwise Vorticity in an Emulated Diffuser Boundary Layer Using Hybrid Flow Control // AIAA Paper 2010-4586.
 14. *Aram S., Mittal R.* Computational Study of the Effect of Slot Orientation on Synthetic Jet-Based Separation Control // Int. J. Flow Control. 2011. V. 3. № 2–3. P. 87.
 15. *Любимов Д.А.* Исследование влияния струй с нулевым массовым расходом на течение в криволинейном диффузоре // ТВТ. 2011. Т. 49. № 4. С. 557.
 16. *Lyubimov D., Makarov A., Potekhina I.* Experimental and Numerical Research of Unsteady Flow in Curvilinear Channel with Active Flow Management Using “Synthetic” Jets // 28th Int. Congress of the Aeronautical Science. Sept. 23–28. 2012. Brisbane, 2012.
 17. *Любимов Д.А., Потехина И.В.* Применение RANS/ILES-метода для анализа эффективности управления отрывными течениями в диффузорах с помощью синтетических струй // МЖГ. 2015. № 4. С. 144.
 18. *Любимов Д.А.* Разработка и применение метода высокого разрешения для расчета струйных течений методом моделирования крупных вихрей // ТВТ. 2012. Т. 50. № 3. С. 450.
 19. *Ремеев Н.Х.* Аэродинамика воздухозаборников сверхзвуковых самолетов. Жуковский: ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, 2002. 177 с.