

УДК 62.135

В.Г. СОЛОДОВ*, д-р техн. наук, Ю.В. СТАРОДУБЦЕВ*,
Б.В. ИСАКОВ**, В.Т. ФЕДАН**

*ХНАДУ, **ГП НПКГ «Заря-Машпроект»

ОСОБЕННОСТИ ОБТЕКАНИЯ ОПОРНОГО ВЕНЦА КОЛЬЦЕВОГО ДИФфуЗОРА ГТД ПРИ ВХОДНОЙ ЗАКРУТКЕ ПОТОКА

Представлены некоторые результаты исследований кольцевых диффузоров в составе патрубка для режимов с закруткой потока на входе в опорный венец. Выполнен анализ влияния углов установки стоек на снижение потерь полного давления в опорном венце и диффузоре.

Влияние закрутки потока на входе в диффузор изучалось в экспериментальных работах [1-5], в которых указывалось на наличие минимума потерь полного давления в диапазоне углов $10-15^\circ$, отсчитываемых от оси ГТД. Однако систематические исследования влияния этого эффекта на потери в диффузоре при наличии стоек и обтекателей входного опорного венца практически отсутствуют.

Условия физического и численного исследования

Модельный выхлопной патрубок ГТД [6] составлен из осесимметричного кольцевого диффузора с центральным телом вращения, теплообменника и пространства улитки (рис. 1). Опорный венец составлен из 6 цилиндрических стоек и 3 обтекателей с увеличенным миделевым сечением. Регенератор набран из фигурных кольцевых пластин, ориентированных перпендикулярно оси диффузора и охватывающих выхлоп диффузора, и помещен в улитку с трубой отвода выхлопных газов.

В работе исследовались модификации диффузора А, В, С со степенью расширения $F_3/F_1 = 2.15$, безразмерном диаметре $\theta = D_{cp1}/l_1 = 5.5$, для диапазона относительных длин $L/l_1 = 6.5 \div 8.75$, периферийных и корневых углов раскрытия $\alpha_1 = 3 \div 4^\circ$, $\alpha_2 = 11.9^\circ$ по обозначениям [4].

Для диффузора А-типа проведены статические продувки на модели с коэффициентом моделирования 3.35; решетка регенератора заменялась эквивалентным гидросопротивлением. Поля избыточного полного давления определялись методом траверсирования. Некоторые экспериментальные данные и сопоставления с результатами расчетов приведены в [6, 7]. Диффузор характеризуется потерями полного давления $\zeta_n = 0,35 \div 0,4$.

Вычислительная область для расчета течения через патрубок (рис. 1) составлена из пространства диффузора, проточной части регенератора и пространства улитки с трубой выхлопа, в которых моделировалось вязкое турбулентное течение. Для регенератора применена гидравлическая модель в виде имитационной решетки параллельных пластин с эквивалентным по потерям ($1,5\%P_{0ax}$) живым сечением. Вследствие различия в масштабах взаимодействующих частей задача расщеплялась на отдельные подобласти: кольцевой диффузор, регенератор и улитку с поверхностями интерфейса между ними. Для упрощения расчетов применен секторный подход [6], основанный на малости окружных градиентов параметров перед регенератором и в улитке. На каждом секторе кольцевой пластинчатый регенератор заменялся гребенкой

пластин с углом раскрытия 4° . Расчеты проведены при 12 секторах регенератора. Передача потоков массы, импульса и энергии через поверхности интерфейса осуществлялась на основе консервативного алгоритма осреднения их на поверхности интерфейса в окружном направлении.

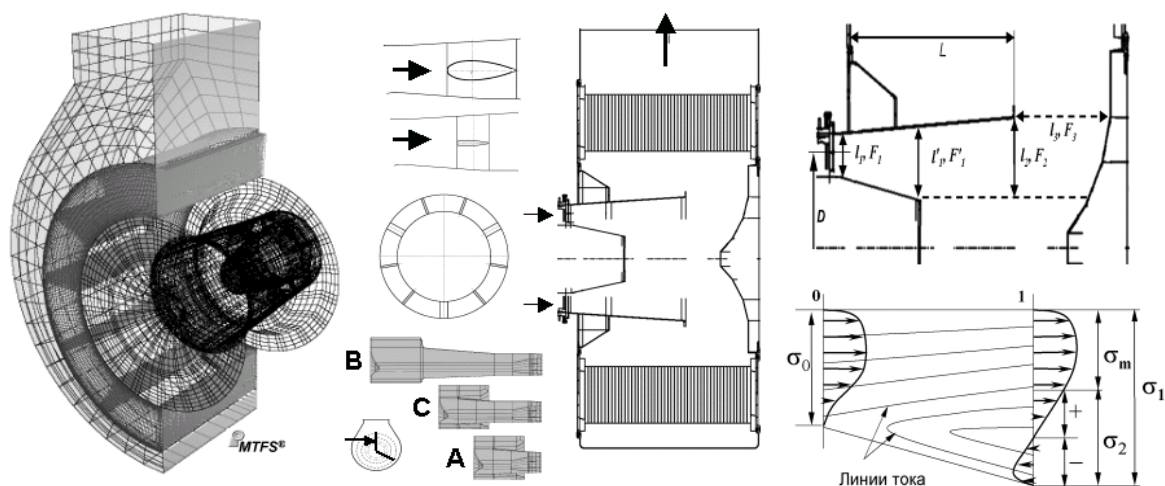


Рис. 1. Схема патрубков с регенератором и диффузором А, В, С-типов и основные обозначения; схема учета противотока при определении потерь

Численное решение и параллелизация алгоритма обеспечены программным комплексом *MTFS* [8], в котором течение в каждой расчетной подобласти описано полной системой нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу-Фавру. Расчетные подобласти аппроксимированы неструктурированными гексаэдральными сетками. Стенки диффузора, пластин регенератора и кожуха предполагались адиабатическими с условием прилипания. Турбулентные эффекты описаны с помощью модифицированной дифференциальной модели турбулентной вязкости Спаларта-Аллараса. Расчеты выполнены с применением сеток мощностью около 1,4-1,8 млн. ячеек для диффузора с опорным венцом, что обеспечило разрешение пограничного слоя $y^+ \leq 2$; пространство улитки состояло из 0,3 млн. ячеек при $y^+ \leq 5$.

Интегральные внутренние потери полного давления на участке газотвода определялись по формуле $\zeta_0 = (p_{0\text{ вх}} - p_{0\text{ вых}}) / (p_{0\text{ вх}} - p_{\text{ вх}})$. В процедуре осреднения сохранялись потоки массы, полной энергии и энтропии, из которых определялись средняя температура и давление торможения. Для оценки потерь на участке, ограниченном сечениями, пересекающими циркуляционную зону, по рекомендации проф. А.В.Гаркуши (ХПИ) из рассмотрения исключалась часть сечения, занимающая площадь поперечного сечения вихря.

Обсуждение результатов

Ниже обсуждаются результаты исследования и особенности течения в серии модификаций А, В, С диффузора на режимах по расходу около $G = 16 \text{ кг/сек}$ для совершенного газа с показателем адиабаты $\kappa = 1,32$ при входных параметрах $P_{0i} = 107 \text{ кПа}$, $T_{0i} = 840^\circ \text{ К}$ (рис. 2-9). Все расчеты выполнены в диапазоне автомодельности по расходу. В обозначениях использованы наименование типа

диффузора (А,В,С), угол установки стойки к оси (0, 10°, 20°), угол закрутки потока (0-40°), совпадающий по направлению с углом установки стоек.

Течение в опорном венце при осевом входе реализуется при числах Маха около $M = 0,3 \div 0,4$ (рис. 2) и числах $Re = 2_{10}5 \div 3_{10}5$, рассчитанных по высоте стойки. Турбулентная вязкость на входе составляла около 10% молекулярной; при выборе характерного размера $1\%l_1$ это соответствовало степени турбулентности $Tu = 0.2 \div 0.25\%$.

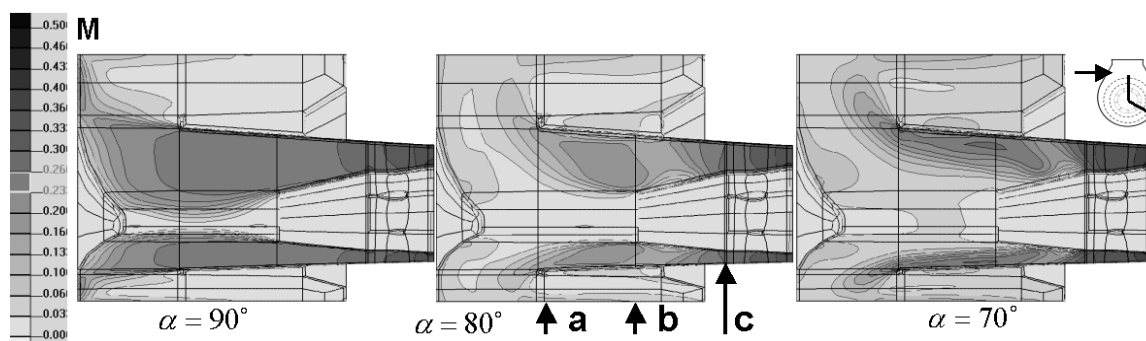


Рис. 2. Структура течения в патрубке А-типа: числа Маха

Течение в диффузоре при осевом входе сопровождается развитыми следами за обтекателями со значительным дефектом полного давления вблизи периферийной оболочки диффузора (рис. 3). Вблизи торца опорного венца возникает обширная малоподвижная циркуляционная зона (рис. 2), которая на некоторых режимах является источником неустойчивости течения, провоцирует колебания параметров в сечениях входа, выхода. В пространстве перед решеткой регенератора реализуется крупномасштабный торовой вихрь, ядро которого загромождает проходное сечение диффузора F_3 ; основная часть пластин обтекает под значительными углами атаки. На выходе из регенератора и в улитке, которая выполнена эксцентричной по отношению к диффузору, течение газа реализуется со скоростями $M = 0,01 \div 0,03$.

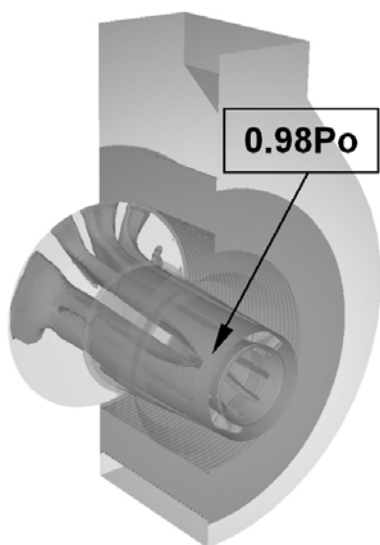


Рис.3. Полное давление в патрубке А-типа

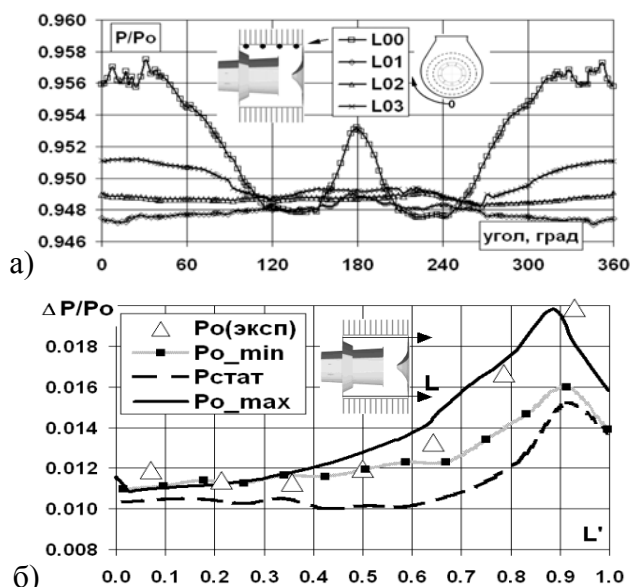


Рис. 4. Статическое давление перед регенератором а)вдоль окружности; б) вдоль оси

Нарушение осевой симметрии для течения в улитке является незначительным ввиду низких скоростей, пренебрежимо мало в пространстве за осевым диффузором из-за демпфирования возмущений регенератором, и проявляется в основной струе из диффузора (рис. 4а). Данные о структуре течения ниже приводятся для 120°-го сектора диффузора, расположенного справа от трубы выхлопа по ходу газа.

Пик статического давления под трубой выхлопа (рис. 4а) объясняется поворотом струй из коллектора в трубу, и впервые был зарегистрирован экспериментально в [9]. Для режима осевого натекания приведено локальное сравнение с данными эксперимента по величине избыточного полного давления для продольного выходного сечения диффузора А-типа (рис. 4б). Расхождение в коэффициенте интегральных внутренних потерь полного давления между расчетными и экспериментальными данными для разных режимов не превышает 18 %. Качество предсказания потерь и локальных характеристик течения солвером *MTFS* представлено также в [7] для коленообразного выхлопа ГТД с опорным венцом.

Влияние входной закрутки на потери при осевой ориентации стоек и обтекателей

Течение в патрубке исследовано при различной, постоянной вдоль радиуса, закрутке потока на входе в опорный венец. Структура течения в диффузоре и характер натекания на пластины регенератора качественно изменяются за счет центробежных сил при появлении закрутки. Высокоскоростная область поджимается к внешней оболочке диффузора, приосевая область в диффузоре наполняется малоподвижным завихренным газом; область вихря, ранее загромождавшего проходное сечение F_3 , смещается к задней стенке газосборника и опускается к оси.

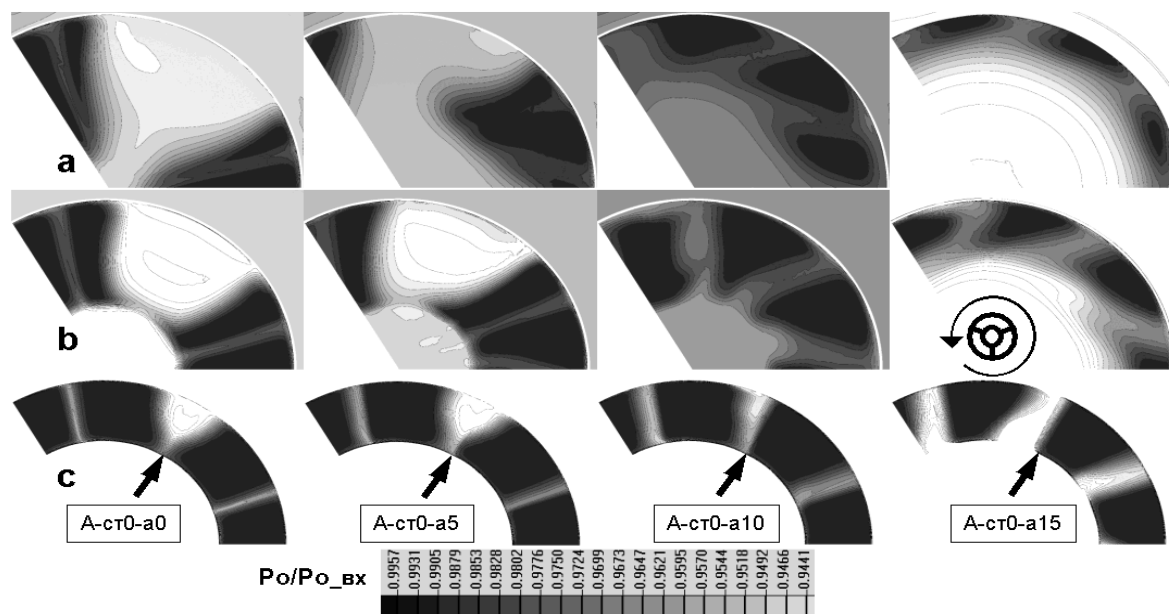


Рис. 5. Структура течения в патрубке А-типа: полное давление; осевая установка стоек

При небольшой входной закрутке следы от стоек и обтекателей имеют тенденцию к смыканию, срединные поверхности следов смещаются в сторону закрутки, наклоняются против закрутки, при увеличении закрутки в прикорневой области следы развиваются в кольцевой отрыв (рис. 5), граница которого смещается к задним кромкам стоек. Следовая завихренность провоцирует набухание погранслоя на обечайке, отрыв

с возможным присоединением. Ее интенсивность определяет заметную долю потерь полного давления в диффузоре. При появлении входной закрутки влияние стоек на потери возрастает и на углах атаки выше 15° интенсивности следов за стойками и обтекателями сопоставимы.

Для углов закрутки потока $7-15^\circ$ проявляется эффект снижения потерь полного давления в диффузоре (рис. 5, 6), известный для свободных кольцевых диффузоров с центральным телом [1-4], который в некоторых случаях может достигать 20-30 % снижения коэффициента потерь [1, 2]. На однотипных диффузорах со стойками в данном диапазоне углов эффект снижения был обнаружен в экспериментах ГП НПКГ «Заря-Машпроект» [7], отмечался в исследованиях ЛМЗ [5].

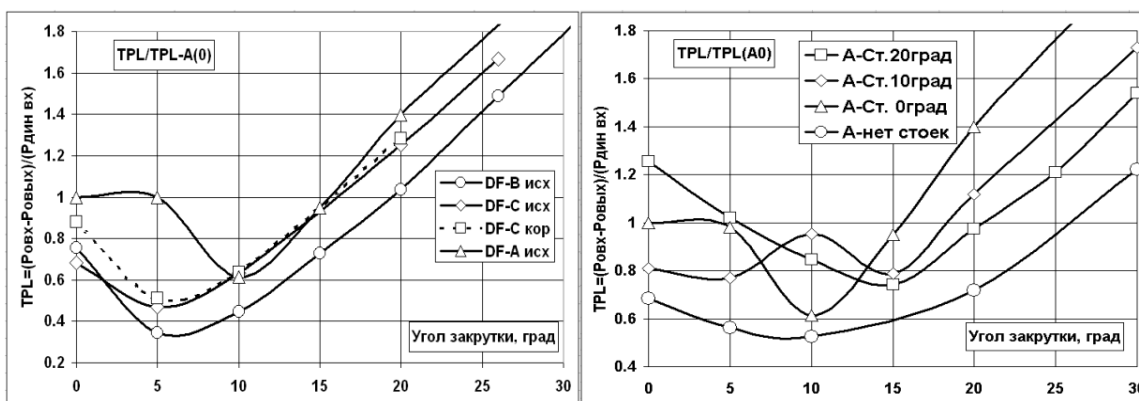


Рис. 6. Относительные внутренние потери полного давления для диффузора А, В, С-типов

Анализ структуры течения в диффузорах рассматриваемого типа (рис. 5, 7) показывает, что наибольшие потери давления в следе за обтекателем возникают при осевом направлении потока из-за отрыва вблизи миделева сечения обтекателя. Ниже по потоку этот отрыв развивается, оставаясь наиболее интенсивным в средней и периферийной частях.

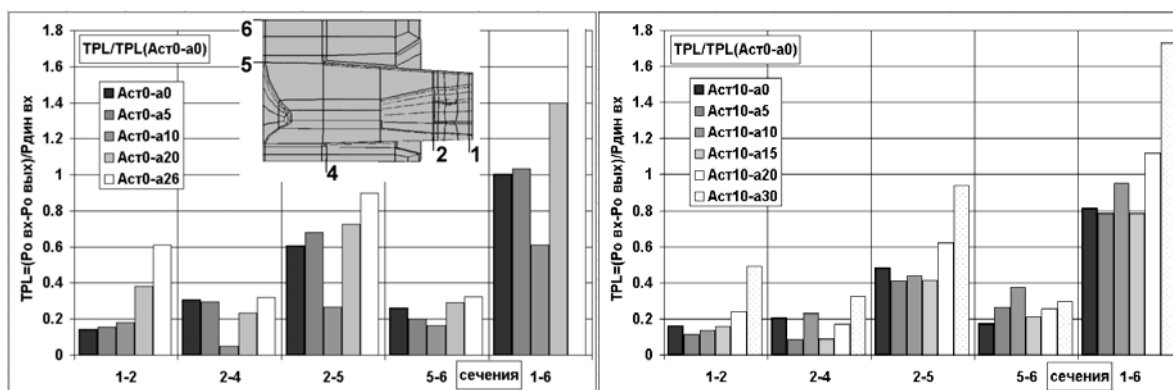


Рис. 7. Потери полного давления на участках диффузора А-типа

Небольшая закрутка качественно не изменяет эту структуру, а лишь искажает, поэтому потери полного давления (рис. 6, 7) практически совпадают. Закрутка 10° (вариант А-ст0-а10) приводит к прилипанию потока с наветренной стороны, в расчетах это происходит спонтанно при углах около 7° . Такая закрутка еще не способна оторвать поток от втулки, завихренность от стоек и обтекателей минимальна, однако течение в

задней части диффузора перестраивается даже при небольшой закрутке, изменяется лишь время этой перестройки. Режим с закруткой в 10° для диффузора А-типа с осевой установкой стоек и обтекателей является наиболее экономичным. В аэродинамически более совершенных диффузорах В,С-типов с цилиндрической вставкой минимум потерь наступает раньше – при $5-7^\circ$. При дальнейшем увеличении закрутки прилипание с наветренной стороны сохраняется, отрыв с теневой стороны увеличивается, следовая завихренность за стойками возрастает, также растет отрывная область на втулке, потери в диффузоре увеличиваются.

Опорный венец создает заметное сопротивление потоку, которое при значительной закрутке увеличивается в несколько раз (рис. 5). Изъятие стоек и обтекателей из опорного венца приводит к нелинейному снижению потерь на диффузоре с ростом закрутки. Для близкого к осевому натекания и для больших углов (20° и выше) потери снижаются в 1.5 – 2 раза (рис. 5) снижение сопротивления диффузора в диапазоне $5 - 15^\circ$ закрутки потока носит монотонный характер.

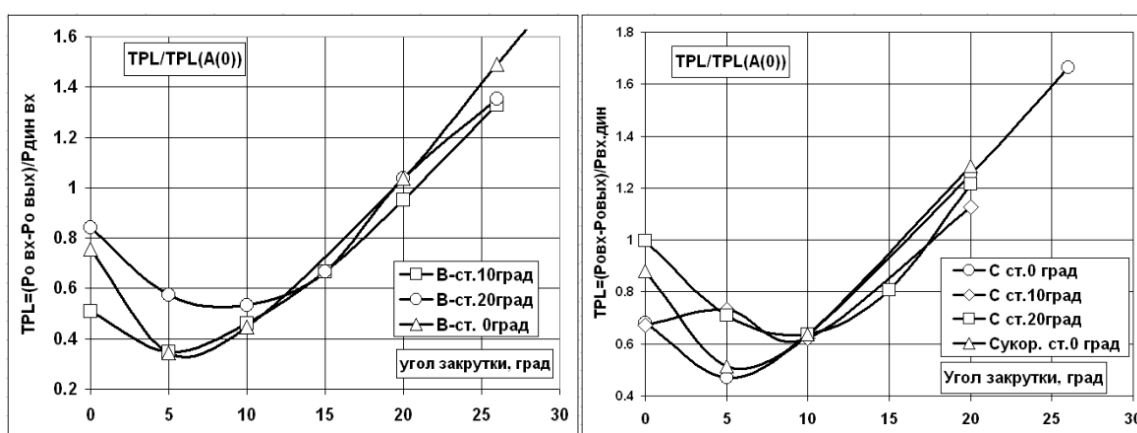


Рис. 8. Относительные внутренние потери полного давления для диффузоров В,С-типов

Установка внутреннего цилиндрического тела за торцом в диффузоре, вытесняющего циркуляционную зону, повышает устойчивость течения, однако практически не влияет на величину потерь полного давления во всем диапазоне углов закрутки. Это обстоятельство подчеркивает основные факторы, определяющие рост потерь: следы от стоек, повышающие степень турбулентности потока, отрыв на втулке, набухание погранслоя на обечайке, условия поворота в сборную камеру; и обосновывает подход к оценке потерь в каналах с противотоком. В целом, механизм снижения потерь объясняется стабилизирующим действием закрутки, при которой на внешней оболочке пограничный слой становится тоньше и отрывные явления минимальны либо отсутствуют, отрыв от втулки еще незначителен; а также прилипанием потока к стойке с наветренной стороны.

Влияние угла установки стоек на потери при закрутке входного потока

Явление снижения потерь на небольших углах закрутки стимулирует исследования закрученного течения в диффузоре при вариации углов установки стоек в диапазоне $10^\circ - 20^\circ$ (рис. 8, 9).

При установке стоек и обтекателей под углом описанный выше механизм развития течения с увеличением угла натекания сохраняется. Именно, для вариантов А-ст10-а10 и А-ст20-а20 потери имеют локальный максимум, однако в связи с веерностью

l_1/D опорного венца в механизм вмешиваются центробежные силы, отрывающие поток от втулки. Поэтому всплеск потерь в варианте А-ст10 для 10° закрутки в 1.5 раза меньше, чем в А-ст0 при осевом входе, для А,В,С-ст20 при 20° закрутке он едва заметен.

При осевом натекании, как и при 15° натекании потока для варианта со скошенной на 10° стойкой, имеет место уменьшение отрыва с наветренной стороны, что и приводит к локальному снижению потерь в сравнении с натеканием без угла атаки. При увеличении закрутки до 15° потери для варианта со скошенной стойкой ниже в сравнении с вариантом осевой установки стойки (рис. 6-9). Аналогичный эффект в данном диапазоне углов обнаружен в экспериментах ЛМЗ [5].

Для более совершенных диффузоров В, С-типов эффект закрутки проявляется более сильно, влияние установки стоек менее выражено.

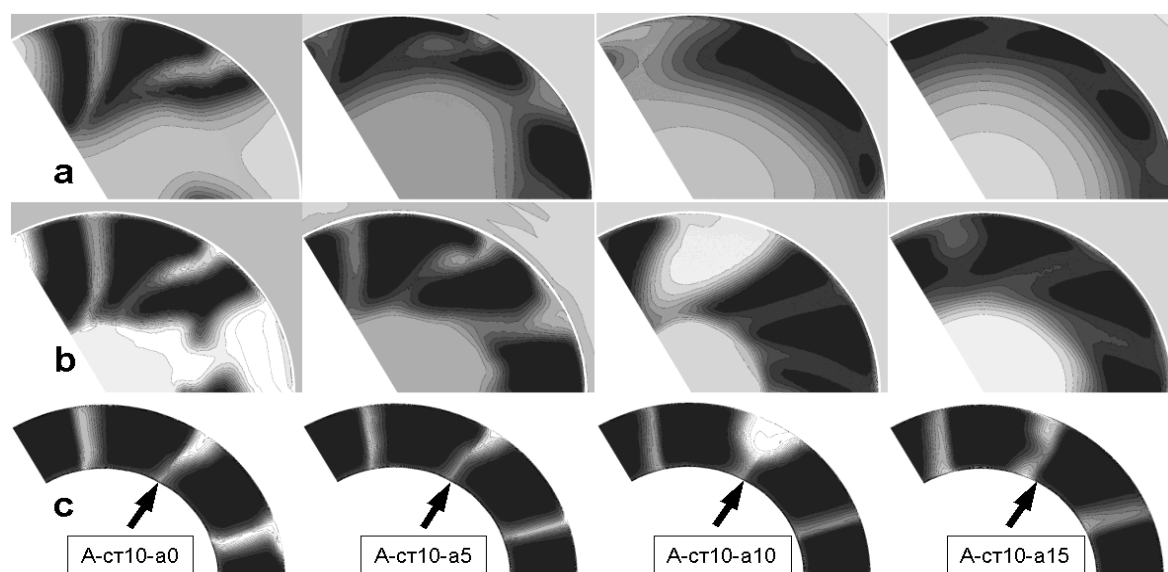


Рис. 9. Структура течения в патрубке А-типа: полное давление; 10° установка стоек

Следует отметить нестабильность режимов течения вблизи безударного натекания на малых углах установки, которая проявляется в сильном изменении структуры течения при малом изменении закрутки. На таких режимах установление структуры формируется очень медленно в связи с инерционностью обширной приосевой циркуляционной зоны.

Заключение

Для моделирования течения в кольцевых выхлопных диффузорах с регенератором и улиткой использован секторный подход, позволяющий существенно сократить объем вычислений. Данный подход может быть применен в переходных диффузорах.

Для кольцевых диффузоров численно подтвержден эффект снижения потерь при небольших углах закрутки, установленный экспериментально различными авторами. Основные особенности безударного обтекания стоек и обтекателей в сравнении с ударным – повышенные потери на обтекателях и более развитый след – сохраняются и для случая скошенных стоек и обтекателей. Основными факторами, способствующими снижению потерь при небольших углах закрутки, являются утоньшение погранслоя на обечайке диффузора, прилегание потока к поверхности стойки (обтекателя) с наветренной стороны. Данный эффект зависит от верности опорного венца, густоты

стоек, геометрических параметров стойки, аэродинамического совершенства диффузора и окружной неравномерности параметров за диффузором. Эффект закрутки в основном проявляется для патрубков с осесимметричной структурой течения в опорном венце; при одностороннем выхлопе без регенератора, например, для коленообразного газоотвода, кривая потерь нечувствительна к закрутке в диапазоне до 10° и эффект отсутствует [7]. Установка стоек под углом 10° к оси приводит к снижению потерь при натекании, близком к осевому, дальнейшее подворачивание не является эффективным для снижения потерь в связи с усилением центробежного эффекта и отрыва от втулки. Для более точной оценки эффективности работы диффузора в диапазоне режимов работы двигателя необходим расчет совместной работы патрубка и последней ступени с реальными распределениями параметров на входе в патрубок.

Литература

1. Винник И.Д., Уманский М.П., Черников В.А. Некоторые результаты аэродинамического исследования выхлопного патрубка транспортного ГТД. – «Энергомашиностроение», 1959, №4, с.6-11.
2. Шерстюк А.Н., Зарянкин А.Е. Радиально-осевые турбины малой мощности. М.: Машиностроение, 1976, 206с.
3. Гоголев И.Г., Дроконов А.М. Аэродинамические характеристики ступеней и патрубков тепловых турбин. - Брянск: Грани, 1995.-257с.
4. Зарянкин А.Е., Симонов Б.П. Выхлопные патрубки паровых и газовых турбин. М.: МЭИ, 2002, 272с.
5. Пономарев Н. Улучшение газодинамических характеристик входных и выходных устройств промышленных ГТУ. Газотурбинные технологии. Май, 2000г.- С.16-19
6. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В., Хандримайлов А.А., Исаков Б.В., Федан В.Т. Трехмерное моделирование вязкого турбулентного течения в выхлопном диффузоре ГТД с кольцевым теплообменником // В кн: Совершенствование турбоустановок методами матем. и физического моделирования: Сб. научн. тр. ИПМаш НАНУ (под ред. Ю.М.Мацевитого). – 2003. – Т. 2. – с.26-34.
7. Solodov V.G., Starodubtsev Yu.V., Isakov B.V., Fedan V.T. Experimental and Numerical Study of Gas Dynamics of Exhaust Pipe of Gas Turbine Unit // Proc. 6th ISAIF. - 2003. - P. 141-146. // Journ. of Thermal Science. – 2004. – No.1. – P. 31-37.
8. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В. Научно-прикладной программный комплекс *MTFS*[®] для расчета трехмерных вязких турбулентных течений жидкостей и газов в областях произвольной формы. Сертификат гос. регистрации авт. прав, УГААСП, №5921, 16. 07. 2002
9. Гродзинский В.Л., Фролов Б.И., Клубань Е.С. Влияние формы щели отбора на окружную неравномерность параметров в проточной части // Энергетическое машиностроение, 1987, №43, 7-11с.

© Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В., Исаков Б.В., Федан В.Т., 2005