

На правах рукописи

Непомнящий Алексей Дмитриевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ
В РЕШЕТКАХ И ТУРБИНАХ ПРИ НИЗКИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬСДА**

Специальность 05.07.05 –
Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Москва – 2021

Работа выполнена в Государственном Научном Центре Российской Федерации
Федеральное Автономное Учреждение «Центральный Институт Авиационного Мо-
торостроения имени П.И. Баранова»

Научный руководитель: Венедиктов Владимир Дмитриевич
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник ФАУ «ЦИАМ
им. П.И. Баранова»

Официальные оппоненты: Арбеков Александр Николаевич
доктор технических наук, доцент, профессор Федерального
государственного бюджетного учреждения высшего обра-
зования «Московский Государственный Технический Уни-
верситет имени Н.Э. Баумана (Национальный Исследова-
тельский Университет)»

Иванов Андрей Владимирович
доктор технических наук, доцент, Заместитель главного
конструктора по науке и новым технологиям Акционерно-
го общества «НПО Энергомаш имени академика
В.П. Глушко»

Ведущая организация: Акционерное общество «Турбонасос»

Защита диссертации состоится «20» октября 2021 г. в 14 часов 00 минут на за-
седании диссертационного совета Д 212.141.08 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адре-
су: 105005, г. Москва, Лефортовская набережная, д. 1, ф-т «Энергомашиностроения»
ауд. 202Э.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и
на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения,
просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр 1,
МГТУ им Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.08.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.08,
кандидат технических наук, доцент



К.С. Егоров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Газодинамическая эффективность турбины низкого давления (ТНД) помимо геометрических параметров проточной части и режимных параметров π_T^* , u/c_{is} во многом зависит и от более общих параметров, к которым можно отнести:

- тип профилей (передне/задненагруженные);
- реактивность ступеней ρ_T ;
- число Рейнольдса (Re);
- турбулентность потока.

Тип профилей характеризует лопаточные венцы более на качественном уровне и определяется сочетанием определенных геометрических параметров (углами установки и отгиба). В частности, при использовании передненагруженных профилей в лопаточных венцах точка перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный на спинке лопаток смещается к входной кромке и на оставшейся части спинки возникает диффузорное течение с высоким уровнем потерь трения и склонностью к отрыву. При использовании задненагруженных профилей в лопаточных венцах точка перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный на спинке лопаток смещается к выходной кромке и на значительной передней части спинки сохраняется конфузорное течение с ламинарным пограничным слоем и низким уровнем потерь трения. При высоком уровне числа $Re > 2.5 \times 10^5$ задненагруженные профили обеспечивают минимальный уровень профильных потерь в лопаточном венце.

В турбинных ступенях с высокой степенью реактивности лопаточные аппараты рабочего колеса (РК) имеют значительную конфузорность и умеренный угол поворота потока. При этом потери в сопловом аппарате (СА) невелики, однако закрутка потока на выходе имеет повышенные значения. При уменьшении степени реактивности конфузорность каналов РК снижается, а угол поворота потока возрастает, что приводит к интенсивному увеличению потерь в РК (закрутка потока на выходе снижается). Потери в сопловом аппарате изменяются при этом незначительно.

Течение в проточной части турбины имеет повышенную неоднородность, нестационарность и турбулентность. Влияние данных параметров на коэффициент полезного действия (КПД) ТНД учитывается в расчетах с использованием 3D RANS (URANS) уравнений. Значения неоднородности, нестационарности и турбулентности потока перед турбиной высокого давления (ТВД) определяется камерой сгорания, а перед ТНД – геометрическими и режимными параметрами ТВД. Параметры турбулентности потока в проточной части турбин при разных режимах их работы (в частности, по числу Re) практически не изучены.

Влияние степени расширения π_T^* , реактивности ступеней ρ_T , коэффициента быстроходности Y (u/c_{is}) и геометрических параметров решеток ($\beta_{1к}$; $\beta_{2ф}$; t ; c_m ; δ ; ...) на эффективность турбины, исследовались в газотурбостроении многократно. Влияние типа профилей в решетках, чисел Re и турбулентности потока исследовано недостаточно. Поэтому исследование влияния низких чисел Re и параметров турбулентности потока на газодинамическую эффективность ТНД является исключительно актуальной темой, обусловленная необходимостью повышения

эффективности ТНД воздушно-реактивных двигателей (ВРД) при уменьшении числа Re по мере набора высоты полета самолетом.

С 70-ых годов прошлого века в ЦИАМ ведутся интенсивные исследования по оценке уменьшения КПД турбины. Известны труды В.Е. Михальцева, Б.Ш. Ланда, В.О. Боровик по исследованию влияния числа Re на эффективность турбин. Работы по исследованию влияния чисел Re на эффективность турбин проводятся на плоских решетках – моделях лопаточных венцов турбин, на модельных и натуральных турбинах. Подобные работы проводятся за рубежом.

Степень разработанности темы. Исследованиям лопаточных венцов и модельных турбин в области низких чисел Re посвящено большое количество работ. Исследования проводятся в основном на плоских решетках при низком уровне начальной турбулентности потока. Результаты исследований имеют разрозненный характер и невысокую практическую значимость.

Настоящая диссертация обусловлена необходимостью проведением систематизации накопленных данных (в том числе, полученных автором) по испытаниям плоских решеток и турбин при низких числах Re . В результате получено обобщение данных семи плоских решеток, верифицированное на 15 плоских решетках других исследователей.

Разработаны рекомендации по повышению эффективности турбин низкого давления.

Цели и задачи диссертации:

1. Провести исследования плоских решеток на модернизированном - под руководством соискателя - стенде У-300 ЦИАМ с целью выявления особенностей формирования потерь и уровня турбулентности потока при низких числах Re .
2. Разработать модельную ступень ТНД турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД) и провести ее испытания при низких и сверхнизких числах Re на модернизированном - под руководством соискателя - стенде ТС-2 ЦИАМ.
3. Разработать метод измерения турбулентности потока при помощи высокочастотного зонда давления и провести измерение параметров турбулентности потока в проточной части турбин и плоских решеток при низких числах Re .
4. Провести анализ и обобщение результатов экспериментального исследования плоских турбинных решеток при низких числах Re .
5. Разработать рекомендации по снижению дополнительных потерь в лопаточных аппаратах и ступенях ТНД при низких числах Re .

Научная новизна работы:

1. Введены понятия граничного числа Рейнольдса $Re_{гр.}$, определяющего границу области автомодельности профильных потерь в решетке.
2. Впервые получена обобщающая зависимость влияния низких чисел Re на профильные потери в лопаточных венцах.
3. Впервые получены новые данные по влиянию сверхнизких чисел Re ($Re < 0.5 \times 10^5$) и начальных параметров турбулентности потока на эффективность ступени ТНД.
4. Разработан метод исследования особенностей турбулентных параметров потока при помощи высокочастотного зонда давления Kulite FAP-НТ-250.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы:

1. Обобщающая зависимость влияния низких чисел Re на профильные потери в лопаточных венцах позволяет получить оценку изменения эффективности ТНД с уменьшением числа Re на стадии проектирования турбины. Современные расчетные методы (модели турбулентности) дают значительную погрешность в предсказании отрывных явлений в лопаточных венцах ТНД и в оценке эффективности турбины в целом при низких числах Re .
2. Впервые исследованы турбулентные параметры потока при помощи высокочастотного зонда в турбинах и плоских решетках при низких числах Re в модельных условиях.
3. Определены доверительные диапазоны по частотной реализации пульсаций скорости потока и по минимальному числу Re для высокочастотного зонда Kulite FAP-HT-250, которые могут установлены для высокочастотных зондов других типов (по числам Re и Sh).
4. Получены новые данные по параметрам турбулентности потока в решетках и турбинах при низких числах Re ; получены новые данные по влиянию низких чисел Re и турбулентности потока на потери в решетках и турбинах.
5. Сформулированы рекомендации по оптимальному проектированию решеток и турбин, работающих при низких числах Re .

Методы исследования. Приведенные результаты имеют экспериментальный характер исследования плоских решеток и модельной ступени ТНД соответственно на модернизированных стендах У-300 и ТС-2 ЦИАМ при низких числах Re .

Метод измерения турбулентных параметров потока в решетках и турбинах основан на применении высокочастотного зонда давления. Простая конструкция зонда и его высокая надежность увеличили возможности исследований турбулентных течений (по сравнению с LDA, PIV или термоанемометром).

Положения, выносимые на защиту:

1. Обобщающая зависимость влияния низких чисел Re на профильные потери в лопаточных венцах.
2. Новые данные по влиянию сверхнизких чисел Re ($Re < 0.5 \times 10^5$) и начальных параметров турбулентности потока на эффективность ступени ТНД и потерь в плоских решетках.
3. Метод измерения турбулентности потока при помощи высокочастотного зонда давления с получением результатов измерения параметров турбулентности потока в плоских решетках и турбинах при низких числах Re в модельных условиях.
4. Рекомендации по проектированию решеток и турбинных ступеней с учетом влияния низких чисел Re и турбулентности потока.

Степень достоверности результатов подтверждается применением фундаментальных законов подобия газодинамики и достоверных экспериментальных данных, полученных в модельных условиях исследования плоских решеток при низких числах Re , в условиях поддержания равномерных параметров потока на входе; результатами систематизации данных экспериментального исследования плоских решеток; достоверных экспериментальных данных, полученных в модельных условиях исследования модельной ступени ТНД при низких и сверхнизких числах Re ; сравнением эксперимен-

тальных данных, получаемых при помощи высокочастотного зонда давления с данными, полученными при помощи термоанемометра и системы Stereo PIV.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на Международных форумах и Международных конгрессах:

1. Международный форум Двигателестроения «Научно-технический конгресс по двигателестроению (НТКД-2014)» (Москва, 2014);
2. Международный форум Двигателестроения «Научно-технический конгресс по двигателестроению (НТКД-2016)» (Москва, 2016);
3. Международный форум Двигателестроения «Научно-технический конгресс по двигателестроению (НТКД-2018)» (Москва, 2018);
4. 29-ый Международный Конгресс по Авиационным Наукам ICAS-2014 (Санкт-Петербург, 2014);
5. 30-ый Международный Конгресс по Авиационным Наукам ICAS-2016 (Тэджон, 2016 г.);
6. 31-ый Международный Конгресс по Авиационным Наукам ICAS-2018 (Белу-Оризонти, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 научных статей, из них 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ и 3 статьи в трудах Международного Конгресса по Авиационным Наукам (ICAS), включенных в базу данных Scopus.

Личный вклад соискателя. Изложенные в диссертации результаты по разработке метода измерения параметров турбулентности потока при помощи высокочастотного зонда давления, по технологии подготовки экспериментальных стендов и экспериментальных объектов с проведением экспериментальных исследований, обработке и обобщению результатов исследования, выполнены соискателем лично.

Структура и объем работ. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 59 наименований. Диссертация изложена на 135 страницах, содержит 81 рисунок, 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, степень разработанности, определены цели и задачи исследования, сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость, указан метод исследования, приведены положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробации результатов.

В первой главе диссертации рассматривается состояние вопроса и постановка задачи диссертационного исследования. Показано, что исследования влияния числа Re на потери в лопаточных аппаратах необходимо проводить в различных плоских решетках (моделей лопаточных венцов) при различных параметрах турбулентности потока. Влияние низких чисел Re на профильные потери предлагается оценивать отношением коэффициентов действительных профильных потерь $\zeta_{гр}$ к профильным потерям $\zeta_{гр,0}$ в автомодельной по числу Re области – коэффициентом K_{Re} влияния числа Re на дополнительные потери, см. формулу (1):

$$K_{Re} = \zeta_{пр.}/\zeta_{пр.0} \quad (1)$$

Вводится определение граничного числа $Re_{гр.}$ для решетки. Граничное число $Re_{гр.}$ определяет границу области автомодельности профильных потерь в решетке. Значение граничного числа $Re_{гр.}$ зависит от геометрии решетки и параметров турбулентности потока. С увеличением интенсивности турбулентности граничное число $Re_{гр.}$ сдвигается в сторону более низких значений числа Re .

В первой главе диссертации также приводится обзор публикаций по исследованию плоских решеток и турбин в области низких чисел Re и обзор публикаций по исследованию параметров турбулентности потока в проточной части турбин.

Практически все исследования плоских решеток при низких числах Re проводились при низкой интенсивности турбулентности потока на входе $Tu < 0.05$. В большинстве случаев масштаб турбулентности, характеризующий ее структуру, не указывался. Большинство авторов работ делают вывод о том, что в области низких чисел Re передненагруженные профили лопаточных аппаратов предпочтительнее задненагруженных профилей. Однако в турбинах, где уровень турбулентности потока выше в 2...3 раза, эти рекомендации могут оказаться ошибочными.

Большинство работ по измерению параметров турбулентности потока в проточной части турбин проводились на модельных турбинах в немодельных условиях (при низких скоростях потока $M < 0.3$ и степени расширения $\pi_t^* < 1.1$), т.к. измерения турбулентных параметров потока существенно ограничиваются возможностями используемой аппаратуры (термоанемометр, ЛДА). Данное обстоятельство ставит задачу о разработке нового метода по измерению параметров турбулентности потока.

Обзор публикаций по исследованию параметров турбулентности потока в проточной части турбин показал, что основным источником повышенной интенсивности турбулентности потока являются кромочные следы лопаток. Максимальная интенсивность турбулентности возникает вблизи выходных кромок и имеет высокие значения $Tu \sim 0.3$. В ядре потока (между следами лопаток) $Tu \sim 0.05$. Увеличение интенсивности турбулентности в проточной части многоступенчатых турбин происходит вследствие турбулизации потока в предыдущих ступенях. Интенсивность турбулентности от входа в турбину и до ее выхода может увеличиваться в диапазоне $Tu \sim 0.05 \dots 0.3$.

Основной вывод, полученный из обзора публикации по исследованию влияния низких чисел Re и параметров турбулентности потока на потери в ТНД и плоских решетках – результаты исследования носят разрозненный характер; не существует достоверных рекомендаций по оптимальному проектированию лопаточных аппаратов и ступеней, работающих в области низких чисел Re .

Во второй главе диссертации приведен метод исследования турбулентных параметров потока в решетках и турбинах при низких числах Re .

В качестве инструмента исследования параметров турбулентности потока используется пятиточечный высокочастотный зонд давления Kulite FAP-HT-250. Основные преимущества использования высокочастотного зонда – это его простота конструкции и удобство монтажа на экспериментальном объекте, отсутствие режимных ограничений (по скорости потока $M < 0.85$), отсутствие чувствительности к вибрациям.

Метод измерения турбулентных параметров потока при помощи высокочастотного зонда давления основывается на использовании осредненных по времени характе-

ристики зонда (квазистационарный подход). Характеристики высокочастотного зонда давления получают по данным обработки результатов его испытаний в аэродинамической трубе на разных режимах по скорости, полному давлению, углам набегающего потока на зонд и используются для нахождения мгновенных параметров потока.

В главе приводится подробное описание метода определения мгновенных скоростей потока (пульсационных компонент вектора скорости потока), энергетических спектров пульсаций компонент вектора скорости потока с использованием аппарата быстрого преобразования Фурье. Турбулентные характеристика потока определяются в декартовой системе координат, ось i которой совпадает с направлением вектора средней скорости потока.

Определяемые энергетические спектры пульсаций компонент скорости потока удовлетворяют следующему уравнению (в непрерывном виде):

$$\langle c_i^2 \rangle = \int_0^{+\infty} E_i(f) df, \langle c_j^2 \rangle = \int_0^{+\infty} E_j(f) df, \langle c_k^2 \rangle = \int_0^{+\infty} E_k(f) df, \quad (2)$$

где $\langle c_i^2 \rangle$, $\langle c_j^2 \rangle$, $\langle c_k^2 \rangle$ – квадраты пульсаций компонент вектора скорости потока (среднеквадратические отклонения), $\text{м}^2/\text{с}^2$;

E_i, E_j, E_k – энергетические спектры пульсаций компонент скорости, $\text{м}^2/\text{с}$;

f – частота, Гц.

Помимо флуктуационных (турбулентных) пульсаций скорости в потоке могут присутствовать нестационарные пульсации скорости, например – следы в потоке от лопаток вращающегося ротора турбомшины. Нестационарные составляющие проявляются на энергетическом спектре в виде острых пиков на частотах, пропорциональных частоте вращения ротора турбомшины и количеству рабочих лопаток в ступенях и их суперпозиции. Преобразование Фурье обладает свойством линейности, поэтому из исходного сигнала выделяются турбулентные составляющие компонент вектора скорости при помощи фильтра.

Интегральные параметры турбулентности, такие как интенсивность и интегральный масштаб, определяются по фильтрованным энергетическим спектрам.

Интенсивности турбулентности потока определяются, согласно следующим уравнениям:

$$Tu_i = \frac{\sqrt{\langle c_i^2 \rangle}}{c}, Tu_j = \frac{\sqrt{\langle c_j^2 \rangle}}{c}, Tu_k = \frac{\sqrt{\langle c_k^2 \rangle}}{c}, \quad (3)$$

где Tu_i, Tu_j, Tu_k – интенсивности турбулентности пульсационных компонент вектора скорости потока;

c – модуль вектора средней скорости потока, $\text{м}/\text{с}$.

Интегральный масштаб турбулентности потока определяется, согласно следующим уравнениям:

$$\Lambda_i = \left[\frac{E_i(f)c}{4\langle c_i^2 \rangle} \right]_{f \rightarrow 0}, \Lambda_j = \left[\frac{E_j(f)c}{4\langle c_j^2 \rangle} \right]_{f \rightarrow 0}, \Lambda_k = \left[\frac{E_k(f)c}{4\langle c_k^2 \rangle} \right]_{f \rightarrow 0}, \quad (4)$$

где $\Lambda_i, \Lambda_j, \Lambda_k$ – интегральные масштабы турбулентности пульсационных компонент вектора скорости потока, м ;

На Рисунке 1 приведена зависимость интенсивности турбулентности продольной пульсации скорости Tu_i от числа Re (число Re определено для характерного размера 10 мм), полученная по данным высокочастотного зонда давления и термоанемометра в

аэродинамической трубе. Изменение числа Re проводилось изменением полного давления потока в диапазоне $p_0^* = 0.2 - 0.8$ бар и приведенной скорости течения в диапазоне $\lambda = 0.15 - 0.6$. На Рисунке 1 видно хорошее, в пределах 10%, совпадение величины интенсивности турбулентности потока, определенной при помощи двух разных приборов (здесь и далее под интенсивностью турбулентности потока будем понимать интенсивность турбулентности продольной пульсационной компоненты вектора скорости потока).

Установлено, что характеристики высокочастотного зонда Kulite FAP-HT-250 существуют при числах $Re > 1 \times 10^4$. Определение трех пульсационных компонент вектора скорости потока при помощи данного зонда при числах $Re < 1 \cdot 10^4$ сопряжено с увеличением погрешности измерений.

На Рисунке 2 приведен энергетический спектр E_i , продольной пульсации скорости потока, полученный по данным высокочастотного зонда давления и термоанемометра в аэродинамической трубе при полном давлении потока $p_0^* \sim 1$ бар.

С учетом того, что приемная часть высокочастотного зонда давления – плохообтекаемое тело, возможны ограничения использования данного зонда для измерения турбулентных параметров потока, в частности, по минимальному числу Re и по частотному диапазону измеряемых пульсаций скорости потока.

Оценить возможный диапазон частот, при котором зонд Kulite может обеспечить достоверное измерение пульсационных параметров потока можно по числу Струхалия ($Sh = 1$). Так, доверительный частотный диапазон измеряемых пульсаций скорости потока, энергетический спектр которого приведен на Рисунке 2, определенный с использованием числа Струхалия (по средней скорости потока и диаметру головки зонда) составляет $f < 14.6$ кГц. Однако, как видно на Рисунке 2 при сравнении энергетических спектров, полученных по данным двух приборов видно, что доверительный диапазон не превышает 7.5 кГц (термоанемометр принят за эталонный прибор).

В диапазоне частот $f < 7.5$ кГц, в приведенном примере на Рисунке 2, укладывается до 90% энергии пульсаций продольной компоненты вектора скорости потока (по фильтрованному спектру).

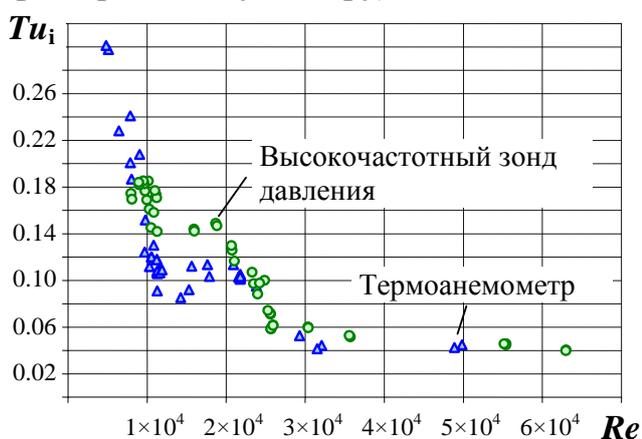


Рисунок 1. Изменение Tu_i от числа Re

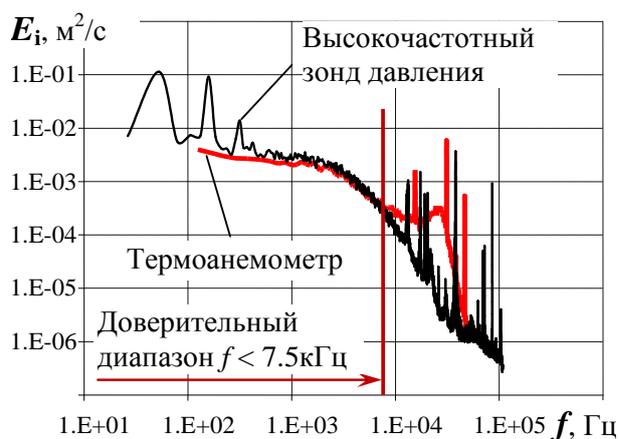


Рисунок 2. Энергетический спектр пульсации скорости ($\lambda_{is} \sim 0.3, p_0^* \sim 1$ бар)

В третьей главе диссертации приведено описание мероприятий по модернизации стенда У-300 для проведения экспериментальных исследований плоских решеток при низких числах Re и конструктивных особенностей исследуемых на данном стенде

плоских решеток. Модернизация стенда заключалась в установке регулируемого дросселирующего устройства на входных створках стенда, обеспечивающего изменение полного давления на входе в решетку в диапазоне $p_0^* = 0.85 - 0.2$ бар, герметизации входного участка стенда между дросселирующим устройством и плоской решеткой, а также установкой хонейкомба перед плоской решеткой. Приведены результаты апробации экспериментальных характеристик стенда (результаты измерения полей параметров потока на входе в плоские решетки при низких числах Re) и результаты экспериментального исследования плоских решеток.

На Рисунке 3 приведены результаты экспериментального исследования плоской решетки – зависимости коэффициента профильных потерь $\zeta_{пр.}$, полученных при величинах приведенной изоэнтропической скорости истечения из решетки $\lambda_{2is} = 0.5; 0.7; 0.9$ (режим работы) в диапазоне полного давления на входе в решетку $p_0^* = 0.2 - 0.9$ кгс/см². На Рисунке 4 приведены те же самые результаты, но перестроенные в виде зависимости профильных потерь $\zeta_{пр.}$ от числа Re (здесь и далее число Re для решетки определяется по хорде лопатки и изоэнтропическим параметрам на выходе).

На Рисунке 4 видно, что экспериментальные точки ложатся на одну кривую, что указывает на определяющее влияние числа Re на профильные потери $\zeta_{пр.}$ в решетке.

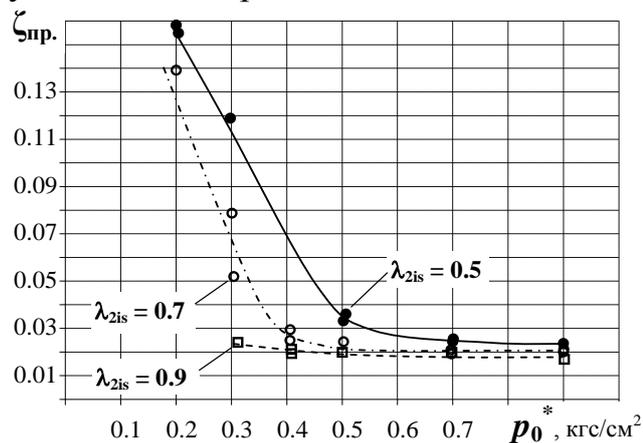


Рисунок 3. Зависимость $\zeta_{пр.}$ в решетке от полного давления на входе p_0^* и λ_{2is}

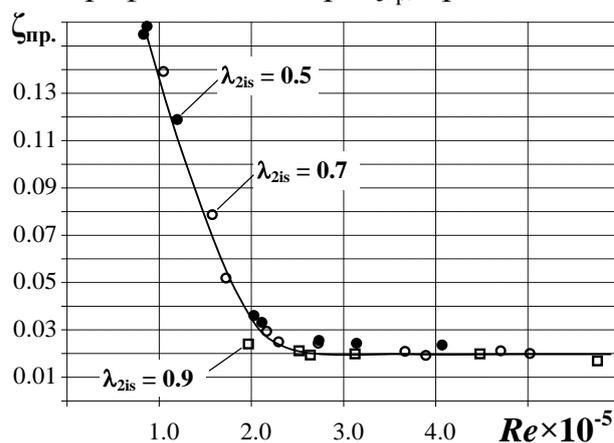


Рисунок 4. Зависимость $\zeta_{пр.}$ в решетке от числа Re

На Рисунке 5 приведена зависимость интенсивности турбулентности продольной пульсационной компоненты скорости потока перед плоской решеткой от числа Re . Интенсивность турбулентности определена по данным высокочастотного зонда Kulite (здесь число Re определялось по параметрам набегающего на зонд потока и характерному размеру 40 мм, равному хорде лопатки). Измерения проводились одновременно с исследованием плоской решетки в диапазоне полного давления потока $p_0^* = 0.2 - 0.8$ кгс/см² и режимов работы $\lambda_{2is} = 0.4 - 0.85$. На Рисунке 5 видно, что интенсивность турбулентности потока перед плоской решеткой увеличивается с уменьшением числа Re .

На Рисунке 6 приведена зависимость коэффициента профильных потерь в плоской решетке от числа Re на режиме работы $\lambda_{2is} = 0.6$ при разных параметрах начальной турбулентности потока (без турбулизирующей сетки (ТС) и с ТС, установленной перед решеткой). На Рисунке 6 видно, как при изменении начальных параметров турбулентности потока изменяется характеристика плоской решетки при $Re < 2.5 \times 10^5$.

В области низких чисел $Re < 2 \times 10^5$, при повышенной интенсивности турбулентности потока (см. Рисунок 5), следует ожидать формирования турбулентных пограничных слоев на спинках лопаток, при которых отрыва потока не должно происходить, и, следовательно, не должно наблюдаться увеличения профильных потерь. Наблюдаемое интенсивное увеличение профильных потерь в плоских решетках в области низких чисел Re можно объяснить тем, что даже при повышенной турбулентности потока, в структуре турбулентных слоев на спинках лопаток присутствует ламинарный подслой, который и проявляет склонность к отрыву.

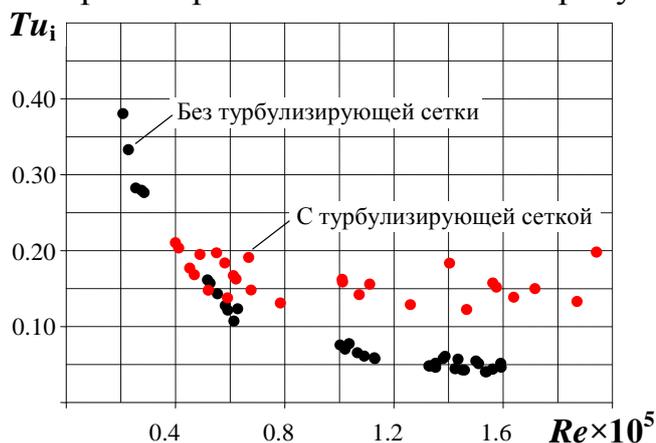


Рисунок 5. Зависимость Tu_i перед решеткой от числа Re

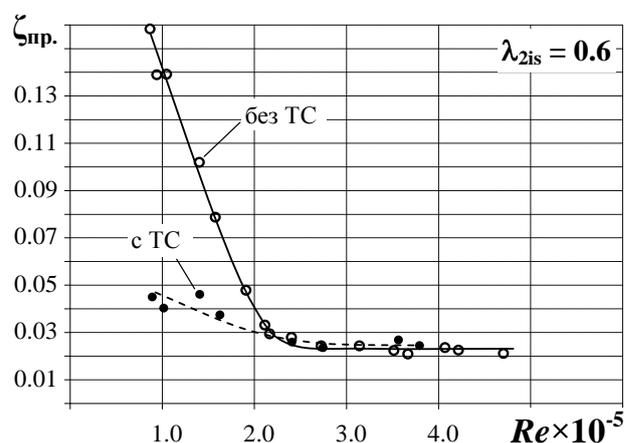


Рисунок 6. Зависимость $\zeta_{пр.}$ в решетке от числа Re с/без TC ($\lambda_{2is} = 0.6$)

В третьей главе также приведены результаты экспериментального исследования на модернизированном стенде У-300 двух решеток с передненагруженными профилями. Решетки с передненагруженными профилями были спроектированы на основе исходных решеток с задненагруженными профилями при сохранении значений конструктивных углов входа $\beta_{1к}$ и эффективных углов выхода $\beta_{2эф.}$ (сохранении конфузурности каналов K), шагов t и хорд L лопаток, диаметров входных d_1 и выходных d_2 кромок. Как правило, решетки с передненагруженными профилями имеют малый угол отгиба $\delta < 10^\circ$ и повышенный угол установки профилей $\gamma > 50^\circ$.

Сравнение результатов исследования решеток с передненагруженными профилями и с задненагруженными профилями показало, что в области низких чисел $Re < 2.0 \times 10^5$ профильные потери в решетках с задненагруженными профилями меньше, чем в решетках с передненагруженными профилями. Данное обстоятельство согласуется с рекомендациями ЦИАМ о целесообразности применения в лопаточных венцах многоступенчатых ТНД двухконтурных ТРДД решеток с задненагруженными профилями.

В разных решетках, отличающихся геометрическими параметрами, типом приложения нагрузки (передненагруженные/задненагруженные), граничные числа $Re_{гр.}$ могут быть разными. Граничное число $Re_{гр.}$ для одной и той же решетки также может иметь разное значение, в зависимости от начальных параметров турбулентности потока. Поэтому целесообразно получить универсальную зависимость профильных потерь в решетках от числа Re при различных начальных параметрах турбулентности потока.

Получена обобщающая зависимость влияния низких чисел Re на профильные потери в плоских решетках, см. уравнение (6)

$$\zeta_{\text{пр.}}/\zeta_{\text{пр.0}} = (Re/Re_{\text{гр.}})^{-0.88}, \quad (6)$$

где $\zeta_{\text{пр.}}$ – коэффициент профильных потерь в решетке;

$\zeta_{\text{пр.0}}$ – коэффициент профильных потерь в решетке в области автомодельности по числу Re ;

Re – число Re , определенное по хорде лопатки и изоэнтропическим параметрам потока на выходе из решетки.

$Re_{\text{гр.}}$ – граничное число Re плоской решетки.

В формуле (6) граничное число $Re_{\text{гр.}}$ для каждой решетки является функцией ее геометрических параметров и начальных параметров турбулентности потока. Обобщающая зависимость (6) получена по результату обработки данных экспериментальных исследований семи решеток, полученных на модернизированном стенде У-300 при различных начальных параметрах турбулентности потока.

На Рисунке 7 приведены результаты экспериментального исследования плоских решеток и обобщающая зависимость (6). Повышенный разброс экспериментальных точек в области $Re/Re_{\text{гр.}} = 0.3 - 0.6$, скорее всего, объясняется наличием ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое на спинках лопаток при этих числах Re и начальных параметрах турбулентности потока, что может повлиять на величину коэффициента профильных потерь в плоских турбинных решетках (как в опытах А. Никурадзе).

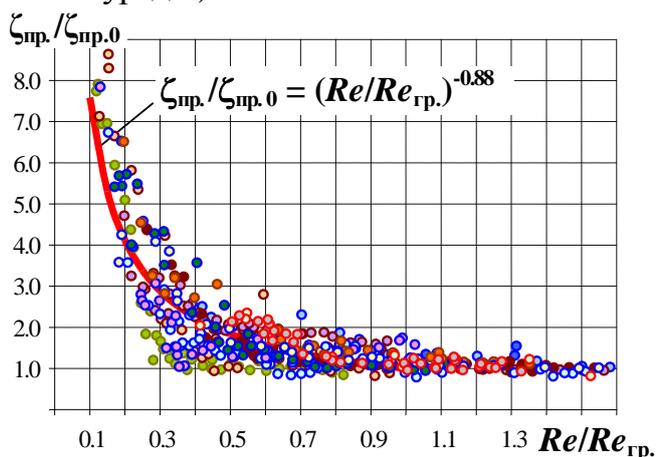


Рисунок 7. Зависимость $\zeta_{\text{пр.}}/\zeta_{\text{пр.0}}$ от $Re/Re_{\text{гр.}}$ по результатам исследования решеток на стенде У-300 ЦИАМ

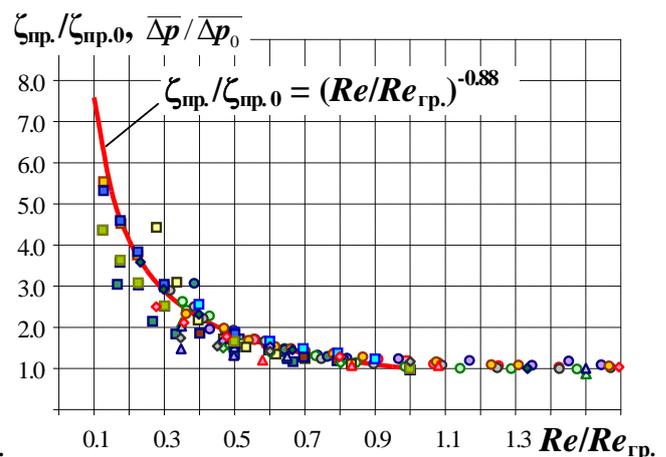


Рисунок 8. Зависимость $\zeta_{\text{пр.}}/\zeta_{\text{пр.0}}$ от $Re/Re_{\text{гр.}}$ по результатам исследования решеток на иностранных стендах

Получено подтверждение обобщающей зависимости (6) результатами экспериментального исследования пятнадцати плоских решеток на иностранных стендах, опубликованными в открытой печати, см. Рисунок 8.

На Рисунке 8 следующие обозначения:

$\overline{\Delta p}$ – коэффициент профильных потерь (потерь полного давления) в плоской решетке;

$\overline{\Delta p_0}$ – коэффициент профильных потерь (потерь полного давления) в плоской решетке в области автомодельности по числу Re ;

В четвертой главе диссертации приведены результаты измерения параметров турбулентности потока в проточной части турбин, исследуемых на стенде ТС-2 ЦИАМ. Также в этой главе приведены результаты влияния начальных параметров турбулентно-

сти потока на эффективность модельной ступени ТНД. Измерения параметров турбулентности потока проводилось при помощи высокочастотного зонда давления Kulite FAP-NT-250.

Измерение параметров турбулентности потока проводилось во входном канале ТНД (при отсутствии турбины), в диапазоне полного давления $p_0^* = 1.43 - 2.55$ бар и полной температуры $T_0^* = 288 - 450$ К, без турбулизирующей сетки (ТС) и с использованием турбулизирующих сеток (ТС1, ТС2), устанавливаемых на входе в канал.

На Рисунке 9 приведены зависимости интенсивности турбулентности потока от числа Re_{inl} (число Re_{inl} определено по локальной скорости натекания потока на зонд с использованием характерного размера 10 мм). На Рисунке 10 приведены зависимости интегрального масштаба турбулентности потока Λ_i (здесь и далее под интегральным масштабом турбулентности потока будем понимать интегральный масштаб продольной пульсационной компоненты вектора скорости потока) от числа Re_{inl} .

На Рисунке 10 видно, что с уменьшением числа Re интенсивность турбулентности увеличивается; интегральный масштаб турбулентности потока снижается. Турбулизирующие сетки привели к снижению величины интегрального масштаба турбулентности в ~ 3 раза.

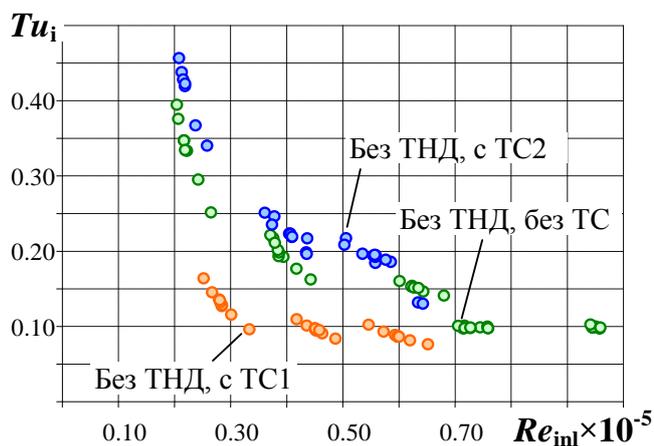


Рисунок 9. Зависимость Tu_i от Re_{inl} во входном канале при отсутствии турбины

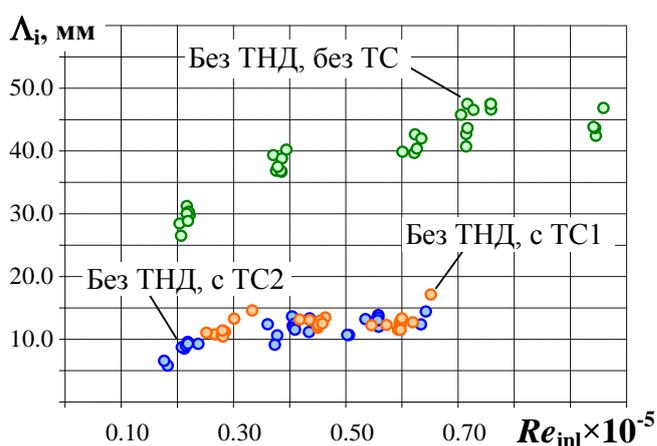


Рисунок 10. Зависимость Λ_i от Re_{inl} во входном канале при отсутствии турбины

Измерение параметров турбулентности потока проводилось также во входном канале с присутствием работающей ТНД при ее испытании на стенде ТС-2 ЦИАМ. Полученные при этом результаты по интенсивности и масштабу турбулентности потока, практически, не отличались от результатов, полученных в тех же условиях, но при отсутствии ТНД.

Интенсивность турбулентности и интегральный масштаб турбулентности на выходе из ТНД, на расстоянии ~ 320 мм от выходных кромок РК составили $Tu_i \sim 0.03$ и $\Lambda_i \sim 12$ мм соответственно и не зависели от наличия или отсутствия ТС перед ТНД.

Исследования параметров турбулентности потока проводилось перед СА модельной ступени ТНД. На Рисунке 12 приведена схема модельной ступени ТНД.

Экспериментальное исследование модельной ступени ТНД проводилось на стенде ТС-2 ЦИАМ в диапазоне полного давления потока на входе $p_0^* = 0.075 - 0.9$ бар, полной температуры $T_0^* = 450 - 550$ К, при степени расширения в ступени $\pi_r^* = 1.7$, как без ТС, так и с ТС, устанавливаемой перед направляющим аппаратом (НА), см. Рисунок 11. Изменение полного давления и полной температуры потока на входе в модельную ступень

пень ТНД позволило варьировать число Re в диапазоне $Re = 0.13 \times 10^5 - 1.1 \times 10^5$ (здесь и далее число Re для модельной ступени определяется по хорде РК и параметрам потока на выходе из РК в относительном движении при изоэнтропическом истечении).

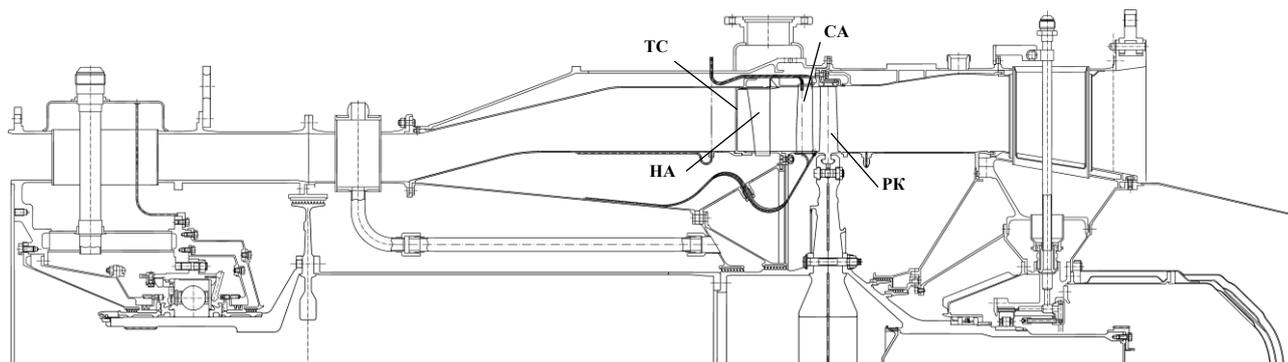


Рисунок 11. Схема модельной ступени ТНД и экспериментального модуля

На Рисунке 12 приведены результаты измерения интенсивности турбулентности потока перед СА при помощи высокочастотного зонда давления, полученные на режиме работы модельной ступени ТНД при степени расширения $\pi_r^* = 1.7$ и коэффициенте быстроходности $u/c_{is} = 0.48$ в диапазоне чисел $Re = 0.13 \times 10^5 - 1.0 \times 10^5$, с/без ТС. На Рисунке 13 приведены результаты измерения интегрального масштаба турбулентности потока перед СА, полученные в тех же условиях.

На Рисунках 12, 13 видно, что турбулизирующая сетка привела к изменению турбулентных параметров потока на входе в модельную ступень.

В четвертой главе диссертации также приведены результаты экспериментального и расчетного исследования КПД модельной ступени ТНД в диапазоне чисел $Re = 0.13 \times 10^5 - 1.1 \times 10^5$.

На Рисунке 14 показаны экспериментальные значения КПД модельной ступени ТНД (в относительных величинах) от числа Re , полученные при степени понижения давления $\pi_r^* = 1.7$ и коэффициенте быстроходности $u/c_{is} = 0.48$, с/без ТС.

В исследованном диапазоне чисел $Re = 0.13 \times 10^5 - 1.1 \times 10^5$ КПД ступени ТНД уменьшается на 50 % по отношению к КПД в области автомодельности по числу Re ($Re > 1.0 \times 10^5$). Установка ТС перед НА приводит к изменению начальных параметров турбулентности потока во всем исследованном диапазоне по числу Re , что способствует уменьшению отрывных явлений в лопаточных венцах и замедлению снижения КПД модельной ступени ТНД. Так, при числе $Re = 0.13 \times 10^5$, КПД модельной ступени ТНД, полученный с ТС, на ~20 % выше, чем КПД, полученный без ТС. Данное обстоятельство указывает на необходимость моделирования турбулентных параметров потока в наиболее «опасных» лопаточных венцах последних ступеней многоступенчатых ТНД, что может быть обеспечено вариацией толщины выходных кромок и густоты лопаток предыдущих венцов. В частности, при увеличении диаметра выходных кромок лопаток предыдущего венца, увеличится интенсивность турбулентности потока на входе в следующий лопаточный венец.

На Рисунке 16 нанесены расчетные зависимости изменения КПД модельной ступени ТНД (в относительных величинах) от числа Re , полученные по результатам RANS и URANS моделирования, замкнутых моделью турбулентности (q- ω) Coakley. На Рисунке 16 нанесена также расчетная зависимость КПД модельной ступени ТНД, полу-

ченная по результатам термо-газодинамического расчета в 1D постановке, с использованием обобщающей зависимости (6). Граничное число $Re_{гр.}$, принимаемое в 1D расчете для СА и РК модельной ступени ТНД, составляло $Re_{гр.} = 3.0 \times 10^5$.

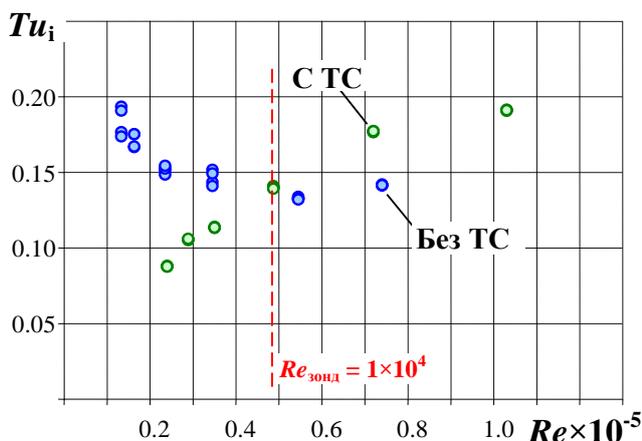


Рисунок 12. Изменение Tu_i от Re перед СА модельной ступени ТНД с/без ТС

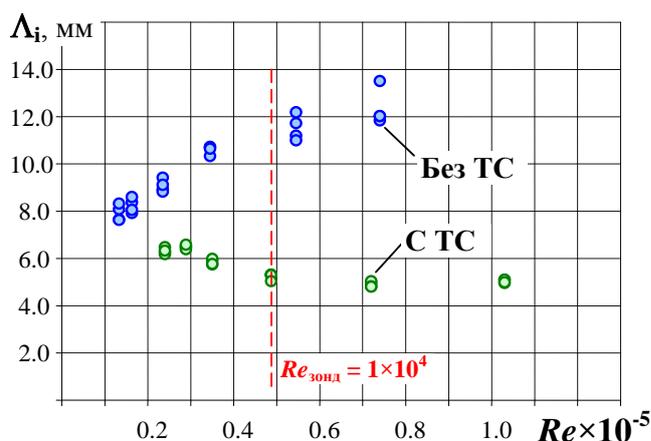


Рисунок 13. Изменение Λ_i от Re перед СА модельной ступени ТНД с/без ТС

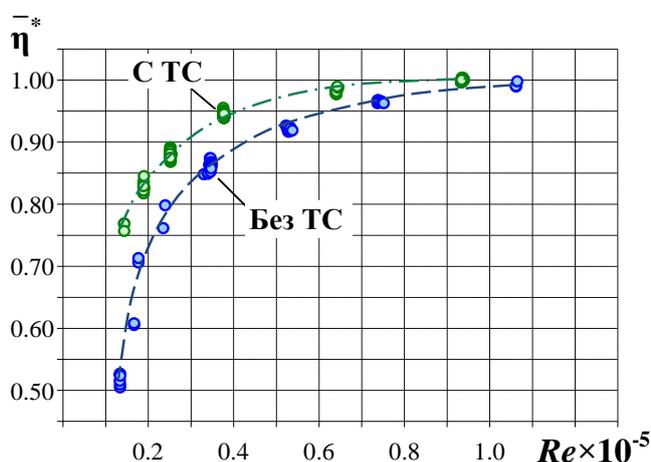


Рисунок 14. Экспериментальная зависимость КПД модельной ступени ТНД (в относительных величинах) от числа Re

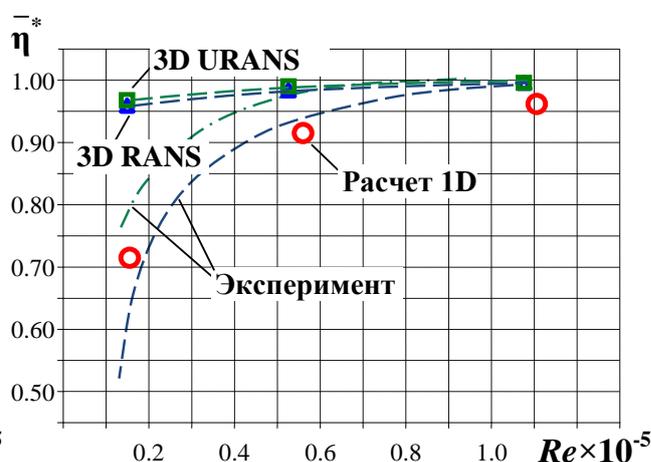


Рисунок 15. Расчетная зависимость КПД модельной ступени ТНД (в относительных величинах) от числа Re

На Рисунке 15 видно, что в области чисел $Re > 0.95 \times 10^5$ расчетные характеристики модельной ступени ТНД, полученные по результатам RANS и URANS моделирования, хорошо согласуются с экспериментальными характеристиками. При $Re < 0.95 \times 10^5$ расхождение между расчетными (RANS и URANS) и экспериментальными результатами увеличивается.

На Рисунке 15 видно, что характеристика модельной ступени ТНД, полученная по результатам 1D расчета с использованием обобщающей зависимости (6), хорошо согласуется, в пределах 5%, с экспериментальной характеристикой, полученной без ТС в диапазоне чисел $Re = 0.15 \times 10^5 - 1.1 \times 10^5$. Снижение расчетной (1D) величины КПД модельной ступени ТНД на $\Delta \bar{\eta}^* \sim 0.04$ относительно экспериментального значения при $Re = 1.1 \times 10^5$ может быть объяснено повышенными расчетными (1D) значениями коэффициента профильных потерь венцов модельной ступени. В рассматриваемом случае относительное число Re составляет $Re/Re_{гр.} = 0.37$, что попадает в отмеченный выше интервал чисел $Re/Re_{гр.} = 0.3 - 0.6$, в котором наблюдается повышенный разброс экспериментальных данных, см. Рисунок 7.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

- 1 В результате проведения экспериментально-теоретических исследований плоских турбинных решеток и модельной ступени ТНД установлено, что в области низких чисел Re потока основным источником дополнительных потерь в турбинах и плоских решетках является отрыв потока на спинке лопаток, приводящий к увеличению профильных потерь по мере снижения числа Re ниже граничного числа $Re_{гр.}$, соответствующего границе автомодельной области.
- 2 По результатам экспериментального исследования семи плоских решеток на модернизированном стенде У-300 впервые получена обобщающая зависимость относительного коэффициента профильных потерь ζ/ζ_0 от относительного числа $Re/Re_{гр.}$ в виде $\zeta/\zeta_0 = (Re/Re_{гр.})^{-0.88}$ в диапазоне изменения параметра $Re/Re_{гр.} = 0.1 - 1.0$. В полученной обобщающей зависимости граничное число $Re_{гр.}$ отражает совокупное влияние геометрии решетки и параметров турбулентности потока на входе. Получено подтверждение обобщающей зависимости результатами экспериментального исследования пятнадцати плоских решеток на иностранных стендах, опубликованными в открытой печати. Повышенный разброс экспериментальных данных в обобщающей зависимости - в диапазоне $Re/Re_{гр.} = 0.3 - 0.6$ - может быть объяснен, аналогично опытам А. Никурадзе, наличием ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое на спинках лопаток в разных турбинных решетках в данной области.
- 3 В результате проведенного экспериментального исследования модельной ступени ТНД при сверхнизких числах $0.13 \times 10^5 < Re < 1.1 \times 10^5$ (при степени расширения в ступени $\pi_r^* = 1.7$ и коэффициенте быстроходности $Y = 0.48$) показано, что при снижении числа Re до величины $Re = 0.13 \times 10^5$ КПД ступени ТНД может снижаться на $\sim 50\%$ по отношению к величине КПД в области автомодельности по числу Re . Повышение уровня турбулентности на входе в ступень способствует замедлению снижения КПД до $\sim 20\%$.
- 4 Сравнение экспериментальных и расчетных данных, полученных с использованием RANS и URANS уравнений, показало, что современные расчетные модели (модели турбулентности) не могут достоверно предсказать характеристику ступени ТНД при низких числах Re . С уменьшением числа Re ошибка расчетного прогнозирования характеристики ступени ТНД увеличивается.
- 5 Разработан метод исследования особенностей турбулентного течения в плоских решетках и турбинах с помощью высокочастотного зонда Kulite FAP-НТ-250. Результаты измерения турбулентности при помощи высокочастотного зонда Kulite FAP-НТ-250, полученные на разных режимах по скорости потока и числу Re , согласуются в пределах до 10% с результатами измерения турбулентности при помощи термоанемометра в тех же условиях. Определена область допустимости применения высокочастотного зонда Kulite FAP-НТ-250 для измерения турбулентности потока по числу Re ($Re > 0.1 \times 10^5$) и по частотной реализации пульсаций скорости потока ($Sh < 0.5$).
- 6 Впервые проведено измерение турбулентности потока (интенсивности и интегрального масштаба турбулентности потока) в проточной части турбин и плоских решеток

при помощи высокочастотных зондов Kulite FAP-НТ-250 в широком диапазоне чисел Re .

Показано, что с уменьшением числа Рейнольдса начальная интенсивность турбулентности потока, начиная с определенного числа Re ($Re \sim 0.4 \times 10^5 - 0.7 \times 10^5$, число Re определено по характерному размеру 10 мм), увеличивается, а интегральный масштаб турбулентности – уменьшается.

7 Показано, что турбулизация потока при помощи турбулизирующей сетки, приводящая к увеличению интенсивности и снижению интегрального масштаба турбулентности, может приводить к смещению характеристик плоских решеток – зависимости коэффициента профильных потерь от числа Re в область более низких чисел Re , что объясняется стабилизирующим влиянием турбулентности на отрывные течения.

8 Проведенные исследования показали, что в области низких чисел Re в лопаточных венцах ТНД следует применять задненагруженные профили (повышенные углы отгиба профиля и его установки).

Полученные результаты согласуются с рекомендациями ЦИАМ о целесообразности применения во всех венцах многоступенчатых ТНД ТРДД решеток с задненагруженными профилями.

9 По результатам проведенных исследований плоских решеток и турбины сформулированы следующие рекомендации по их проектированию в области низких чисел Re :

- Применять повышенную степень реактивности (что увеличивает конфузурность межлопаточных каналов РК).
- Применять задненагруженные профили (повышенные углы отгиба профиля и его установки).
- Повышать уровень турбулентности потока в проточной части ТНД.

Повышение уровня турбулентности может быть обеспечено, в частности, утолщением выходных кромок лопаток предыдущего лопаточного венца (при больших углах отгиба профиля это не приведет к заметному увеличению кромочных потерь).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Венедиктов В.Д., Непомнящий А.Д. Исследование плоской решетки соплового аппарата при пониженных значениях числа Рейнольдса // Теплоэнергетика. 2011. № 9. С. 20 – 23. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
2. Непомнящий А.Д. О возможности исследования турбулентных характеристик потока при помощи высокочастотного зонда давления // Сборник тезисов Международного форума Двигателестроения «Научно-Технический Конгресс по Двигателестроению (НТКД-2014)», часть 2. Москва. 15 – 17 апреля 2014 г. С. 62. (0,031 п.л./0,031 п.л.).
3. Nepomnyashchiy A.D. Turbulence Measurements in a Flow Part of Turbomachines Using a High-Frequency Pressure Probe // ICAS paper. 2014. ICAS2014-7.4.3-2014_0252. URL: https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0252_paper.pdf (дата обращения 06.05.2021 г.)

4. Непомнящий А.Д., Сунцов С.В. Влияние числа Рейнольдса на профильные потери плоских турбинных решеток // Насосы. Турбины. Системы. 2016. №4 (21). С. 61 – 66. (0,81 п.л./0,75 п.л.).
5. Непомнящий А.Д. Обобщение экспериментальных данных продувок плоских турбинных решеток // Насосы. Турбины. Системы. 2016. № 4 (21). С. 56-59. (0,63 п.л./0,63 п.л.).
6. Непомнящий А.Д. О возможности использования высокочастотного зонда давления для измерения турбулентных характеристик потока в турбомашине // Сборник тезисов Международного форума Двигателестроения «Научно-Технический Конгресс по Двигателестроению (НТКД-2016)». Москва. 19 – 21 апреля 2016 г. С. 71 - 72. (0,125 п.л./0,125 п.л.).
7. Nepomnyashchiy A.D., Suntsov S.V., Danilkin S.Y., Maslov V.P. Effect of Reynolds Number, Operating Mode, Turbulence Parameters on Profile and Secondary Losses of LPT // ICAS paper. 2016. ICAS2016-7.5.2-2016_0276. URL: https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2016/data/papers/2016_0276_paper.pdf (дата обращения 06.05.2021 г.)
8. Венедиктов В.Д., Непомнящий А.Д. Модернизация стенда У-300С ЦИАМ для испытания плоских турбинных решеток // Сборник тезисов Международного форума Двигателестроения «Научно-Технический Конгресс по Двигателестроению (НТКД-2018)», том 1. Москва. 4 – 6 апреля 2018 г. С. 167 – 169. (0,125 п.л./0,063 п.л.).
9. В.Д. Венедиктов, А.Д. Непомнящий Исследование турбинных решеток на стенде У-300М при пониженных числах Рейнольдса // Сборник тезисов Международного форума Двигателестроения «Научно-Технический Конгресс по Двигателестроению (НТКД-2018)», том 1. Москва. 4 – 6 апреля 2018 г. С. 163 - 165. (0,125 п.л./0,063 п.л.).
10. Nepomnyashchiy A.D., Tsvetkov I.V., Suntsov S.V., Danilkin S.Y. Performances of LPT and Linear Cascades at Low Reynolds Numbers // ICAS paper. 2018. ICAS2018-9.3.3-2018_0652. URL: https://icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2018/data/papers/ICAS2018_0652_paper.pdf (дата обращения 06.05.2021 г.)