

На правах рукописи

ИЗМОДЕНОВА Татьяна Юрьевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ  
ГАЗОВЫХ ЗАВЕС ПРИ ПАРАМЕТРАХ, ТИПИЧНЫХ ДЛЯ  
ОРГАНИЗАЦИИ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

Специальность - 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2011

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

Кортиков Николай Николаевич

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор

Терехов Виктор Иванович

доктор технических наук, профессор

Вохмянин Сергей Михайлович

**Ведущая организация:**

ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения», г. Москва

Защита состоится «8» февраля 2011 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29. Главное здание, ауд. 225.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Талалов В. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Постоянный рост температуры газа на входе в турбину приводит к необходимости обеспечения работоспособности элементов ГТД (газотурбинного двигателя), подверженных воздействию высоких температур газа. Из всех элементов высокотемпературного тракта в наиболее напряженных условиях работает лопаточный аппарат турбины. Оптимизация систем охлаждения, в частности, конвективно-пленочного, для получения равномерного распределения температуры по профилю лопатки и снижения термических напряжений требует совершенствования методов расчета теплового состояния лопаток, в том числе численного моделирования.

В инженерной практике разработка систем охлаждения лопаток газовых турбин характеризуется многоэтапностью и итерационностью. Традиционно используется двумерный (2D) несопряженный подход, основанный на последовательном решении задач одномерной гидравлики, задании эмпирических коэффициентов теплоотдачи со стороны газа и воздуха и зависимостей для эффективности пленочного охлаждения. Указанный подход применяется для проведения оптимизационных расчетов в плоской постановке. Однако данный подход не отражает тепловое состояние профильной части лопатки в целом и не учитывает эффекты газодинамической и тепловой сопряженности.

Современные пакеты (в частности, *STAR-CD*, *STAR-CCM+*) имеют возможность решения трехмерной (3D) сопряженной задачи (сопряженный подход), включающей в себя моделирование внешнего течения газа и внешнего теплообмена, течения охлаждающего воздуха внутри лопатки и внутреннего теплообмена, а также расчет теплопроводности по профилю лопатки. Полусопряженный подход предполагает задание эмпирических граничных условий по теплообмену со стороны охладителя в теле лопатки и использование условия сопряжения со стороны газа. Сопряженный подход наиболее перспективен, но требует настройки используемого программного обеспечения для конкретного класса рассматриваемых задач.

Проведенный обзор литературы показывает, что значения температуры металла лопатки по результатам 3D моделирования имеют значительную погрешность в пределах 10-20%. В изученных работах отсутствуют рекомендации по выбору рациональной численной модели, включающей выбор модели турбулентности и параметров расчетной сетки, а также не проанализированы характеристики газовой завесы при параметрах вдува  $M > 1$ .

**Цель диссертационной работы.** Целью диссертации является разработка рациональных подходов к моделированию 3D течения, теплообмена и теплового состояния лопаток ГТД с развитой системой конвективно-пленочного охлаждения.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработана численная модель для моделирования 3D течения и эффективности охлаждения при выдуве из двухрядной и однорядной перфорации на пластине и криволинейной поверхности.
2. Установлено влияние колебаний основного потока на нестационарные характеристики трехмерной газовой завесы. Получено критериальное выражение для поправки, учитывающей низкочастотные наведенные колебания основного потока.
3. Проведен анализ трехмерной структуры газовых завес на пластине, а также на выпуклой и вогнутой поверхностях.

4. Разработан подход и обобщены опытные данные по эффективности пленочного охлаждения на криволинейной поверхности с учетом струйного характера течения вблизи места выдува при высоких параметрах вдува.

5. Проведена апробация предложенных расчетных формул на примере рабочей лопатки современного высокотемпературного двигателя.

6. Разработаны трехмерные численные модели для расчета теплового состояния лопатки с развитой системой конвективно-пленочного охлаждения на основе сопряженного и полусопряженного подходов.

**Метод исследования.** Решение задач осуществлялось с использованием коммерческих пакетов *Star-CD* и *Star-CCM+*, в которых применяется метод конечных объемов для решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, и с использованием усовершенствованной версии программы расчета теплового состояния сечения лопатки ГТД, применяемой в ОАО «Климов», в которую введена полученная в работе поправка, учитывающая влияние кривизны поверхности на эффективность пленочного охлаждения.

**Достоверность и обоснованность** результатов работы достигается:

1. Использованием фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии.

2. Применением программного обеспечения, верифицированного на основе сравнения с опытными данными по эффективности пленочного охлаждения на пластине и криволинейной поверхности.

3. Согласованием расчетных данных с результатами натуральных экспериментов, полученных при испытании лопатки с развитой системой конвективно-пленочного охлаждения.

**На защиту выносятся:**

1. Физико-математическая модель описания трехмерного течения и эффективности пленочного охлаждения при выдуве из двухрядной и однорядной перфорации на пластину, криволинейную поверхность и при наличии колебаний основного потока.

2. Метод расчета параметров внешнего теплообмена с учетом выдува охлаждающего воздуха, позволяющий прогнозировать влияние пленочного охлаждения на тепловое состояние современных лопаток высокотемпературных газовых турбин при высоких параметрах вдува  $M > 1$  и вблизи места выдува ( $2 < x/d < 40$ ).

3. Рекомендации по выбору параметров 3D численных моделей для описания теплового состояния лопаток с развитым конвективно-пленочным охлаждением, обеспечивающих погрешность по глубине охлаждения не выше 5%.

**Научная новизна** результатов заключается в следующем:

1. На основе уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, разработана численная трехмерная модель расчета эффективности пленочного охлаждения пластины и криволинейной поверхности.

2. Установлено влияние колебания основного потока на нестационарные характеристики трехмерной газовой завесы. Получено критериальное выражение для поправки, учитывающей наведенные колебания основного потока.

3. Обобщены опытные данные и предложена формула, учитывающая влияние кривизны охлаждаемой поверхности на эффективность пленочного охлаждения при высоких параметрах вдува и вблизи места выдува.

4. Рассмотрены 3D (сопряженный и полусопряженный) и 2D подходы к моделированию теплового состояния лопаток при развитом конвективно-пленочном охлаждении и даны рекомендации по выбору параметров численных моделей, обеспечивающих погрешность по глубине охлаждения металла лопаток не выше 5%.

**Практическая ценность.** Усовершенствованная инженерная методика расчета теплового состояния сечения лопатки при высоких параметрах вдува позволяет учесть струйный характер течения вблизи места выдува и уточнить прогнозирование теплового состояния для плоского сечения лопатки современного ГТД.

Разработанные численные модели на основе полусопряженного и сопряженного подходов позволяют получать локальные распределения расходов во внутренней системе охлаждения лопатки, а также трехмерное тепловое состояние лопатки. Показано, что корректное численное моделирование теплового состояния лопаток газовых турбин с помощью современного гидродинамического пакета не уступает по точности определения их локальных и интегральных характеристик экспериментальным данным, позволяет дополнить, а в некоторых случаях заменить дорогостоящий эксперимент с целью получения распределения температуры по профилю лопатки с приемлемой для инженерной практики точностью.

Повышение точности расчетов и учет локальных характеристик теплообмена позволяет проектировать более гибкую систему охлаждения, обеспечивающую работоспособность турбины, а значит, увеличивать ресурс турбины.

**Реализация результатов.** Метод реализован в составе программного комплекса и применяется в ОАО «Климов» в процессе проектирования системы конвективно-пленочного охлаждения лопаток современных газовых турбин.

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались и обсуждались российских и международных конференциях и семинарах: XVI школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (г. Санкт-Петербург, 2007 г.), XXXVI неделе науки СПбПУ: всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов (г. Санкт-Петербург, 2008 г.), X Международном салоне «Двигатели - 2008»: научно-техническом конгрессе по двигателестроению НТКД-2008, (г. Москва, 2008), XVII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (г. Жуковский, 2009 г.), Пятой Российской национальной конференции по теплообмену (г. Москва, 2010 г.), III Международной научно-технической конференции «Авиадвигатели – XXI века» (г. Москва, 2010 г.).

**Публикации.** Основное содержание работы отражено в десяти печатных изданиях, в том числе в двух статьях, опубликованных в изданиях, входящих в перечень ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 103 наименований. Работа изложена на 147 страницах машинописного текста, включая 12 таблиц и 70 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, ее научное и практическое значение, сформулированы цель и основные задачи работы.

**В первой главе** дается история развития систем охлаждения лопаток ГТД, объясняется сложная трехмерная структура течения вблизи места выдува охладителя, которая особенно ярко выражена при высоких параметрах вдува. Далее обсуждается

влияние на эффективность пленочного охлаждения геометрических и режимных параметров системы пленочного охлаждения на пластине: угла вдува  $\alpha$ , относительного шага перфораций  $\bar{P}=p/d$  ( $d$  – диаметр перфорации), соотношения плотностей охладителя и газа  $DR=\rho_2/\rho_1$ , параметра вдува  $M=\rho_2 U_2/\rho_1 U_1$  (где  $U_2$ ,  $U_1$  – скорости охладителя и газа), степени турбулентности газа  $Tu_1$ .

Здесь же приводится обзор методов расчета характеристик систем конвективно-пленочного охлаждения лопаток ГТД: методы, основанные на зависимостях, обобщающих экспериментальные данные; интегральные методы и дифференциальные методы. Литературные данные по численному моделированию эффективности пленочного охлаждения и коэффициента теплоотдачи на пластине показывают, что трудно указать наиболее эффективную модель турбулентности, позволяющую смоделировать обе характеристики одновременно. Все двухпараметрические изотропные модели турбулентности в основном завышают эффективность пленочного охлаждения на средней линии отверстия и занижают ее между отверстиями из-за недостаточного расширения струй охладителя между отверстиями. Этот эффект объясняется неучетом анизотропии течения вблизи стенки. Наилучшее соответствие расчета с экспериментом наблюдается при использовании моделей турбулентности *standard k- $\omega$  (SKW)* и *realizable k- $\epsilon$  (RKE)*.

Отмечается также важность учета влияния на эффективность пленочного охлаждения кривизны охлаждаемой поверхности. Приводится обзор применения численных методов для моделирования пленочного охлаждения криволинейной поверхности, который показывает, что наилучшее совпадение расчетных и опытных данных имеет место при низких параметрах вдува. При высоких параметрах вдува эффективность пленочного охлаждения по результатам расчета занижается (на величину до 80%), поскольку вблизи места выдува струи охладителя в основной поток имеет место обширная зона отрыва, которая недостаточно хорошо моделируется с использованием современных моделей турбулентности.

Далее представлен обзор работ по экспериментальному и численному моделированию теплозащитных характеристик трехмерных газовых завес при выдуве через перфорации на лопатках ГТД. Самыми популярными моделями турбулентности, позволяющими получить наиболее близкий к экспериментальному результат по эффективности пленочного охлаждения и тепловому потоку, являются модели *RKE* и *k- $\omega$  SST*.

В заключении первой главы показаны примеры применения полусопряженного и сопряженного подходов к моделированию теплового состояния лопаток ГТД. Хорошее согласование расчета с экспериментом (погрешность менее 10%) по температуре лопатки получается при использовании модели турбулентности *RKE*.

**Во второй главе** приводится разработанная численная модель для моделирования трехмерного течения и эффективности пленочного охлаждения при выдуве из двухрядной перфорации на пластине. Показаны результаты расчетов для пяти моделей турбулентности с соответствующими расчетными сетками (три сетки, пример на рис. 1а) с использованием коммерческого пакета *Star-CD v3.22*. Погрешность расчетных данных относительно опытных не превышает 20% (рис. 1б) при выполнении следующих рекомендаций:

1. Модель турбулентности Дурбина *V2F*, учитывающая анизотропию течения в направлении, перпендикулярном потоку.
2. Расчетная сетка с  $Y^+ \sim 0.1-0.3$ , количество ячеек в отверстии 40-70 тысяч, соотношение сторон ячеек вблизи места выдува 1-1.25.

3. Расчетная область должна содержать помимо области основного течения область отверстий (подводящие каналы) и ресивер.

Трехмерное моделирование позволяет визуализировать парные вихри в подводящих каналах отверстий перфораций и сложную вихревую структуру вблизи места выпуска охладителя (рис. 2).

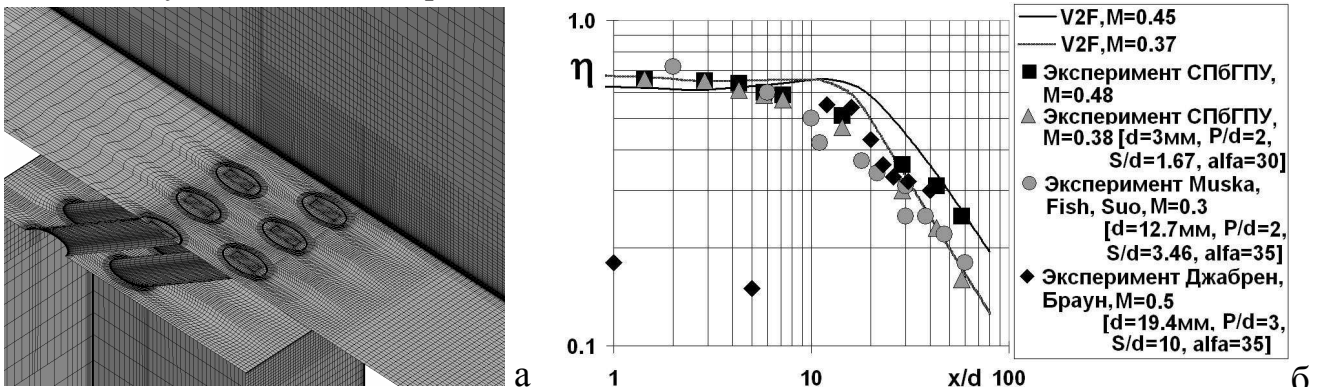


Рис. 1 Фрагмент расчетной сетки (а); сравнение расчета и опыта для двух параметров вдува (б)

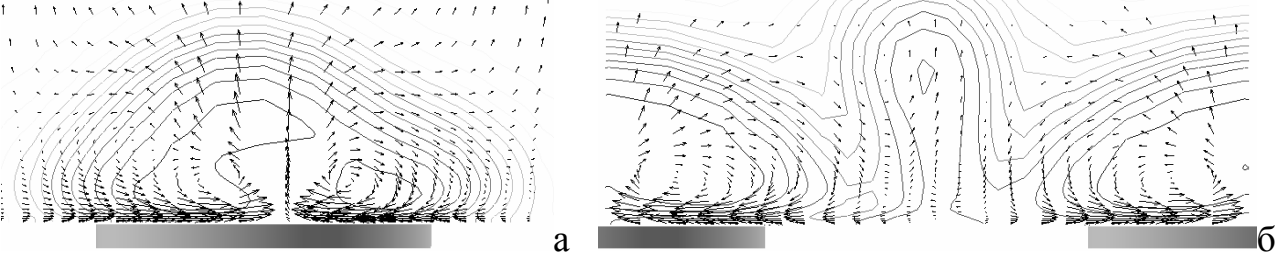


Рис. 2 Вектора скорости в завесе в сечении после первого  $x/d = -0.67$  (а) и второго  $x/d = 1.0$  (б) рядов перфорации

На базе построенной численной модели определяется влияние наведенных колебаний основного потока на эффективность пленочного охлаждения, которая имеет место при эксплуатации рабочих лопаток турбины. Помимо отмеченных выше параметров, влияющих на эффективность пленочного охлаждения, появляется дополнительный критерий – число Струхали охладителя  $Sh_c = 2\pi N_{\text{след}} l / U_2$ , который характеризует отношение времени прохождения охладителя через подводящий канал перфорации длиной  $l$  –  $l/U_2$  к характерному времени воздействия наведенных колебаний  $1/2\pi N_{\text{след}}$ . Численные значения частоты мелькания следа  $N_{\text{след}}$  соответствуют произведению числа оборотов ротора на количество лопаток соплового аппарата. В статье [Ligrani, Bell, 2001] вводится параметр  $Sh = Sh_c [M^{0.6} (\rho_2/\rho_1)^{2.0} (l/d)^{2.0}]$ , учитывающий влияние параметра вдува, отношения плотностей охладителя и газа, относительной длины отверстий перфораций. Его критическое значение, начиная с которого важен учет влияния наведенных колебаний, равно  $Sh_{\text{кр}} = 0.055 - 0.070$ .

Результаты расчета показывают, что наведенные колебания имеют форму бегущей волны (рис. 3а), они имеют низкочастотный характер, при котором частота собственных колебаний потока (частота турбулентных пульсаций) больше, чем частота наведенных колебаний. Результаты расчета показывают снижение эффективности охлаждения за двойным рядом отверстий на 20% при воздействии наведенных колебаний (рис. 3б). Максимальное изменение эффективности представлено в виде зависимости:

$$\eta = \eta_0(1 - \varepsilon_{Sh}), \varepsilon_{Sh} = (\Delta\eta/\eta_{\text{стац}})_{\text{макс}} = [C(Sh - Sh_{\text{кр}}) + 0.1] \cdot 100\% \quad (1)$$

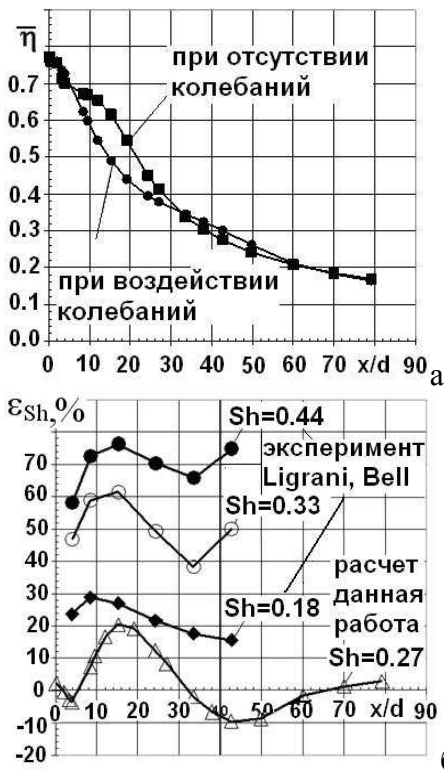


Рис. 3 Эффективность охлаждения завесы при воздействии колебаний и их отсутствии (а); поправка на нестационарность для завесы (б)

входной кромке и для перфораций с параметрами вдува меньше единицы.

В третьей главе проанализировано влияние параметра кривизны охлаждаемой поверхности ( $R/d$ ) на теплозащитные свойства газовых завес ( $R$  – радиус кривизны).

Проводится анализ экспериментальных данных [Schwarz, Goldstein, 1991] по влиянию кривизны на эффективность пленочного охлаждения (рис. 5), который показывает наличие инверсии влияния кривизны охлаждаемой поверхности на эффективность пленочного охлаждения в зависимости от параметра вдува. При низких параметрах вдува ( $M \leq 1$ ) эффективность пленочного охлаждения выпуклой поверхности выше, а вогнутой – ниже, чем для пластины. При параметрах вдува  $M = 1.3 - 1.59$  наблюдается обратная картина: увеличивается эффективность охлаждения на вогнутой поверхности по сравнению с выпуклой на участке поверхности до 20 калибров ( $x/d = 20$ ). При параметрах вдува  $M = 1.9 - 2.5$  указанная тенденция наблюдается на большей

где  $Sh > Sh_{кр}$ ,  $Sh_{кр} = 0.055$ ,  $C = 1.4$  для однорядной перфорации,  $C = 0.5$  для двухрядной,  $\eta_0$  – эффективность охлаждения для пластины при отсутствии колебаний.

Влияние нестационарной следовой неравномерности для условий эксплуатации реальной рабочей лопатки показано на рис. 4а,б. Исходя из значения  $Sh_{кр}$  можно выделить зону влияния колебаний основного потока (выше границы  $Sh_{кр}$ ). На рис. 4б показана зависимость числа Струхала охладителя от параметра вдува. Каждой перфорации соответствует своя граничная кривая в зависимости от относительной длины отверстий  $l/d$ . Если точка для перфорации лежит выше соответствующей граничной кривой, то влияние нестационарной следовой неравномерности существенно, если ниже, то расчет пленочного охлаждения можно проводить в стационарной постановке. Пользуясь этой диаграммой, можно уменьшать влияние нестационарной следовой неравномерности, управляя относительной длиной отверстия. На диаграмме все точки для перфораций на рабочей лопатке ТВД лежат ниже соответствующих граничных кривых. Можно рекомендовать учет влияния нестационарной следовой неравномерности для рядов перфораций на

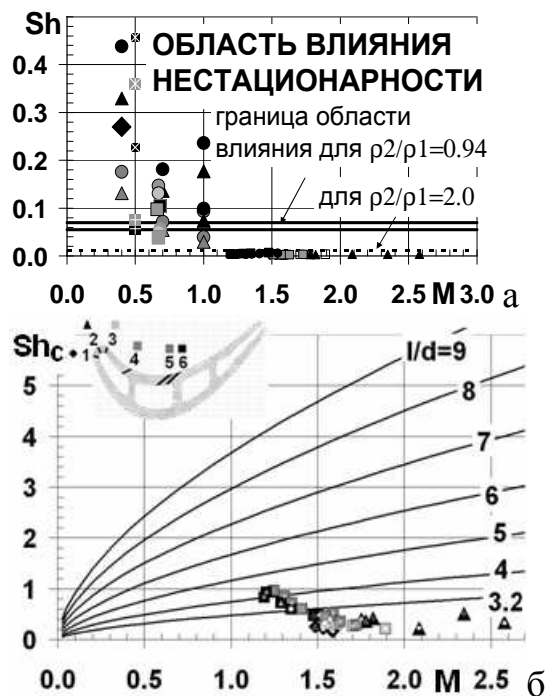


Рис. 4 Диаграммы влияния нестационарности: обобщение опытных и расчетных данных (а); рабочая лопатка ТВД модификации двигателя РД33 (б)



протяженности криволинейной поверхности, вплоть до 60 калибров. Это можно объяснить по результатам численного моделирования.

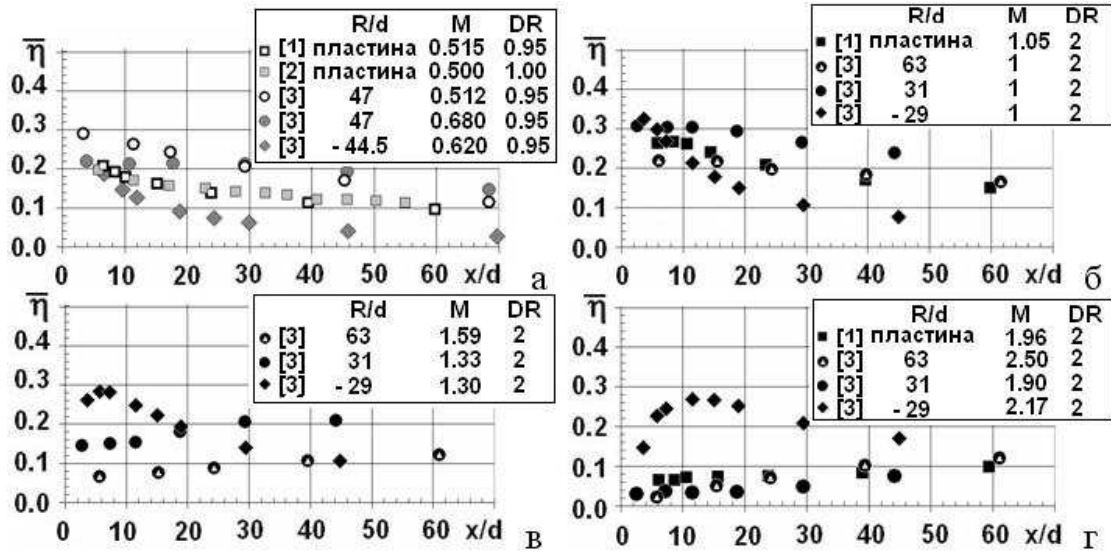


Рис. 5 Влияние кривизны охлаждаемой поверхности на эффективность пленочного охлаждения:  $M=0.5 - 0.68$  и  $\rho_2/\rho_1=0.95$  (а);  $M=0.92 - 1.0$  и  $\rho_2/\rho_1=2.0$  (б);  $M=1.3 - 1.59$  и  $\rho_2/\rho_1=2.0$  (в);  $M=1.9 - 2.5$  и  $\rho_2/\rho_1=2.0$  (г). 1 – [Педерсен, Эккерт, Голдстейн, 1977], 2 – [Кадотани, Голдстейн, 1979], 3 – [Шварц, Голдстейн, 1991]

На рис. 6а показан один из пары вихрей, которые образуются вблизи выпуклой и вогнутой поверхностей. При параметре вдува  $M \approx 2.2$  центр вихря расположен далеко от стенки, он активнее доставляет к стенке горячий газ, снижая эффективность охлаждения. На вогнутой поверхности «подкачка» отсутствует, поэтому эффективность пленки выше.

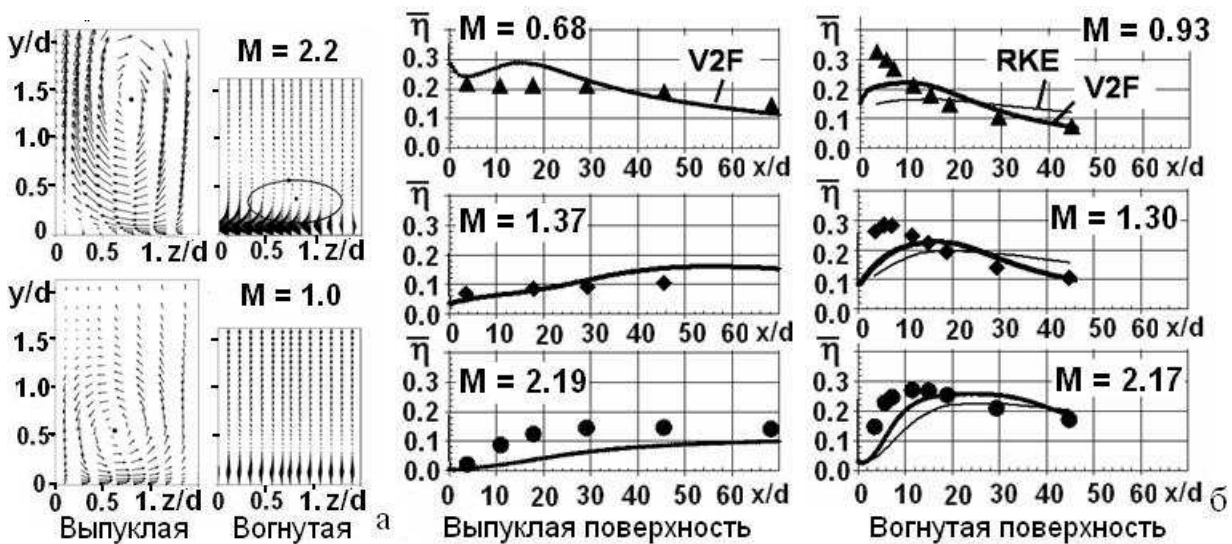


Рис. 6 Вектора скорости в сечении  $x/d=29.5$  (а); эффективность пленочного охлаждения для однорядной перфорации на криволинейной поверхности (б).

Влияние кривизны поверхности на эффективность завесы моделируется на базе численной модели, разработанной во второй главе. Результаты расчета (рис. 6б) показывают удовлетворительное совпадение расчета и эксперимента, кроме начального участка (до 10 калибров), особенно при параметрах вдува  $M > 1$ . Используемая модель *RKE* (расчет [Undappali, Leylek, 2003]) наравне с *V2F* дает удовлетворительные результаты, так как модель *RKE* учитывает влияние процесса смешения для круглых струй, которые характерны для завес при  $M > 1$ .

Проведение трехмерных расчетов требует больших вычислительных и временных затрат на построение геометрической модели, расчетной сетки и проведение расчета. Поэтому для выполнения оптимизационных расчетов, когда требуется много вариантов, используется инженерная методика.

В четвертой главе дается коррекция инженерной методики на параметр вдува 1.5-2.5. Одним из этапов расчета теплового состояния по инженерной методике является определение эффективности пленочного охлаждения. В методике, применяемой в ОАО «Климов» в настоящее время, для этого применяется формула, полученная ЦИАМ (Сахаров В.Н., Тришкин А.Т., Венедиктов В.Д.):

$$\eta = A_T A_\phi \frac{1}{\bar{P} + \frac{0.017(\rho_\infty U_\infty)}{G_2} x h \left[ 1 + A_k \frac{x}{R} \text{Re}_x^{-0.2} \right]^{-1}}, \quad (2)$$

где  $A_k = 4.5$  для выпуклой поверхности и  $A_k = -7.1$  для вогнутой. Формула (2) обобщает результаты для сопловых лопаток в диапазоне параметра вдува  $M = 0.7 \div 1.3$  и относительном шаге отверстий в ряду  $\bar{P} = 1.4 \div 2.0$ . Однако она не учитывает струйный характер течения завесы вблизи отверстий перфорации при высоких параметрах вдува  $M > 1.3$ , поэтому требуется коррекция указанной формулы на высокие параметры вдува  $M = 1.5 - 2.5$ .

В [Baldauf et al., 2002] предложена зависимость, полученная в результате обобщения экспериментальных данных для пластины и справедливая в диапазоне изменения параметров  $M = 0.2 - 2.5$ ,  $DR = 1.2 - 1.8$ ,  $Tu_1 = 1.5 - 4\%$ ,  $\alpha = 30 \dots 60^\circ$ ,  $\bar{P} = 2 - 5$ :

$$\eta_0 = \eta_c \frac{(DR)^{0.9/(P/d)}}{(\sin \alpha)^{0.06P/d}} \quad (3)$$

В настоящей работе эмпирическое соотношение (3) дополнено множителем, учитывающим влияние кривизны обтекаемой поверхности, в виде относительного закона Леонтьева - Кутателадзе:

$$\eta = \eta_0 \cdot \Psi_R, \quad \Psi_R = \frac{1 + Z_R}{1 + \eta_0 \cdot \bar{P} \cdot Z_R}, \quad (4)$$

где  $Z_R = A_k \cdot x / |R| \cdot \text{Re}_x^{-0.2}$ ,  $A_k = C \exp(-Bx/d)$ . Корректирующий множитель  $\Psi_R$  получен на основании обработки опытных данных [Schwarz, Goldstein, 1990]. Он предполагает учет струйного характера развития завесы на криволинейной поверхности вблизи места ее выдува посредством безразмерного параметра  $Z_R \cdot \eta_0$  и зависимостей для расчета коэффициента  $A_k$ :

$$C = -110.6M + 167.2, \quad B = \begin{cases} -0.0791M + 0.0854, & \text{при } M \leq 1 \\ 0.0575M - 0.0504, & \text{при } M \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$C = \begin{cases} 11.835M - 20.107, & \text{при } M \leq 1.68 \\ 376.27M - 632.45, & \text{при } M \geq 1.68 \end{cases}, \quad B = \begin{cases} -0.0022M + 0.0066, & \text{при } M \leq 1.3 \\ 0.0644M - 0.0797, & \text{при } M \geq 1.3 \end{cases} \quad (6)$$

$$C = -1.4077 \quad B = -0.0198M + 0.0099 \quad (7)$$

где формулы (5), (6), (7) – для выпуклой поверхности (спинки), для вогнутой поверхности (корыта) и для входной кромки соответственно. Значения коэффициентов  $C$  и  $B$  справедливы при  $R/d \geq 10$ .

Практика расчетов по формулам (3)-(6) показала, что в случае появления значения  $Z_R < -1$  необходимо полагать  $\psi_R = 0$ . Необходимость применения такого приема появляется на удалении от входной кромки, в частности для корытной части при  $x/d > 50$ .

Параметр  $Z_R$  пропорционален отношению толщины пограничного слоя на непроницаемой поверхности к радиусу кривизны поверхности, а при умножении этого параметра на величину  $\eta_0$  получаем учет влияния кривизны поверхности на эффективность пленочного охлаждения при наличии ддува.

Проверка адекватности предложенных зависимостей (5)-(7) представлена рис. 7а,б, где можно отметить удовлетворительное согласование предложенной корреляции с опытными данными [Schwarz, Goldstein, 1990].

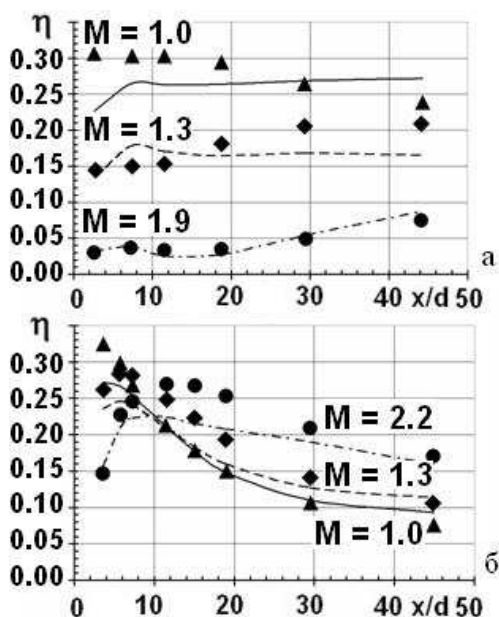


Рис. 7 Выпуклая поверхность  $R/d = 31$  (а) и вогнутая поверхность  $R/d = -29$  (б)

Полученная зависимость (4)-(7) для определения эффективности пленочного охлаждения была применена при расчете теплового состояния среднего сечения для двух рабочих лопаток. Результаты расчета сравнивались с опытными данными и с результатами расчетов по методике ЦИАМ, то есть с использованием формулы (2).

На рис. 8в показаны результаты расчета для рабочей лопатки модификации двигателя РД-33. На спинке вдали от входной кромки результаты расчета по двум методикам согласуются. На корыте наблюдается улучшение соответствия (на  $15^\circ\text{C}$ ) расчета по модифицированной методике, полученной в данной работе, эксперименту.

Результаты расчета для рабочей лопатки с развитой системой конвективно-пленочного охлаждения, испытанной в ЦИАМ, показаны на рис. 9в.

Маркеры в виде ромбов соответствуют значениям, полученным в ЦИАМ. Наблюдается улучшение соответствия расчета по модифицированной методике и эксперимента на  $14^\circ\text{C}$  на спинке и на  $34^\circ\text{C}$  на корыте.



Рис. 8 Исследуемая лопатка ГТД (а); схема расположения перфораций (б); сопоставление результатов расчета с опытными данными (в)

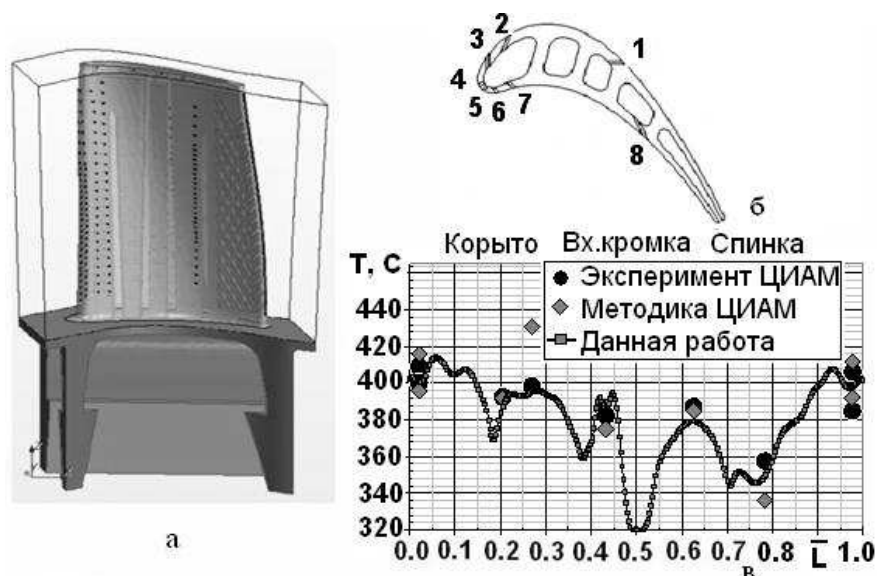


Рис. 9 Исследуемая лопатка ГТД (а); схема расположения перфораций (б); сопоставление результатов расчета с опытными данными (в)

В пятой главе проведен анализ применимости сопряженной и полусопряженной постановок на тепловое состояние охлаждаемой лопатки ГТД. Полученные рекомендации по моделированию охлаждения были применены для расчета лопатки с развитой системой конвективно-пленочного охлаждения (рис. 9а,б).

Геометрическая модель включает в себя межлопаточный канал, каналы охлаждения внутри лопатки и тело лопатки. Геометрия внутренних каналов лопатки не упрощалась - геометрическая модель содержит оребрение вертикальных каналов, матрицу компланарных каналов и отверстия рядов перфораций.

В расчете использовались четыре расчетные сетки. Самая грубая сетка – 2.8 млн. ячеек, самая подробная – 23.5 млн. ячеек (таблица 1). Для расчета использовался кластер ОАО «Климов».

Сравнение результатов расчета данной работы для среднего сечения с результатами расчета по двумерной модели (рис. 10а) показывает их удовлетворительное соответствие, что говорит о корректности выбора режимных и геометрических параметров по внешнему обтеканию лопатки. Однако на рис. 10б,в показано, что при сохранении суммарного расхода воздуха через лопатку распределение по рядам отверстий лопатки отличается от расчетов, проведенных на основе одномерной теории графов, особенно в области отверстия №7 (рис. 9б), расположенного на корыте вблизи входной кромки. Это связано с образованием обширной отрывной зоны на входе в отверстие (рис. 10г).

Была рассмотрена 21 численная модель (таблица 1), отличающаяся моделью турбулентности, расчетной сеткой, подходом (сопряженный, полусопряженный). Выбор рациональной численной модели основан на сравнении результатов расчета с экспериментом по величине относительной погрешности глубины охлаждения, средней по всем замерам (рис. 11а), по спинке, по корыту и для входной кромки (рис. 12). В качестве граничных значений по определению приемлемости численной модели выбирался диапазон  $\pm 5\%$ , приемлемый для достоверной оценки повреждаемости лопатки. Можно отметить, что точки, попавшие в этот коридор, соответствуют модели турбулентности *RKE* для четырех различных сеток.

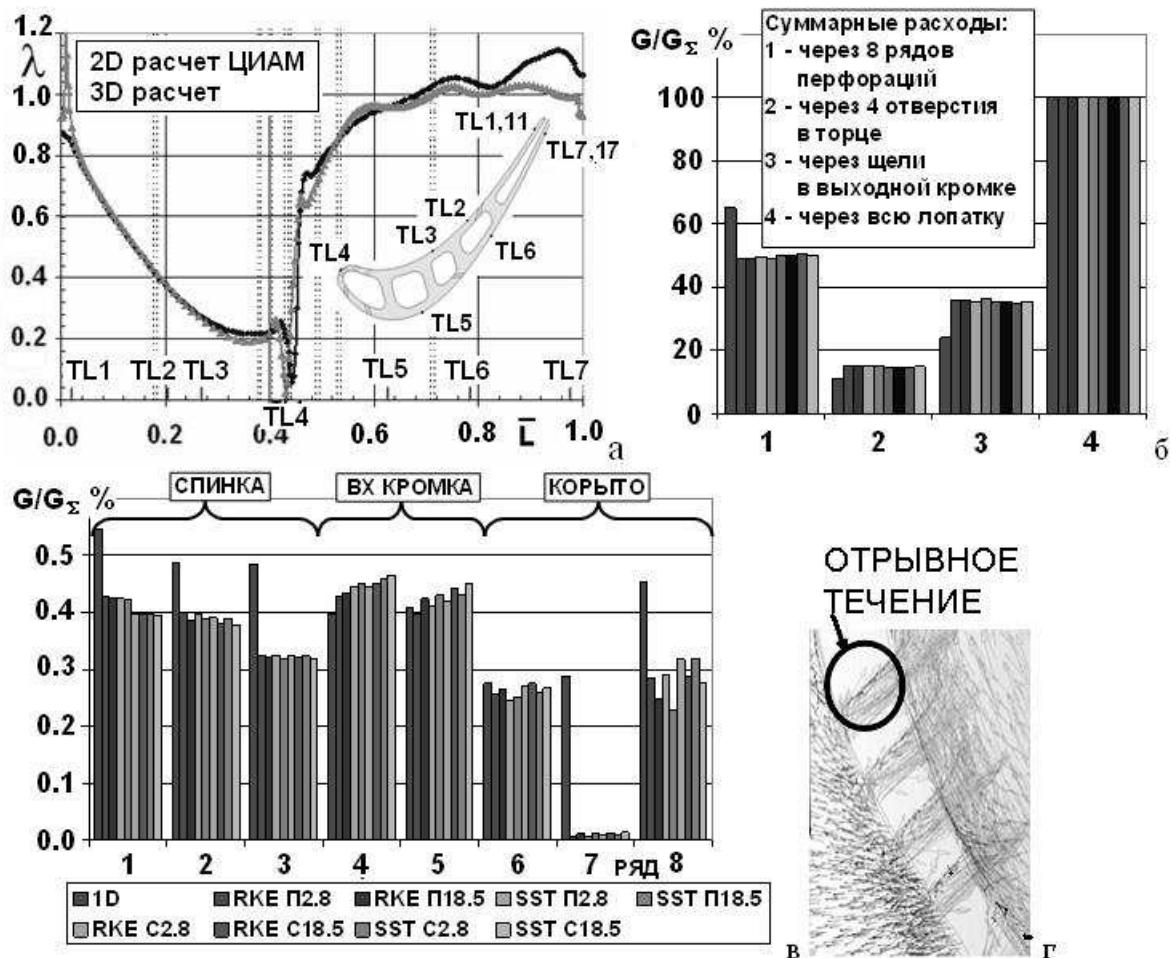


Рис. 10 Приведенная скорость по обводу профиля лопатки в среднем сечении (а); расходы охладителя: суммарные (б) и через каждый из восьми рядов перфораций (в); отрывное течение на входе в перфорации ряда №7.

Таблица 1 Перечень рассмотренных вариантов

Модель турбулентности	Число ячеек, млн.	$Y^+$	Номер варианта	
			С- Сопряженный	П-Полусопряженный
$k-\omega$ SST all $Y^+$	2.8	100	1С	1П
	9.5	10	2С	2П
	18.5	5	3С	3П
	23.5	3	4С	4П
RKE all $Y^+$	2.8	100	5С	5П
	9.5	10	6С	6П
	18.5	5	7С	7П
	23.5	3	8С	8П
V2F	23.5	3	9С	9П
$k-\omega$ SST sWF	2.8	100	10С	
KE sWF	2.8	100	11С	
$k-\omega$ SST LowRe $\gamma$ -Re $_{\theta}$	23.5	3		10П

лопатки в районе выходной кромки. Это связано с тем, что значения коэффициента теплоотдачи для воздуха, которые задавались в расчете, получены по расходам из гидравлического расчета, которые меньше расходов, полученных по 3D расчету

Анализ данных показывает, что интегральная величина (глубина охлаждения, средняя по всем замерам) может быть получена на сетке 2.8 млн. ячеек с  $Y^+=100$ . Другие рассмотренные модели турбулентности (SST, V2F) находятся вне диапазона  $\pm 5\%$  и имеют погрешность по глубине охлаждения 10-25%.

Изменение температуры металла лопатки по обводу профиля в среднем сечении представлено на рис. 11б. Показано, что полусопряженный подход дает выбросы по температуре

(рис. 10в), что приводит к занижению коэффициента теплоотдачи со стороны охладителя в районе выходной кромки и повышению температуры лопатки.

Это подчеркивает важность тепловой и газодинамической сопряженности внутри задачи (соответствие расходов охладителя и коэффициентов теплоотдачи), а также необходимость коррекции коэффициентов теплоотдачи со стороны воздуха по расходам, полученным в результате 3D расчетов для полусопряженного подхода.

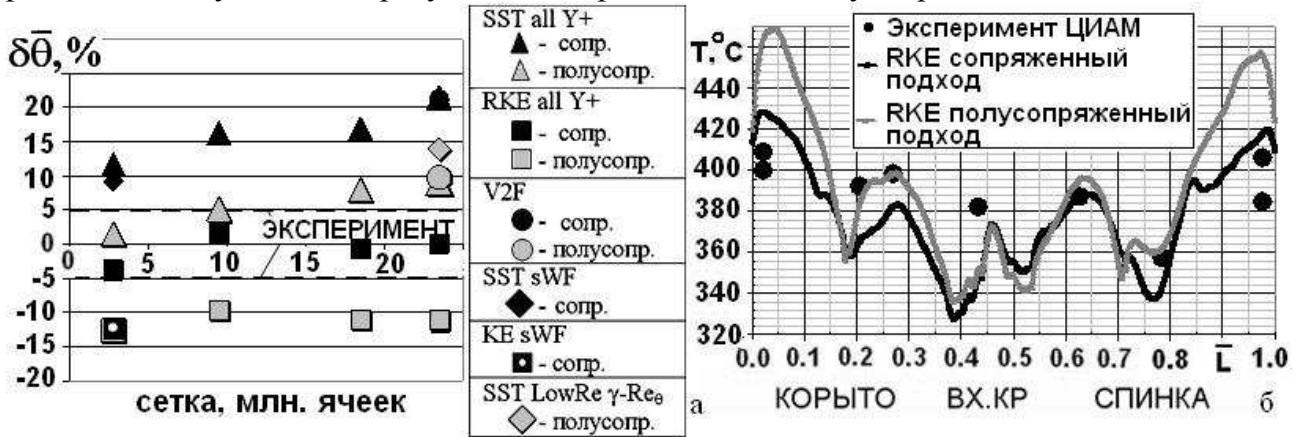


Рис. 11. Относительная погрешность расчетов по глубине охлаждения лопатки, средняя по всем замерам (а); температура лопатки по обводу профиля (б).



Рис. 12 Относительная погрешность расчетов по глубине охлаждения лопатки, средняя по спинке (а), средняя по корыту (б), на входной кромке (в).

На основе выбора рациональной сетки и модели турбулентности сделан анализ 3D течения, который отмечает наличие радиального перепада температуры струй, омывающих лопатку, перетекания через радиальный зазор, разнонаправленный характер истечения завесы в области входной кромки (рис. 13).

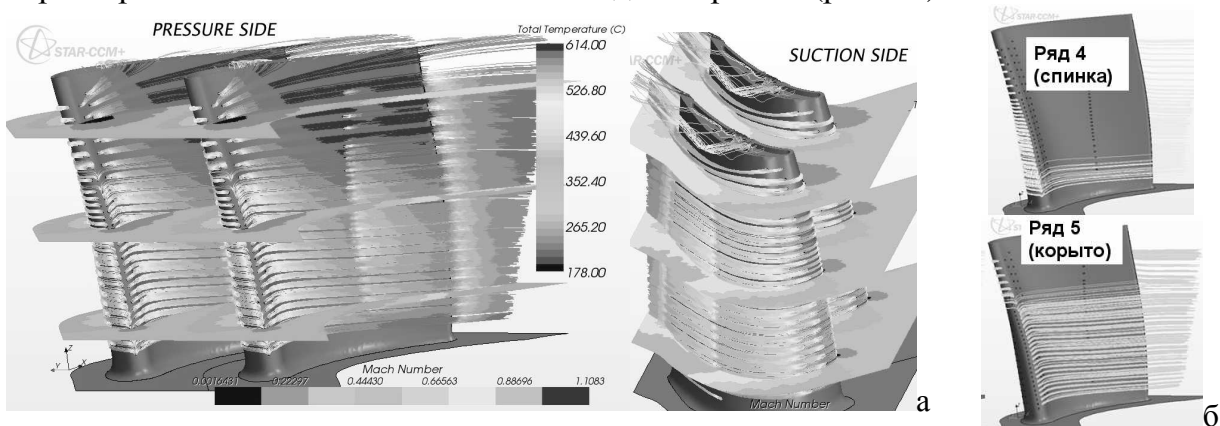


Рис. 13 Температуры торможения линий тока на корыте и спинке лопатки, поля чисел Маха в трех сечениях межлопаточного канала (а); разнонаправленный характер струй из рядов перфораций на входной кромке (б).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены трехмерные и двумерный подходы к моделированию теплового состояния лопаток при развитом конвективно – пленочном охлаждении и даны рекомендации по выбору параметров численных моделей, с погрешностью по глубине охлаждения металла лопаток, не превышающей 5%. Выявлены достаточность применения расчетных сеток в 2.8 млн. ячеек для получения осредненных значений по глубине охлаждения и необходимость увеличения числа ячеек до 23.5 млн. для локальной температуры лопатки при сопряженной постановке.

2. Разработаны методы расчета эффективности трехмерных газовых завес при наличии многофакторного воздействия параметров системы пленочного охлаждения, в том числе кривизны обтекаемой поверхности, колебаний основного потока для параметров вдува больше единицы. Показано, что применение модели турбулентности  $V2F$  на расчетной сетке с  $Y+\cong 1$ , учитывающей течение в подводящих каналах, позволяет получить удовлетворительное соответствие расчетных и опытных данных (погрешность 20%) на расстоянии, превышающем десять калибров.

3. Установлено, что распространение возмущений от наложения поперечных колебаний в основном потоке внутри газовой завесы происходит в виде бегущей волны и приводит к снижению эффективности газовой завесы на 20% при наложении низкочастотных колебаний. Построены диаграммы, с помощью которых установлены области влияния нестационарности. На основе анализа трехмерной структуры газовых завес на криволинейной поверхности объяснена инверсия эффективности охлаждения в зависимости от параметра вдува и кривизны поверхности.

4. Трехмерное моделирование течения и сопряженного теплообмена выявило перераспределение расхода воздуха внутри лопатки по сравнению с расчетом по одномерной теории графов, в частности, уменьшение на 24% значения расхода через восемь рядов перфораций из – за наличия зоны отрыва в одном из рядов перфораций. Показано отличие температуры в срединном сечении (на 25%) от ее значения на концевых участках лопатки вследствие перетекания в радиальном зазоре и разнонаправленного течения завесы вблизи входной кромки.

5. Предложена поправка на кривизну для расчета эффективности газовых завес в виде относительного закона Леонтьева-Кутателадзе. Проведена ее апробация при расчете теплового состояния для среднего сечения двух рабочих лопаток и достигнуто улучшение согласования расчета с опытными данными (на 8% на корытной части лопатки).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. *Измоденова Т.Ю.* Нестационарная газовая завеса при воздействии неоднородного колеблющегося потока [Текст] / Измоденова Т.Ю., Кортиков Н.Н., Кузнецов Н.Б. // Теплофизика и аэромеханика, - 2008.- Том 15.- № 4. – С. 623 - 628.

2. *Измоденова Т.Ю.* Эффективность пленочного охлаждения при выдуве завесы из однорядной перфорации на криволинейную поверхность [Текст] / Измоденова Т.Ю., Кортиков Н.Н., Кузнецов Н.Б. // Тепловые процессы в технике, - 2009. - №12. - С. 507-510.

Работы, опубликованные в других изданиях:

3. *Измоденова Т.Ю.* Газовая завеса за двухрядной перфорацией на пластине: опыт использования различных моделей турбулентности и расчетных сеток [Текст] / Измоденова Т.Ю., Кортиков Н.Н., Кузнецов Н.Б. // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках (XVI Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева). М.: Изд-во МЭИ, - 2007. - Том 1. - С. 148 – 151.

4. *Измоденова Т.Ю.* Численное моделирование нестационарной трехмерной завесы в колеблющемся потоке газа [Текст] / Измоденова Т.Ю., Кортиков Н.Н. // XXXVI неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч. II. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, - 2008. - С. 151 - 153.

5. *Измоденова Т.Ю.* Моделирование пленочного охлаждения сопловых и рабочих лопаток ТВД современных высокотемпературных двигателей [Текст] / Измоденова Т.Ю., Кузнецов Н.Б., Кортиков Н.Н. // X Международный салон «Двигатели - 2008»: Научно-технический конгресс по двигателестроению НТКД-2008, Москва 16-18 апреля 2008. – С. 62 - 64.

6. *T.Yu. Izmodenova.* Unsteady film cooling with imposed nonuniform pulsations of the main flow / T.Yu. Izmodenova, N.N. Kortikov and N.B. Kuznetsov // Thermophysics and aeromechanics, - 2008. - Vol. 15. - No. 4. -pp.583-588.

7. *Измоденова Т.Ю.* Эффективность пленочного охлаждения при выдуве завесы из однорядной перфорации на пластине [Текст] / Измоденова Т.Ю., Кортиков Н.Н., Кузнецов Н.Б. // Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях (XVII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева). М.: Изд-во МЭИ, - 2009. - Том 1. - С. 190 – 193.

8. *Измоденова Т.Ю.* Эффективность пленочного охлаждения при выдуве завесы из однорядной перфорации на криволинейную поверхность [Текст] / Измоденова Т.Ю., Кортиков Н.Н., Кузнецов Н.Б. // Перспективные разработки в авиадвигателестроении. Санкт-Петербург, 20 октября 2009 г.: сборник статей заочной научно-технической конференции «Климовские чтения». СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, - 2009. - С. 88 – 96.

9. *Измоденова Т.Ю.* Совершенствование подходов к моделированию теплового состояния перфорированных лопаток высокотемпературных газовых турбин [Текст] / Измоденова Т.Ю., Кортиков Н.Н., Кузнецов Н.Б. // Москва, 25-28 октября 2010 г. Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену, М.: Изд-во МЭИ, - 2010. - Том 2. - С. 131 - 134.

10. *Измоденова Т.Ю.* Совершенствование подходов к моделированию теплового состояния лопаток высокотемпературных газовых турбин с конвективно – пленочной системой охлаждения [Электронный ресурс] / Измоденова Т.Ю., Кортиков Н.Н., Кузнецов Н.Б. // Авиадвигатели XXI века: материалы конф. – Электрон. дан. – М.: ЦИАМ, - 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).