

Министерство образования и науки Российской Федерации  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

Институт машиностроения «ЛМЗ-ВТУЗ»  
Институт энергетики и транспортных систем

С. М. Вохмянин И. А. Богов В. А. Суханов  
А.П. Безухов К. Д. Андреев

**ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ**  
**РАСЧЕТ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК**  
**ГАЗОВЫХ ТУРБИН. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС**  
**COLD**

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список принятых сокращений.....	3
Введение.....	4
1. Программный комплекс COLD для расчета систем охлаждения лопаток газовых турбин.....	8
1.1. Общее описание программного комплекса COLD.....	8
1.2. Автоматизированная база данных PROFIL.....	13
1.3. Автоматизированная база данных METALL.....	18
1.4. Программный модуль UPI.....	19
1.5. Программный модуль ALFA.....	24
1.6. Программный модуль GIDRA.....	36
1.7. Программный модуль TERM.....	50
1.8. Сопоставление результатов работы комплекса COLD с экспериментальными данными.....	62
2. Практическое использование программного комплекса COLD.....	66
2.1. Работа с автоматизированными базами данных PROFIL и METALL.....	66
2.2. Работа с модулем UPI.....	74
2.3. Работа с модулем ALFA.....	81
2.4. Работа с модулем GIDRA.....	87
2.5. Работа с модулем TERM.....	101
2.6. Работа в смешанных и комплексном режимах.....	107
2.7. Работа с базой выходных файлов.....	113
Заключение.....	116
Библиографический список.....	117

## СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АБД – автоматизированная база данных;
- БД – база данных;
- ВГТ – высокотемпературная газовая турбина;
- ВТУЗ – высшее техническое учебное заведение;
- ГТУ – газотурбинная установка;
- КС – камера сгорания;
- КЭ – конечный элемент;
- ЛГТУ – Ленинградский государственный технический университет,  
ныне СПбГПУ;
- ЛМЗ – Ленинградский металлический завод;
- МКЭ – метод конечных элементов;
- НПО – научно-производственное объединение;
- ПИМаш – Санкт-Петербургский институт машиностроения «ЛМЗ-  
ВТУЗ», ныне СПбГПУ;
- РК – рабочее колесо;
- СА – сопловой аппарат;
- СПбГПУ – Санкт-Петербургский государственный политехнический  
университет;
- ЦКТИ – Центральный котлотурбинный институт им.  
И.И. Ползунова.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие газовых турбин, сопровождающееся ростом начальных параметров рабочего тела, повышением их технических характеристик и маневренных качеств, выдвинуло широкий круг проблем обеспечения прочности и долговечности деталей газотурбинных установок. Среди разнообразных аспектов этих проблем особо важное значение имеет дальнейшее совершенствование методов расчета, а также исследования систем охлаждения и термонапряженного состояния лопаток газовых турбин.

Целью разработки систем охлаждения лопаток газовых турбин является распределение охлаждающей среды по трактам системы охлаждения при минимальных значениях величин расхода и давления этого воздуха, обеспечивающее максимальный уровень температуры и градиент температурного поля в лопатке, допустимые по условиям длительной прочности материала.

Для достижения этой цели необходимо решение следующих основных задач:

- выполнение теплового расчета системы охлаждения, в процессе которого определяется зависимость температуры лопатки от расхода и параметров охлаждающей среды и выбора приемлемого поля температуры по условиям длительной прочности материала лопатки;

- выполнение гидравлического расчета системы охлаждения, в процессе которого определяются размеры проходных сечений охлаждающего тракта лопатки, обеспечивающих распределение расходов охлаждающей среды, выбранное в результате теплового расчета и снижение до минимума непроизводительных потерь.

Указанные задачи разделены условно, а их решение представляет

собой единый итерационный процесс.

Процесс разработки систем охлаждения лопаток газовых турбин, схематично представленный на рис. В.1, характеризуется многоэтапностью и итерационностью. Кроме того, этот процесс довольно трудоемок, длителен и требует наличия у проектировщика определенной квалификации и навыков.

В настоящее время почти все основные этапы решения задачи разработки систем охлаждения лопаточного аппарата (так называемая прямая задача) в той или иной степени автоматизированы. При этом используются отдельные компьютерные программы, работающие, как правило, автономно. В этих условиях проектировщику приходится затрачивать определенное, иногда значительное, время на подготовку данных для расчета по каждой программе и обработку полученных результатов. Подобная «ручная» работа не только является потенциальным источником погрешностей и ошибок, но и существенно увеличивает трудоемкость и время процесса проектирования. Последнее обстоятельство, особенно при многовариантных расчетах, нередко провоцирует проектировщика на сокращение исследуемых вариантов системы охлаждения, либо числа проводимых итераций (см. рис. В.1). Во всех перечисленных случаях увеличивается доля субъективизма в процессе проектирования, что, естественно, не способствует достижению требуемого качества разрабатываемой системы охлаждения либо приводит к нарушению достоверности получаемых результатов.

Расчет параметров охладителя с целью получения их окончательных значений необходимо сочетать с расчетом температурного состояния лопатки, а в случае применения заградительного охлаждения лопатки, - и с расчетом граничных условий теплообмена со стороны газа (см. рис. В.1).

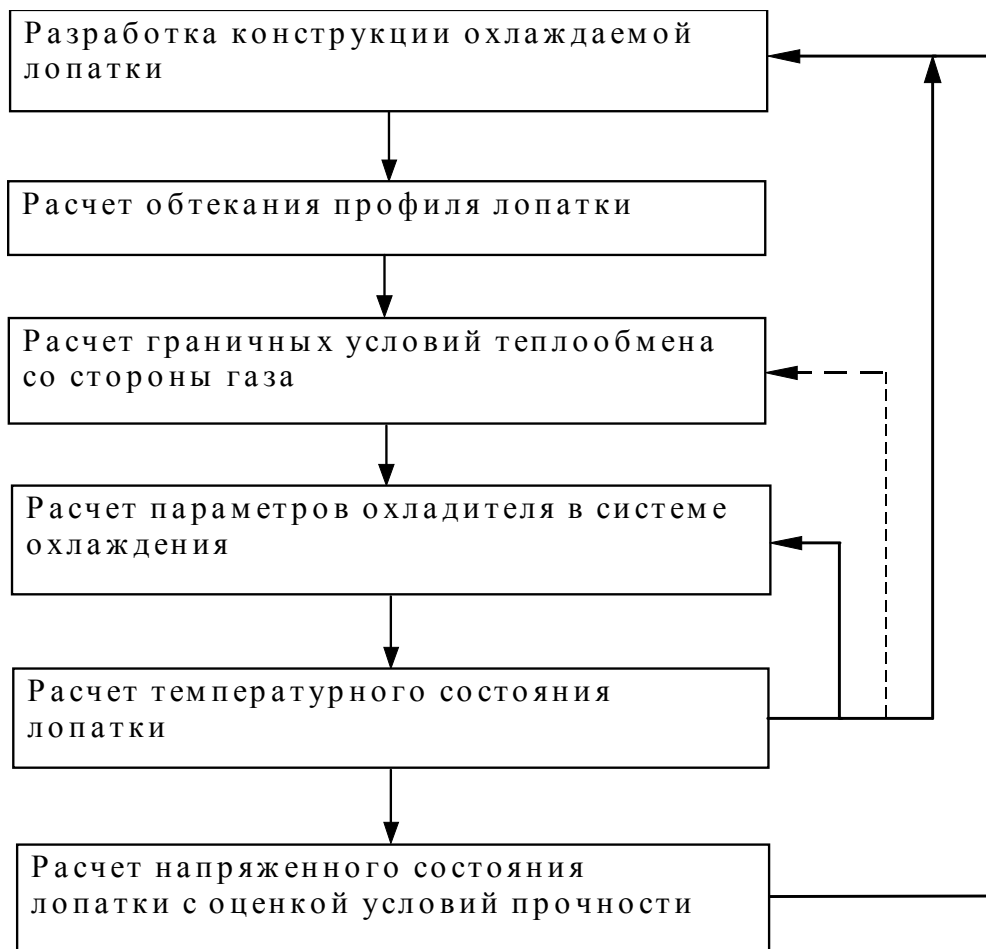


Рис. В.1. Основные этапы разработки систем охлаждения лопаток газовых турбин

Если же учитывать еще и влияние на обтекание лопатки выдува охладителя на ее наружную поверхность (при заградительном охлаждении), то становится очевидным, что трудоемкость выполнения во всех отношениях исчерпывающего и корректного расчета системы охлаждения лопатки достигает такого уровня, который делает этот расчет практически невыполнимым традиционными принятыми на сегодняшний день, методами.

В связи с этим весьма актуальным представляется разработанный на кафедре «Машины и оборудование энерготехнологических комплексов» (ранее – «Турбиностроение и средства автоматики») Института

машиностроения («ЛМЗ-ВТУЗ») высокопроизводительный программный комплекс, обеспечивающий проведение в сжатые сроки многовариантных расчетов систем охлаждения лопаточного аппарата газовых турбин по схеме, показанной на рис. В.1, с предельно достижимой и, в то же время, рациональной степенью автоматизации.

Учебное пособие предназначено студентам, обучающимся по направлению подготовки инженеров «Энергомашиностроение», специальности «Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели», и направлению подготовки бакалавров «Энергетическое машиностроение».

Данное пособие может быть использовано преподавателями при проведении лабораторных занятий и упражнений по дисциплинам «Энергетические машины», «Паро- и газотурбинные установки», «Газотурбинные установки», а так же при выполнении студентами выпускных квалификационных работ.

Коллектив авторов выражает глубокую, сердечную благодарность Роост Эльвире Гансовне за многолетнее плодотворное сотрудничество и участие в разработке и практической реализации программного комплекса COLD.

# **1. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС COLD ДЛЯ РАСЧЕТА СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН**

В данной главе помимо общей характеристики и некоторых особенностей организации функционирования программного комплекса COLD, в краткой форме излагаются математические модели, положенные в основу различных модулей комплекса, а также приводятся результаты сопоставления имеющихся в распоряжении авторов экспериментальных данных по исследованию обтекания и теплоотдачи к турбинным профилям, расходных характеристик и температурного состояния охлаждаемых лопаток отечественных стационарных ГТУ с расчетными, полученными с использованием комплекса COLD.

## **1.1. Общее описание программного комплекса COLD**

Программный комплекс COLD предназначен для расчета систем охлаждения лопаток газовых турбин. Комплекс разработан применительно к персональным компьютерам IBM AT с операционной системой MS DOS и обеспечивает функционирование всех своих модулей в режимах как автономном, так и различной степени интеграции на основе единой базы файлов числового и графического характера под управлением специальной программы-монитора (оболочки).

Основные модули комплекса с кратким описанием их функционального назначения приведены в табл. 1.1.

Модуль COLD состоит из одной управляющей программы - своеобразной оболочки всего комплекса, в функции которого входит:

- обеспечение пользователя всей необходимой справочной



информацией по вопросам назначения, возможностей и ограничений, накладываемых на отдельные модули и комплекс в целом, по вопросам подготовки исходных данных, трактовки результатов расчетов и т.д.;

- настройка комплекса, включающая выбор того или иного текстового редактора для просмотра/редактирования файлов, указание имени каталога с рабочими (используемыми в данном расчете) файлами данных, задание цвета фона выводимых на экран графических данных - различных схем и графиков;

- выбор режимов использования комплекса, схематично показанных на рис. 1.1, а именно: работа с БД PROFIL или METALL, выполнение расчетов в режимах автономном, смешанном (UPI - ALFA, GIDRA - TERM) или комплексном, при котором в определенной последовательности работают все имеющиеся модули, а также организация соответствующего вычислительного процесса (например, при смешанном GIDRA - TERM и комплексном режимах попеременно активизируются модули GIDRA и TERM, реализуя таким образом метод последовательных приближений с целью достижения с заданной степенью точности совместной сходимости параметров охладителя и температурного состояния лопатки);

- ведение базы текстовых и графических входных, выходных и временных рабочих файлов, что включает такие операции над файлами, как хранение, просмотр, поиск, редактирование, копирование, печать, удаление, а также формирование пакета входных файлов для выполнения выбранного расчета в рамках того, или иного режимов работы.

Таблица 1.1

## Основные модули комплекса COLDF и их функциональное назначение

<b>Наименование модуля</b>	<b>Функциональное назначение модуля</b>
COLDF	Организация режимов использования комплекса и всего вычислительного процесса; настройка комплекса, ведение базы данных (БД) входных, выходных и временных рабочих файлов, обеспечение пользователя справочной информацией и т.д.
PROFIL	Автоматизированная база данных (АБД) PROFIL с экспериментальными характеристиками плоских решеток профилей лопаток газовых турбин
UPI	Расчет распределения скоростей потока на внешней границе пограничного слоя вдоль контура профиля
ALFA	Расчет граничных условий теплообмена со стороны газа
GIDRA	Расчет параметров охладителя в системе охлаждения
TERM	Расчет температурного и напряженного состояния лопатки с оценкой условий прочности
METALL	АБД METALL с физическими и прочностными характеристиками материалов, применяемых для изготовления охлаждаемых лопаток газовых турбин

В качестве примера на рис. 1.2 показана схема меню по формированию пакета входных файлов для выполнения расчета в смешанном режиме GIDRA-TERM. Комплекс автоматически контролирует строгую последовательность выбираемых файлов.

На рис. 1.3 схематично изображен фрагмент меню, демонстрирующий возможные режимы работы с входными файлами.

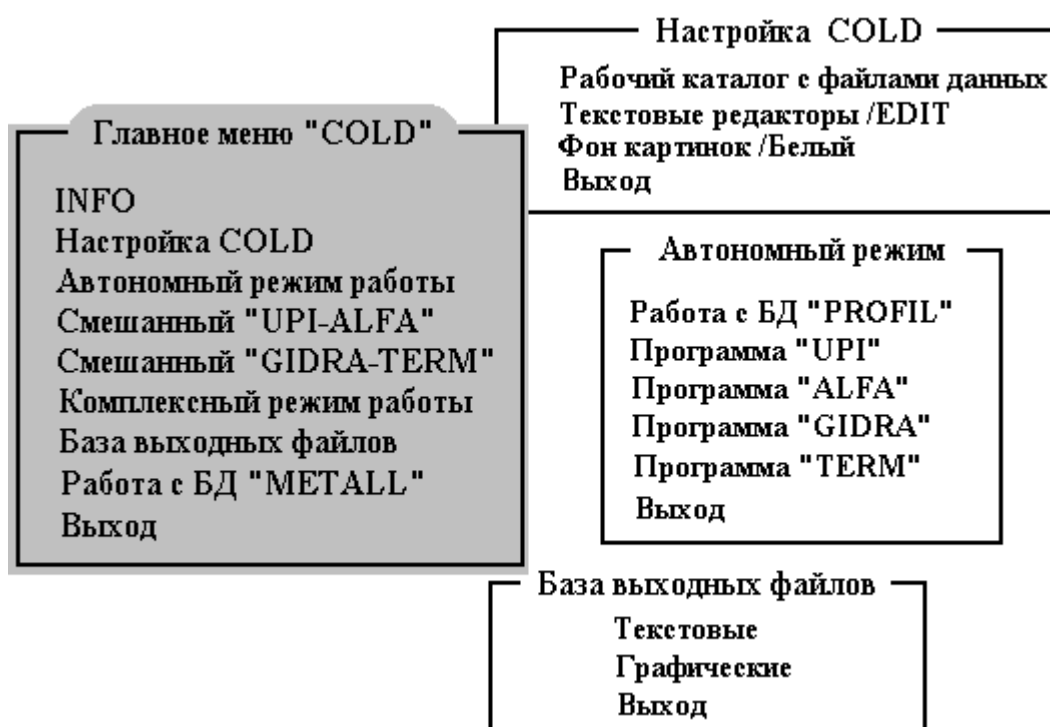


Рис. 1.1. Основные режимы использования комплекса COLD

Смешанный режим UPI-ALFA объединяет два расчета: расчет обтекания профиля (решетки) и расчет локальных коэффициентов теплоотдачи к лопатке со стороны газа.

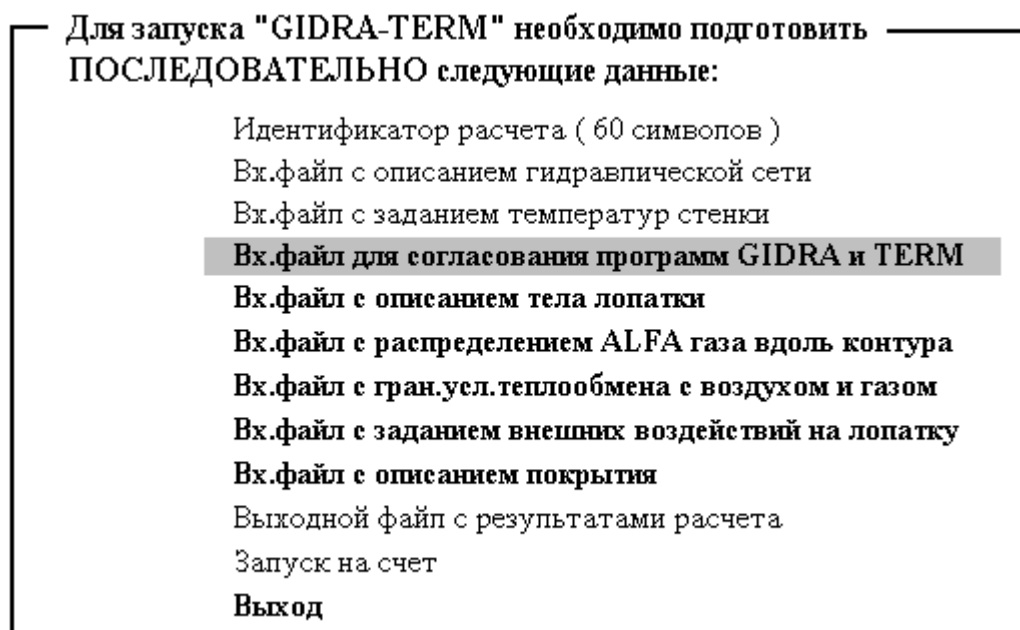


Рис. 1.2. Схема меню по формированию пакета входных файлов для выполнения расчета в смешанном режиме GIDRA-TERM

Смешанный режим GIDRA-TERM предназначен для организации совместного расчета параметров охладителя и температурного состояния лопатки и реализуется путем многократного попеременного выполнения программ GIDRA и TERM. Программа TERM на каждой итерации должна получать обновленные граничные условия теплообмена со стороны охладителя, а программа GIDRA - уточненные значения температур поверхностей лопатки, омываемых охладителем.

Нужно сказать, что при расчете температурного поля методом конечных элементов по программе TERM тело лопатки предварительно разбивается на ряд восьмиузловых макроэлементов (зон), в которых впоследствии генерируются треугольные конечные элементы. Понятно, что не все стороны макроэлементов контактируют с охладителем, и не на всех ветках эквивалентной гидравлической схемы происходит теплообмен с телом лопатки.

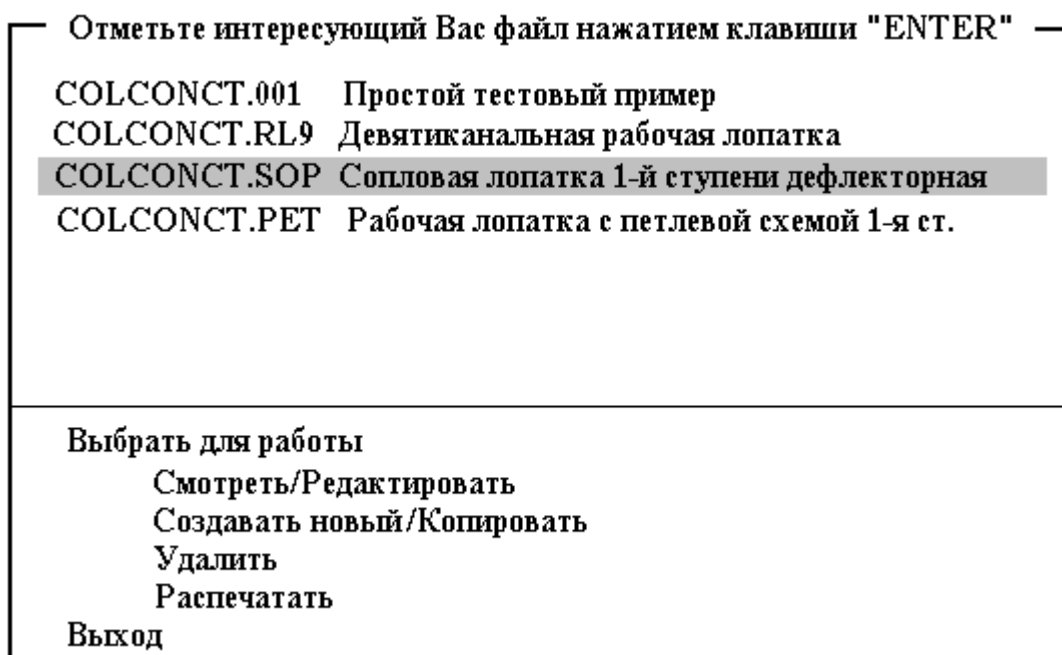


Рис. 1.3. Фрагмент меню, демонстрирующий возможные режимы работы с входными файлами

Для организации информационной связи программ GIDRA и TERM пользователем формируется специальный файл данных (с именем ColConct.\*), содержащий информацию о взаимном соотношении ветвей эквивалентной гидравлической схемы, а также номеров и сторон макроэлементов, контактирующих с охладителем.

Более подробно порядок подготовки и содержание файлов с исходными данными для проведения расчетов по комплексу COLD описывается в главе 2 настоящего учебного пособия.

## 1.2. Автоматизированная база данных PROFIL

АБД PROFIL с экспериментальными характеристиками 177 плоских решеток профилей охлаждаемых лопаток газовых турбин создан на основе атласа ЦИАМ [1].

База данных содержит следующую информацию.

- Геометрические параметры, показанные на рис. 1.4, по каждой из имеющихся в АБД решеток профилей. На рис. 1.4 приняты следующие обозначения:  $l$  - хорда профиля;  $\gamma$  - угол установки профиля в решетке;  $E_1$  и  $E_2$  - углы сужения межлопаточного канала в его входном  $a_1$  и  $a_2$  выходном сечениях;  $\bar{t}$  - относительный шаг решетки;  $b$  - ширина решетки;  $\beta_{1к}$  и  $\beta_{2к}$  - конструктивные углы решетки на входе и выходе соответственно;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  - углы заострения входной и выходной кромок соответственно;  $d_1$  и  $d_2$  - толщины входной и выходной кромок соответственно;  $X_{см}$  и  $Y_{см}$  - координаты центра максимальной окружности диаметром  $S_{макс}$ , вписанной в профиль;  $\delta$  и  $\delta_1$  - углы отгиба входной и выходной кромок соответственно;  $X_{г}$  и  $Y_{г}$  - координаты точки касания окружности, вписанной в выходное сечение межлопаточного канала, со спинкой лопатки. Все линейные геометрические параметры решеток как в атласе, так и в АБД, отнесены к хорде профиля  $l$ . Исключение составляет толщина выходной кромки  $d_2$ , которая отнесена к горлу межлопаточного канала  $a_2$ .

- Унифицированные безразмерные координаты профилей.

- Экспериментальные значения коэффициента профильных потерь, полученные без учета охлаждения, при безударном угле входа, различных значениях приведенной скорости  $\lambda_{2ад}$  на выходе из решетки, степени турбулентности набегающего потока, составляющей 0,03-0,06 % и числах Рейнольдса  $Re=W_2l/\nu=(5\dots 10)\cdot 10^5$ , что близко к автомодельной области.

- Опытную номограмму связи для каждой решетки между углом установки профиля  $\gamma$ , относительным шагом  $\bar{t}$  и эффективным углом выхода потока  $\beta_{2эф}$ , показанную на рис. 1.5.

Информационной основой АБД PROFIL является БД, состоящая из шести файлов, представленных в табл. 1.2.



Для организации поиска требуемого профиля в БД помимо углов входа  $\beta_1$  и выхода  $\beta_2$  необходимо задать максимально допускаемые положительный  $i^+$  и отрицательный  $i^-$  углы атаки, относительный шаг решетки  $\bar{t}$ , а для определения значения коэффициента профильных потерь - и режимное число  $\lambda_{2ад}$ .

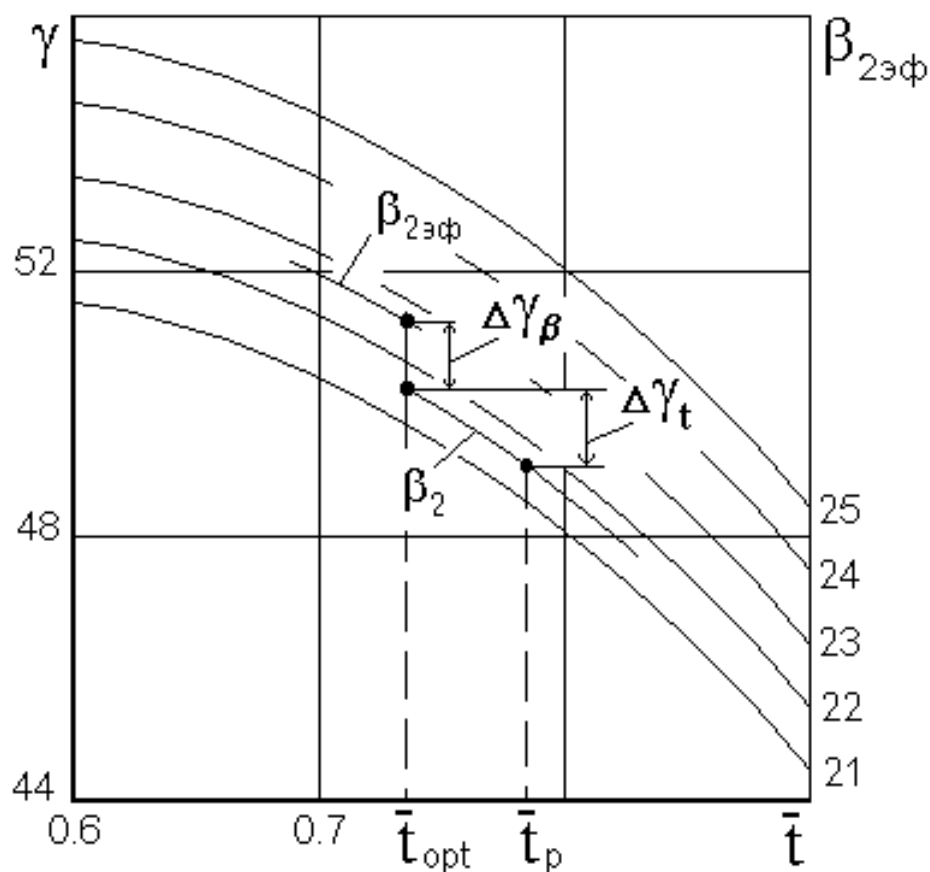


Рис. 1.5. Опытная номограмма связи  $\gamma$ ,  $\bar{t}$  и  $\beta_{2эф}$

(на примере решетки № 43)



## Файловый состав АБД PROFIL

Имя файл	Содержимое файла
Profil.dbf	Основные геометрические параметры решеток профилей
ProfilXY.dbf	Безразмерные координаты профилей
Pr_Loss.dbf	Экспериментальные значения коэффициента профильных потерь при различных режимных числах $\lambda_{2ад}$
Pr_GTA.dbf	Опытные номограммы связи угла установки профиля в решетке, относительного шага и эффективного угла выхода потока
Prom.dbf	Промежуточные результаты вычислений в процессе поиска требуемой решетки

Поиск требуемого профиля (решетки) производится в автоматическом режиме и осуществляется в следующей последовательности.

Для каждой решетки определяется величина  $\Delta_2 = \beta_{2эф} - \beta_2$  и далее рассматриваются только те из них, у которых  $|\Delta_2| \leq 2^\circ$ .

После чего, рассчитывается угол поворота профиля в решетке  $\Delta\gamma_\beta$  для обеспечения нужного  $\beta_2$  при сохранении оптимального относительного шага решетки  $\bar{t}_{opt}$

$$\Delta\gamma_\beta = \gamma_{t\beta} \Delta_2,$$

где  $\gamma_{t\beta}$  - содержащийся в БД безразмерный коэффициент, определяемый из номограммы (рис. 1.5) и показывающий, на сколько должен измениться

угол установки профиля  $\gamma$  при оптимальном относительном шаге  $\bar{t}_{opt}$  и изменении угла  $\beta_{2эф}$  на  $1^\circ$ .

Затем по номограмме определяется угол поворота профиля в решетке  $\Delta\gamma_\beta$  для обеспечения нужного  $\beta_2$  при отклонении  $\bar{t}$  от оптимального (см. рис. 1.5).

Если  $\bar{t}$  для данной решетки выходит за пределы своей номограммы, то такая решетка выводится из дальнейшего рассмотрения.

Конструктивный угол решетки на входе  $\beta_{1к}$  изменится на величину суммарного угла поворота профиля в решетке, определяемого из следующего соотношения:

$$\Delta\gamma = \Delta\gamma_\beta + \Delta\gamma_t.$$

После чего рассчитывается получаемый угол атаки

$$i = \beta_{1к} + \Delta\gamma - \beta_1.$$

Решетки, удовлетворяющие условиям  $|i| < i^+$ , если  $i > 0$  и  $|i| < i^-$ , если  $i < 0$  и являются искомыми.

Дальнейший отбор решеток профилей из оставшихся в рассмотрении производится проектировщиком исходя из уровня коэффициента профильных потерь, оценка которого осуществляется по заданной приведенной скорости потока на выходе из решетки  $\lambda_2$ , или других параметров, определяющих, например, прочность проектируемой лопатки, возможность размещения в ней системы охлаждения и т.д.

### 1.3. Автоматизированная база данных METALL

АБД METALL содержит данные по материалам, применяемым для изготовления охлаждаемых лопаток газовых турбин. В число этих данных

входят: код в виде целого числа, под которым материал значится в БД и который используется в модуле TERM для указания используемых материалов; наименование материала и его плотность; массив температур, при которых получены представленные свойства материала; значения коэффициентов теплопроводности, линейного расширения, модуля упругости, удельной теплоемкости, значения предела длительной прочности, полученные при соответствующей температуре и при выдержке материала в течение 10000, 5000 и 1000 час, а также примечания.

АБД METALL предусматривает возможность просмотра БД и ее редактирования с режимами замены, вставки и удаления записей, характеризующих как отдельные свойства материала, так и материалы в целом.

#### **1.4. Программный модуль UPI**

Программный модуль UPI предназначен для расчета распределения скоростей потока на внешней границе пограничного слоя вдоль обвода турбинного профиля, а также для определения целого ряда параметров, таких как эффективный угол выхода потока из решетки, координата точки разветвления потока, геометрическая длина контура профиля и т.д. В основу UPI была положена методика и программа, разработанные для ЕС ЭВМ сотрудниками кафедры «Вычислительные методы и уравнения математической физики» Уральского политехнического института (УПИ) им. С.М.Кирова [2].

Согласно этой методике обтекание решетки несжимаемым потоком, получаемое в результате решения интегрального уравнения Фредгольма 2-го рода методом, представляющим собой комбинацию методов

конформных отображений и интегральных уравнений, корректируется системой эмпирических поправочных коэффициентов, учитывающих сжимаемость потока при  $0,38 \leq \lambda_2 \leq 1,15$ .

В процессе адаптации для персональных компьютеров IBM AT и с учетом требований применения в расчетах охлаждаемых лопаток газовых турбин программа УПИ была модифицирована и претерпела следующие изменения:

- исключена подпрограмма расчета пограничного слоя и коэффициента профильных потерь, которая, по нашему мнению, недостаточно точно осуществляет поиск границ участков с различными режимами течения в пограничном слое (имеются ввиду режимы ламинарный, переходный, турбулентный и отрыва пограничного слоя), а также не учитывает влияние повышенной турбулентности набегающего потока и других факторов на величину профильных потерь;

- уменьшено количество вводимых исходных данных и упрощена форма их представления;

- признано целесообразным проводить расчет только для одного режимного числа  $\lambda_2$  и для одного значения угла натекания потока  $\beta_1$ , а не для нескольких, как это предусматривает исходная программа;

- разработана подпрограмма вывода на экран монитора трех эпюр обтекания профиля: без учета сжимаемости и с учетом сжимаемости при заданной и критической (при которой на поверхности профиля скорость потока достигает значений местной скорости звука) приведенных скоростях потока на выходе из решетки.

С использованием программы UPI проведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными. Характерные распределения значений коэффициента статического давления  $C_p$  вдоль обводов профилей для некоторых охлаждаемых лопаток отечественных стационарных ГТУ показаны на рис. 1.6 - 1.8. Коэффициент статического

давления  $C_p$  определяется как [3, 4]

$$C_p = \frac{P_i - P_2}{\left( \frac{\rho_{2T} C_{2T}^2}{2} \right)} = \frac{1}{\lambda_{2T}^2} \frac{k+1}{k} \left( \frac{P_i}{P_2} - 1 \right) \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_{2T}^2 \right),$$

где  $P_i$  - статическое давление в  $i$ -той точке обвода профиля;

$P_2$  - среднее статическое давление потока за решеткой.

$\rho_{2T}$  - удельная плотность потока на выходе их решетки;

$C_{2T}$  - теоретическая скорость потока на выходе их решетки;

$\lambda_{2T}$  - приведенная скорость потока на выходе их решетки;

$k$  - показатель адиабаты.

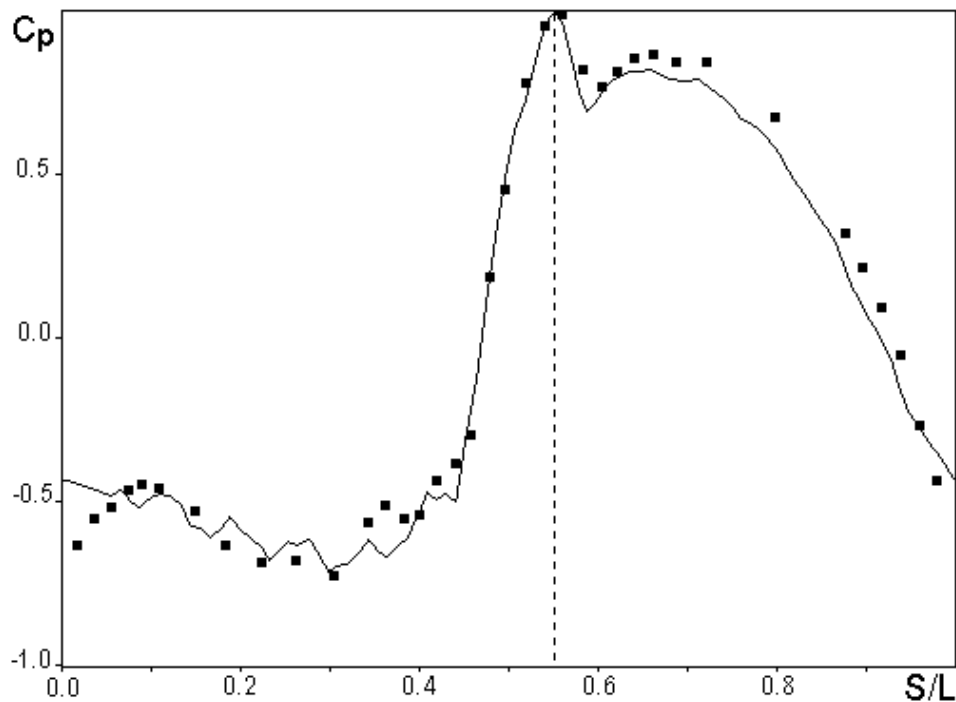


Рис. 1.6. Расчетное (—) и экспериментальное (■) распределение значений коэффициента давления  $C_p$  вдоль обвода профиля сопловой лопатки 1-й ступени турбины ГТК-25/ГТН-40 НЗЛ при  $\beta_1 = 90^\circ$  и  $\lambda_2 = 0,760$

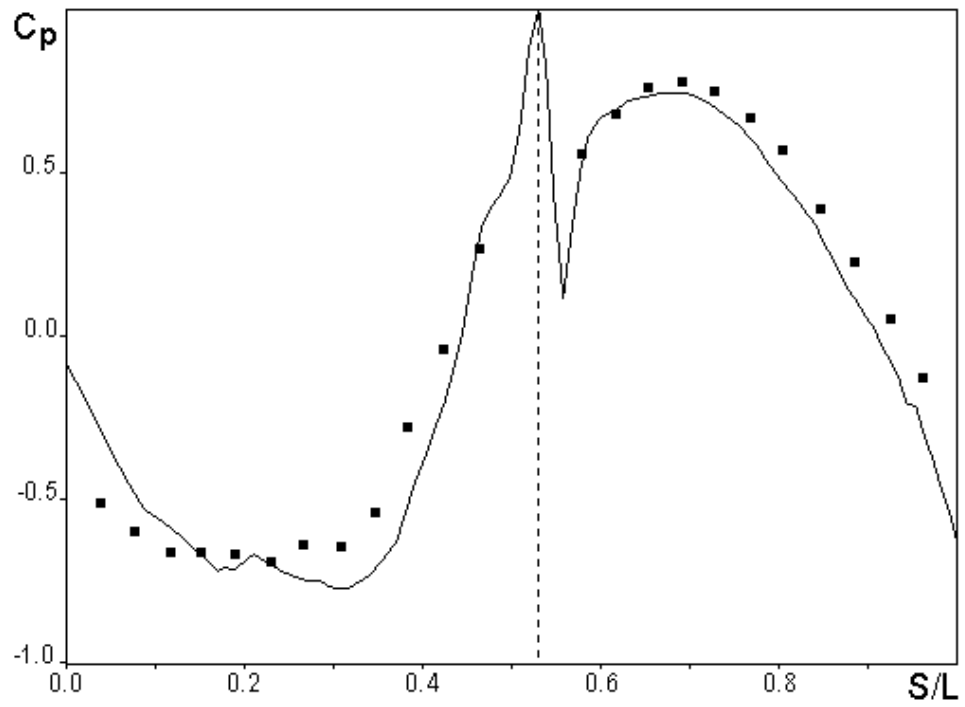


Рис. 1.7. Расчетное (—) и экспериментальное (■) распределение значений коэффициента давления  $C_p$  вдоль обвода профиля сопловой лопатки 2-й ступени турбины установки ГТЭ-150 ЛМЗ при  $\beta_1=96,4^\circ$  и  $\lambda_2=0,604$

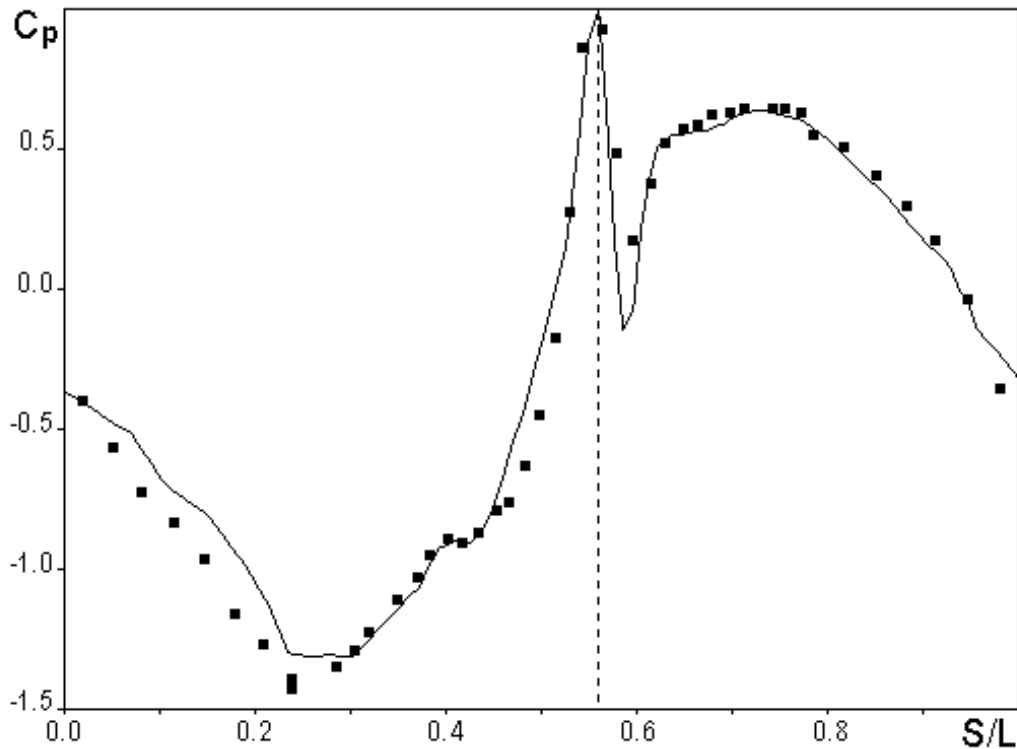


Рис. 1.8. Расчетное (—) и экспериментальное (■) распределение значений коэффициента давления  $C_p$  вдоль обвода профиля среднего сечения рабочей лопатки 1-й ступени турбины установки ГТЭ-150 ЛМЗ при  $\beta_1=60^\circ$  и  $\lambda_2=0,51$

Многочисленные обсчеты экспериментальных данных, а также графики на рис. 1.6 - 1.8, показывают, что программа UPI при дозвуковом обтекании решеток (при режимных числах  $\lambda_2 \leq 0.9 \dots 0.95$  в зависимости от конкретной геометрии решетки) дает результаты, согласующиеся с экспериментом с относительной погрешностью, не превышающей  $\approx 15-20$ ) % по  $C_p$  и  $\approx 10\%$  по  $\lambda$ . При больших значениях  $\lambda_2$  не только усиливается расхождение  $C_p$  с экспериментом, но и, что особенно нежелательно, наблюдается смещение координаты пиков скоростей. Поэтому, во избежание получения ошибочных результатов при расчете локальной теплоотдачи к лопатке со стороны газа расчетное исследование обтекания решетки необходимо дополнить экспериментальным.

## 1.5. Программный модуль ALFA

Модуль ALFA производит автоматическое определение границ имеющихся на профиле участков с различными режимами течения потока в пограничном слое (ламинарным, переходным и турбулентным, а также с отрывом пограничного слоя, точкой его обратного присоединения и участком последующей стабилизации течения в присоединившемся пограничном слое) и в пределах каждого участка - расчет локальных коэффициентов теплоотдачи.

Ниже в сокращенной форме приводятся основные зависимости, использованные при разработке модуля ALFA.

Координата начала перехода ламинарного режима течения в пограничном слое к турбулентному при обтекании выпуклой поверхности лопатки малотурбулизированным (со степенью турбулентности  $Tu \leq 1,5\%$ ) как сжимаемым, так и несжимаемым потоком, при  $\lambda_2 \leq 0,95-1,0$ , определяется по следующей зависимости для расчета числа Рейнольдса  $Re_{нп}^{**}$  в точке начала перехода [5]:

$$Re_{нп}^{**} = 163 + \exp \left( F(f) - F(f) Tu / 6.91 \right), \quad (1.1)$$

где

$$Re^{**} = \frac{U \delta^{**}}{\nu},$$

$U$  - скорость потока на внешней границе пограничного слоя;

$\nu$  - кинематическая вязкость;

$\delta^{**}$  - толщина потери импульса;



$$\delta^{**} = \int_0^{\delta} \frac{\rho u}{\rho_0 U} \left( 1 - \frac{u}{U} \right) dy ;$$

$\rho$ - плотность потока в пограничном слое;

$\rho_0$ - плотность потока на внешней границе пограничного слоя;

$u$  - скорость течения в пограничном слое на расстоянии  $y$  от стенки;

$\delta$  - толщина пограничного слоя;

$f$  - формпараметр пограничного слоя, определяемый по формуле:

$$f = \frac{\delta^{**2}}{\nu} \frac{dU}{dx} .$$

$$F(f) = 6.91 + 12.75f + 63.64f^2 .$$

Формула (1.1) справедлива при  $f < 0$ .

Точка с координатой на контуре профиля, в которой  $Re^{**} = Re^{**}_{нп}$  и будет точкой начала перехода.

При повышенных значениях степени турбулентности набегающего потока точка начала перехода смещается вверх по потоку и при  $Tu > 1,5\%$  определяется по графику (рис. 1.9) зависимости числа Рейнольдса, при котором происходит потеря устойчивости ламинарного пограничного слоя  $Re^{**}_{пу}$  от формпараметра  $f$ .

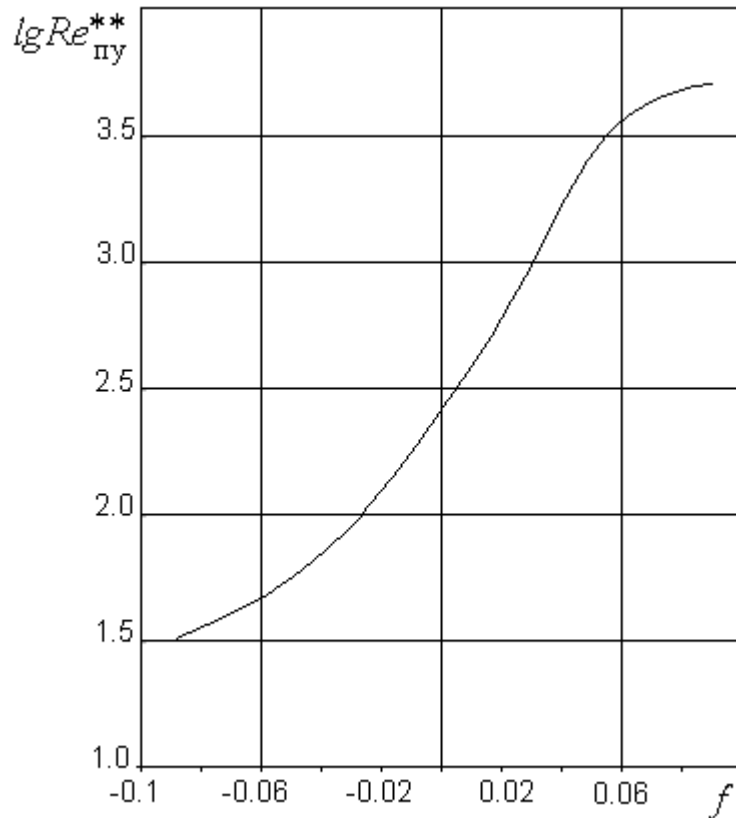


Рис. 1.9. График зависимости  $Re_{пу}^{**} = \varphi(f)$

В модуле ALFA для вогнутых сторон при  $f < 0$  начало перехода определяется по рекомендациям А.А.Дородницына и Л.Г.Лойцянского [6]:

$$\left( \frac{v}{U^2} \frac{dU}{dx} + \Gamma \right) Re_{нп}^{**2} = -0.089, \quad (1.2)$$

где  $Re_{нп}^{**}$  - число Рейнольдса в точках начала перехода;

$\Gamma$  - функция, зависящая от степени и масштаба турбулентности внешнего потока; в практических расчетах принимается  $\Gamma = -1.3 \cdot 10^{-7}$ .

Однако в связи с тем, что во всех имеющихся в распоряжении авторов экспериментах по исследованию локальной теплоотдачи со стороны газа на вогнутых сторонах отрыв ламинарного пограничного слоя наблюдался раньше начала его перехода к турбулентному режиму, зависимость (1.2) экспериментально подтвердить не удалось.

Координата конца перехода при  $Tu \leq 1,5\%$  рассчитывается по следующей зависимости из работы [7] для определения коэффициента продольной перемежаемости  $\gamma$

$$\gamma = 1 - \exp \left( -\Phi (x - x_k) \int_{x_k}^x \frac{1}{U} dx \right), \quad (1.3)$$

где

$$\Phi = 3U^3 Re_k^{-1.34} / (Bv)^2,$$

$$B = 60 + 4.68M_k^{1.92},$$

$x_k$  - координата точки начала перехода;

$M_k$  - число Маха в точке начала перехода.

Точка с координатой  $x$ , в которой коэффициент  $\gamma$  достигнет 1, будет искомой точкой конца переходной области.

При повышенных значениях степени турбулентности ( $Tu \leq 1,5\%$ ) конец переходной области определяется по параметру  $r$ , предложенному в работах [8, 9].

$$r = \frac{Re_{нп}}{Re_{кп}},$$

где  $Re_{нп}$  - значение числа Рейнольдса в точке начала перехода;

$Re_{кп}$  - значение числа Рейнольдса в точке конца перехода.

Величина параметра  $r$  определяется по экспериментально полученному графику, показанному на рис. 1.10, в зависимости от относительного минимального давления  $\bar{P}_m$  и типа эюры скорости.

$$\bar{P}_m = \frac{P_{\min}}{P_0^*},$$

где  $P_{\min}$  - статическое давление в точке минимума на эпюре давления  
ниже по течению точки начала перехода;

$P_0^*$  - давление торможения потока на входе.

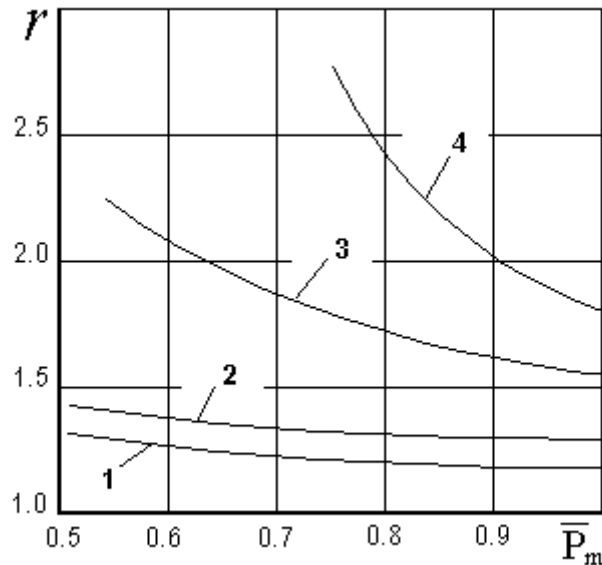


Рис. 1.10. Зависимость параметра  $f$  от относительной величины  
минимального давления  $\bar{P}_m$  и эпюры скорости:

- 1 - диффузорная выпуклая; 2 - диффузорная вогнутая;
- 3 - конфузорная выпуклая; 4 - конфузорная вогнутая.

Отрыв ламинарного пограничного слоя наступает при достижении  
формпараметром  $\Lambda$

$$\Lambda = \frac{\delta^2}{\nu} \frac{dU}{dx}.$$

значения, равного -12, чему соответствует, как показано в работе [10],  $f = -0.1567$ .

Турбулентный пограничный слой обладает большей устойчивостью к отрыву. В качестве критерия отрыва турбулентного пограничного слоя

используется формпараметр

$$H_{12} = \frac{\delta^*}{\delta^{**}},$$

где  $\delta^*$  - толщина вытеснения;

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \frac{\rho}{\rho_0} \left( 1 - \frac{u}{U} \right) dy ;$$

Отрыв наступает при  $H_{12} = H_{12.кр} = 1,87$  [10, 11, 12]. Этому значению  $H_{12}$ , как показано в работах [13, 2], соответствует критическое значение формпараметра  $f_T = f_{T.кр} = -0,01$ , где

$$f_T = \frac{dU}{dx} \frac{\delta^{**}}{U}.$$

Для определения  $\delta^{**}$  в модуле ALFA используется метод Кутателадзе-Леонтьева [12].

В качестве критерия, определяющего местоположение точки обратного присоединения оторвавшегося пограничного слоя, используется параметр  $\sigma$ , представляющий собой коэффициент восстановления давления.

$$\sigma = \frac{P_{\max} - P_{от}}{\left( \frac{\rho U^2}{2} \right)_{от}},$$

где  $P_{\max}$  - максимальное статическое давление на эпюре давлений ниже по потоку точки отрыва;

$P_{от}$  - статическое давление в точке отрыва;

$\rho$  и  $U$  - плотность и скорость потока соответственно в точке отрыва пограничного слоя.

При  $\sigma \leq 0,35$  возникает, так называемый, «короткий» отрыв, после

которого, независимо от значения степени турбулентности внешнего потока пограничный слой присоединяется почти сразу же за точкой отрыва и на эпюре обтекания отрыв «не виден».

При  $\sigma > 0,35$  и  $Tu \leq 1,5\%$  присоединение происходит в точке максимума давления или сразу же за ней на конфузормом участке эпюры скорости, а по мере увеличения  $Tu$  - точка присоединения приближается к точке отрыва.

При расчете локальной теплоотдачи о газа к профилям лопаток в качестве основы принят один из наиболее известных и хорошо зарекомендовавших себя на практике, так называемый, «метод ЦКТИ» [14, 15, 8].

«Метод ЦКТИ» предполагает использование отдельных полуэмпирических критериальных зависимостей, описывающих условия теплообмена для участков с различными режимами течения потока в пограничном слое.

На утолщенных входных кромках, характерных для охлаждаемых лопаток газовых турбин, внешний локальный теплообмен хорошо описывается следующей эмпирической зависимостью, предложенной в работе [16],

$$Nu_x = (0.49 - 0.51) k_{\text{вх. к р.}} Re_x^{0.5},$$

где  $k_{\text{вх. к р.}}$  - коэффициент интенсификации теплообмена, вызванной повышенной турбулентностью набегающего потока;

$$Re_x = \frac{Ux}{\nu};$$

$x$  - продольная координата, отсчитываемая от лобовой точки.

При  $1,0\% \leq Tu \leq 3,45\%$

$$k_{\text{вх. к р.}} = 1 + 0.1Tu^{1.4};$$

при  $Tu > 3.45 \%$

$$k_{\text{вх. к р.}} = 1 + 0.4Tu^{0.28}.$$

При расчете локальных коэффициентов теплоотдачи при обтекании профиля малотурбулизированным потоком с  $Tu < 1 \%$  на участках с ламинарным пограничным слоем, надежные результаты дает соотношение

$$Nu_x = \frac{A Re_x}{\left( \int_0^x \frac{U_x}{v_x} dx \right)^{0.5}}, \quad (1.4)$$

где  $A=0,297$ .

Для учета интенсификации теплообмена из-за повышенной турбулентности набегающего потока  $Tu$  на поверхностях лопаток, занятых ламинарным пограничным слоем, в работах завода-ВТУЗа [17, 18] были предложены зависимости, основанные на данных по распределению локальной турбулентности потока вдоль обводов профилей, полученных А.Ф. Слитенко и В.Б. Титовым [19, 20, 21]. Эти зависимости удовлетворительно согласовывались с экспериментальными данными только для сопловых, но не рабочих, решеток профилей.

В программе ALFA для учета интенсификации теплообмена при ламинарном режиме течения в пограничном слое,  $K_{\text{лам}}$ , используются следующие формулы из работы [16]:

для выпуклых поверхностей лопаток

$$\text{при } (Tu \cdot \lambda_2) < 0.2 \quad K_{\text{лам}}=1,$$

$$\text{при } (Tu \cdot \lambda_2) \geq 0.2 \quad K_{\text{лам}}=1+0,67(Tu \cdot \lambda_2)^{0.5};$$

для вогнутых поверхностей

$$\text{при } (Tu \cdot \lambda_2) < 0,2 \quad K_{\text{лам}}=1,$$

$$\text{при } 0,2 \leq (Tu \cdot \lambda_2) \leq 30 \quad K_{\text{лам}}=1+(Tu \cdot \lambda_2)^{0.5}.$$

Значения локальных коэффициентов теплоотдачи при повышенной турбулентности определяются из соотношения:

$$Nu_x^{Tu} = K_{\text{лам}} Nu_x, \quad (1.5)$$

где  $Nu_x$  - числа Нуссельта полученные по формуле (1.4).

Теплоотдача на участках профилей, занятых турбулентным пограничным слоем, хорошо описывается используемой в «методе ЦКТИ» соответствующей зависимостью при допущении, что турбулентный пограничный слой начинается в лобовой точке, т.е. с точки с координатой  $x=0$ . Строго говоря, это допущение несправедливо, однако сопоставление многочисленных экспериментальных и расчетных данных свидетельствует о том, что с помощью формулы

$$Nu_x = \frac{0.0255 Re_x}{\left( \int_0^x \frac{U_x}{v_x} dx \right)^{0.2}}, \quad (1.6)$$

можно получать достоверные значения локальных коэффициентов теплоотдачи для турбулентных пограничных слоев при различной степени турбулентности набегающего потока в дозвуковом диапазоне изменения чисел  $\lambda_2$ .

Условия теплообмена для переходной области пограничного слоя могут быть получены путем линейной интерполяции между значениями чисел  $Nu_x$  в точках конца ламинарного и начала турбулентного пограничных слоев. Упомянутые числа  $Nu_x$  рассчитываются соответственно по формулам (1.6) в точке начала перехода и (1.7) в точке конца перехода.

На участках профилей с локальным отрывом пограничного слоя на вогнутых поверхностях в обратно присоединившемся пограничном слое при  $\lambda_2=0,2\dots 1,1$ ,  $Re_2=(0,3\dots 4,5)\cdot 10^6$  и  $Tu=0,5-15\%$  используется



полученная авторами данной работы зависимость вида:

$$Nu_{0T} = 6 (1.5 - \lambda_2) Re^{0.32 + 0.22\lambda_2} \quad (1.7)$$

На рис. 1.11 - 1.14 приведено сопоставление экспериментальных и рассчитанных по программе ALFA эпюр коэффициентов теплоотдачи,  $\alpha_T$ , для некоторых охлаждаемых лопаток стационарных ГТУ.

Графики на рис.1.11 - 1.14 свидетельствуют об удовлетворительном совпадении экспериментальных и рассчитанных с помощью модуля ALFA локальных значений коэффициентов теплоотдачи в решетках профилей с различными геометрическими параметрами, как при безотрывном обтекании (рис. 1.11, 1.12), так и с отрывом пограничного слоя на вогнутых поверхностях (рис. 1.13, 1.14).

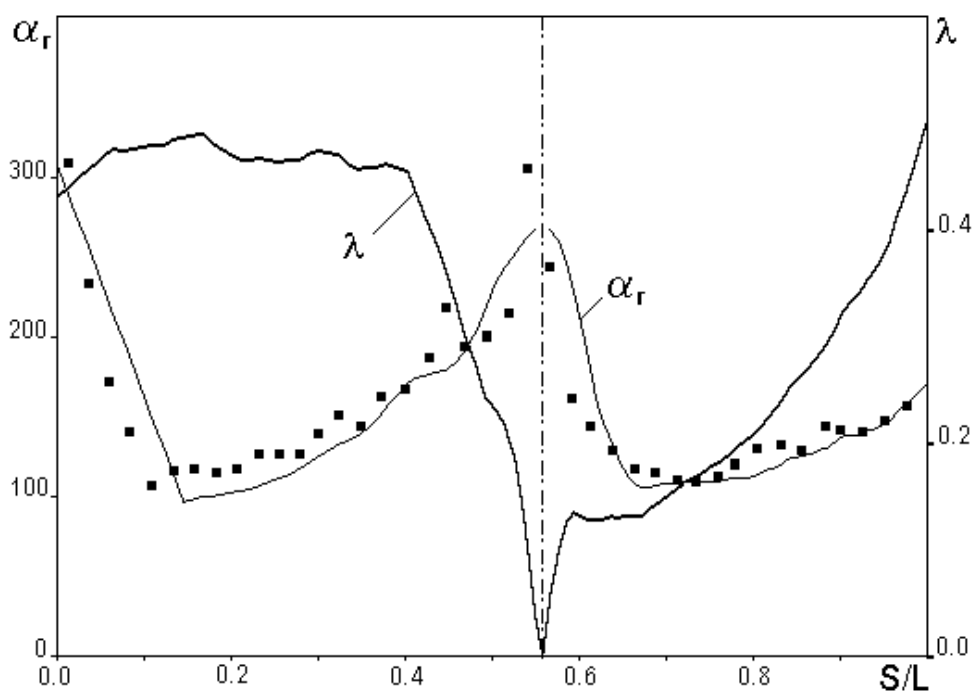


Рис. 1.11. Распределение коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_T$  и приведенных скоростей потока  $\lambda$  вдоль обвода профиля сопловой лопатки 1-й ступени турбины ГТН-16/ГТН-25 УТМЗ при  $\lambda_2 = 0,444$  и  $Tu = 0,5\%$ .

— - расчет; ■ - эксперимент

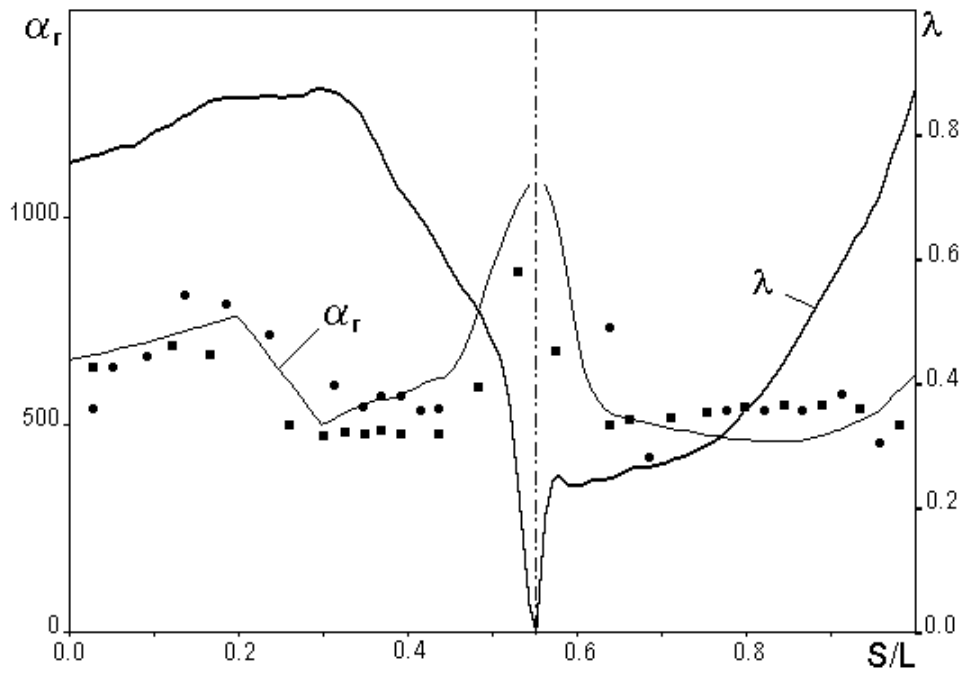


Рис. 1.12. Распределение коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_T$  и приведенных скоростей потока  $\lambda$  вдоль обвода профиля сопловой лопатки 1-й ступени турбины ГТЭ-150 ЛМЗ при  $\lambda_2 = 0,7\tilde{6}$  и  $Tu = 5,5\%$ .

— - расчет; ■ - эксперимент (вариант 1); •- эксперимент (вариант 2)

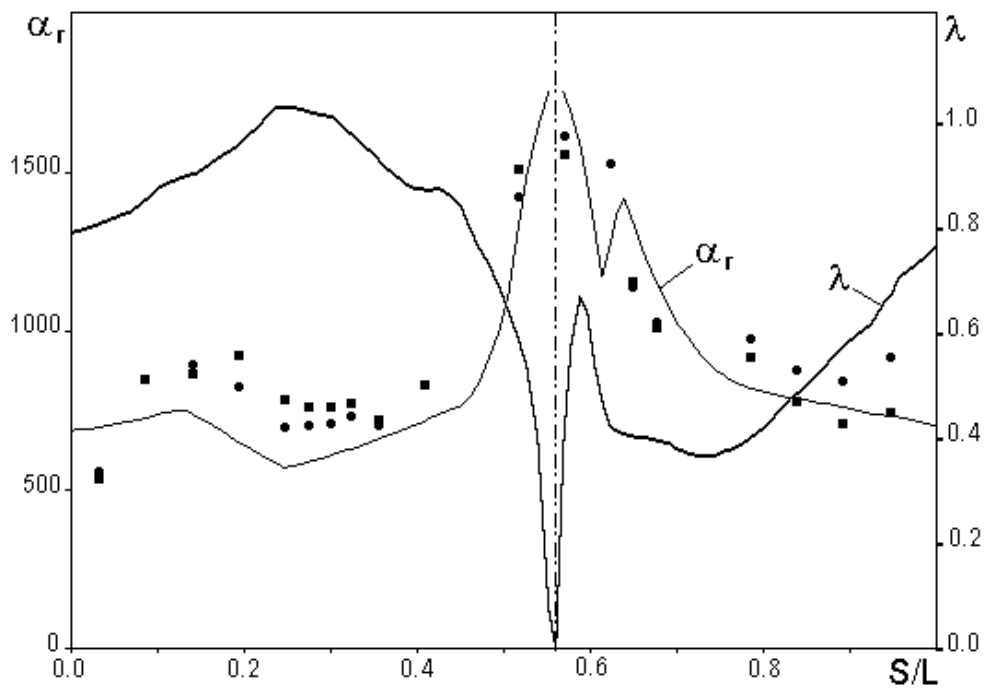


Рис. 1.13. Распределение коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_g$  и приведенных скоростей потока  $\lambda$  вдоль обвода профиля рабочей лопатки 1-й ступени турбины ГТЭ-150 ЛМЗ при  $\beta_1 = 60^\circ$  и  $Tu = 6,0\%$ .

— - расчет при  $\lambda_2 = 0,76$ ; ■ - эксперимент при  $\lambda_2 = 0,76$ ;  
 □ - эксперимент при  $\lambda_2 = 0,756$

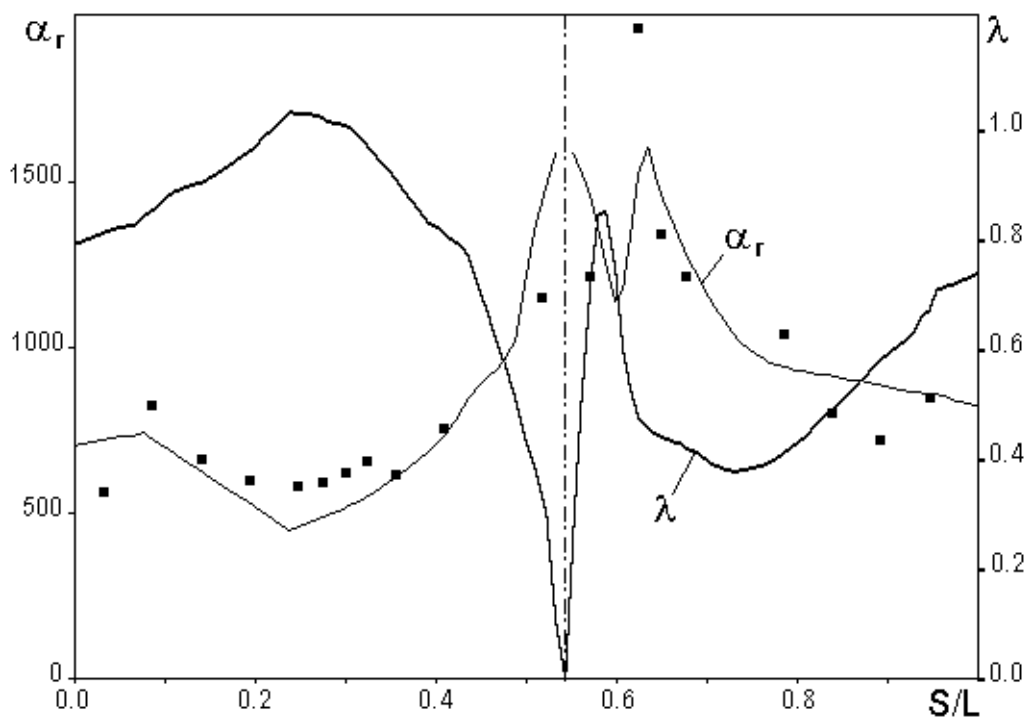


Рис. 1.14. Распределение коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_g$  и приведенных скоростей потока  $\lambda$  вдоль обвода профиля рабочей лопатки 1-й ступени турбины ГТЭ-150 ЛМЗ при  $\beta_1 = 80^\circ$ ,  $\lambda_2 = 0,76$  и  $Tu = 5.4 \%$ .  
 — - расчет; ■ - эксперимент

## 1.6. Программный модуль GIDRA

Расчет основных параметров охладителя (давлений, расходов, температур, коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи) в системе охлаждения лопатки начинается с составления структурной модели системы охлаждения, называемой эквивалентной расчетной гидравлической схемой (сетью).

При составлении эквивалентной гидравлической схемы весь тракт течения охладителя делится на множество взаимосвязанных участков - элементарных типовых элементов (каналов), для каждого из которых есть

возможность однозначно определить значения коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи в зависимости от геометрических параметров канала и режима течения охладителя в нем. Места соединения типовых элементов в эквивалентной гидравлической схеме заменяются узловыми точками, в которых течение, слияние и разделение потока охладителя предположительно происходит без изменения давления [22, 3]. Типовые элементы и узловые точки соединяют между собой в той же последовательности и порядке, что и участки системы охлаждения. Таким образом, эквивалентную гидравлическую схему можно рассматривать как граф, состоящий из ветвей и узлов.

Как показывает практика, построение эквивалентной гидравлической схемы должно увязываться с описанием конструкции охлаждаемой лопатки при расчете ее температурного состояния, например, при разбивке ее на макроэлементы (зоны) в случае использования метода конечных элементов, или при выборе сечения профильной части лопатки для расчета двумерного температурного поля при продольном течении охладителя, что имеет место, например, в лопатках с канальными или петлевыми схемами охлаждения.

Кроме того, на точность расчета температурного поля будет оказывать влияние количество типовых элементов в эквивалентной гидравлической схеме, определяющее степень подробности задания граничных условий теплообмена (значений температур и коэффициентов теплоотдачи) со стороны охладителя.

При расчете параметров охладителя в системе охлаждения считаются известными все геометрические размеры охлаждающего тракта, вид охладителя (его теплофизические свойства), а также полное давление и температура на входе и статическое давление внешней среды на выходе из системы охлаждения.

Течение охладителя в разветвленных сетях в соответствии с первым

законом Кирхгофа описывается следующей системой уравнений  $n$ -ного порядка:

$$f_i = \sum_{j=1}^{j=m_i} G_{i-j} = 0, \quad i = 1, 2, 3 \dots n, \quad (1.8)$$

где  $f_i$  функция, описывающая баланс расходов во внутренних узлах (узлах с неизвестными давлениями) гидравлической сети;

$i, j$  - номера узлов гидравлической сети;

$G_{i-j}$  - расход охладителя на ветке  $i-j$ ;

$n$  - число внутренних узлов гидравлической сети;

$m_i$  - количество веток, присоединенных к  $i$ -тому узлу.

Расход охладителя  $G_{i-j}$  определяется из соотношения:

$$G_{i-j} = \text{sign}(P_i^* - P_j^* \pm \Delta P_{\text{цс}}^*) K_{i-j} \sqrt{P_i^* - P_j^* \pm \Delta P_{\text{цс}}^*},$$

где  $K_{i-j}$  - коэффициент гидравлической проводимости ветки  $i-j$ ;

$$K_{i-j} = \sqrt{\frac{2 F_{i-j}^2 \rho_{i-j}}{\zeta_{i-j}}};$$

$P_i^*$ ,  $P_j^*$  - полные давления в узлах с номерами  $i$  и  $j$ , соответственно;

$\Delta P_{\text{цс}}^*$  - величина изменения полного давления ветке  $i-j$ , вызванная действием центробежной силы в случае вращения канала;

$F_{i-j}$  - средняя площадь поперечного сечения канала на ветке  $i-j$ ;

$\rho_{i-j}$  - плотность потока охладителя на ветке  $i-j$ , рассчитанная по статическим параметрам;

$\zeta_{i-j}$  - суммарный коэффициент гидравлического сопротивления ветки  $i-j$ .

Величина  $\Delta P_{\text{цс}}^*$  определяется по формуле:

$$\Delta P_{\text{цс}}^* = \rho_{i-j} \omega^2 \frac{|r_i^2 - r_j^2|}{2},$$

где  $\omega$  - угловая скорость вращения канала с охладителем;

$r_i$  и  $r_j$  - радиусы, на которых расположены  $i$ -тый и  $j$ -тый узлы, соответственно.

Величина  $\Delta P_{\text{цс}}^*$  считается положительной, если поток центробежной силой отбрасывается от узла  $i$  к узлу  $j$ , то есть  $r_i < r_j$ .

Статическая плотность потока охладителя на ветке  $i-j$  рассчитывается по формуле:

$$\rho_{i-j} = \frac{P_i + P_j}{2RT_{i-j}},$$

где  $P_i$  и  $P_j$  - величины статического давления потока в узлах  $i$  и  $j$ , соответственно;

$R$  - газовая постоянная;

$T_{i-j}$  - среднее значение статической температуры потока на ветке  $i-j$ .

Охладитель при течении в тракте системы охлаждения нагревается. Расчет нагрева охладителя может быть произведен только после предварительного построения векторного графа, показывающего направление течения охладителя в гидравлической сети, и должен проследивать его движение от входа в систему охлаждения по всему тракту к выходу.

Статическая температура охладителя на выходе из канала рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{вых}} = T_{\text{ст } i-j} - \left( T_{\text{ст } i-j} - T_{\text{вх}} \right) e^{-\gamma l}.$$

где  $T_{\text{ст } i-j}$  - средняя температура стенки (поверхности) канала, омываемой

охладителем;

$T_{\text{вх}}$  - температура охладителя на входе в канал;

$\gamma$  - показатель степени, определяемый из соотношения:

$$\gamma = \frac{\alpha_{i-j} \Pi_{\text{T}}}{G_{i-j} C_p};$$

$\alpha_{i-j}$  - средний коэффициент теплоотдачи в канале;

$\Pi_{\text{T}}$  - периметр поверхности канала, участвующей в теплообмене;

$C_p$  - удельная изобарная теплоемкость охладителя при средней температуре в канале;

$l$  - длина канала.

Средняя статическая температура охладителя в канале определяется по формуле:

$$T_{i-j} = T_{\text{с т } i-j} - \left( T_{\text{с т } i-j} - T_{\text{вх}} \right) \frac{1 - e^{-\gamma l}}{\gamma l}.$$

В узлах, где происходит слияние охладителя из нескольких ветвей, предположительно, устанавливается среднемассовая температура смешивающихся потоков.

Повышение температуры охладителя оказывает существенное влияние на его теплофизические характеристики, расход, числа Рейнольдса, коэффициенты гидравлического сопротивления и теплоотдачи. Это влияние в явном виде учесть практически невозможно. Поэтому вычислительный процесс определения параметров охладителя (давлений, расходов, коэффициентов гидравлического сопротивления, теплоотдачи и температур) в элементах системы охлаждения по описанным выше зависимостям должен быть построен по итерационной схеме, один из возможных вариантов которой показан на рис. 1.15.

При наличии гидравлического сопротивления и подогрева, что имеет



место в реальных системах охлаждения, скорость охладителя при течении его в канале, как известно, возрастает [24, 25]. Поэтому не исключена возможность (и практика проектирования систем охлаждения лопаток газовых турбин это подтверждает), что скорость потока на выходе из канала может достичь значений местной скорости звука, а расход - своего максимального значения, дальнейшее увеличение которого, если не переходить в область сверхзвуковых течений, невозможно. Другими словами, система охлаждения на некоторых участках своего тракта может быть «заперта».

Параметром, показывающим наличие «запираания» потока, может служить приведенная скорость  $\lambda_2$  (или число Маха  $M_2$ ), рассчитанная по параметрам потока на выходе из канала.

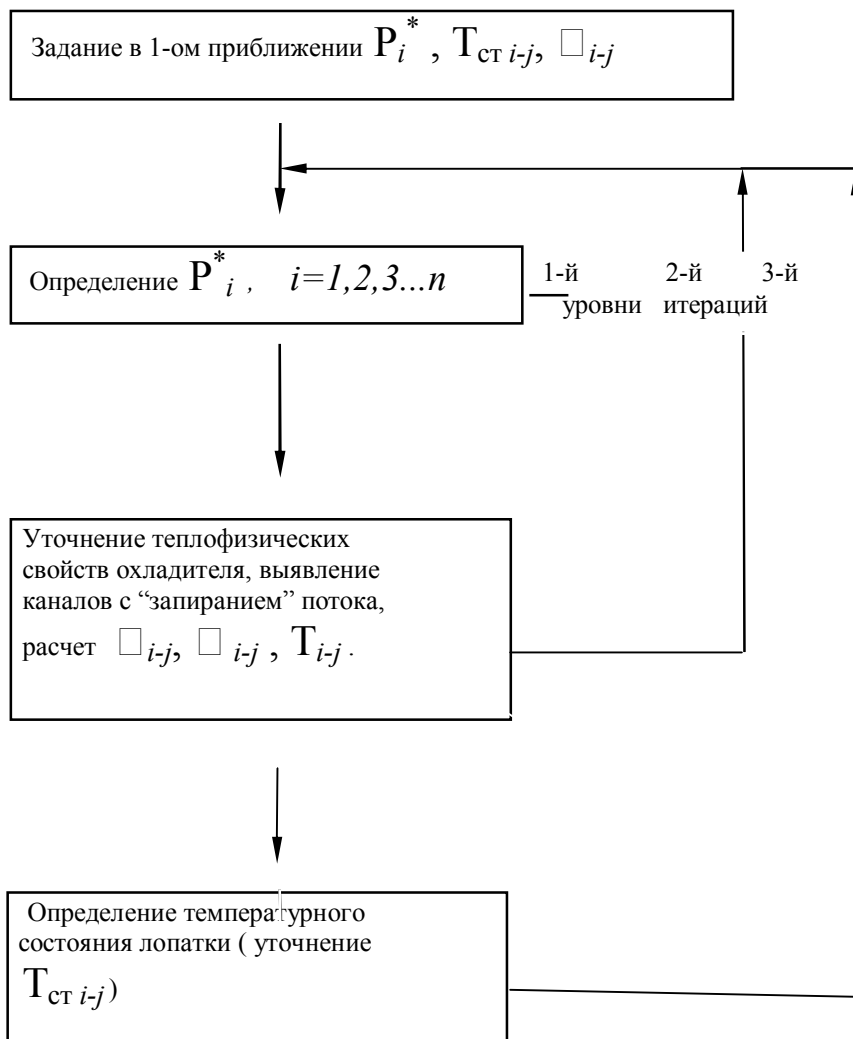


Рис. 1.15. Итерационная схема вычислительного процесса по определению параметров охладителя в системе охлаждения

$$\lambda_2 = \frac{C_2}{C_{кр}}$$

где  $C_2$  - скорость потока охладителя на выходе из канала, определяемая из уравнения расхода:

$$C_2 = \frac{G_{i-j}}{F_{i-j} \rho_2};$$

$\rho_2$  - статическая плотность охладителя на выходе из канала;

$C_{кр}$  - критическая скорость потока охладителя;

$$C_{к р} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} R T_2^*},$$

$k$  - показатель адиабаты;

$R$  - газовая постоянная;

$T_2^*$  - полная температура охладителя на выходе из канала.

Так как на выходе из канала известны только значения таких параметров охладителя, как статическая температура  $T_{\text{вых}}$ , полное давление  $P_i^*$  и расход  $G_{i-j}$ , то совершенно очевидно, что расчет  $\lambda_2$  может быть осуществлен только с использованием численных методов.

Если окажется, что  $\lambda_2 \geq 1,0$ , то необходимо не только определить такой расход, который имел бы место при  $\lambda_2 = 1,0$ , но и зафиксировать его для данного канала. Более того, при этом расходе должны быть рассчитаны параметры охладителя в характерном сечении канала (обычно это среднее сечение), для которого получены используемые зависимости по расчету коэффициента гидравлического сопротивления  $\zeta_{i-j}$ .

Необходимость в постоянном контроле каналов на наличие «запирания» потока ставит под сомнение возможность объединения нескольких разнородных (различного типа и размеров проходного сечения) последовательно или параллельно расположенных каналов в один фиктивный, что иногда делается с целью упрощения эквивалентной гидравлической схемы, уменьшения порядка системы уравнений (1.8) и сокращения временных затрат на ее решение.

Для расчета коэффициентов гидравлических сопротивлений и теплоотдачи в элементах систем охлаждения лопаток газовых турбин использованы обобщенные данные работ [22, 23, 26, 27, 28, 29]. Конкретные зависимости по расчету коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи, которые, по мнению авторов, наиболее

точно моделируют реальные процессы в отдельных элементах типовых каналов систем охлаждения лопаток газовых турбин, приведены в работе [30].

Модуль (программа) GIDRA по расчету параметров охладителя (давлений, расходов, коэффициентов теплоотдачи и температур) в элементах систем охлаждения лопаток газовых турбин написан на языке программирования Фортран 77 (Microsoft FORTRAN Version 5.10) и функционирует на персональных компьютерах IBM AT с математическим сопроцессором в среде операционной системы MS-DOS.

Описываемый модуль имеет целый ряд особенностей, которые следует учитывать при оценке его возможностей, ограничений, задаваемых исходных данных и получаемых результатов, степени удобства пользовательского интерфейса и т.д.

Из числа наиболее значимых следует указать следующие особенности:

- в качестве охладителя может использоваться как сухой воздух, так и перегретый пар;

- обеспечивается сходимость с заданной степенью точности по значениям давлений, расходов, теплофизических свойств охладителя, коэффициентов гидравлических сопротивлений и теплоотдачи, а также температур в узлах и на ветвях гидравлической сети (в данной версии программы баланс расходов в узлах обеспечивается с точностью до 0,001 кг/с и при необходимости может быть изменен);

- моделируется так называемый эффект «запирания» по расходу, который наблюдается при достижении потоком на выходе из какого-либо канала критической скорости (местной скорости звука); таким образом, гидравлическая характеристика каждого канала и всей системы охлаждения в целом качественно описывается зависимостью, показанной на рис. 1.16;

- на сложность и структуру гидравлической схемы не накладывается никаких ограничений (вплоть до схемы в виде одной ветки с известными давлениями на концах) за исключением количественных, таких, например, как максимальное число узлов (200) или веток (300);

- допускается совершенно произвольная нумерация узлов с использованием любых целых чисел от 1 до 200 включительно, что делает удобным описание и последующую модификацию (усложнение или упрощение) рассчитываемых гидравлических схем;

- применяется специальная система считывания данных из входных файлов, позволяющая произвольно располагать в них числовые значения параметров каналов и снабжать их поясняющими комментариями также произвольно и в неограниченном количестве с соблюдением лишь определенной очередности вводимых чисел, что существенно облегчает подготовку исходных данных;

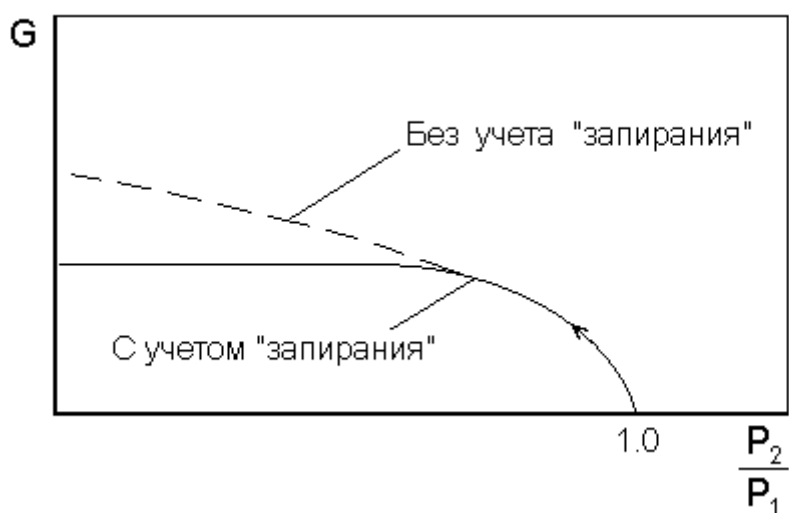


Рис. 1.16. Расходная характеристика, моделируемая программой GIDRA

- модуль контролирует все принятые в нем ограничения и в случае их нарушений выводит соответствующие диагностирующие сообщения, например, при «опрокидывании» системы охлаждения, при

непреднамеренной попытке использовать для охлаждения влажный пар или воду и т.д., повышая, таким образом, степень достоверности получаемых результатов;

- при моделировании системы охлаждения допускается использование не более 50 разнотипных каналов. Программа, укомплектованная разработчиком, содержит 15 подпрограмм по расчету значений коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи в наиболее характерных для систем охлаждения лопаток газовых турбин каналах, которые приведены в табл. 1.3. Кроме того, программа содержит 35 подпрограмм-«пустышек» (номера каналов 16 - 50), которые пользователь с соблюдением несложных правил без привлечения разработчика может заполнить конкретным содержанием по своему усмотрению. Понятно, что замене может быть подвержен и набор подпрограмм предлагаемый разработчиком.

Таким образом, пользователю предоставляется возможность не только создавать и совершенствовать свои собственные библиотеки подпрограмм по расчету значений коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи, но и расширять сферу применения программы GIDRA за пределы систем охлаждения лопаток газовых турбин.

Таблица 1.3

## Типовые каналы, предусмотренные в программе GIDRA

Номер канала	Описание канала
1	Гладкий канал круглого сечения
2	Плоский гладкий канал прямоугольного сечения
3	Гладкий канал поперечного сечения неправильной формы
4	Прямоугольный канал, расположенный между дефлектором и лопаткой с одним рядом отверстий для душирования на стенке дефлектора или без него
5	Прямоугольный канал, расположенный между дефлектором и лопаткой с несколькими рядами отверстий для душирования на стенке дефлектора
6	Канал, перегородженный столбиками-турбулизаторами, расположенными в шахматном порядке
7	Канал, перегородженный столбиками-турбулизаторами, расположенными в коридорном порядке
8	Канал, представляющий собой круглые отверстия в дефлекторе для выхода струй (кроме района входной кромки)
9	Канал, описывающий внутреннюю полость входной кромки лопатки, омываемой одним рядом плоских прямоугольных струй
10	Канал, описывающий внутреннюю полость входной кромки лопатки, омываемой одним рядом круглых струй
11	Сложный прямоугольный канал с внезапным расширением
12	Сложный прямоугольный канал с внезапным сужением
13	Канал поперечного сечения произвольной формы с задаваемым коэффициентом гидравлического сопротивления
14	Канал круглый, оребренный по периметру цилиндрическими кольцами
15	Канал поперечного сечения неправильной формы, оребренный по всему периметру или только по его части

Правила, которыми следует руководствоваться для практической

реализации этой возможности, подробно рассмотрены в работе [30].

Сопоставление экспериментальных и расчетных расходов охладителя осуществляется в виде графика зависимости  $G_{\text{эксп}} = f(G_{\text{расч}})$ , выводимого на монитор, а при необходимости - в графический файл типа .PCX или на принтер.

На рис. 1.17 - 1.19 показаны результирующие графики  $G_{\text{эксп}} = f(G_{\text{расч}})$  для экспериментальных сопловых лопаток 1-х ступеней турбин установок ГТК-25/ГТН-40 НЗЛ, ГТГ-6 завода «Экономайзер» и ГТЭ-150 ЛМЗ.

Графики на рис. 1.17 - 1.19 показывают, что программа GIDRA позволяет достаточно уверенно производить расчет расходов охладителя с относительной погрешностью по отношению к эксперименту, до  $\pm 20\%$ , что для подобного рода экспериментов и расчетов можно считать вполне удовлетворительным.

Порядок подготовки исходных данных для работы с модулем GIDRA будет рассмотрены в Главе 2 настоящей монографии.

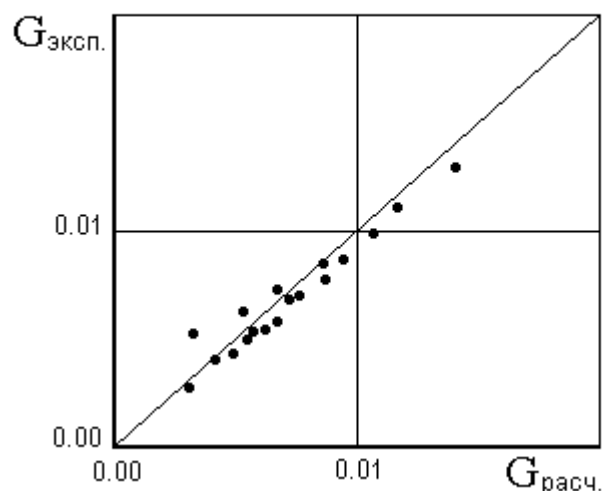


Рис. 1.17. График зависимости  $G_{\text{эксп}} = f(G_{\text{расч}})$  для экспериментальной сопловой лопатки 1-й ступени турбины установки ГТК-25/ГТН-40 НЗЛ



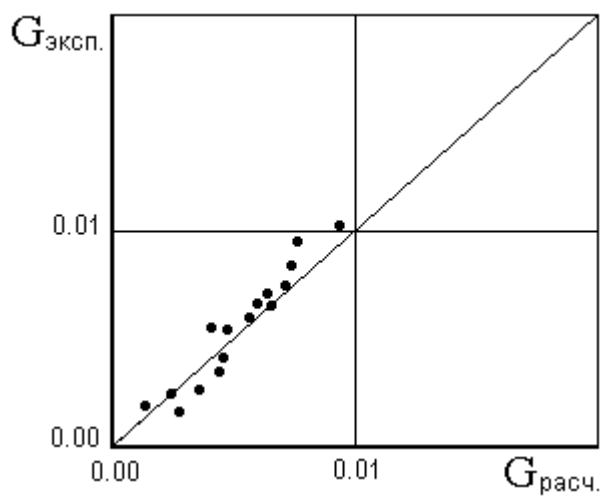


Рис. 1.18. График зависимости  $G_{\text{эксп}} = f(G_{\text{расч}})$  для экспериментальной сопловой лопатки 1-й ступени турбины установки ГТГ-6 завода «Экономайзер»

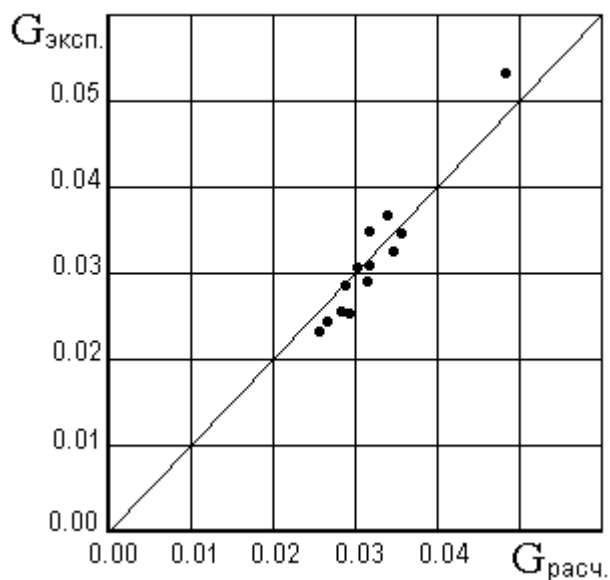


Рис. 1.19. График зависимости  $G_{\text{эксп}} = f(G_{\text{расч}})$  для экспериментальной сопловой лопатки 1-й ступени турбины установки ГТЭ-150 ЛМЗ (эксперимент ВТИ им. Дзержинского)

## 1.7. Программный модуль TERM

TERM предназначен для расчета двумерных стационарных температурных полей, возникающих в сечениях охлаждаемых лопаток газовых турбин.

Задача стационарной теплопроводности для двумерного случая без источников и стоков тепла, как известно [31], описывается следующим дифференциальным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0$$

с граничными условиями 3-го рода, соответствующими закону Ньютона:

$$\alpha (T - T_{\infty}) = - \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right),$$

где  $T$  - температура на площади  $F$ ;

$\lambda_x$  и  $\lambda_y$  - коэффициенты теплопроводности материала в направлении координатных осей  $x$  и  $y$ ;

$\alpha$  - коэффициент теплоотдачи на поверхности  $S$ ;

$T_{\infty}$  - температура окружающей среды;

$n_x$  и  $n_y$  - направляющие косинусы внешней нормали к поверхности  $S$ .

Решение дифференциального уравнения теплопроводности в программе TERM производится методом конечных элементов (МКЭ), который в настоящее время получил широкое распространение, достаточно глубокое развитие и всестороннее исчерпывающее освещение в литературе [32-35].

В вариационной постановке, что и предусматривает МКЭ, решение приведенного выше дифференциального уравнения сводится к минимизации следующего функционала:

$$\chi = \frac{1}{2} \int_F \left( \lambda_x \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right) dF + \int_S \alpha \left( \frac{1}{2} T - T_\infty \right) T dS .$$

Задача минимизации функционала  $\chi$  легко осуществляется, если аппроксимировать температуру  $T$  дискретной моделью на множестве некоторого числа конечных элементов (КЭ) различного типа, покрывающих рассматриваемую площадь.

В программе TERM используются треугольные КЭ.

Расчет температурного поля производится для разнородных, имеющих разные теплофизические свойства, изотропных материалов с учетом зависимости коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от температуры  $T$ . Конкретный вид зависимости  $\lambda(T)$  определяется теми табличными данными по теплофизическим параметрам, которые имеются в АБД METALL по используемым материалам.

Для оперативного контроля за вычислительным процессом программа TERM выводит на монитор компьютера геометрическую модель рассчитываемой лопатки вначале с разбивкой ее на макроэлементы (зоны) с цветовым выделением сторон, граничащих с газом и охладителем, а затем с разбивкой на КЭ.

На рис. 1.20 приведен пример визуального контроля описания геометрии и задания граничных условий теплообмена для среднего сечения рабочей лопатки 1-й ступени турбины установки ГТЭ-150 ЛМЗ, а на рис. 1.21 - результаты генерации КЭ в сечении той же лопатки. Подобная визуализация рассчитываемой конструкции позволяет своевременно обнаружить и откорректировать грубые ошибки в описании геометрии лопатки и задании граничных условий теплообмена.

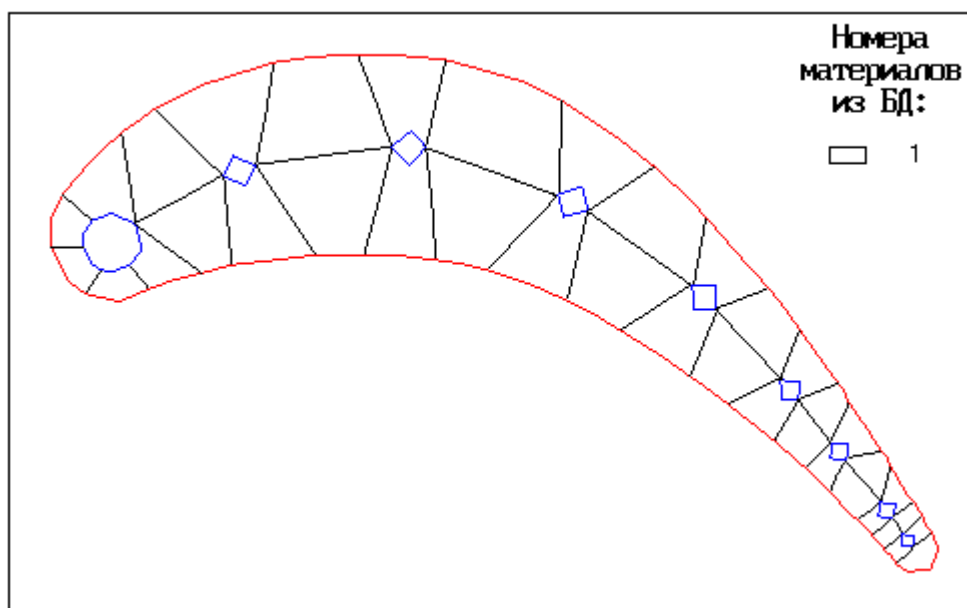


Рис. 1.20. Визуальный контроль описания геометрии сечения лопатки и задания граничных условий теплообмена

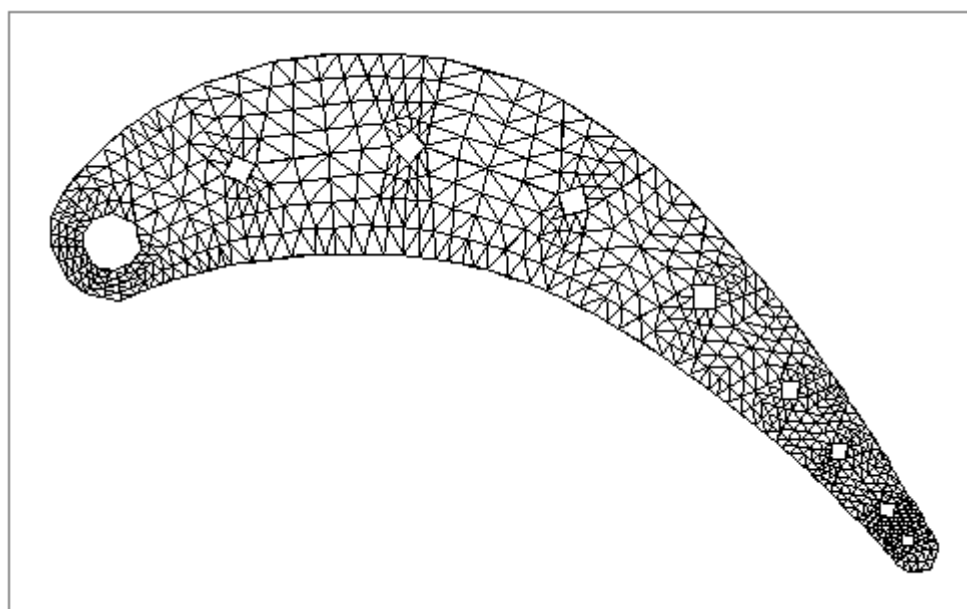


Рис. 1.21. Генерация КЭ в сечении лопатки

Приемлемая на сегодняшний день точность расчета температурных

полей в сечении лопатки может быть достигнута при количестве температур, насчитывающих сотни и тысячи значений. Если учитывать привязку температур в точках к их координатам, то становится очевидным, что подобного размера массивы чисел можно проанализировать либо только специальными автоматическими методами, либо представляя данные в графической форме. В программе TERM в качестве основной принята графическая форма, которая сочетается с выводом результатов автоматического анализа температурных полей (например, значений температур на границах сечения, в точках, где температуры превышают максимально допускаемые значения) в текстовый файл.

На рис. 1.22 - 1.24 показаны примеры генерируемых программой TERM изображений, полученных для рабочей лопатки 1-й ступени турбины ГТЭ-150 ЛМЗ с канальной системой охлаждения, и которые автоматически заносятся в базу графических файлов комплекса.

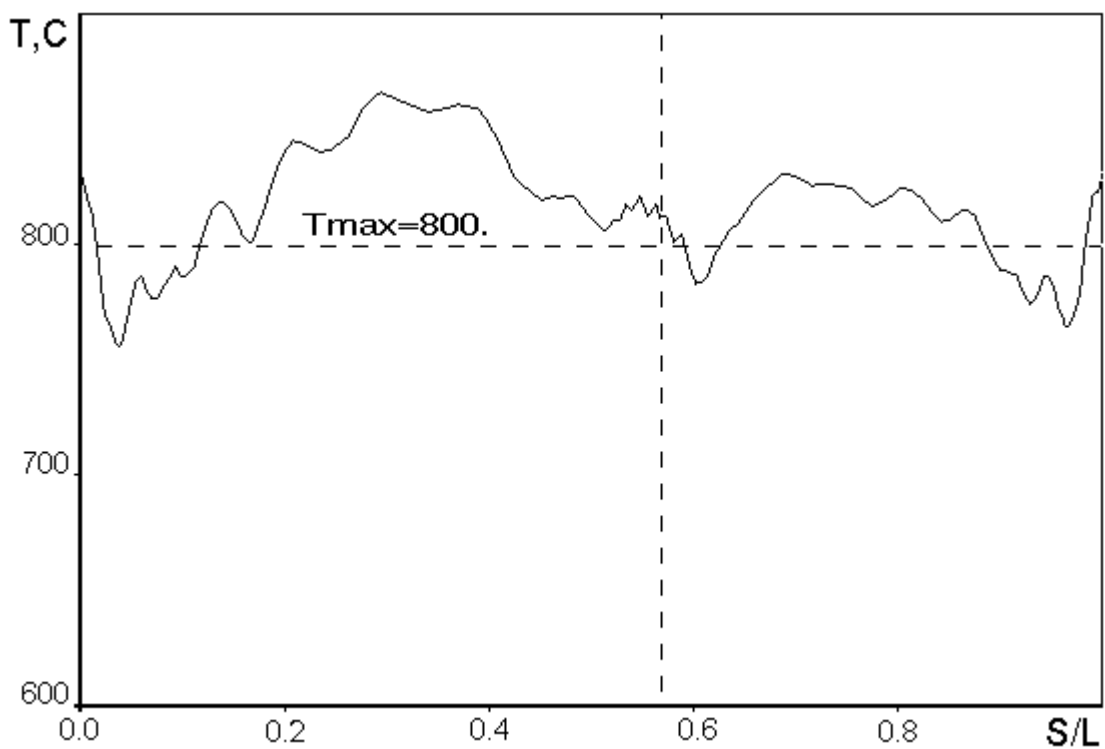


Рис. 1.22. График распределения температуры вдоль наружного обвода профиля

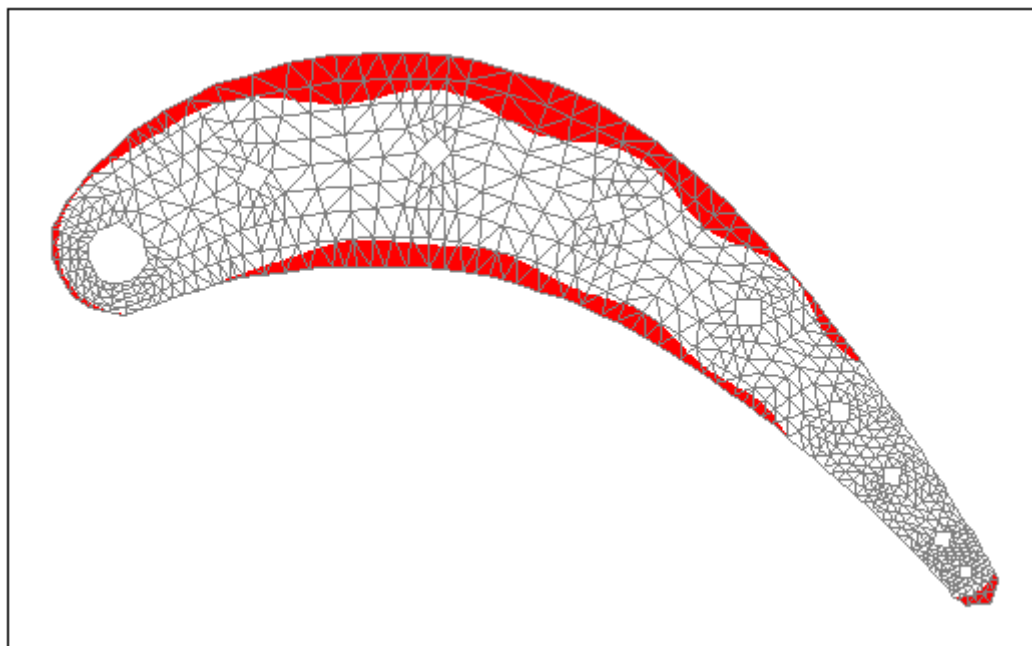


Рис. 1.23. Области сечения лопатки, в которых температура превышает некоторое заданное значение

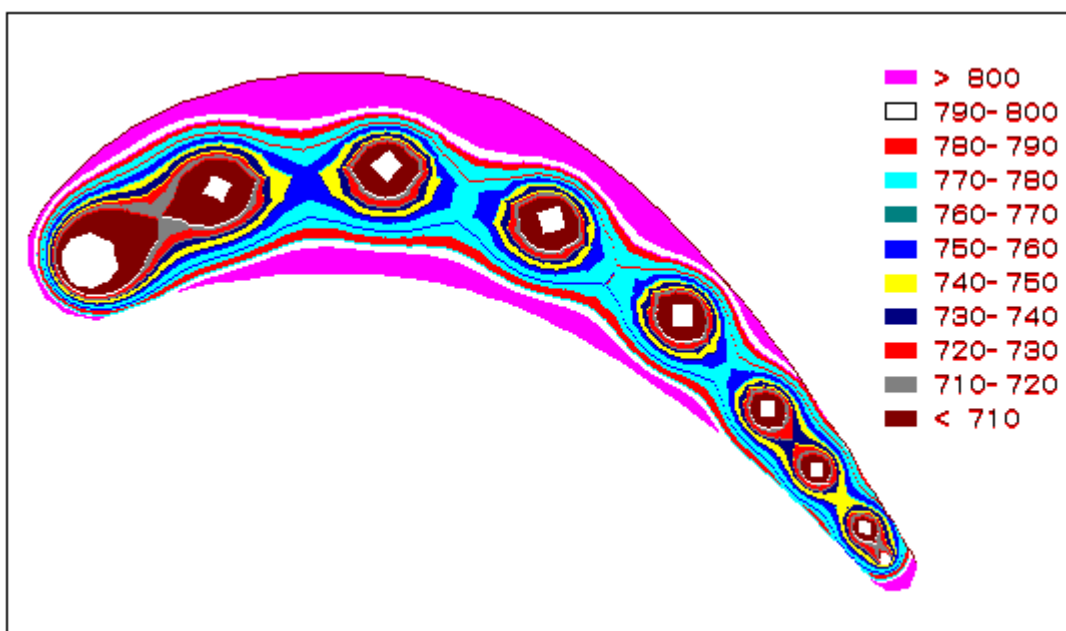


Рис. 1.24. Распределение температуры в сечении лопатки

Несмотря на то, что МКЭ позволяет учитывать в расчетах переменность по пространственным координатам свойств тела, все же следует признать нецелесообразным тонкие термобарьерные покрытия толщиной 0.1...0.3 мм описывать отдельными макроэлементами с генерацией в них КЭ, нумерацией получаемых узлов и т.д.

Для этой цели авторами разработан другой способ учета тонких термобарьерных покрытий при расчете температурного состояния охлаждаемых лопаток газовых турбин.

Метод основан на определении такой локальной фиктивной температуры газа,  $T_{г.ф.}^*$ , которая при расчете температурного поля лопатки без покрытия, моделировала бы эффект присутствия покрытия. Для этого необходимо обеспечить одинаковые значения удельных тепловых потоков  $q$  от газа к покрытию и к лопатке без покрытия, а также равенство температур поверхности лопатки  $T_{л}$  под покрытием и без него. Расчетная схема по учету термобарьерного покрытия показана на рис. 1.25.

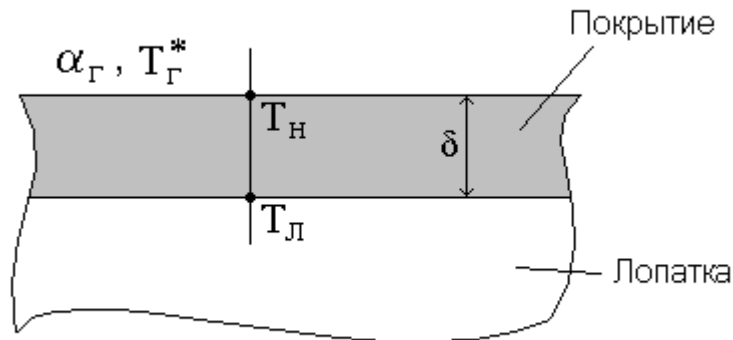


Рис. 1.25. Расчетная схема по учету покрытия

В виду того, что термобарьерные покрытия, как правило, имеют малую, по сравнению с размерами лопатки, толщину  $\delta$  (порядка 0,1...0,3 мм) и низкие значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  порядка 2 Вт/(м·К), при постановке и решении рассматриваемой задачи можно предположить, во-первых, что перетечек тепла вдоль покрытия нет и, во-вторых, что покрытие не изменяет обтекание и теплоотдачу от газа к лопатке по сравнению со случаем без покрытия.

В соответствии с законами Ньютона и Фурье можно записать

$$q = \alpha_{Г} (T_{Г}^* - T_{Н}) = \frac{\lambda}{\delta} (T_{Н} - T_{Л}) .$$

С другой стороны

$$q = \alpha_{Г} (T_{Г.ф}^* - T_{Л}) .$$

В явном виде соотношение для расчета  $T_{Г.ф}^*$  получить невозможно, поэтому необходимо использовать метод последовательных приближений, схема которого показана на рис. 1.26. Практика расчетов показывает, что для достижения сходимости с абсолютной точностью  $\Delta T = 1^{\circ}$  достаточно провести 3 - 5 итераций.



Достоинством рассмотренного метода является то, что он не имеет ограничений по толщине покрытия и позволяет легко моделировать покрытия переменной толщины.

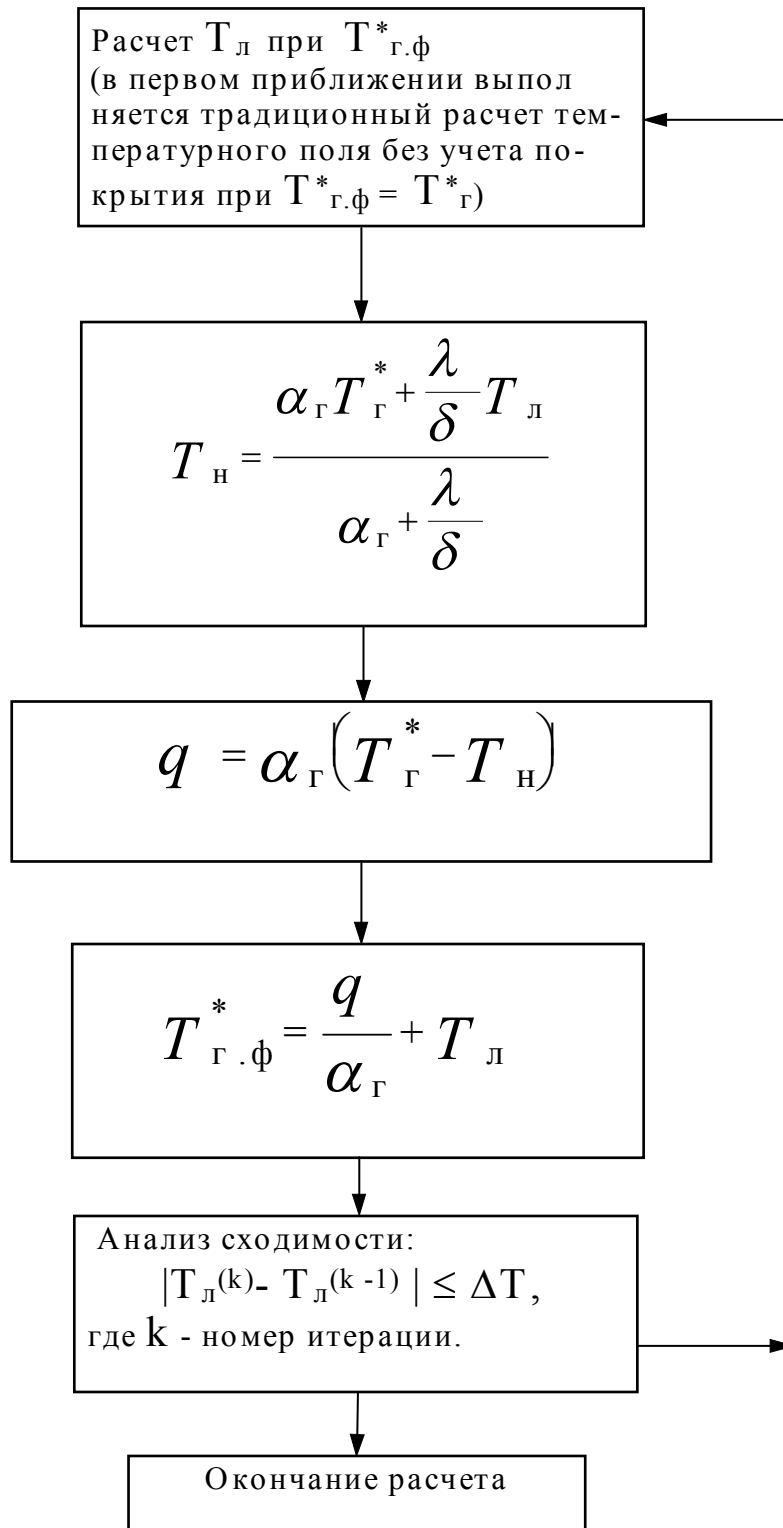


Рис. 1.26. Схема последовательности расчетов по учету покрытия

Снижение  $T_{л}$  на наружной поверхности лопатки в среднем составляет примерно 15...25 °С.

Достоверность результатов, получаемых с применением изложенной выше методики, была подтверждена путем сопоставления их с температурными полями, рассчитанными по известной программе Н.Н. Шаброва [36] для охлаждаемой сопловой лопатки дефлекторного типа 1-й ступени турбины ГТЭ-150 ЛМЗ с покрытием толщиной 0,15 мм. Расхождения по температурам на наружной поверхности лопатки не превысили 0,15 %.

### 1.7.1. Расчет напряженного состояния

Расчет термоупругих напряжений производится в рамках модуля TERM по так называемой «стержневой» методике И.А. Биргера, основанной на гипотезе плоских сечений [37]. Используемая методика отличается простотой при вполне удовлетворительной точности применительно к турбинным лопаткам.

Напряжения от центробежных и внешних газовых сил определяются по общепринятым методикам, изложенным, например, в работах [37, 38, 39].

Для расчетной схемы лопатки, показанной на рис. 1.27, продольная относительная деформация  $\varepsilon$  произвольной точки сечения с координатами  $\xi$  и  $\eta$  в приведенной системе координат выразится следующим соотношением:

$$\varepsilon(\xi, \eta) = \varepsilon_0 - \chi_{\eta} \xi + \chi_{\xi} \eta \quad (1.9)$$

где  $\varepsilon_0$  - осевая относительная деформация начала приведенной системы координат;

$\chi_\eta, \chi_\xi$  - составляющие упругой кривизны оси лопатки вследствие поворота сечения.

При упругих деформациях неравномерно нагретой лопатки

$$\varepsilon(\xi, \eta) = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon^T, \quad (1.10)$$

где  $\sigma$  - напряжение в точке с координатами  $\xi$  и  $\eta$ ;

$E$  - модуль упругости при значении температуры в точке;

$\varepsilon^T$  - относительное температурное перемещение точки.

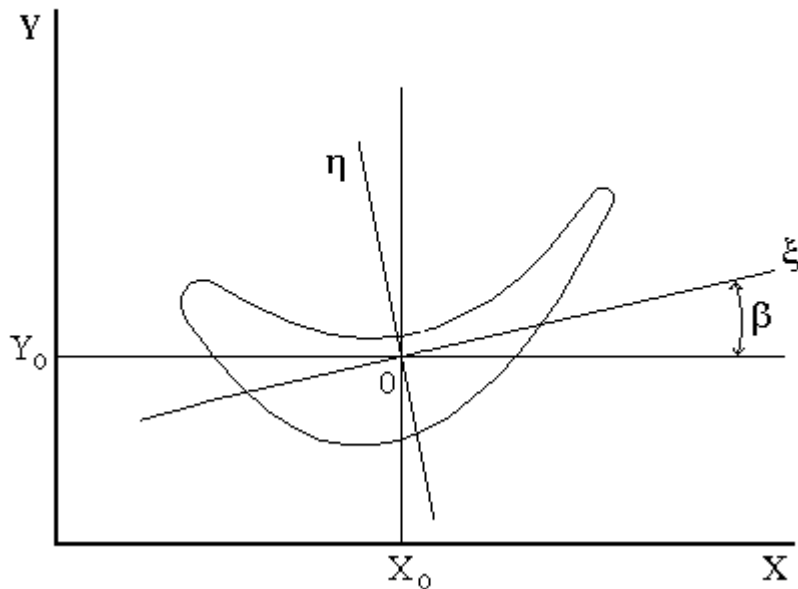


Рис. 1.27. Схема лопатки для расчета напряжений

$$\varepsilon^T = \alpha(T) T,$$

где  $T$  - температура в точке;

$\alpha(T)$  - коэффициент линейного температурного расширения.

Подставляя (1.9) в (1.10) получим

$$\sigma = E \left( \varepsilon_0 - \chi_\eta \xi + \chi_\xi \eta - \varepsilon^T \right). \quad (1.11)$$

Используя выражение (1.11) и условия равновесия

$$\int_F \sigma \, dF = N \quad ;$$

$$\int_F \sigma \, \xi \, dF = -M_\eta \quad ;$$

$$\int_F \sigma \, \eta \, dF = M_\xi$$

и произведя математические преобразования получим окончательное соотношение для расчета упругих напряжений в лопатке, вызванных совместным действием температурных расширений и внешних нагрузок

$$\sigma = E \left( \frac{N}{\int_F E \, dF} - \frac{M_\eta \xi}{\int_F E \xi^2 \, dF} + \frac{M_\xi \eta}{\int_F E \eta^2 \, dF} \right) + E \left( \frac{\int_F E \varepsilon^T \, dF}{\int_F E \, dF} + \frac{\xi \int_F E \varepsilon^T \xi \, dF}{\int_F E \xi^2 \, dF} + \frac{\eta \int_F E \varepsilon^T \eta \, dF}{\int_F E \eta^2 \, dF} - \varepsilon^T \right).$$

Рассчитываемый профиль лопатки может быть задан в произвольной декартовой системе координат (см. рис. 1.27). В этом случае координаты приведенного центра тяжести можно найти по следующим формулам

$$x_0 = \frac{\int_F E x \, dF}{E_{cp} F} \quad ;$$

$$y_0 = \frac{\int_F E y \, dF}{E_{cp} F} \quad ,$$

а направление приведенных главных центральных осей - из условия

$$\operatorname{tg}2\beta = \frac{2 \int_F E (x-x_0)(y-y_0) dF}{\int_F E (x-x_0)^2 dF - \int_F E (y-y_0)^2 dF}.$$

По полученным значениям напряжений в программе TERM производится простейшая оценка прочности лопатки, которая заключается в расчете локальных коэффициентов запаса по длительной прочности  $K_{дл.пр.}$  и выявлении точек, в которых величина  $K_{дл.пр.}$  меньше некоторого задаваемого пользователем минимального значения.

Результаты расчета и анализа напряженного состояния лопатки (так же, как и температурного) выводятся в графической форме на экран монитора, как это показано в качестве примера для среднего сечения рабочей лопатки 1-й ступени турбины установки ГТЭ-150 ЛМЗ на рис. 1.28 и 1.29, с последующим занесением в базу графических файлов.

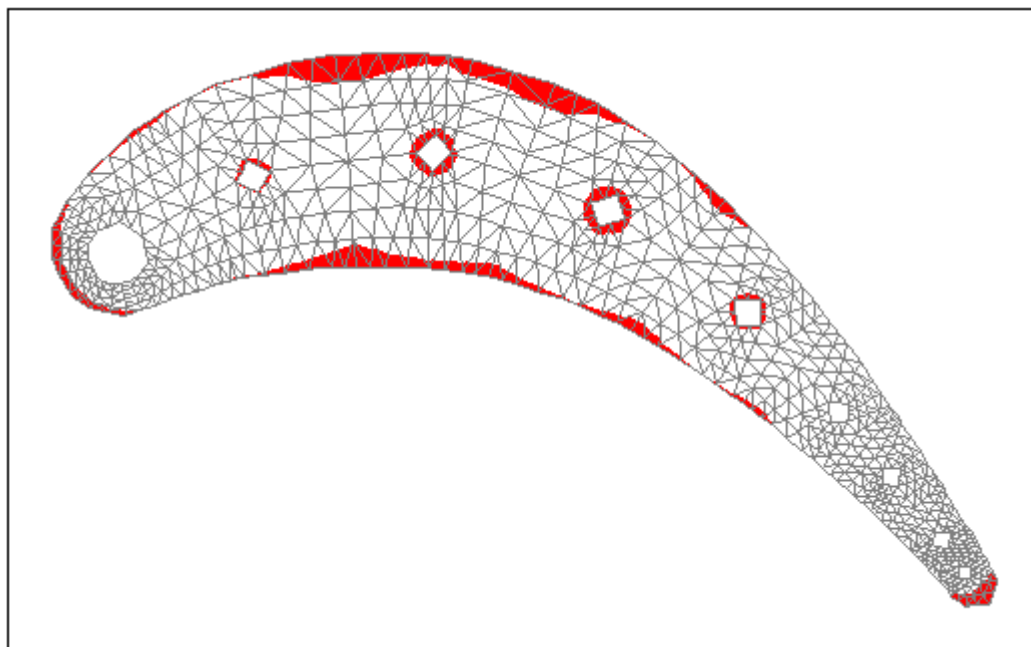


Рис. 1.28. Область сечения лопатки, в которой  $K_{дл.пр.}$  меньше некоторого заданного значения

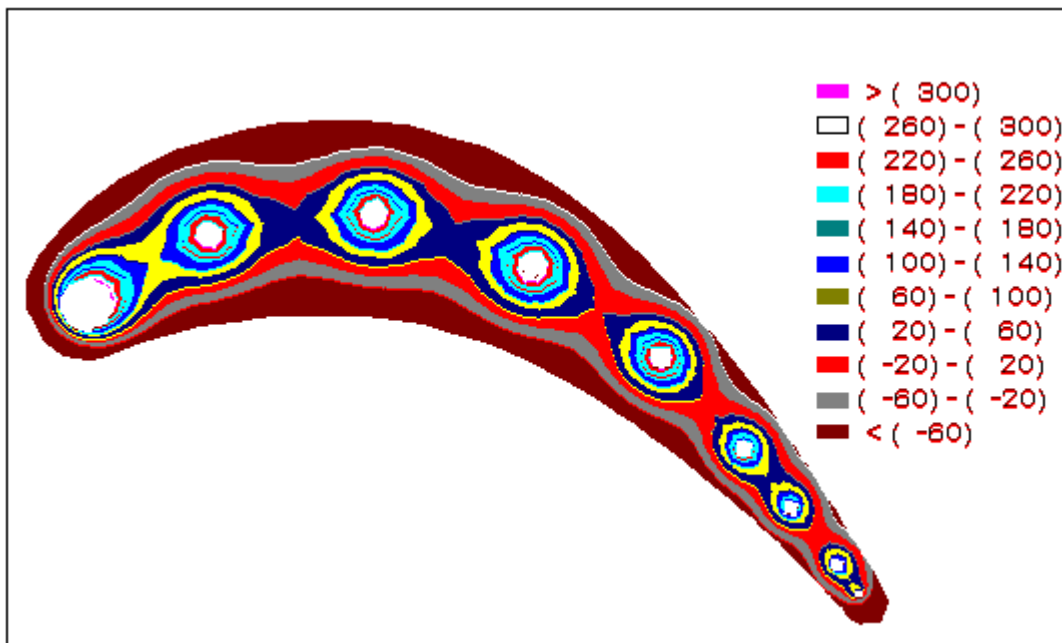


Рис. 1.29. Распределение суммарных напряжений в сечении лопатки

### 1.8. Сопоставление результатов работы комплекса COLD с экспериментальными данными

Корректность совместного функционирования всех компонентов комплекса COLD, за исключением модуля расчета напряженного состояния лопатки, производилась путем обсчета имевшихся в распоряжении авторов экспериментальных данных по исследованию расходных характеристик и температурного состояния лопаток с дефлекторной системой охлаждения 1-х ступеней турбин установок ГТК-25/ГТН-40 НЗЛ, ГТГ-6 завода «Экономайзер» и ГТЭ-150 ЛМЗ (эксперименты НПО ЦКТИ, ЛПИ им. Калинина и ВТИ им. Дзержинского).

Полученные в результате сопоставления расчета с экспериментом характерные температурные поля для некоторых экспериментальных охлаждаемых лопаток представлены на рис. 1.30 - 1.32 в виде графиков

распределения температуры вдоль обвода профиля на наружной ( $T_{нар}$ ) и внутренней ( $T_{вн}$ ) поверхностях оболочки лопатки. Сюда же нанесены опытные показания термопар.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает, что погрешность расчета относительно эксперимента не превышает 10-12 %, что свидетельствует о приемлемой точности результатов, получаемых с помощью комплекса COLD.

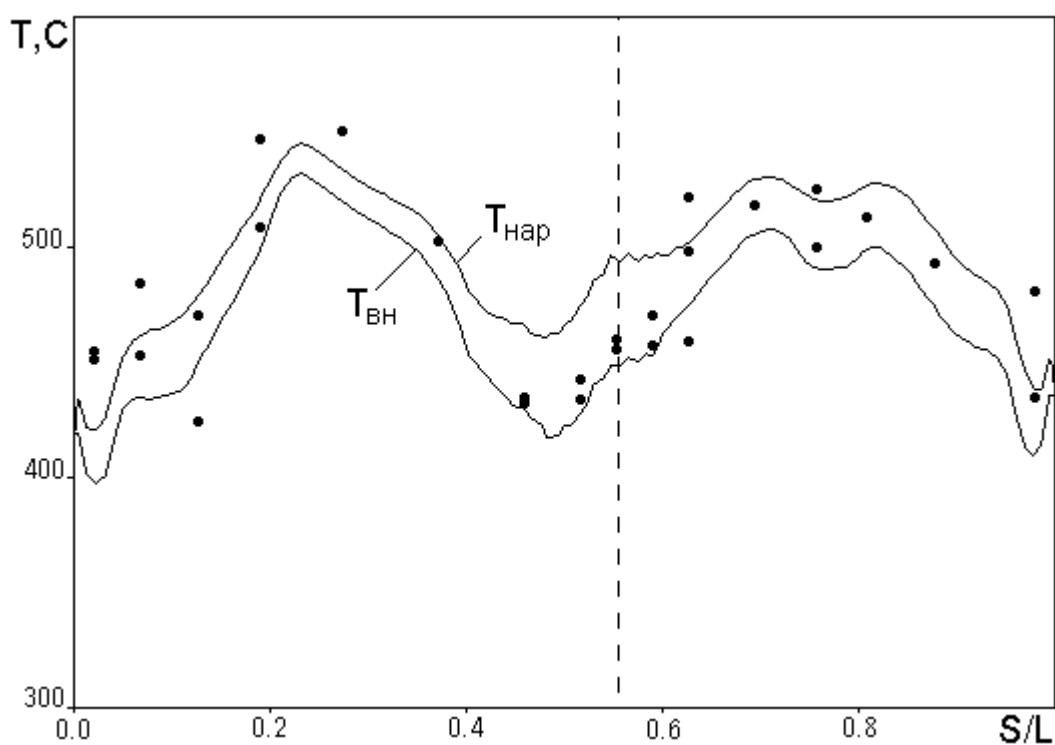


Рис. 1.30. Расчетное (—) и экспериментальное (•) распределение температуры вдоль обвода профиля экспериментальной сопловой лопатки 1-й ступени турбины установки ГТК-25/ГТН-40 НЗЛ при  $T_{Г}=721^{\circ}C$ ,  $T_{В}=89^{\circ}C$ ,  $\lambda_2=0,752$ ,  $T_u=0,6\%$ ,  $G_{охл}=2,46\%$ .

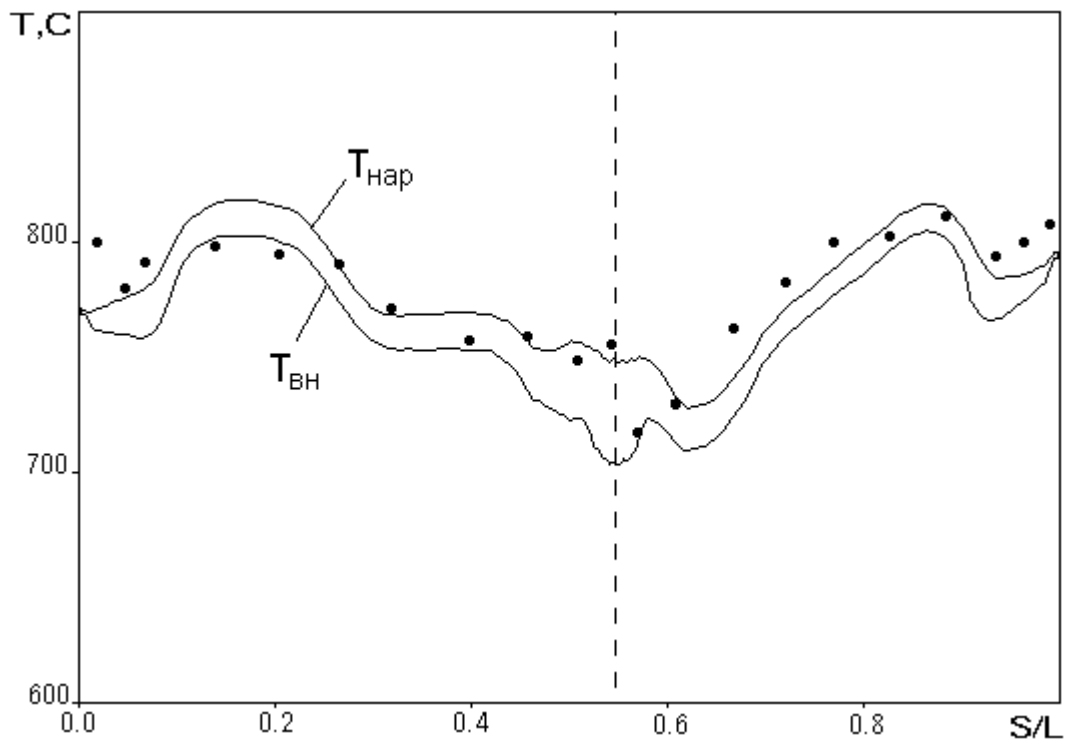


Рис. 1.31. Расчетное (—) и экспериментальное (•) распределение температуры вдоль обвода профиля экспериментальной сопловой лопатки 1-й ступени турбины установки ГТЭ-150 ЛМЗ (эксперимент НПО ЦКТИ) при  $T_{\Gamma}=950^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{В}}=350^{\circ}\text{C}$ ,  $\lambda_2=0,763$ ,  $T_u=4\%$ ,  $G_{\text{ОХЛ}}=1,42\%$



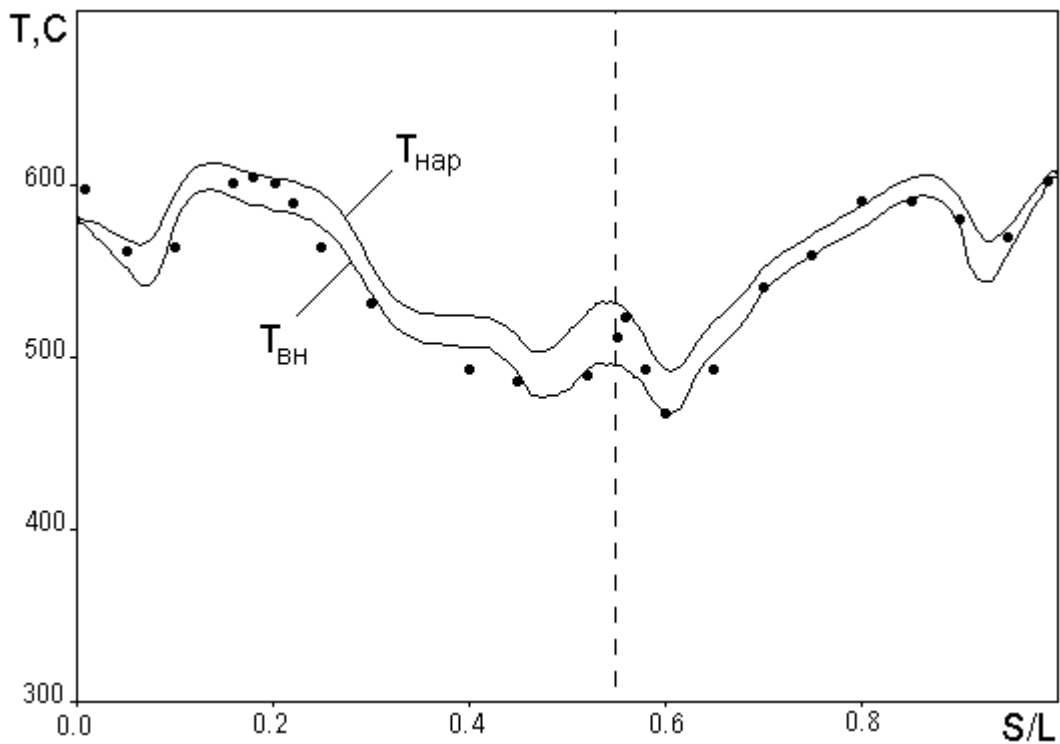


Рис. 1.32. Расчетное (—) и экспериментальное (•) распределение температуры вдоль обвода профиля экспериментальной сопловой лопатки 1-й ступени турбины установки ГТЭ-150 ЛМЗ (эксперимент ЛПИ им.Калинина) при  $T_{\Gamma}=770^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{В}}=125^{\circ}\text{C}$ ,  $\lambda_2=0,653$ ,  $T_u=1,6\%$ ,  $G_{\text{охл}}=1,3\%$

## 2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА COLD

### 2.1. Работа с автоматизированными базами данных PROFIL и METALL

АБД PROFIL и METALL относятся к числу модулей, функционирующих в автономном режиме (см.рис. 1.1).

После запуска АБД PROFIL пользователю предлагается меню, показанное на рис.2.1, которое позволяет сделать выбор одного из двух режимов работы: просмотра БД и поиска требуемого профиля (решетки профилей).

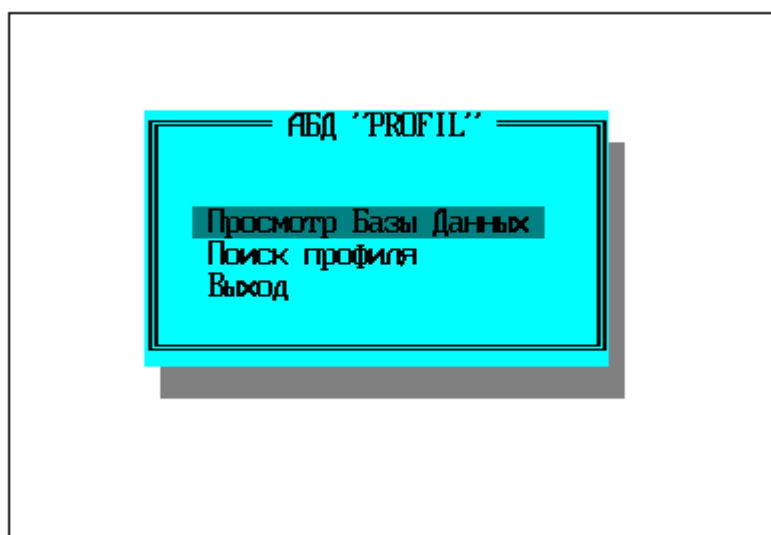


Рис. 2.1. Режимы работы АБД PROFIL

В режиме просмотра БД пользователь имеет возможность просматривать неосновные геометрические характеристики и графические

изображения имеющихся в БД решеток профилей, как это показано на рис. 2.2 и рис. 2.3 соответственно.

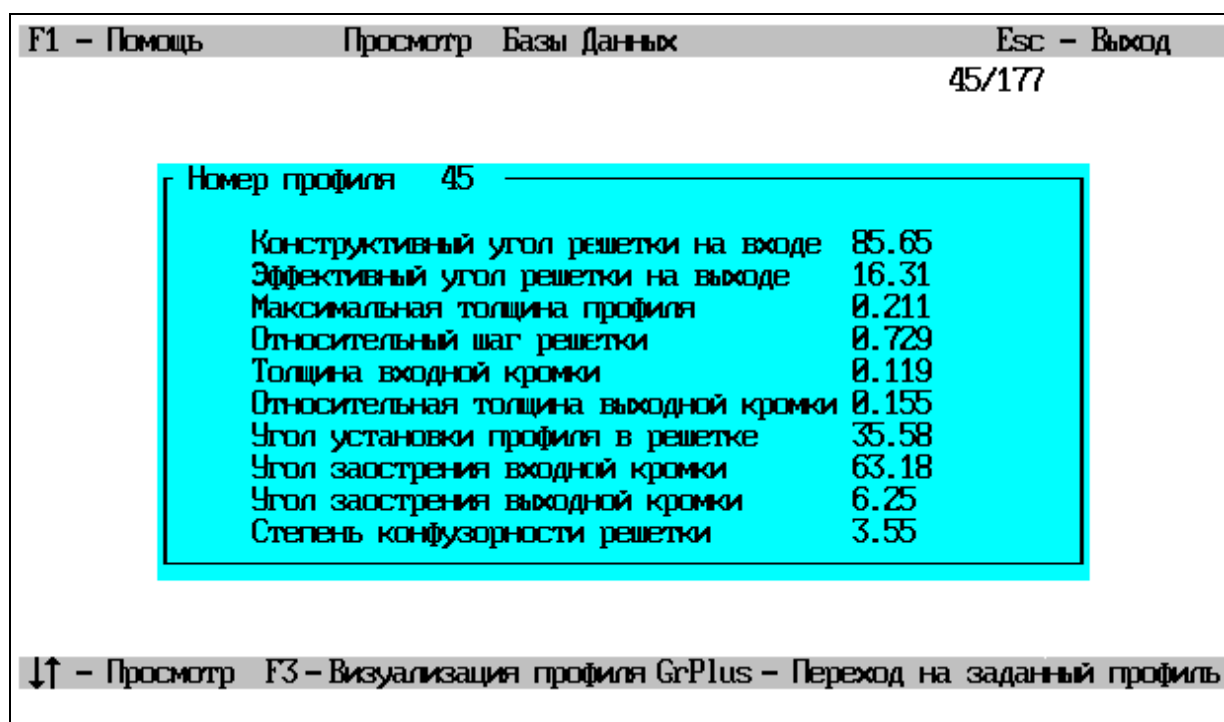


Рис. 2.2. Режим просмотра основных геометрических характеристик решеток профилей

Во втором режиме работы АБД для поиска требуемого профиля задаются: углы входа и выхода потока; максимально допускаемые положительный и отрицательный углы атаки; относительный шаг решетки и приведенная скорость потока на выходе из решетки. Порядок ввода данных для поиска профиля показан на рис. 2.4. Если поиск завершился успешно, т.е. найдены одна или более решеток профилей, то просмотр и дальнейший отбор решеток из числа найденных производится в режиме просмотра, при котором доступными являются уже только решетки, удовлетворяющие условиям поиска. Расширяется, как это показано на рис. 2.5, и объем информации, предоставляемой пользователю для принятия решения относительно использования той или иной решетки.

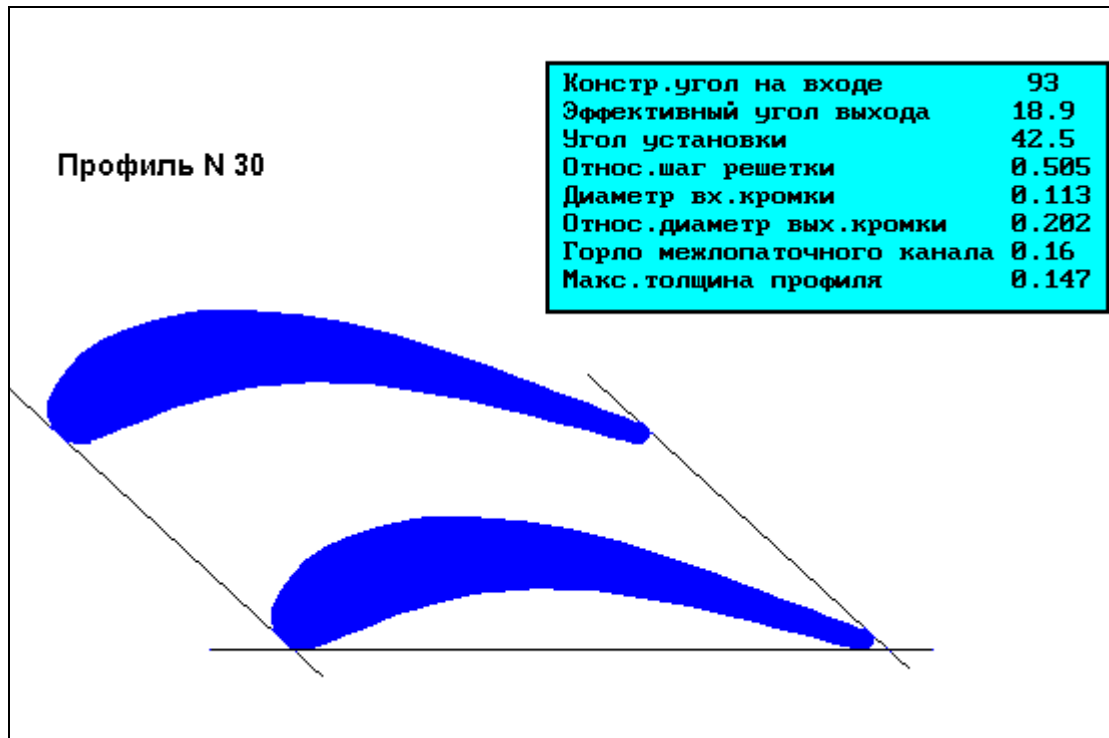


Рис. 2.3. Режим просмотра графического изображения решеток профилей

F1 - Помощь      Поиск профиля в Базе Данных      Esc - Выход

Задать условия и выполнить поиск  
Выход

Угол входа, град	60.5
Угол выхода, град	25.6
Допускаемый положительный угол атаки, град	5
Допускаемый отрицательный угол атаки, град	4
Относительный шаг решетки, T/b	0.768
Число $\Lambda_2$ потока на выходе	0.78

Все верно ?  
Да Нет

↑↓ - Движение по меню      Enter - Выбор пункта меню

Рис. 2.4. Порядок ввода данных для поиска профиля (решетки профилей)

F1 – Помощь		Просмотр Базы Данных		Esc – Выход	
1/15					
Номер профиля 75					
Конструктивный угол решетки на входе	56.57				
Эффективный угол решетки на выходе	23.21				
Максимальная толщина профиля	0.243				
Относительный шаг решетки	0.690				
Толщина входной кромки	0.095				
Относительная толщина выходной кромки	0.235				
Угол установки профиля в решетке	64.0				
Угол заострения входной кромки	34.44				
Угол заострения выходной кромки	6.57				
Степень конфузорности решетки	2.12				
Поворот решетки, град	-1.68				
Угол атаки, град	4.89				
Коэффициент профильных потерь	0.062*				
↓↑ – Просмотр F3 – Визуализация профиля GrPlus – Переход на заданный профиль					

Рис. 2.5. Просмотр основных геометрических характеристик решеток профилей, полученных в результате поиска

АБД METALL после своего запуска вводит пользователя в режим просмотра БД, которая на экране компьютера представляется в виде двух таблиц, показанных на рис. 2.6. В верхней, однострочной таблице содержатся номер материала в БД, его наименование и графа с примечаниями. В нижней таблице размещаются физические и прочностные характеристики материала, такие как плотность, коэффициенты теплопроводности, линейного расширения, модуль упругости, удельная теплоемкость и т.д. в зависимости от температуры. Пользователь имеет возможность просматривать отдельно как верхнюю таблицу, так и нижнюю. В нижней таблице с помощью специального маркера можно осуществлять прокрутку текста в окне вывода, как это показано на рис. 2.7.

Рис. 2.8 демонстрирует один из фрагментов режима редактирования

БД. Аналогично режиму редактирования производится добавление нового материала или отдельных характеристик.

В режиме помощи на экран выводится необходимая для работы с АБД METALL информация, показанная на рис. 2.9, 2.10.

F1 - Помощь    ↓↑ - Просмотр    ESC - Отмена/Выход    F10 - Выход									
Просмотр БД 'METALL'									
N	Название	Примечание							
1	ЖСБК	Из отчета Левченко-Роземблома 1984 г.							
Темпера- тура °С	Плот- ность кг/м3	Кэф. теплопров Вт/(м·К)	Кэф. лин. расширения мм/(мм·К)	Модуль упруг. МПа	Ср Дж/ (кг·К)	Пределы длит. прочности			
						10000 ч. Мпа	5000 ч. Мпа	1000 ч. Мпа	
0.00	7800	5.12	0.0000111	196200	519.1	6374	1000		
200.00	7800	10.39984	0.00001174	183447	519.1	5394	1000		
300.00	7800	11.49971	0.00001206	177070	519.1	4903	1000		
400.00	7800	13.27955	0.00001238	170694	519.1	4413	1000		
500.00	7800	15.07128	0.0000127	164317	519.1	4187	1000		
600.00	7800	17.26516	0.00001302	157941	519.1	1785	1000		
700.00	7800	19.0588	0.00001334	151564	519.1	760	760	760	760
800.00	7800	21.55155	0.00001366	145188	519.1	323.6	353	405	405
900.00	7800	23.74439	0.00001398	138811	519.1	137.3	155	198	198
1000.00	7800	22.54	0.0000143	132435	519.1	49.03	56	77	77
1000.10	7800	22.54	0.0000143	132435	519.1	49.03	56	77	77
1400.00	7800	21.0	0.000015	130000	519.1	40	40	40	40
ENTER -Выбор/Переход    F4 -Редактировать    Ins -Добавить материал    DEL -Удалить									

Рис. 2.6. Режим просмотра верхней таблицы БД METALL

F1 - Помощь    ↓↑ - Просмотр    ESC - Отмена/Выход    F10 - Выход

Просмотр БД "METALL"

N	Название	Примечание						
1	ЖСБК	Из отчета Левченко-Роземблома 1984 г.						

Температура °С	Плотность кг/м <sup>3</sup>	Коэф. теплопровод Вт/(м·К)	Коэф. лин. расширения мм/(мм·К)	Модуль упруг. МПа	Ср Длн/ (кг·К)	Пределы 10000 ч. Мпа	длит. 5000 ч. Мпа	прочности 1000 ч. Мпа
0.00	7800	5.12	0.0000111	196200	519.1	6374	1000	
200.00	7800	10.39984	0.00001174	183447	519.1	5394	1000	
300.00	7800	11.49971	0.00001206	177070	519.1	4903	1000	
400.00	7800	13.27955	0.00001238	170694	519.1	4413	1000	
500.00	7800	15.07128	0.0000127	164317	519.1	4187	1000	
600.00	7800	17.26516	0.00001302	157941	519.1	1785	1000	
700.00	7800	19.0588	0.00001334	151564	519.1	760	760	760
800.00	7800	21.55155	0.00001366	145188	519.1	323.6	353	405
900.00	7800	23.74439	0.00001398	138811	519.1	137.3	155	198
1000.00	7800	22.54	0.0000143	132435	519.1	49.03	56	77
1000.10	7800	22.54	0.0000143	132435	519.1	49.03	56	77
1400.00	7800	21.0	0.000015	130000	519.1	40	40	40

ENTER -Выбор/Переход    F4 -Редактировать    Ins -Добавить материал    DEL -Удалить

Рис. 2.7. Режим просмотра нижней таблицы БД METALL

F1 - Помощь    ↓↑ - Просмотр    ESC - Отмена/Выход    F10 - Выход

Редактирование материалов БД "METALL"

N	Название	Примечание						
1	ЖСБК	Из отчета Левченко-Роземблома 1984 г.						

Температура °С	Плотность кг/м <sup>3</sup>	Коэф. теплопровод Вт/(м·К)	Коэф. лин. расширения мм/(мм·К)	Модуль упруг. МПа	Ср Длн/ (кг·К)	Пределы 10000 ч. Мпа	длит. 5000 ч. Мпа	прочности 1000 ч. Мпа
0.00	7800	5.12	0.0000111	196200	519.1	6374	1000	
200.00	7800	10.39984	0.00001174	183447	519.1	5394	1000	
300.00	7800	11.49971	0.00001206	177070	519.1	4903	1000	
400.00	7800	13.27955	0.00001238	170694	519.1	4413	1000	
500.00	7800	15.07128	0.0000127	164317	519.1	4187	1000	
600.00	7800	17.26516	0.00001302	157941	519.1	1785	1000	
700.00	7800	19.0588	0.00001334	151564	519.1	760	760	760
800.00	7800	21.55155	0.00001366	145188	519.1	323.6	353	405
900.00	7800	23.74439	0.00001398	138811	519			
1000.00	7800	22.54	0.0000143	132435	519			
1000.10	7800	22.54	0.0000143	132435	519			
1400.00	7800	21.0	0.000015	130000	519			

Замещаем текущую запись  
Добавляем в качестве новой  
Повторное редактирование  
Выход

↓↑ - Выбор    ESC - Отмена

Рис. 2.8. Фрагмент режима редактирования БД METALL

База данных (БД) "METALL" содержит данные по материалам, применяемым для изготовления охлаждаемых попато́к газовых турбин. В БД включены только те данные, которые необходимы для расчетов температурного и напряженного состояния попато́к, а также для упрощенной оценки их прочности.

Структура БД содержит поля, в которых записываются:

- код в виде целого числа, под которым материал значится в БД и который используется в модулях TERM и SIGMA для указания используемых материалов;
- наименование материала;
- плотность материала  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>
- массив табличных температур, Т°С, при которых получены представленные свойства материала;
- значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м\*К);
- значения коэффициента линейного расширения  $\alpha$ , мм/(мм\*К);
- значения модуля упругости E, МПа;
- значения удельной теплоемкости  $C_p$ , ДЖ/(кг\*К);
- значения предела длительной прочности  $\sigma_{дл}$ , МПа, полученные при соответствующей температуре и при выдержке материала в течение 10000, 5000 и 1000 час.
- примечания.

При описании указанного перечня свойств для каждого материала

Esc - Выход

PgUp ↑ PgDn ↓

Рис. 2.9. Фрагмент 1 режима помощи при работе с АБД METALL



накладывается единственное ограничение: число температур и соответствующих значений параметров должно находиться в пределах от 1 до 20 включительно.

Банк данных "METALL" предусматривает возможность только просмотра БД и ее редактирования с режимами замены, вставки и удаления записей, характеризующих как отдельные свойства материала, так и материалы в целом.

При работе с Банком данных задействованы следующие клавиши:

**F1** - помощь;

**←↑↓→** и **PgUP, PgDn** - перемещение в окнах просмотра/редактирования;

**ENTER** - переход из верхнего окна просмотра/редактирования в нижнее и наоборот;

**F4** - переход в режим редактирования в соответствующем окне просмотра/редактирования;

**INS** - переход в режим добавления нового материала;

**ESC** - отмена текущего режима работы Банка данных;

**DEL** - удаление материала/характеристики;

**F10** - выход из Банка данных.

БД "METALL" реализована в файле METALL.DBF стандартного формата dBase - подобных систем управления базами данных с подключением одноименного индексного файла METALL.NTX . Оба файла располагаются в подкаталоге \DBF .

**Esc - Выход**

**PgUp ↑ PgDn ↓**

Рис. 2.10. Фрагмент 2 режима помощи при работе с АБД METALL

## 2.2. Работа с модулем UPI

Модуль (программа) UPI предназначен для расчета распределения скоростей потока вдоль обвода турбинного профиля, а также определения таких параметров потока, как эффективный угол выхода из решетки, координата точки разветвления потока, геометрическая длина контура профиля и т.д.

Все исходные данные для модуля UPI формируются в двух файлах: ColProf1.\* - с описанием геометрии решетки профилей и ColFlow1.\* - с описанием параметров потока. Помимо файлов данных, как показано на рис. 2.11, прямо с клавиатуры задается, так называемый, идентификатор расчета (комментарий) в виде строки не более чем из 60-ти символов, описывающий проводимый расчет. Идентификатор впоследствии будет добавлен к заголовкам в выходных текстовом и графическом файлах.

Входные файлы размещаются в подкаталоге \DAT и доступ к ним для выполнения таких операций, как включение в расчет, просмотр, редактирование, удаление, вывод на печать, обеспечивается оболочкой комплекса COLD. На рис. 2.12 показан пример, демонстрирующий перечисленные возможности по работе с входными файлами.

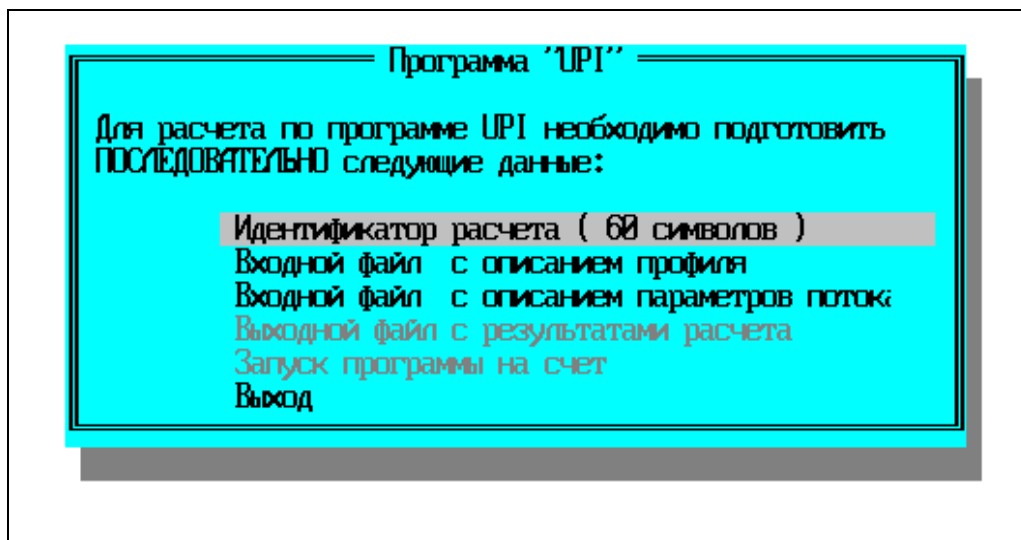


Рис. 2.11. Формирование пакета входных файлов для модуля UPI

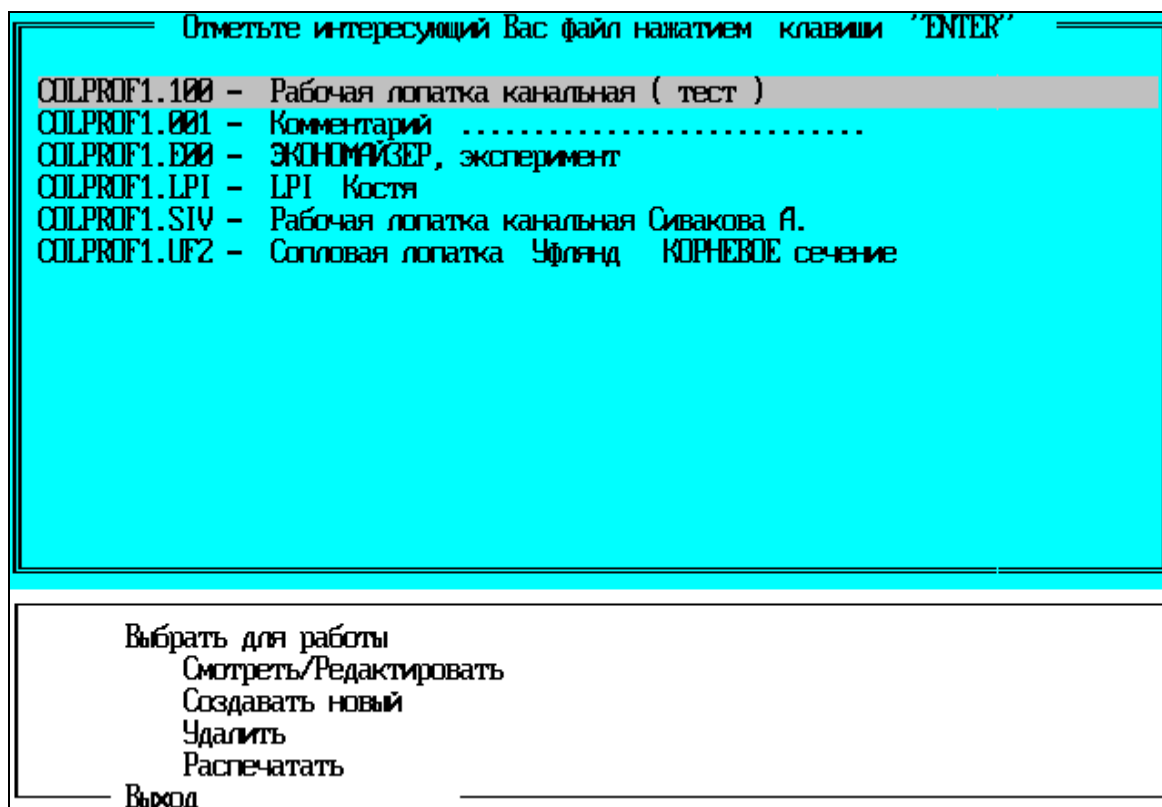


Рис. 2.12. Возможные операции при работе с входными файлами

Для задания геометрии рассчитываемого профиля его располагают в правой декартовой системе координат, как правило, либо «лежащим» на хорде (т.е. хорда совпадает с осью «X» или параллельна ей, как показано на рис. 2.13), либо в рабочем положении (когда фронт решетки совпадает или параллелен оси «Y», что продемонстрировано на рис. 2.14) выпуклой стороной вверх так, чтобы входная кромка находилась слева.

Контур профиля рассекается вертикальными прямыми (не более 100), для каждой из которых снимается абсцисса  $X_i$  и ординаты точек пересечения со спинкой  $Y_{спi}$  и корытом  $Y_{ki}$ . Конфигурация профиля и его расположение в системе координат должны обеспечивать однозначность задания ординат для каждого  $X_i$ .

В файле ColProfl.\*, фрагмент которого показан на рис. 2.15, записываются: шаг решетки, мм; угол поворота системы координат угол между положительным направлением фронта решетки и отрицательным направлением оси «X» (понятно, что угол поворота системы координат равен углу установки  $\gamma$ , если ось «X» совпадает или параллельна хорде, и составляет  $90^0$ , если лопатка задана в рабочем положении); координаты центров  $X_{C1}$ ,  $Y_{C1}$ ,  $X_{C2}$ ,  $Y_{C2}$  и радиусы окружностей  $R_1$  и  $R_2$  образующих соответственно входную и выходную кромки, мм; общее число секущих и таблица с порядковыми номерами секущих и координаты  $X_i$ ,  $Y_{ki}$  и  $Y_{спi}$ , мм. Если точки пересечения секущих с наружным или внутренним контуром лопатки попадают на дуги окружностей, описывающих входную или выходную кромки, то можно задавать значения ординат, равным нулю.

Во втором входном файле - ColFlow1.\*, показанном на рис. 2.16, записываются: вид рабочего тела («газ» или «воздух»); полные температура и давление рабочего тела на входе, выраженные

соответственно в градусах Цельсия и барах; начальная степень турбулентности потока в процентах; угол входа потока в решетку  $\beta_1$  град.; значение приведенной скорости потока на выходе из решетки (режимное число  $\lambda_2$ ).

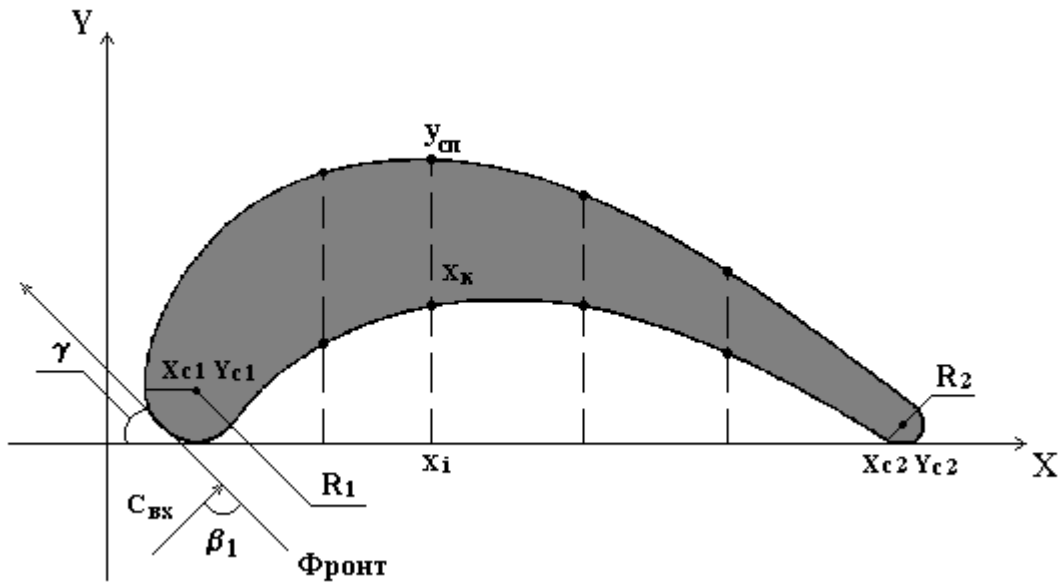


Рис. 2.13. Представление профиля в хордовой системе координат

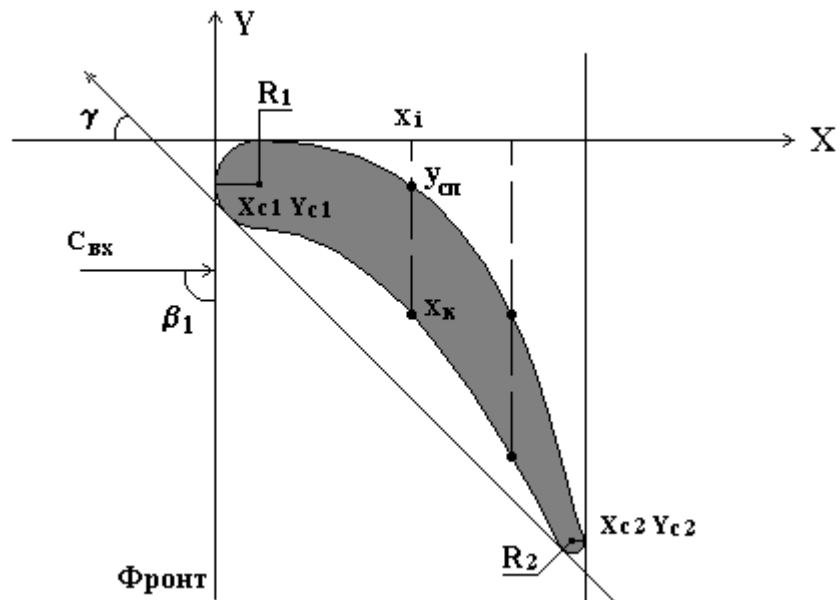


Рис. 2.14. Представление профиля в рабочем положении

```

Сопловая лопатка 1-й ступени ( Комментарий к файлу )
176.23      - шаг решетки, мм
45.         - угол поворота системы координат
-229.43, 16.17, 16.17 - коорд. центра и радиус входной кромки
-2.75, 2.75, 2.75   - коорд. центра и радиус выходной кромки
57         - число секущих
-----X-----Yсп-----Yк-----
 1 -237.70  34.604  0.0
 2 -235.27  37.45   0.0
 3 -232.85  39.875  0.0
 4 -230.42  42.204  0.0
 5 -227.10  44.241  0.0
 6 -225.57  46.117  0.0
 7 -223.15  47.928  1.294
.....
56 -4.852   7.115   0.485
57 -3.000   6.000   0.005
----- Конец

```

Рис. 2.15. Фрагмент файла ColProf1.\*

```

Сопловая лопатка 1-й ступени с Tг=1000 С
газ      - рабочее тело ("газ" или "воздух")
1000     - полная температура рабочего тела на входе, град С;
12.518   - полное давление рабочего тела на входе, бар;
5        - начальная степень турбулентности потока, % ;
89.99    - угол входа потока, град
0.823    - число LAMBDA на выходе

```

Рис. 2.16. Фрагмент файла ColFlow1.\*

В программе UPI обтекание профиля рассчитывается в 100 точках, включая лобовую, причем, на выпуклой и вогнутой сторонах профиля выделяется по 50 равноотстоящих точек. При нумерации точек контур профиля обходится, начиная с выходной кромки, по выпуклой стороне к входной кромке и от нее по вогнутой стороне профиля к выходной кромке.

В выходной файл UPIRes.\* выводится целый ряд значений таких параметров как, например, общая длина контура профиля, геометрическая длина спинки, размер горла межлопаточного канала решетки, эффективный угол выхода потока, критическая приведенная скорость

потока на выходе  $\lambda_{2кр}$ , при которой на поверхности профиля скорость потока достигает значений местной скорости звука, и т.д., а также три таблицы с номерами точек на контуре профиля, их относительными координатами и значениями приведенной скорости  $\lambda$  при обтекании решетки несжимаемой жидкостью, при заданном и критическом значениях приведенной скорости на выходе из решетки. Табличные данные представляются в виде трех соответствующих эпюр приведенных скоростей, выводимых на монитор компьютера.

Фрагмент файла UPIRes.\* показан на рис. 2.17, а совмещенные графики распределения  $\lambda$  - на рис. 2.18.

Сопловая лопатка 1-й ступени на $T\gamma=1000\text{ C}$	
Результаты расчета по программе "UPI"	
Входные файлы: DBF\COLPROF1.001 DBF\COLFLOW1.001	
Длина контура, мм	544.331
Геометрическая длина спинки, мм	296.207
Горло решетки, мм	62.632
Относительная длина до горла по спинке	.282
Эффективный угол выхода, град	20.818
Угол выхода для несжимаемой среды, град	22.540
Длина спинки, мм	300.141
Длина корыта, мм	243.968
Координаты точки разветвления потока	X = -237.992 Y = 2.455
Критическая относительная скорость потока на выходе	$\lambda_{2\text{кр}}$ .885

Рис. 2.17. Фрагмент выходного файла UpiRes.\*

Массив приведенных скоростей L(i)  
 при обтекании профиля несжимаемой средой  
 при угле входа потока Beta1 = 89.990

i	x(i)	L(i)	i	x(i)	L(i)
1	-.10000E-05	.95954E+00	51	.56059E+00	.26614E+00
2	.22065E-01	.98609E+00	52	.56955E+00	.34660E+00
3	.33097E-01	.99936E+00	53	.57852E+00	.36431E+00
.....	.....	.....	.....	.....	.....
48	.52955E+00	.45130E+00	98	.98206E+00	.10938E+01
48	.54059E+00	.17987E+00	99	.99103E+00	.11427E+01
50	.55162E+00	.00000E+00	100	.10000E+01	.11915E+01

Массив приведенных скоростей L(i)  
 при обтекании профиля сжимаемой средой  
 при заданных Beta1 = 89.990 и Lambda2 = .823

Beta2 = 21.374  
 Max1 = .208 Max2 = .798  
 Lambda1 = .227 Lambda2 = .823

i	x(i)	L(i)	i	x(i)	L(i)
1	-.10000E-05	.79003E+00	51	.56059E+00	.17734E+00
2	.22065E-01	.80931E+00	52	.56955E+00	.23095E+00
3	.33097E-01	.81894E+00	53	.57852E+00	.24276E+00
.....	.....	.....	.....	.....	.....
48	.52955E+00	.24564E+00	98	.98206E+00	.86825E+00
48	.54059E+00	.10663E+00	99	.99103E+00	.91136E+00
50	.55162E+00	.00000E+00	100	.10000E+01	.95448E+00

Массив приведенных скоростей L(i)  
 при обтекании профиля сжимаемой средой  
 при Beta1 = 89.990 и Lambda2 кр = .885

i	x(i)	L(i)	i	x(i)	L(i)
1	-.10000E-05	.84978E+00	51	.56059E+00	.18115E+00
2	.22065E-01	.86991E+00	52	.56955E+00	.23592E+00
3	.33097E-01	.86991E+00	52	.57852E+00	.24798E+00
.....	.....	.....	.....	.....	.....
48	.52955E+00	.25092E+00	98	.98206E+00	.92698E+00
49	.54059E+00	.10892E+00	99	.99103E+00	.97474E+00
50	.55162E+00	.00000E+00	100	.10000E+01	.10225E+01

Продолжение рис. 2.17



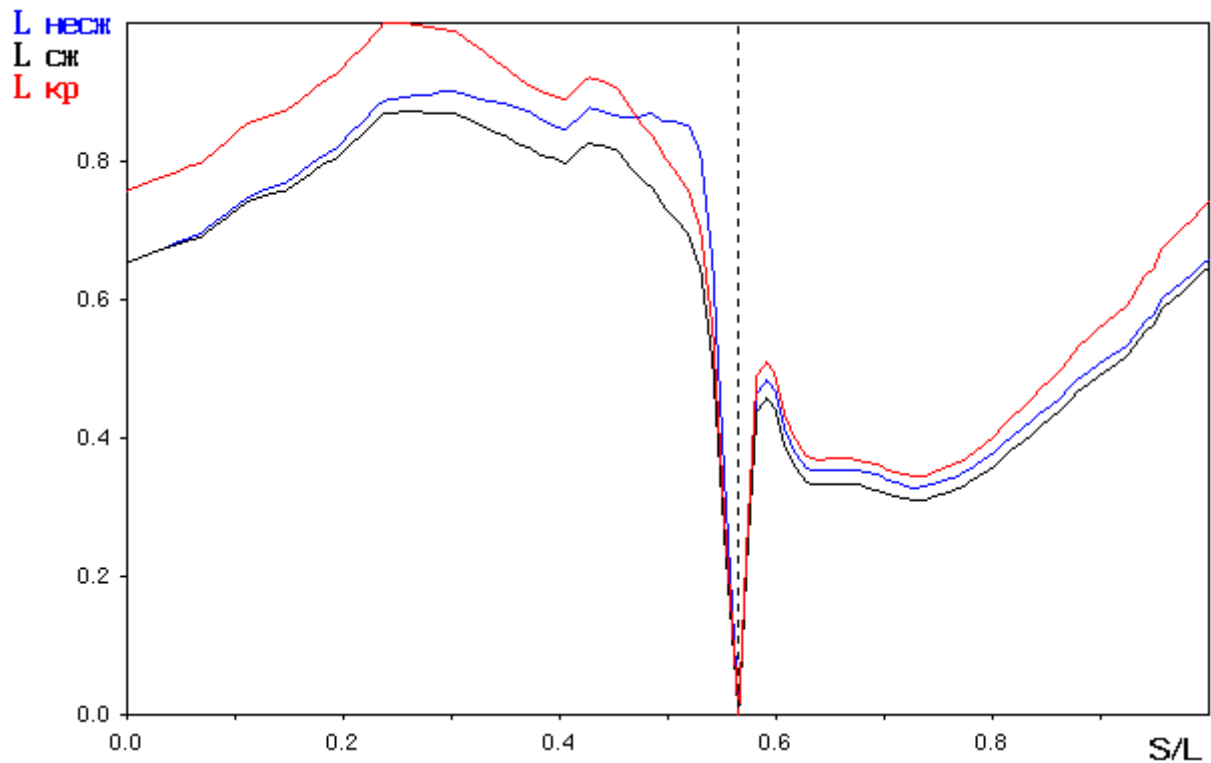


Рис. 2.18. Распределение приведенных скоростей потока вдоль контура профиля

### 2.3. Работа с модулем ALFA

Модуль ALFA предназначен для расчета распределения по контуру профиля коэффициентов теплоотдачи со стороны газа.

Все исходные данные для модуля ALFA группируются в четырех входных файлах.

Первый файл - ColProf2.\*, автоматически создается программой UPI. Этому файлу присваивается расширение, которое при расчете по UPI имел файл ColProf1.\*. Файл ColProf2.\* содержит строку комментария, перенесенную из ColProf1.\* и такие характеристики профиля, как хорда, диаметр входной кромки, длина контура профиля и максимальная стрелка прогиба скелетной линии. Все перечисленные величины выражены в

метрах. Вид исходного файла с характеристиками профиля показан на рис. 2.19.

Сопловая лопатка 1-й ступени с шагом 176.23 мм  
 .24600E+00 - хорда профиля, м  
 .32340E-01 - диаметр входной кромки, м  
 .43630E-01 - максимальная стрелка прогиба скелетной линии  
 .54433E+00 - длина обвода профиля, м

Рис. 2.19. Входной файл ColProf2.\* с характеристиками профиля

Во втором файле - ColUri.\* , размещаются данные, описывающие условия обтекания профиля. Этот файл также создается программой UPI, но при необходимости может быть создан пользователем.

В случае автоматического создания файла, ему присваивается расширение, которое имел файл ColProf1.\* при расчете по UPI, но в качестве комментария пересылается идентификатор того расчета, в результате которого этот файл был получен.

Фрагмент файла ColUri.\* показан на рис. 2.20.

Сопловая лопатка 1-й ступени  
*l* - обтекание задано в виде приведенных скоростей L;  
 .823 - режимное число L, при котором получено исходное обтекание;  
 .552 - относительная координата лобовой точки;  
 100 - число точек, в которых задано обтекание

1	-.10000E-05	.78995E+00	51	.56059E+00	.17734E+00
2	.22065E-01	.80926E+00	52	.56955E+00	.23095E+00
3	.33097E-01	.81891E+00	53	.57852E+00	.24276E+00
.....					
48	.52955E+00	.24564E+00	98	.98206E+00	.86825E+00
49	.54059E+00	.10663E+00	99	.99103E+00	.91136E+00
50	.55162E+00	.00000E+00	100	.10000E+01	.95448E+00

Рис. 2.20. Фрагмент файла ColUri.\* с обтеканием профиля

Видно, что в файле после строки комментария указывается параметр, которым задается обтекание. Если файл получен программой UPI, то таким

параметром однозначно является приведенная скорость  $\lambda$ , обозначаемая буквами  $l$ . Если файл создан «вручную», то в качестве рассматриваемого параметра может быть число Маха -  $m$ , относительная скорость  $C_i / C_{1T}$  -  $cc1t$ , коэффициент статического давления  $C_p$  -  $cp$  или скорость потока -  $C$  ( $c$ ). В случае неправильного (ошибочного) обозначения параметра обтекания на мониторе появится сообщение

В файле данных, где представлено обтекание профиля неправильно записано: " $l$ ", " $m$ ", " $cc1t$ ", " $cp$ " или " $c$ "
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

и работа программы на этом прекратится. После чего следует откорректировать файл данных и запустить программу на выполнение снова.

В следующей строке файла ColUpi.\* после параметра обтекания указывается значение приведенной скорости на выходе из решетки, при котором было получено задаваемое обтекание профиля. Далее записываются относительная координата лобовой точки, количество точек вдоль обвода профиля, в которых задается обтекание, и таблица из номеров точек, их относительных координат и значений определяющего обтекание параметра. Нумерация точек должна проводиться, начиная от выходной кромки, по выпуклой стороне ко входной кромке и далее от нее по вогнутой стороне к выходной кромке. Общее количество точек не должно превышать 100.

Третий файл ColFlow2.\*, показанный на рис. 2.21, как и предыдущие, создается автоматически программой UPI и отличается от файла ColFlow1.\* (рис. 2.16) только наличием в последней строке значения эффективного угла выхода потока.

Наконец, в четвертом, последнем входном файле ColFilm.\*, образец

которого приведен на рис. 2.22, задаются параметры используемого пленочного охлаждения, а именно: количество рядов отверстий (ноль означает отсутствие пленочного охлаждения); их относительную координату S/L на контуре профиля; диаметр, выраженный в миллиметрах; количество отверстий в каждом ряду; шаг расположения отверстий, в миллиметрах. В файле также задается суммарный расход охладителя ( $G_j$ ) через каждый ряд отверстий и его температуру на выходе из отверстий ( $T_j$ ), выраженные соответственно в кг/с и  $^{\circ}\text{C}$ , при этом, если программа ALFA работает в автономном режиме, то  $G_j$  и  $T_j$  должны быть определены предварительно. Если же ведется расчет в комплексном режиме, то задаваемые значения  $G_j$  и  $T_j$  рассматриваются как первое приближение и уточняются по ходу расчета.

Результаты работы модуля ALFA записываются в один выходной файл AlfaRes.\*, фрагмент которого приведен на рис. 2.23.

```

Сопловая лопатка 1-й ступени на Tг=1000 С
газ - рабочее тело ("газ" или "воздух")
1000 - полная температура рабочего тела на входе, град С
12.518 - полное давление рабочего тела на входе, бар;
5 - начальная степень турбулентности потока, % ;
89.99 - угол входа потока, град
0.823 - число LAMBDA на входе
21.37 - угол выхода потока, град

```

Рис. 2.21. Входной файл ColFlow2.\* с параметрами потока на входе в решету

```

Направляющая лопатка Tг=1000 С
1 - количество рядов отверстий
-- S/L --- D ---- Z --- Шаг --- G(расход,кг/с) ----- T(град С) -----
0.45 2 30 10 0.03 566
----- end

```

Рис. 2.22. Входной файл ColFilm.\* с параметрами выдуваемой пленки охладителя

Сопловая лопатка 1-й ступени на $T_{г}=1000\text{ C}$											
Исх данные: газ ; турб= 5.0 ; лоб(т)= .552 ; дл обв = 544.3 мм											
прогиб ср лин = 43.6 мм; $R_{вх}$ = 16.2 мм; хорда= 246.0 мм											
Параметры входа: $P_{полн}$ = 12.52 бар; $T_{полн}$ = 1000.0 град C; угол= 89.99 гр											
выхода: лямбда= .823 ; угол= 21.37 гр											
X	Lambda	Pст	Alfa	Tgas,C	X	Lambda	Pст	Alfa	Tgas,C		
1	.0000	.7900	8.62	2831.3	859.1	51	.5610	.1804	12.29	3411.6	1000.0
2	.0110	.7996	8.54	2855.3	857.3	52	.5699	.2319	12.14	2724.5	1000.0
3	.0221	.8093	8.46	2879.1	855.4	53	.5789	.2421	12.10	2269.3	1000.0
48	.5189	.3816	11.51	2498.9	1000.0	98	.9821	.8683	7.94	1626.6	1000.0
49	.5299	.2405	12.11	2496.2	1000.0	99	.9910	.9114	7.56	1670.3	1000.0
50	.5430	.0520	12.50	1840.8	1000.0	100	1.0000	.9544	7.17	1707.2	1000.0

Рис. 2.23. Фрагмент выходного файла AlfaRes.\*

Как видно из рис. 2.23, в выходном файле помимо таблицы с номерами точек, их относительными координатами, локальными значениями приведенных скоростей, коэффициентов теплоотдачи и полных температур газа, содержится краткая запись основных исходных данных.

Помимо создания выходного файла на монитор компьютера выводятся совмещенные эпюры приведенной скорости потока  $\lambda$  и коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{г}$ , изображенные на рис. 2.24.

При наличии пленочного охлаждения строится и выводится на экран график распределения вдоль контура профиля заторможенной температуры газа. Пример последнего графика показан на рис. 2.25.

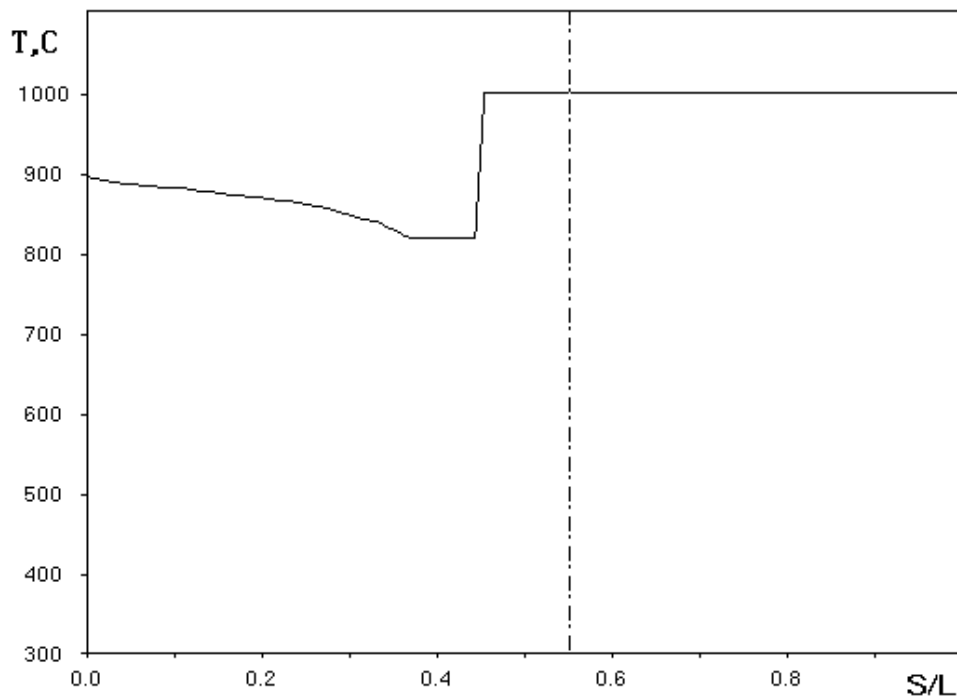


Рис. 2.25. Распределение полной температуры газа вдоль обвода профиля

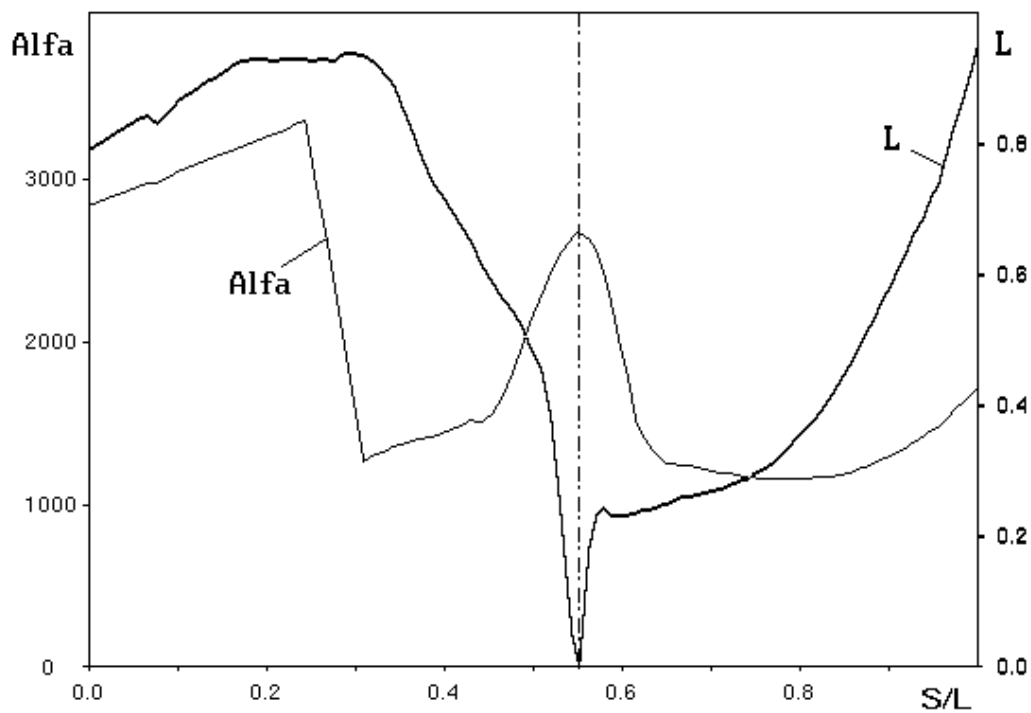


Рис. 2.24. Распределение коэффициентов теплоотдачи и приведенных скоростей потока вдоль обвода профиля

## 2.4. Работа с модулем GIDRA

Назначение модуля GIDRA, его особенности, рекомендации по составлению эквивалентной гидравлической схемы - структурной модели рассчитываемой системы охлаждения, а также типовые каналы, использование которых предусмотрено в модуле GIDRA, были рассмотрены ранее в Главе 1, п.1.6 настоящей монографии. Здесь же ограничимся изложением правил подготовки исходных данных и описанием получаемых результатов.

Модель GIDRA требует ввода идентификатора проводимого расчета и задания двух файлов с исходными данными.

В первом файле ColGidr1.\* содержится структурное описание эквивалентной гидравлической схемы и значения параметров, входящих в ее состав типовых каналов. Вид файла ColGigr1.\* для конкретной конструкции системы охлаждения лопатки приведен далее (см.рис. 2.27).

При формировании файла задают: целое число, кодирующее вид охладителя (1 - сухой воздух; 2 - перегретый пар); количество узлов с неизвестными давлениями; количество узлов с заданными давлениями; общее количество веток гидравлической сети (не более 300); частота вращения ротора турбины, об/с.

Каждая ветка гидравлической сети характеризуется номерами узлов на ее концах; целым числом, указывающим тип канала (от 1 до 50 включительно); целым числом, равным количеству параметров, описывающих геометрию канала (не более 30); массивом значений параметров, описывающих геометрию канала.

Параметры, общие для большинства используемых программой GIDRA, типовых каналов сведены в табл. 2.1. Параметры и

последовательность их ввода для описания каждого из предусмотренных модулем GIDRA каналов указаны в табл. 2.2. В табл. 2.3 приведены рекомендуемые значения степени турбулентности охладителя на входе в каналы систем охлаждения лопаток газовых турбин.

Далее во входном файле записывается массив, состоящий из номеров узлов с соответствующими значениями известных давлений и температур. Для узлов, через которые охладитель поступает в систему охлаждения, задаются полное давление и температура, а для узлов, через которые охладитель выходит из системы охлаждения, - статическое давление и температура, равная нулю. Давления вводятся в барах, температура - в градусах Цельсия.



Таблица 2.1

Общие параметры типовых каналов систем охлаждения лопаток газовых турбин

Обозначение параметра	Описание параметра
$L$	Длина канала, мм;
$R_1$	Радиус закругления входной кромки, мм;
$R_2$	Радиус закругления выходной кромки, мм;
$H_1$	Расстояние до экрана (стенки) на входе, мм;
$H_2$	Расстояние до экрана на выходе, мм; (если экранов нет, то следует задавать $H_1 = 0$ и $H_2 = 0$ );
$\bar{F}_1$	Отношение площадей проходного сечения каналов рассматриваемого к предыдущему;
$\bar{F}_2$	Отношение площадей проходного сечения каналов рассматриваемого к последующему;
$\square$	Угол поворота потока в канале, град;
$L_0$	Расстояние от полости ввода охладителя в систему последовательных однотипных каналов с постоянными или слабо меняющимися размерами поперечных сечений до входа в данный канал (для расчета длины участка гидродинамической и тепловой стабилизации потока в канале), мм;
$Tu$	Степень турбулентности охладителя на входе в канал, % ; если $L_0$ задано равным нулю, то $Tu$ задается на входе в данный канал; если $L_0 > 0$ , то $Tu$ задается в полости ввода охладителя перед общим входом в каналы; (для задания конкретных значений величины $Tu$ рекомендуются данные табл. 2.3 [23] );
$\Pi_T$	Доля гидравлического периметра канала, участвующего в теплообмене.

Таблица 2.2

## Типовые каналы, предусмотренные в модуле GIDRA

Номер канала	Описание канала	Параметры, описывающие канал
1	Гладкий канал круглого сечения	$d$ - диаметр канала, мм; $L, R_1, R_2, H_1, H_2, \bar{F}_1, \bar{F}_2, \varphi, L_0, Tu, \Pi_T$ (см. табл. 2.1)
2	Плоский гладкий канал прямоугольного сечения	$b$ - ширина канала, мм; $h$ - высота канала, мм, ( $h > b$ ); $L, R_1, R_2, H_1, H_2, \bar{F}_1, \bar{F}_2, \varphi, L_0, Tu, \Pi_T$ (см. табл. 2.1)
3	Гладкий канал поперечного сечения неправильной формы	$F$ - площадь поперечного сечения канала, мм <sup>2</sup> ; $\Pi$ - периметр сечения канала, мм; $L, R_1, R_2, H_1, H_2, \bar{F}_1, \bar{F}_2, \varphi, L_0, Tu, \Pi_T$ (см. табл. 2.1)
4	Прямоугольный канал, расположенный между дефлектором и лопаткой с одним рядом отверстий для душирования на стенке дефлектора или без него	$b$ - ширина канала, мм; $h$ - высота канала, мм, ( $h > b$ ); $L, R_1, R_2, H_1, H_2, \bar{F}_1, \bar{F}_2, \varphi, L_0$ (см. табл. 2.1); $i, j$ - номера узлов ветки, по которой происходит душирование; если душирования нет, то $i = j$ ; $\Pi_T$ (см. табл. 2.1)
5	Прямоугольный канал, расположенный между дефлектором и лопаткой с несколькими рядами отверстий для душирования на стенке дефлектора	$b$ - ширина канала, мм; $h$ - высота канала, мм, ( $h > b$ ); $L, R_1, R_2, H_1, H_2, \bar{F}_1, \bar{F}_2, \varphi, L_0$ (см. табл. 2.1); $d_{стр}$ - диаметр отверстия душирования, мм; $H_d$ - толщина дефлектора, мм; $S_{стр}$ - расстояние между рядами отверстий вдоль канала, мм; $i, j$ - номера узлов ветки, по которой происходит душирование; если душирования нет, то $i = j$ ; $\Pi_T$ (см. табл. 2.1)

Номер канала	Описание канала	Параметры, описывающие канал
6	Канал, перегороденный столбиками-турбулизаторами, расположенными в шахматном порядке	$b_1$ - ширина канала на входе, мм; $h_1$ - высота канала на входе, мм, ( $h_1 > b_1$ ); $b_2$ - ширина канала на выходе, мм; $h_2$ - высота канала на выходе, мм, ( $h_2 > b_2$ ); $d$ - диаметр столбиков-турбулизаторов, мм; $Z_1$ - число столбиков-турбулизаторов на входе; $Z_2$ - число столбиков-турбулизаторов на выходе; $N$ - число рядов столбиков-турбулизаторов вдоль канала; $S_1$ - поперечный шаг, мм; $S_2$ - продольный шаг (вдоль канала), мм; $\varphi$ , $\Pi_T$ (см. табл. 2.1)
7	Канал, перегороденный столбиками-турбулизаторами, расположенными в коридорном порядке	$b_1$ - ширина канала на входе, мм; $h_1$ - высота канала на входе, мм, ( $h_1 > b_1$ ); $b_2$ - ширина канала на выходе, мм; $h_2$ - высота канала на выходе, мм, ( $h_2 > b_2$ ); $d$ - диаметр столбиков-турбулизаторов, мм; $Z_1$ - число столбиков-турбулизаторов на входе; $Z_2$ - число столбиков-турбулизаторов на выходе; $N$ - число рядов столбиков-турбулизаторов вдоль канала; $S_1$ - поперечный шаг, мм; $S_2$ - продольный шаг (вдоль канала), мм; $\varphi$ , $\Pi_T$ (см. табл. 2.1)
8	Канал, представляющий собой круглые отверстия в дефлекторе для выхода струй (кроме района входной кромки)	$d$ - диаметр отверстия, мм; $L$ - длина канала (толщина дефлектора), мм; $Z$ - количество отверстий в одном ряду (если количество отверстий разное, то берется среднее); $N$ - количество рядов отверстий; $R_1, R_2, H_1, H_2$ (см. табл. 2.1); $H_d$ - высота дефлектора, мм; $\varphi, Tu, \Pi_T$ (см. табл. 2.1); как правило $\varphi = 90^\circ$

Продолжение табл. 2.2

Номер канала	Описание канала	Параметры, описывающие канал
9	Канал, описывающий внутреннюю полость входной кромки лопатки, омываемой одним рядом плоских прямоугольных струй	$b$ - ширина щели, мм; $h$ - высота щели, мм; ( $h > b$ ); $L$ - длина щели, равная толщине дефлектора, мм; $Z$ - количество щелей в ряду; $R_1, R_2, \varphi, H_1, H_2$ (см. табл. 2.1); $H_d$ - высота дефлектора, мм; $B$ - ширина внутренней полости лопатки на срезе щелей, мм; $L_1$ - длина внутреннего обвода входной кромки, мм; $Tu$ (см. табл. 2.1)
10	Канал, описывающий внутреннюю полость входной кромки лопатки, омываемой одним рядом круглых струй	$d$ - диаметр отверстия, мм; $L$ - длина канала (толщина дефлектора), мм; $T_s$ - шаг отверстий, мм; $Z$ - количество отверстий в ряду; $R_1, R_2, \varphi, H_1, H_2$ (см. табл. 2.1); $H_d$ - высота дефлектора, мм; $B$ - ширина внутренней полости лопатки на срезе отверстий, мм; $L_1$ - длина внутреннего обвода входной кромки, мм; $Tu$ (см. табл. 2.1)
11	Сложный прямоугольный канал с внезапным расширением	$b_1$ - ширина узкого канала, мм; $h_{01}$ - высота узкого канала, мм; ( $h_{01} > b_1$ ); $L, R_1, H_1, \bar{F}_1, \varphi$ (см. табл. 2.1, но применительно к узкому каналу); $b_2$ - ширина широкого канала, мм; $h_{02}$ - высота широкого канала, мм; ( $h_{02} > b_2$ ); $L, R_2, H_2, \bar{F}_2, \varphi$ (см. табл. 2.1, но применительно к широкому каналу); $L_0$ (см. табл. 2.1); $Tu$ - степень турбулентности на входе в узкий канал, %; $\Pi_T$ - доля среднего гидравлического периметра, участвующего в теплообмене

Номер канала	Описание канала	Параметры, описывающие канал
12	Сложный прямоугольный канал с внезапным сужением	$b_1$ - ширина широкого канала, мм; $h_{01}$ - высота широкого канала, мм, ( $h_{01} > b_1$ ); $L, R_1, H_1, \bar{F}_1, \varphi$ (см. табл. 2.1, но применительно к широкому каналу); $b_2$ - ширина узкого канала, мм; $h_{02}$ - высота узкого канала, мм, ( $h_{02} > b_2$ ); $L, R_2, H_2, \bar{F}_2, \varphi$ (см. табл. 2.1, но применительно к узкому каналу); $L_0$ (см. табл. 2.1); $Tu$ - степень турбулентности на входе в широкий канал, %; $\Pi_T$ - доля среднего гидравлического периметра, участвующего в теплообмене
13	Канал поперечного сечения произвольной формы с задаваемым коэффициентом гидравлического сопротивления	$F$ - площадь поперечного сечения канала, мм <sup>2</sup> ; $\Pi$ - периметр сечения канала, мм; $L$ - длина канала, мм; $\zeta$ - коэффициент гидравлического сопротивления $L_0, Tu, \Pi_T$ (см. табл. 2.1)
14	Канал круглый, оребренный по периметру цилиндрическими кольцами	$d$ - диаметр неоребренного (широкого) канала, мм; $L, R_1, R_2, H_1, H_2, \bar{F}_1, \bar{F}_2, \varphi, L_0$ (см. табл. 2.1); $t_p$ - шаг расположения ребер, мм; $l_p$ - продольный размер ребра (его протяженность по длине канала), мм; $h_p$ - высота ребра, мм; $Tu, \Pi_T$ (см. табл. 2.1)
15	Канал поперечного сечения неправильной формы, оребренный по всему периметру или только по его части	$F_0$ - площадь поперечного сечения неоребренного (широкого) канала, мм; $\Pi_0$ - периметр сечения неоребренного канала, мм; $L, R_1, R_2, H_1, H_2, \bar{F}_1, \bar{F}_2, \varphi, L_0$ (см. табл. 2.1); $t_p$ - шаг расположения ребер, мм; $l_p$ - продольный размер ребра (его протяженность по длине канала, мм); $F_1$ - площадь поперечного сечения узкой части канала (в области ребер), мм; $\Pi_1$ - периметр сечения узкой части канала, мм; $Tu, \Pi_T$ (см. табл. 2.1)

Рекомендуемые значения степени турбулентности охладителя на входе в гидравлические каналы систем охлаждения лопаток газовых турбин

Условия входа потока в канал	Значение $Tu$ , %
Плавный вход	5
Прямой вход в канал с острой кромкой	10
Вход в канал с острыми кромками с поворотом на $90^0$	30
Вход в канал с острыми кромками через двойное девяностоградусное колено (поворот на $180^0$ )	40

Если частота вращения ротора турбины не равна нулю, то должен быть задан массив, элементы которого состоят из номера узла и значения соответствующего радиуса выраженного в метрах, отсчитанного от оси вращения ротора, для всех узлов, входящих в эквивалентную гидравлическую схему вращающейся лопатки.

Во втором файле исходных данных - ColGigr2.\*, также приведенном далее (см. рис. 2.28.), записывается общее число веток гидравлической сети и для каждой ветки - номера ее узлов и соответствующая средняя температура стенки канала, выраженная в градусах Цельсия. Если в каком-либо канале теплообмен между охладителем и телом лопатки отсутствует, то в этом случае среднюю температуру стенки канала следует задать равной нулю.

При подготовке и записи исходных данных вводимые числа должны записываться любым в формате, предусмотренном языком Фортран, с 1-й по 80-ю позиции строки включительно. Числа должны отделяться друг от друга и от комментариев как минимум одним пробелом. При записи чисел необходимо соблюдать лишь очередность их следования. Комментарии располагаются между числами совершенно произвольно и в неограниченном количестве. Нужно помнить, что в комментариях нельзя использовать цифры и символы "+", "-", "."

В выходной файл GidraRes.\* выводится идентификатор расчета,

имена файлов с исходными данными (с которыми производился данный расчет) и результаты расчета в виде таблицы с перечисленными для каждой ветки гидравлической сети значениями расходов, давлений, средних температур воздуха и стенки канала, коэффициентов гидравлического сопротивления, теплоотдачи, приведенной скорости потока, чисел Рейнольдса и т.д. Образец выходного файла *GidraRes.\** для конкретной лопатки показан далее (см. рис. 2.29)

На рис. 2.26 изображен эскиз рабочей лопатки и один из вариантов эквивалентной гидравлической схемы канальной системы охлаждения. Ветки гидравлической схемы 1-10, 10-20, 20-30, 30-40 представляют собой каналы круглого поперечного сечения, оребренные по всему периметру цилиндрическими кольцами (типовой канал № 14). Ветки 1-11, 11-21, 21-31, 31-41 - гладкие каналы с неправильной формой поперечного сечения (типовой канал № 3). Ветки 1-12, 12-22, 22-32, 32-42 и 1-13, 13-23, 23-33, 33-43 - гладкие каналы круглого поперечного сечения (типовой канал № 1). Ветки 1-14, 14-24, 24-34, 34-44 - каналы поперечного сечения произвольной формы с задаваемыми коэффициентами гидравлического сопротивления (типовой канал № 13).

На рис. 2.27. и рис. 2.28. приведены образцы (в виде фрагментов) входных файлов *ColGidr1.\** и *ColGidr2.\**, соответственно, для канальной рабочей лопатки, показанной на рис. 2.26. На рис. 2.29. представлены результаты расчета параметров охладителя, размещенные в файле *GidraRes.\**.

На рис. 2.30 изображен эскиз сопловой лопатки с поперечным течением охладителя и один из вариантов эквивалентной гидравлической схемы. Ветка гидравлической схемы 1-2 представляет собой типовой канал № 9, описывающий внутреннюю полость входной кромки лопатки, омываемую одним рядом плоских прямоугольных струй. Каналы 2-3, 3-5, 2-4, 4-6, 5-10 и 6-10 - представлены как гладкие каналы поперечного сечения неправильной формы (типовые каналы № 3). Каналы между

дефлектором и лопаткой можно представить также и в виде типовых каналов № 4. Ветка 10-20 - плоский гладкий типовой канал № 2. Участок гидравлической схемы 20-21 - это канал, перегороденный столбиками-турбулизаторами, расположенными в шахматном порядке (типовой канал № 6). Ветка 21-25 описывает конструкцию выходного канала лопатки. Это сложный прямоугольный канал с внезапным расширением: проходное сечение первой половины канала перегородено перемычками, а во второй половине перемычек нет и площадь проходного сечения больше (типовой канал № 11).

На рис.2.31 приведен образец входного файла ColGidr1.\* для сопловой лопатки, показанной на рис. 2.30.

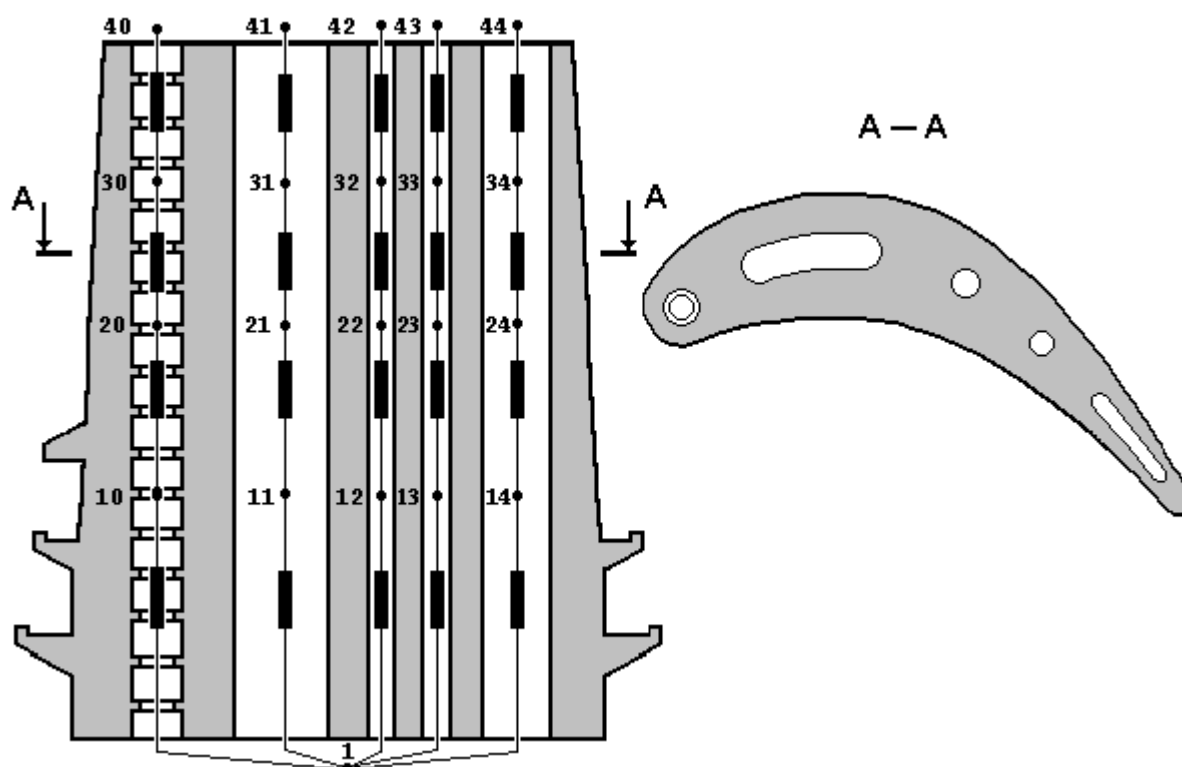


Рис. 2.26. Эскиз канальной рабочей лопатки с совмещенной эквивалентной гидравлической схемой



```

Рабочая лопатка первой ступени (образец)
1   воздух
15  число узлов с неизвестными давлениями
6   число узлов с заданными давлениями
20  число веток
50  частота вращения ротора, об/с
*****

Номера узлов гидравлической сети с неизвестными давлениями
*****
10 11 12 13 14   20 21 22 23 24   30 31 32 33 34
*****

i  j  Тип      Кол-во      Данные, описывающие канал
     канала параметров
*****
1  10  14 ( 15) d= 8 мм; L= 110 мм; Rвх= 0 мм; Rвых= 0 мм;
           Нвх= 0 мм; Нвых= 0 мм; F/Fвх= 0.06 ; F/Fвых= 1 ;
           Угол= 90 град; Lнач= 0 мм; lreb= 7 мм; lreb= 1 мм;
           breb= 1 мм; Tu= 30 % ; Pet= 1 ;
. . . . .
1  11  3  ( 13) S= 85 мм*мм; Pe= 64.3 мм; L= 110 мм;
           Rвх= 0 мм; Rвых= 0 мм; Нвх= 0 мм; Нвых= 0 мм;
           F/Fвх= 0.06 ; F/Fвых= 1 ;
           Угол= 90 град; Lнач= 0 мм; Tu= 30 % ; Pet= 1 ;
. . . . .
1  12  1  ( 12) d= 4 мм; L= 110 мм; Rвх= 0 мм; Rвых= 0 мм;
           Нвх= 0 мм; Нвых= 0 мм; F/Fвх= 0.06 ; F/Fвых= 1 ;
           Угол= 90 град; Lнач= 0 мм; Tu= 30 % ; Pt/P= 1 ;
. . . . .
13 23  1  ( 12) d= 4 мм; L= 75 мм; Rвх= 0 мм; Rвых= 0 мм;
           Нвх= 0 мм; Нвых= 0 мм; F/Fвх= 0.06 ; F/Fвых= 1 ;
           Угол= 0 град; Lнач= 110 мм; Tu= 30 % ; Pt/P= 1 ;
. . . . .
14 24 13 ( 7) S= 78 мм*мм; Pe= 55.3 мм; L= 75 мм;
           Dzita= 0.452 ; Lнач= 110 мм; Tu= 30 % ; Pet= 1 ;
. . . . .
*****

Массив известных давлений и температур воздуха: i P(i),бар T(i),град С
*****
1 9.2 210 40 7.61 0 41 7.39 0 42 7.11 0 43 6.83 0 44 6.44 0
=====
Массив радиусов: i RA(i),м (задается, если Z не равно нулю)
=====
1 0.975
10 1.085 11 1.085 12 1.085 13 1.085 14 1.085
20 1.160 21 1.160 22 1.160 23 1.160 24 1.160
30 1.220 31 1.220 32 1.220 33 1.220 34 1.220
40 1.275 41 1.275 42 1.275 43 1.275 44 1.275
=====end

```

Рис. 2.27. Образец входного файла ColGidr1.\* для канальной рабочей лопатки, показанной на рис. 2.26

Файл с заданием средних температур стенки

```

20   число веток
*****
i   j   Tстенки
*****
1  10   489
1  11   488
1  12   464
. . . . .
33 43   593
34 44   619
=====end

```

Рис. 2.28. Образец входного файла ColGidr2.\* для канальной рабочей лопатки, показанной на рис. 2.26

Рабочая лопатка тестовый пример

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОХЛАДИТЕЛЯ

Расчет выполнен для исходных данных,  
размещенных в файлах:

DBF\COLGIDR1.SIV  
DBF\COLGIDR2.SIV

i	j	G кг/с	Tв.ср град.С	Alfa Вт/(м*м гр)	Tст.ср град.С	Dzita(i,j) --	Re(i,j) —
1	10	.0081	298.1	2477.3	489.0	41.303	57643.2
10	20	.0081	405.9	1900.3	588.0	26.056	51088.9
20	30	.0081	464.8	1946.9	598.0	20.848	48099.1
24	34	.0925	307.8	2793.8	604.0	.448	222981.7
34	44	.0923	334.5	2820.6	619.0	.435	215794.2

i	j	P(i) бар	P(j) бар	T(i) град.С	T(j) град.С	F(i,j) мм*мм	L(i,j) --
1	10	9.200	8.847	210.0	365.4	.5027E+02	.067
10	20	8.847	8.458	365.4	441.1	.5027E+02	.076
20	30	8.458	8.042	441.1	485.9	.5027E+02	.084
24	34	8.884	8.387	293.4	321.7	.7800E+02	.649
34	44	8.387	6.440	321.7	346.9	.7800E+02	1.000

Рис. 2.29. Образец выходного файла GidrRes.\* для канальной рабочей лопатки, показанной на рис. 2.26

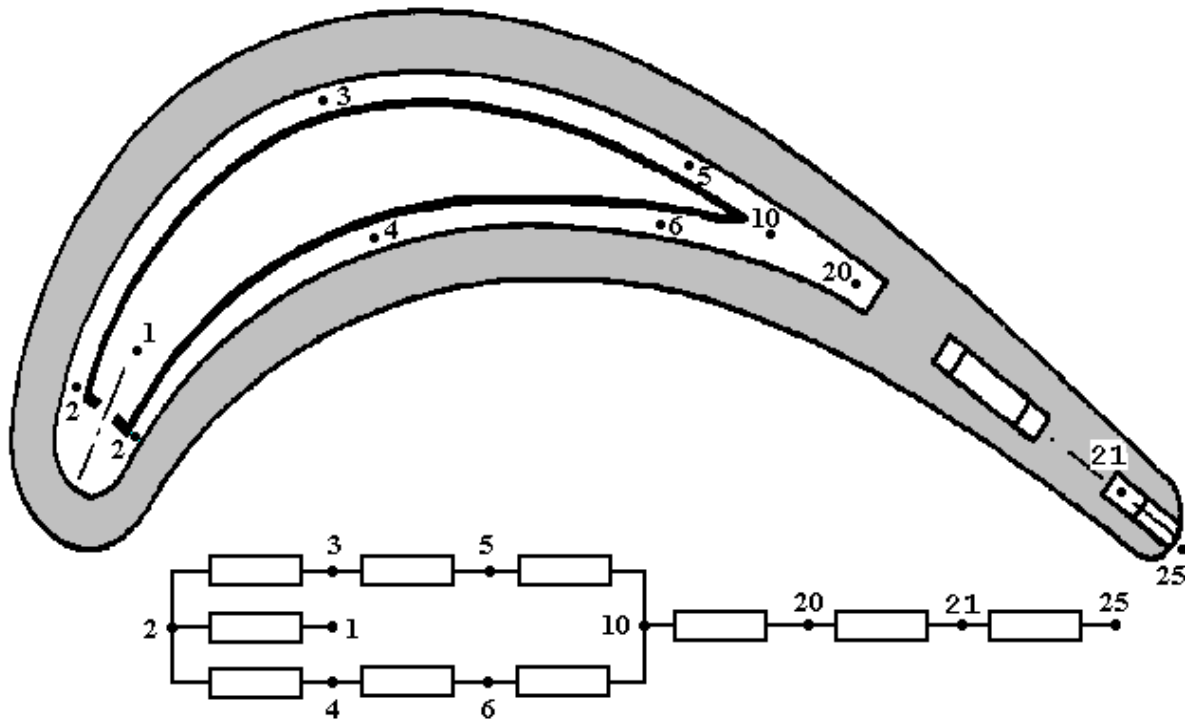


Рис. 2.30. Эскиз дефлекторной сопловой лопатки с соответствующей эквивалентной гидравлической схемой

Сопловая лопатка (горячие продувки) Вариант одиннадцатый

- 1 воздух
- 8 число узлов с неизвестными давлениями
- 2 число узлов с заданными давлениями
- 10 число веток
- 0 частота вращения ротора, об/с

\*\*\*\*\*

Номера узлов с неизвестными давлениями:

\*\*\*\*\*

2 3 4 5 6 10 20 21

\*\*\*\*\*

i	j	Тип канала	Кол-во параметров	Данные, описывающие канал
---	---	---------------	----------------------	---------------------------

\*\*\*\*\*

1	2	9	(13)	b= 2.5 мм; h= 10 мм; L= 7.8 мм; Z= 6 R <sub>ВХ</sub> = 0 мм; R <sub>ВЫХ</sub> = 0 мм; Угол = 180 град; Н <sub>ВХ</sub> = 0 мм; Н <sub>ВЫХ</sub> = 4.2 мм; Н <sub>деф</sub> = 88 мм; B = 10.6 мм; L <sub>кромки</sub> = 14.5 мм; Tu= 10 %;
2	3	3	(13)	F= 61.6 кмм; Pe= 177.3 мм; L= 25.5 мм; R <sub>ВХ</sub> = 0 мм; R <sub>ВЫХ</sub> = 0 мм; Н <sub>ВХ</sub> = 0 мм; Н <sub>ВЫХ</sub> = 0 мм; F/F <sub>ВХ</sub> = 0.3 ; F/F <sub>ВЫХ</sub> = 1 ; Угол= 30 град; L <sub>нач</sub> = 0 ; Tu= 30 %; Pt/P= 0.5 ;
3	5	3	(13)	F= 61.6 кмм; Pe= 177.3 мм; L= 25.0 мм; R <sub>ВХ</sub> = 0 мм; R <sub>ВЫХ</sub> = 0 мм; Н <sub>ВХ</sub> = 0 мм; Н <sub>ВЫХ</sub> = 0 мм; F/F <sub>ВХ</sub> = 1 ; F/F <sub>ВЫХ</sub> = 1 ; Угол= 20 град; L <sub>нач</sub> = 25.5 ; Tu= 30 %; Pt/P= 0.5 ;
5	10	3	(13)	F= 156.4 кмм; Pe= 182.9 мм; L= 9.2 мм; R <sub>ВХ</sub> = 0 мм; R <sub>ВЫХ</sub> = 0 мм; Н <sub>ВХ</sub> = 0 мм; Н <sub>ВЫХ</sub> = 0 мм; F/F <sub>ВХ</sub> = 1 ; F/F <sub>ВЫХ</sub> = 0.5 ; Угол= 3 град; L <sub>нач</sub> = 50.5 ; Tu= 30 %; Pt/P= 0.5 ;
2	4	3	(13)	F= 157.6 кмм; Pe= 181.1 мм; L= 23 мм;
.....				
4	6	3	(13)	F= 157.6 кмм; Pe= 181.1 мм; L= 25 мм;
.....				
6	10	3	(13)	F= 61.6 кмм; Pe= 173.3 мм; L= 6.5 мм; R <sub>ВХ</sub> = 0 мм; R <sub>ВЫХ</sub> = 0 мм; Н <sub>ВХ</sub> = 0 мм; Н <sub>ВЫХ</sub> = 0 мм; F/F <sub>ВХ</sub> = 1 ; F/F <sub>ВЫХ</sub> = 0.237 ; Угол= 5 град; L <sub>нач</sub> = 48 ; Tu= 30 %; Pt/P= 0.5 ;
10	20	2	(13)	h= 4 мм; b= 88 мм; L= 6.4 мм; R <sub>ВХ</sub> = 0 мм; R <sub>ВЫХ</sub> = 0 мм; Н <sub>ВХ</sub> = 0 мм; Н <sub>ВЫХ</sub> = 0 мм; F/F <sub>ВХ</sub> = 1 ; F/F <sub>ВЫХ</sub> = 1 ; Угол= 0 град; L <sub>нач</sub> = 0 ; Tu= 20 %; Pt/P= 0.5 ;
20	21	6	(12)	b <sub>ВХ</sub> = 1.8 мм; h <sub>ВХ</sub> = 88 мм; b <sub>ВЫХ</sub> = 1 мм; h <sub>ВЫХ</sub> = 88 мм; d= 5 мм; Z <sub>ВХ</sub> = 8 ; Z <sub>ВЫХ</sub> = 8 ; N= 3 ; S <sub>поп</sub> = 11 мм; S <sub>пр</sub> = 6 мм; Угол= 90 град; Pt/P= 1 ;
21	25	11	(17)	b <sub>уз</sub> = 1 мм; h <sub>уз</sub> = 60 мм; L <sub>уз</sub> = 2 мм; R <sub>ВХ</sub> = 0 мм; Н <sub>ВХ</sub> = 0 мм; F <sub>уз</sub> /F <sub>ВХ</sub> = 0.75 ; f <sub>уз</sub> = 0 ; b <sub>ш</sub> = 1 мм; h <sub>ш</sub> = 88 мм; L <sub>ш</sub> = 2 мм; R <sub>ВЫХ</sub> = 0 мм; Н <sub>ВЫХ</sub> = 0 мм; F <sub>ш</sub> /F <sub>ВЫХ</sub> = 0.5 ; f <sub>ш</sub> = 0 ; L <sub>нач</sub> = 0 мм; Tu= 30 %; Pt/P= 1 ;

\*\*\*\*\*

Рис. 2.31. Образец входного файла ColGidr1.\* для сопловой лопатки, показанной на рис. 2.30

## 2.5. Работа с модулем TERM

Модуль TERM предназначен для расчета стационарных двумерных температурных полей, а также напряжений термоупругих, от центробежных сил (ЦБС) и изгибных от воздействия потока газа, в охлаждаемых лопатках газовых турбин. Модуль состоит из 4-х программ, название и функциональное назначение которых показано в табл. 2.4.

Таблица 2.4  
Программный состав модуля TERM

Наименование программы	Функциональное назначение программы
SETKA	Ввод исходных данных, проверка правильности их задания, разбиение рассчитываемого сечения лопатки на конечные треугольные элементы
BCOND	Преобразование задаваемых граничных условий теплообмена в форму, пригодную для использования при решении дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных элементов
TERM	Собственно расчет температурного поля (решении дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных элементов) и вывод результатов расчета в графической форме
POKR	Расчет термобарьерного покрытия
SIGMA	Расчет термоупругих и суммарных напряжений (термоупругих, изгибных и растяжения от ЦБС) в сечении лопатки. Оценка прочности и вывод результатов.

Исходные данные для модуля TERM записываются в четырех файлах.

В первом файле ColSetka.\* сосредоточены данные, описывающие геометрию сечения рассчитываемой лопатки.

Для формирования этого файла плоскую геометрическую модель сечения лопатки размещают в правой прямоугольной системе координат и разбивают на произвольные восьмиузловые зоны (макроэлементы), как показано на примере канальной рабочей лопатки на рис. 2.32. Граничные узлы макроэлементов для всего расчетного сечения нумеруются последовательно в произвольном порядке. Общее число граничных узлов

не должно превышать 5000. На рис. 2.32 для примера показана нумерация макроэлемента номер I.

В файле ColSetka.\*, фрагмент которого показан на рис. 2.33, после однострочного комментария к файлу записывается три целых числа: количество макроэлементов (зон), общее количество граничных узлов макроэлементов и количество дополнительных внутренних узлов, которые должна сгенерировать программа, на половине каждой стороны макроэлемента. Последнее число служит для изменения размеров и числа конечных треугольных элементов и может принимать фиксированные значения 0, 1 или 2.

Далее в файл ColSetka.\* для каждого пронумерованного узла записывают его порядковый номер  $i$  и координаты  $X_i$  и  $Y_i$ , выраженные в мм.

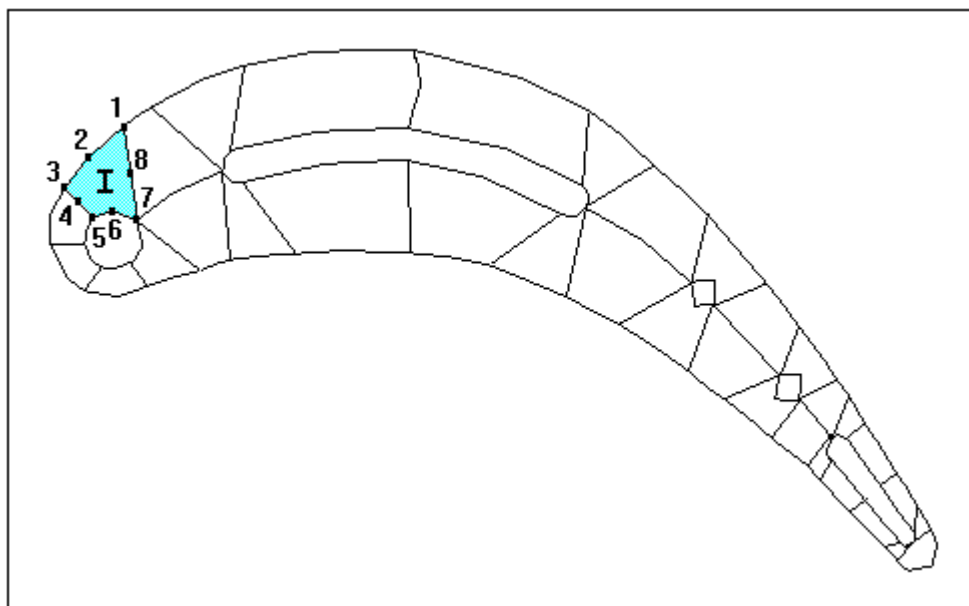


Рис. 2.32. Разбивка сечения лопатки на макроэлементы

Далее для каждой зоны (макроэлемента) необходимо описать номера принадлежащих ей узлов, причем, порядок перечисления узлов должен производиться по следующему правилу.

Одна из вершин четырехугольного макроэлемента принимается за

начальную (на рис. 2.32 для зоны I - это узел с номером 1). Затем против часовой стрелки перечисляются номера всех восьми узлов макроэлемента. При этом автоматически формируется понятие «стороны» макроэлемента: первые три узла (номера 1, 2, 3) образуют первую сторону; третий, четвертый и пятый узлы (номера 3, 4, 5) - вторую сторону; пятый, шестой и седьмой узлы (номера 5, 6, 7) будут расположены на третьей стороне, а четвертая сторона будет описываться номерами седьмого, восьмого и первого узлов (номера 7, 8, 1).

Номера «сторон» макроэлементов в дальнейшем будут использоваться при задании граничных условий теплообмена.

Помимо номеров граничных узлов для каждой зоны записываются кодовые номера материалов для каждого макроэлемента. Модуль TERM позволяет рассчитывать композитные лопатки, состоящие из нескольких материалов (не более трех одновременно), и кодовый номер - это номер, под которым данный материал значится в БД METALL.

Во втором файле ColAlfa.\* содержатся данные с описанием граничных условий теплообмена со стороны газа. Этот файл создается модулем ALFA автоматически параллельно с его выходным файлом и имеет такой же вид, как и файл AlfaRes.\* (см. рис. 2.23).

```

Рабочая лопатка канальная
34 - число макроэлементов
158 - число узлов
1 - количество внутренних узлов на половине стороны макроэлемента
***** Номера и координаты узлов
1 -46.8 15 2 -51.4 10.8 3 -53.9 7.7 4 -52.2 6
5 -50.3 4 6 -47.8 5 7 -45 3.8 8 -45.8 9
9 -55.4 4.5 10 -55.6 0.8 11 -53.4 0.8 12 -51.3 0.8
13 -51.2 2.6 14 -53.6 -3 15 -51.3 -4.7 16 -50.4 -3.2
17 -49.4 -1.8 18 -50.6 -0.8 19 -47 -5.6 20 -43.6 -4.3
21 -44.7 -2.7 22 -45.6 -1.4 23 -47.4 -2.1 24 -40.7 -3.3
25 -37 -2.3 26 -41.2 0.7 27 -44.3 0.6 28 -35.2 -1.7
29 -33.5 -1.2 30 -34. 4.2 31 -34.6 9.6 32 -39.6 7.4
.....
142 10 7 143 2 21 144 -11 24.4 145 -11 20
146 -12 15 147 0 12.6 148 -23.4 24.2 149 -32 22.6
150 -32.8 17 151 -33.4 12.2 152 -23 14.4 153 -37 20.8
154 -42.8 17.8 155 -38.7 13.6 156 -34.4 11.3 157 -44.8 16.4
**Зона *** Номера граничных точек *** Номер материала из БД
1 1 2 3 4 5 6 7 8 1
2 3 9 10 11 12 13 5 4 1
3 10 14 15 16 17 18 12 11 1
.....
31 89 93 94 95 96 97 91 90 1
32 84 88 89 90 91 92 86 85 1
33 82 83 84 85 86 87 80 79 1
34 74 78 82 79 80 81 76 75 1

```

Рис. 2.33. Фрагмент файла ColSetka.\*

Третий файл ColAG.\*, фрагмент которого показан на рис.2.34, служит для записи граничных условий теплообмена со стороны охладителя. Здесь же представлена дополнительная информация по теплообмену с газом.

Задание граничных условий теплообмена со стороны охладителя осуществляется путем перечисления номеров макроэлементов (зон), «сторон», контактирующих с охладителем, и соответствующих значений средних коэффициентов теплоотдачи ( $\text{Alfa}$ ) и температур охладителя ( $T_{\text{в}}$ ) для каждой половины стороны макроэлемента. Последнее обстоятельство представляет собой резервную возможность повысить степень подробности задания граничных условий. На практике в подавляющем большинстве случаев на обеих половинах сторон макроэлементов задают



одинаковые значения средних коэффициентов теплоотдачи и температур охладителя.

Если TERM работает в автономном режиме, то Alfa и Tв должны быть определены предварительно. Если же ведется расчет в смешанном или комплексном режимах, то задаваемые значения Alfa и Tв рассматриваются как первое приближение и уточняются по ходу расчета.

Упомянутая выше дополнительная информация по теплообмену с газом, приводимая в файле ColAG.\*, состоит в перечислении номеров макроэлементов и их «сторон», контактирующих с газом. Перечисление следует начинать с макроэлементов на выходной кромке лопатки со стороны спинки, затем двигаться по выпуклой поверхности профиля ко входной кромке и от нее по вогнутой поверхности - к выходной кромке.

Наконец, в четвертом файле ColMomCr.\* записываются изгибающие моменты  $M_x$  и  $M_y$ , действующие в рассматриваемом сечении со стороны потока газа, величина центробежной силы, максимально допускаемая температура для материала лопатки, минимальный коэффициент запаса по длительной прочности, необходимый для оценки прочности, и температура охлаждающего воздуха на входе в систему охлаждения, используемая при расчете глубины охлаждения лопатки. Образец файла ColMomCr.\* показан на рис. 2.35.

Свойства материала лопатки, используемые при расчете температурного и напряженного состояния, берутся из специального промежуточного файла, создаваемого АБД METALL.

```

Рабочая лопатка канальная
25 - число сторон, граничащих с воздухом
-- Зона-сторона---Alfa1---Тв.1 град---Alfa2---Тв.2
  1      3      1975.5  445.4    1975.5  445.4
  2      3      1975.5  445.4    1975.5  445.4
  3      3      1975.5  445.4    1975.5  445.4
  4      3      1975.5  445.4    1975.5  445.4
  .....
 29      3      2853.1  262.3    2853.1  262.3
 28      3      2853.1  262.3    2853.1  262.3
 27      3      2853.1  262.3    2853.1  262.3
 26      3      2853.1  262.3    2853.1  262.3
35 число сторон с газом (ниже соединение зон с газом:   зона - сторона)
30 2
29 1
28 1
27 1
.....
32 1
31 1
30 1
*****

```

Рис. 2.34. Фрагмент файла ColAG.\*

```

Рабочая лопатка канальная
0   - изгибающий момент Мх, н*м;
0   - изгибающий момент Му, н*м;
0   - центробежная сила, Мн;
850. - максимально допускаемая температура для материала лопатки, град. С ;
2.0 - минимальный коэффициент запаса по длительной прочности;
200 - Т охл. воздуха на входе, град. С

```

Рис. 2.35. Образец файла ColMomCr.\*

Результаты работы модуля TERM, как об этом говорилось в Главе 1, п. 1.7, представляются в основном в графической форме по той простой причине, что корректный неавтоматизированный анализ числовых массивов, получаемых в процессе конечно-элементных расчетов не только затруднителен, но и попросту невозможен.

Для оперативного контроля правильности задания геометрии сечения рассчитываемой лопатки и сторон макроэлементов, граничащих с газом и

охладителем, а также для визуализации процесса генерации конечных элементов, на монитор выводятся расчетные схемы, примеры которых для рабочей лопатки с девятью круглыми гладкими каналами для прокачки охлаждающего воздуха показаны на рис. 1.20 и 1.21 в Главе 1, п.1.7.

Результаты расчета температурного поля изображаются в виде распределения температуры на внешней поверхности лопатки (см. рис. 1.22), области сечения, в которой температура превышает максимально допускаемую (см. рис. 1.23) и температурного поля в виде областей сечения лопатки, в которых температура находится в некоторых числовых интервалах (см. рис. 1.24).

Результаты расчета и анализа напряженного состояния лопатки также выводятся в графической форме, о чем дают представление рис. 1.28 и 1.29.

Наряду с графическими файлами модулем TERM создается и текстовый файл с именем TermRes.\*, где для каждого узла, граничащего с газом и охладителем, приводятся координаты, значения температуры и напряжений. В отдельную таблицу сведены узлы, в которых температура превышает заданную максимально допускаемую величину. То же самое сделано и для узлов, где коэффициент запаса по длительной прочности меньше минимально допускаемого.

Пример файла TermRes.\* в данной работе не приводится в связи с тем, что на практике он используется редко.

## **2.6. Работа в смешанных и комплексном режимах**

Как было показано в Главе 1 настоящей монографии, комплекс COLD предусматривает два смешанных режима: UPI-ALFA и GIDRA-TERM.

В режиме UPI-ALFA организован автоматический последовательный запуск на выполнение модулей UPI и ALFA с передачей необходимых данных через систему промежуточных файлов.

В качестве исходных данных, как следует из рис. 2.36, где показано меню по формированию пакета входных файлов для смешанного режима UPI-ALFA, задают идентификатор расчета, файл с описанием профиля ColProf1.\* (см. рис. 2.15), файл с описанием параметров потока ColFlow1.\* (см. рис. 2.16) и файл с параметрами выдува пленки ColFilm.\* (см. рис. 2.22).

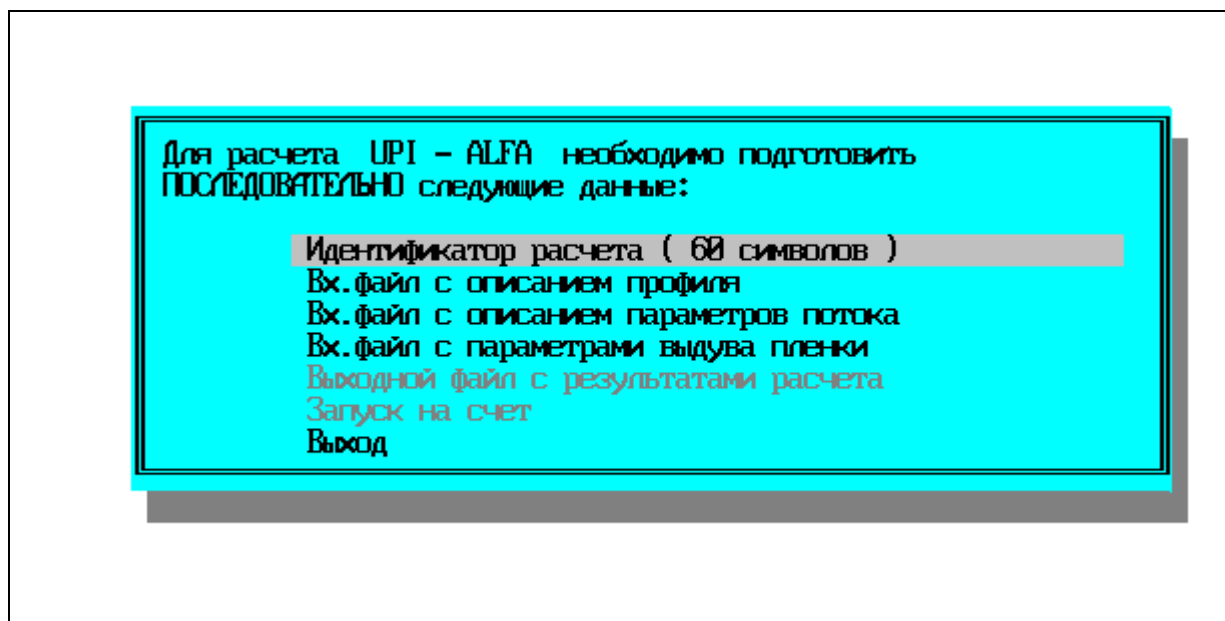


Рис. 2.36. Меню по формированию пакета входных файлов для смешанного режима UPI-ALFA

Результаты расчета по смешанному режиму UPI-ALFA выводятся в текстовый файл AlfaRes.\*, показанный на рис. 2.23, и на экран монитора (см. рис. 2.24) с последующей записью в графический файл. При использовании пленочного охлаждения создается дополнительный графический файл, изображенный на рис. 2.25.

Смешанный режим GIDRA-TERM обеспечивает в итерационном процессе попеременное выполнение программ GIDRA и TERM для достижения совместной сходимости параметров охладителя и температурного состояния лопатки.

Меню по формированию пакета входных файлов для смешанного режима GIDRA-TERM показано на рис. 2.37.

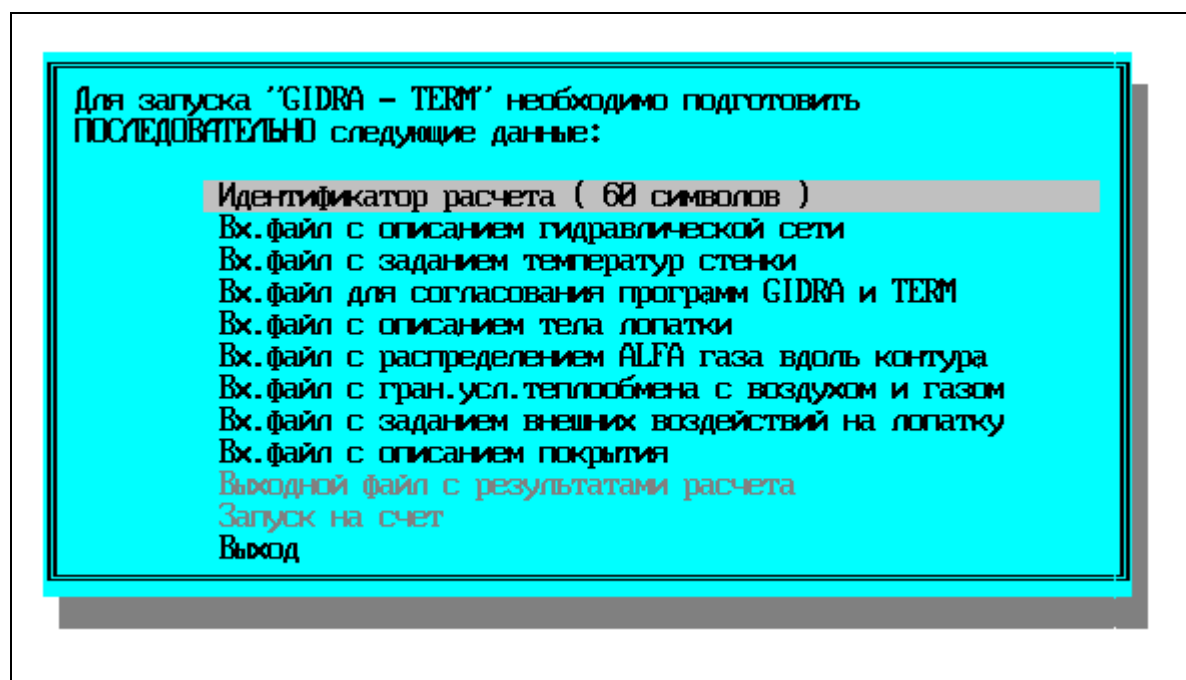


Рис. 2.37. Меню по формированию пакета входных файлов для смешанного режима GIDRA-TERM

В виду того, что модуль TERM на каждой итерации получает обновленные граничные условия теплообмена со стороны охладителя, а GIDRA - уточненные значения температур поверхностей лопатки, омываемых охладителем, для выполнения расчета по смешанному режиму помимо рассмотренных ранее входных файлов для модулей GIDRA и TERM, необходимо сформировать еще один файл с именем ColConct.\*, в котором содержалась бы информация о взаимной связи ветвей эквивалентной гидравлической схемы и сторон макроэлементов (в температурной задаче), контактирующих с охладителем. На рис. 2.37. - это «Вх. файл для согласования программ GIDRA и TERM».

Рассмотрим формирование файла ColConct.\* на примере охлаждаемой сопловой лопатки дефлекторного типа, показанной на рис. 2.38, где изображена также соответствующая эквивалентная гидравлическая схема. В сечении оболочки лопатки показано три макроэлемента температурной сетки: 10, 11 и 12. Стрелки на этих макроэлементах обозначают начало отсчета их «сторон». Как видно из рис. 2.38, с указанными тремя

макроэлементами, каждый из которых обращен к охладителю «стороной» номер 3, контактирует гидравлическая ветка 2 - 3.

На рис. 2.39 показан фрагмент файла ColConct.\*, описывающий рассматриваемый пример. Как видно из рис. 2.39, в начале файла записывается комментарий, затем - количество гидравлических веток, работающих в TERMe (для данной лопатки это количество равно 9). Далее для каждой ветки гидравлической схемы, обозначаемой номерами начального и конечного узлов  $i$  и  $j$  (в нашем примере  $i = 2$ ,  $j = 3$ ), указывается количество «сторон» макроэлементов, примыкающих к данной ветке. Затем построчно перечисляются номера зон и номера «сторон» элементов, примыкающих к этому каналу.

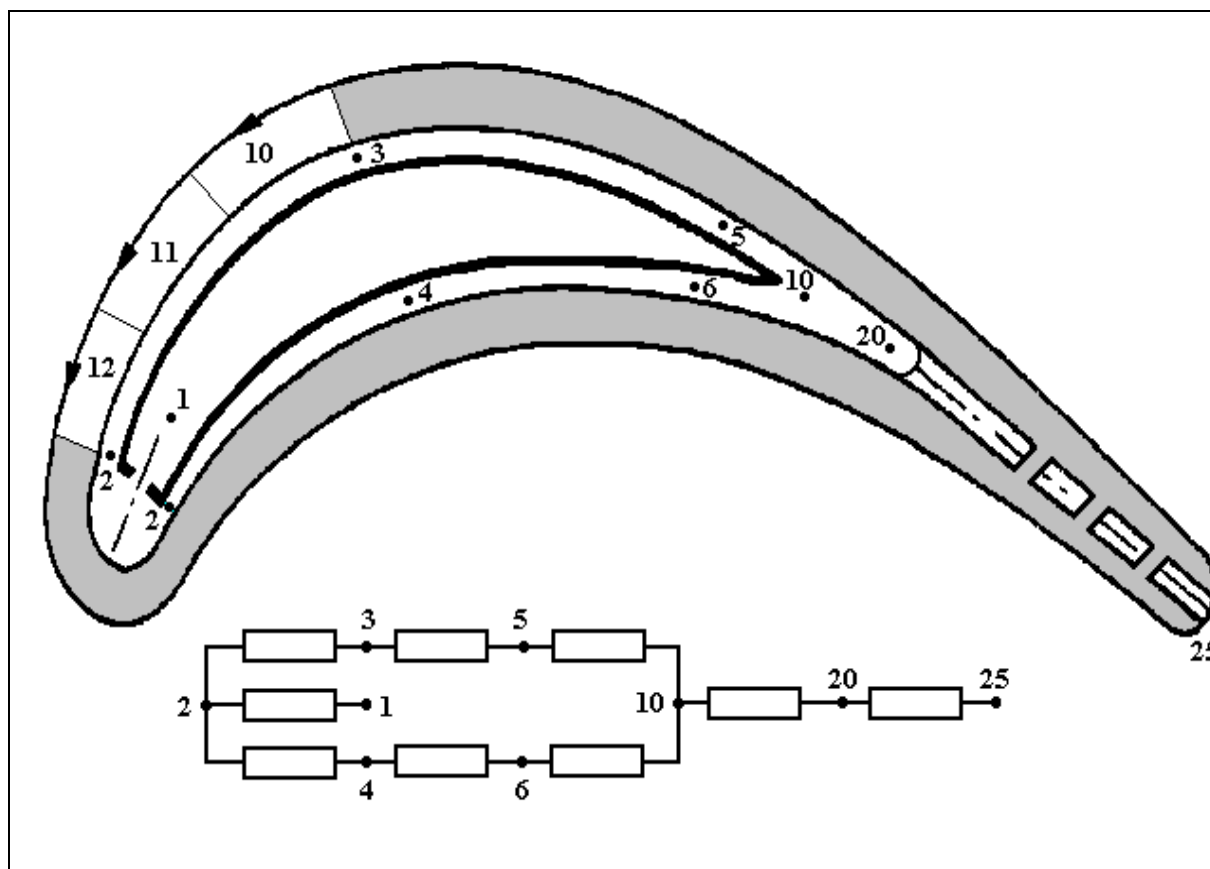


Рис. 2.38. Охлаждаемая сопловая лопатка дефлекторного типа с соответствующей эквивалентной гидравлической схемой

Помимо формирования организационного файла ColConct.\* в

комплексе, автоматически создаются временные рабочие файлы с граничными условия теплообмена со стороны охладителя для модуля TERM и со средними температурами поверхностей лопатки, омываемых охладителем, для модуля GIDRA, которые обновляются на каждой итерации GIDRA - TERM. Таким образом обеспечивается в необходимом объеме информационная согласованность программ GIDRA и TERM для их совместного расчета.

```

Дефлекторная сопловая лопатка
9 количество гидравлических веток, работающих в TERMе
=====
i   j   Количество сторон   Зона   сторона
=====
. . . . .
2   3           3           10     3
           11     3
           12     3
. . . . .
=====end

```

Рис. 2.39. Фрагмент файла ColConst.\*

При комплексном режиме расчетные модули UPI, ALFA, GIDRA и TERM задействованы в последовательности, изображенной на рис. 1, а текущее состояние расчета контролируется пользователем по схеме, выводимой на монитор компьютера и показанной в самом общем виде, т.е. при наличии пленочного охлаждения и термобарьерного покрытия, на рис. 2.40. На экране активный модуль и текущие значения номеров итераций выделяются красным цветом.

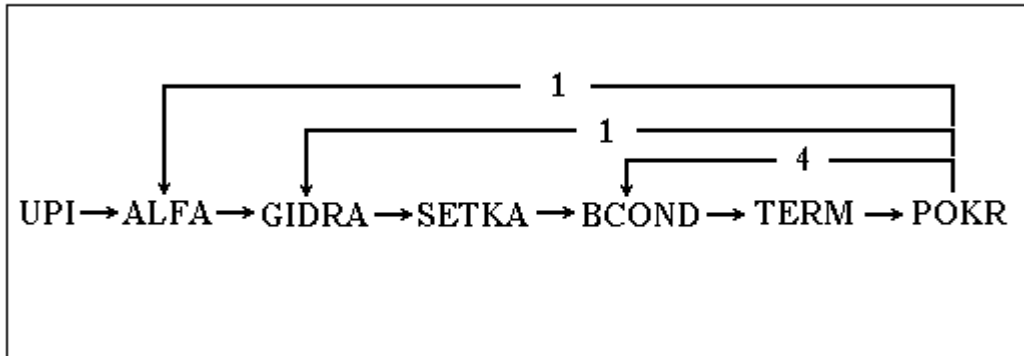


Рис. 2.40. Схема контроля процесса расчета в комплексном режиме

Из анализа меню по формированию пакета входных файлов для работы в комплексном режиме, приведенном на рис. 2.41, следует, что каких-либо принципиальных новшеств в части исходных данных комплексный режим не содержит. В результате расчета создается один выходной текстовый файл и ряд уже известных графических, сопровождающих весь процесс расчета.

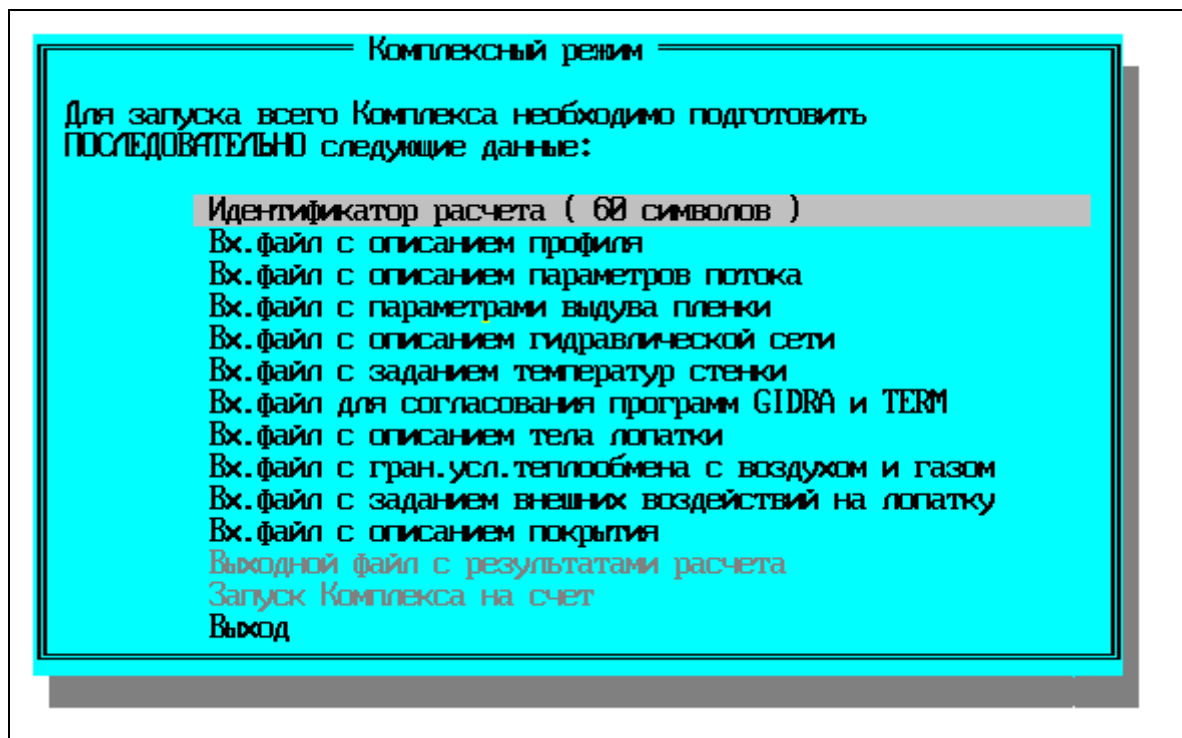


Рис. 2.41. Меню по формированию пакета входных файлов для комплексного режима



## 2.7. Работа с базой выходных файлов

Общее представление порядка работы с базой выходных файлов дают рис. 2.42 - 2.45.

На рис. 2.42 представлен вид меню по выбору типа выходных файлов, который открывается при выборе пункта «База Выходных файлов». После выбора из подменю пункта «Текстовые» на экране появляется меню по работе с базой выходных текстовых файлов, показанное на рис. 2.43. Выбрав в нем пункт, например, «Вых. файл «GIDRA» (автономный режим)» мы попадаем в меню следующего уровня со списком текстовых файлов с результатами расчетов по программе «GIDRA» в автономном режиме.

Возможные операции с выходными файлами указаны на рис. 2.45. Выходные файлы можно смотреть, удалять и распечатывать.

Если из меню, показанном на рис. 2.42, выбрать тип выходных файлов «Графические», то перед пользователем появится меню по работе с базой выходных графических файлов, показанное на рис. 2.44. Как видно из рис. 2.44, пользователю предоставляется возможность просмотреть на экране монитора: распределение относительных скоростей вдоль обвода профиля; распределение коэффициентов теплоотдачи вдоль наружного обвода профиля; разбивку сечения лопатки на макро- и конечные элементы; температуру стенки вдоль наружной поверхности лопатки; температурное поле в сечении лопатки и т.д.

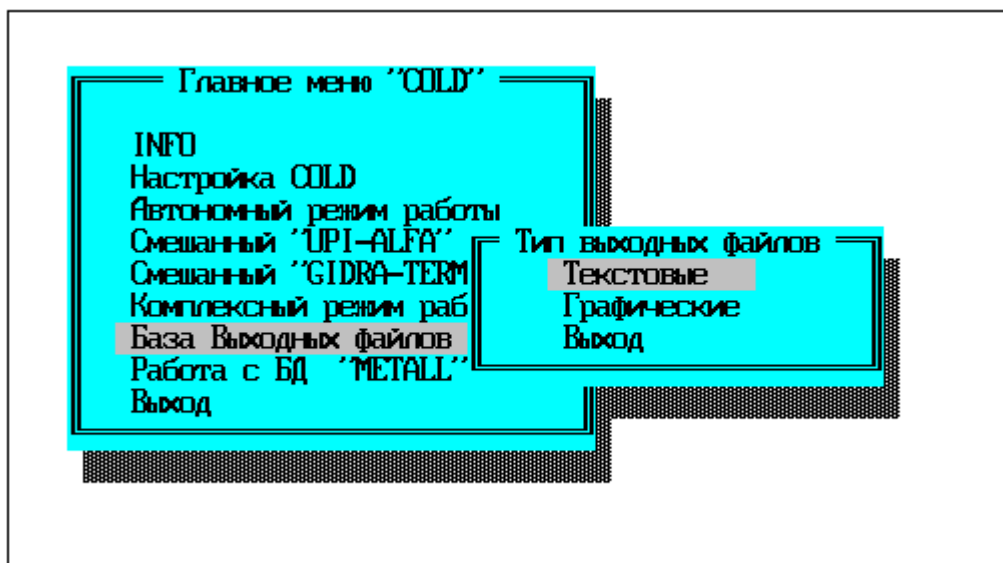


Рис. 2.42. Вид меню по выбору типа выходных файлов

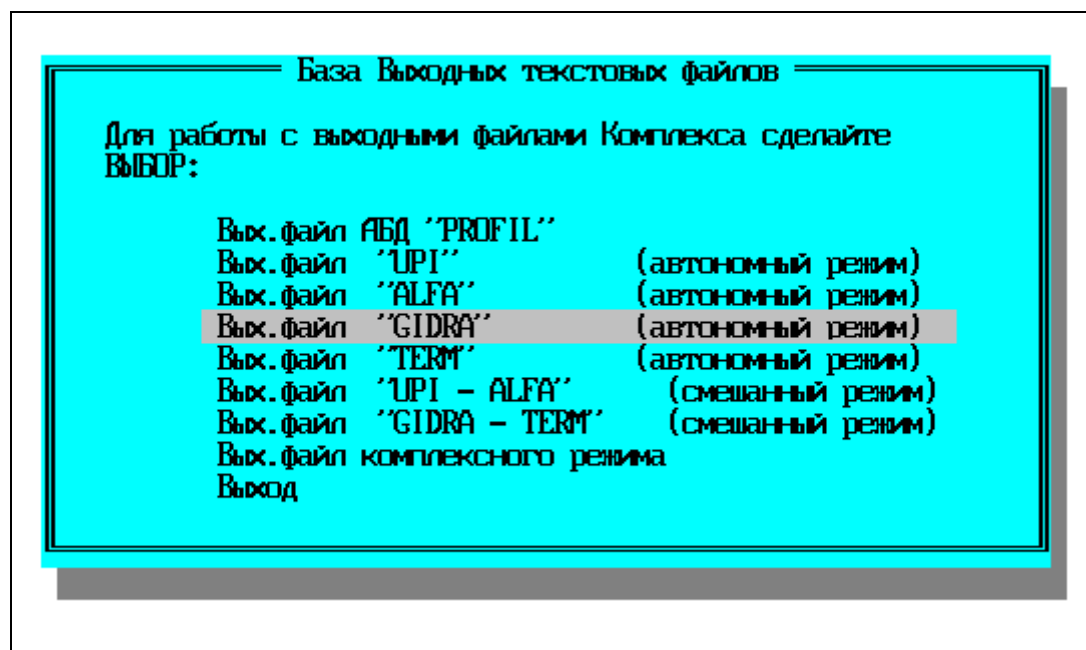


Рис. 2.43. Вид меню по работе с базой выходных текстовых файлов

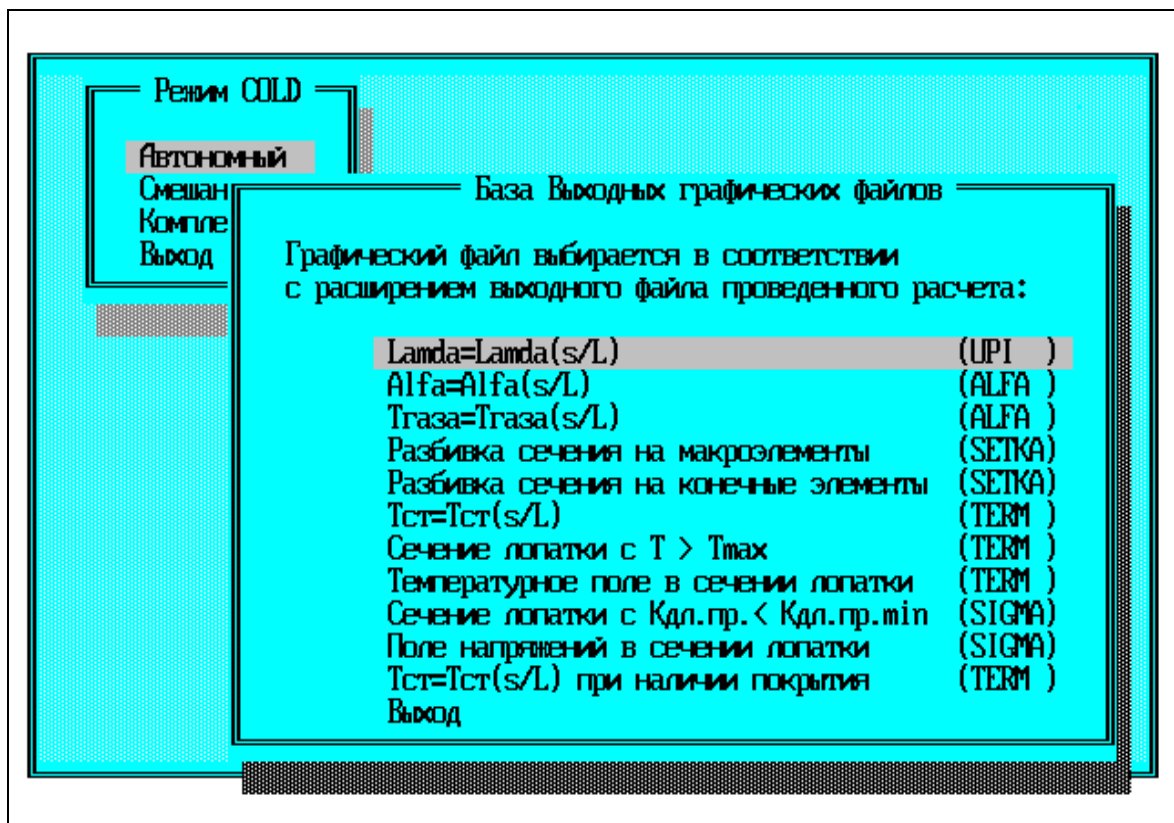


Рис. 2.44. Вид меню по работе с базой выходных графических файлов

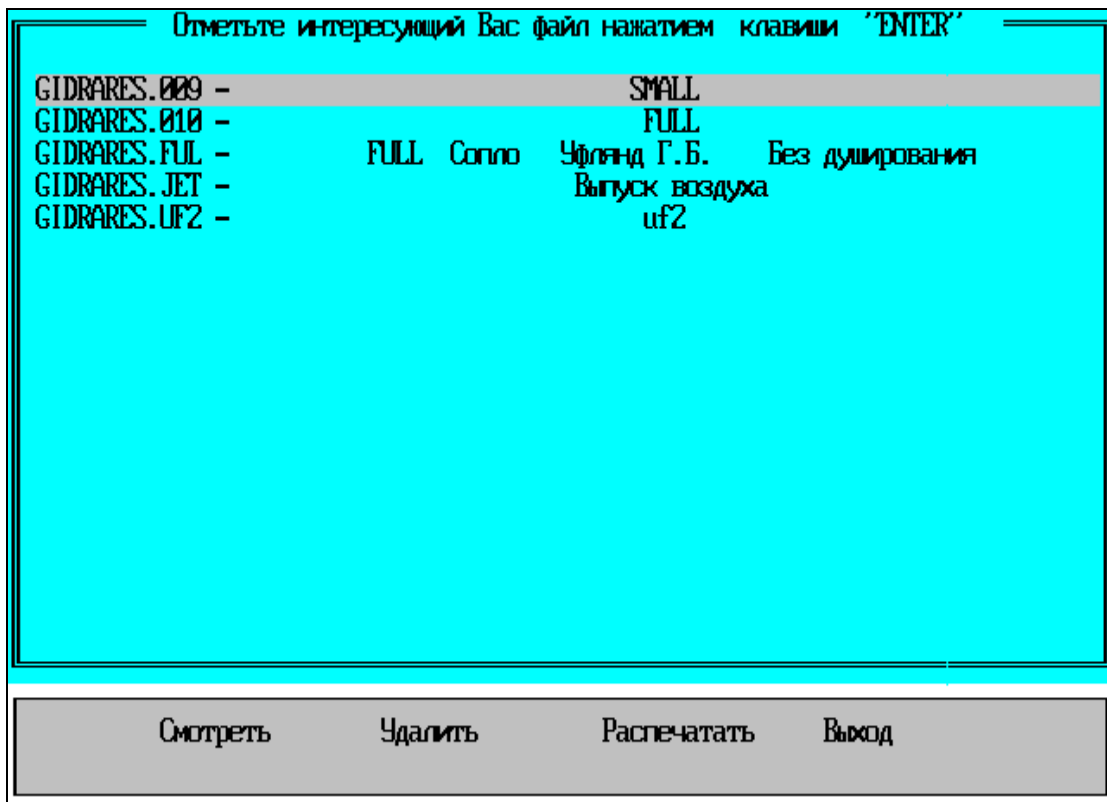


Рис. 2.45. Возможные операции с выходными файлами

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Программный комплекс COLD очень полезен для оценки теплонпряженного состояния охлаждаемых турбинных лопаток. Достоинством данного программного продукта является решение сопряженной задачи внешнего и внутреннего обтекания стенки профиля лопатки и распространением тепла в стенке. Кроме того, программный комплекс обладает возможностью дополнения его инструментария самими пользователями, например, введением новых типов внутренних каналов охлаждения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Венедиктов В.Д., Грановский А.В., Карелин А.М., Колесов А.Н., Мухтаров М.Х. Атлас экспериментальных характеристик плоских решеток охлаждаемых газовых турбин. - М.: ЦИАМ, 1990. - 393 с.
2. Исаков С.Н., Пирогова И.Н., Тугушев Н.У. Комбинированный метод решения прямой задачи гидродинамики решеток профилей турбомашин // Изв. вузов. Энергетика, 1984. - 8. - С.65-72.
3. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. - М.: Энергия, 1974. - 592 с.
4. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. - М. - Л.: Машиностроение, 1974. - 480 с.
5. Abu-Channam B.J., Shaw R. Natural Transition of Boundary-Layers-The Effects of Turbulence. Pressure Gradient and Flow History // Journ. of Mech. Eng. Scie. 1980. - V. 22. - № 5. - P. 213-228.
6. Дородницын А.А., Лойцянский Л.Г. К теории перехода ламинарного слоя в турбулентный // Прикладная математика и механика. - 1945. - Том 9. - Вып.4. - С. 269-285.
7. Чен К., Тайсон Н. Применение теории турбулентных пятен Эммонса к обтеканию затупленных тел // РТК. - 1971. - 5. - С. 63.
8. Зысина-Моложен Л.М., Зысин Л.В., Поляк М.П. Теплообмен в турбомашине. - Л.: Машиностроение, 1974. - 336 с.
9. Решетки профилей лопаток турбин. Расчет на ЭВМ граничных условий теплообмена. РТМ 108.020.02. - Л.: ЦКТИ, 1980, 43 с.
10. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1974. - 711 с.
11. Чжен П. Отрывные течения. Том 1,2. - М.: Мир, 1972.
12. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Турбулентный пограничный слой сжимаемого газа. - Новосибирск: Издание СО АН СССР, 1962.
13. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 320 с.
14. Зысина-Моложен Л.М. Приближенный метод расчета теплового пограничного слоя // ИФЖ. - 1959. - Т.29. - Вып. 5. - С. 632-639.
15. Зысина-Моложен Л.М. Расчет теплового пограничного слоя в потоке сжимаемого газа // ИФЖ. - 1962. - Т.5. - Вып. 6. - С. 21-26.
16. Роост Э.Г. Определение локальных коэффициентов теплоотдачи к поверхности сопловой лопатки при обтекании ее потоком сжимаемого газа повышенной турбулентности. Автореф. дис.... канд. техн.наук. - Л.: ЛПИ им. М.И. Калинина, 1978. - 20 с.
17. Вохмянин С.М. Исследование влияния турбулизации потока на аэродинамику и теплообмен в решетках профилей с целью совершенствования конструкций охлаждаемых лопаток энергетических газовых турбин. Автореф. дис.... канд. техн. наук. - Л.: НПО ЦКТИ им. И.И.Ползунова, 1985. - 22 с.
18. Роост Э.Г., Вохмянин С.М. Теплообмен в реактивной решетке

профилей турбинных лопаток, обтекаемых неравномерным, турбулизированным потоком // Энергетическое машиностроение, - Харьков - № 40. - 1985. - С. 100-106.

19. Слитенко А.Ф. Анализ процессов теплообмена и разработка методов совершенствования систем охлаждения в газотурбинных установках. Автореферат дис.... докт. техн. наук. - Харьков: ХПИ им. В.И. Ленина, 1986. - 36 с.

20. Копелев С.З., Слитенко А.Ф. Конструкции и расчет систем охлаждения ГТД / Под ред. Слитенко А.Ф. - Харьков: Изд-во Основа при Харьк. ун-те, 1996. - 240 с.

21. Титов В.Б. Исследование влияния турбулентности внешнего потока на теплообмен в решетках турбинных лопаток. Автореф. дис.... канд. техн. наук. - Харьков: ХПИ им. В.И. Ленина, 1981. - 20 с.

22. Расчетные и экспериментальные методы определения теплового состояния основных узлов газовых турбин с воздушным охлаждением. - Руководящие указания ЦКТИ-ИТТФ. - Л. - Т.1. - 1970. - 365 с.

23. Швец И.Т., Дыбан Е.П. Воздушное охлаждение деталей газовых турбин. - Киев: Наукова думка, 1974. - 487 с.

24. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Изд. 3-е, переработанное. - М.: Наука, 1969. - 824 с.

25. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. - М.: Издательство Иностранной литературы, 1951. - 575 с.

26. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. - М.: Машиностроение, 1975. - 559 с.

27. Темиров А.М. Гидравлика и теплообмен в охлаждаемой газотурбинной лопатке с поперечными цилиндрическими перемычками. Автореф. дис.... канд. техн. наук. - Л. - 1984.

28. Соколов Н.П. Интенсификация теплоотдачи во внутренних каналах и исследование теплового состояния лопаток газовых турбин с перфорированным дефлектором с целью повышения эффективности охлаждения лопаточного аппарата. Автореф. дис.... канд. техн. наук. - Л.: ЛПИ им. М.И. Калинина, 1986.

29. Митяков В.Ю. Теплообмен в радиальных каналах систем охлаждения рабочих лопаток высокотемпературных газовых турбин. Автореф. дис.... канд. техн. наук. - Л., 1980.

30. Вохмянин С.М., Роост Э.Г., Богов И.А. Программный комплекс СОLD для расчета систем охлаждения лопаток газовых турбин. Расчет параметров охладителя. - СПб.: Международная Академия Наук Высшей школы. Санкт-Петербургское отделение, 1996. - 71 с.

31. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. - М.: Энергия, 1973. - 320 с.

32. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. - М.: Мир, 1979. - 392 с.

33. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. - М.: Мир,

1975. - 541 с.

34. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. - М.: Мир, 1977. - 349 с.

35. Шабров Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. - Л.: Машиностроение, 1983. - 212 с.

36. Шабров Н.Н. Руководство пользователя программной системой SH-2 конечноэлементного анализа двухмерного плоского и осесимметричного напряженного состояния. - СПб., 1993.

37. Термопрочность деталей машин / Под общей редакцией И.А. Биргера и Б.Ф. Шорра. - М.: Машиностроение, 1975. - 455 с.

38. Богов И.А. Плоские задачи термоупругости в газотурбостроении. - Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1984. – 192 с.

39. Жирицкий Г.С., Стрункин В.А. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин - М.: Машиностроение, 1968. - 520 с.