

М434066
МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ имени Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

УДК 621.051.001

ОРЕХОВ Виктор Кузьмич

ВТОРИЧНЫЕ ПОТЕРИ В РЕШЕТКАХ ОСЕВЫХ ДОЗВУКОВЫХ КОМПРЕССОРОВ

05.04.12 - Турбомашинны

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1985

Работа выполнена в ордена Дружбы Народов Университете
дружбы народов имени Патриса Лумумбы.

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент И.В.Балмаков

Научный консультант - кандидат технических наук,
доцент И.В.Евтеев

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Р.М.Федоров
кандидат технических наук
А.И.Бурмистров

Ведущее предприятие - Научно-производственное объединение
по исследованию и проектированию
энергетического оборудования
/НПО ЦКТИ/

Защита состоится "17" февраля 1986 г. в 15³⁰ часов
на заседании специализированного совета К.053.15.05 "Тепловые
машины и теоретические основы теплотехники" при Московском
ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана по
адресу: 107005, Москва, Ленинский проспект, д. 1 корпус
"Энергомашиностроение".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Н.Э.Баумана.

Отзывы на автореферат
учреждения, просим направлять по адресу:
Бауманская улица, дом
107005, Москва, Ленинский проспект, д. 1 корпус
Совета К.053.15.05

Автореферат разослан

Ученый секретарь
специализированного
совета К.053.15.05
К.Т.Н., доцент

М434066

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Актуальность проблемы. Повышение экономичности и сокращение сроков разработки перспективных газотурбинных установок является первоочередной задачей, стоящей перед энергомашиностроительной промышленностью, обусловленной широким внедрением ГТУ в различные отрасли народного хозяйства. Одним из путей решения этой задачи является минимизация аэродинамических потерь в осевом компрессоре, в связи с чем актуальным вопросом является изучение влияния геометрии лопаточных аппаратов и режима их обтекания на аэродинамические потери и создание уточненных методов расчета потерь в ступени осевого компрессора, так как более достоверный учет величины и распределения потерь по высоте лопатки на этапе проектирования позволит находить оптимальную форму проточной части при существенном сокращении времени и средств на экспериментальную доводку.

М 434066

Значительной и наименее изученной частью общих потерь в решетках осевых компрессоров являются вторичные потери. Отсутствие надежных теоретических методов расчета вторичных потерь привело к тому, что в настоящее время для этих целей обычно используют эмпирические формулы, разработанные путем обобщения результатов экспериментальных исследований прямых решеток профилей. Одним недостатком большинства имеющихся эмпирических формул для расчета вторичных потерь является их вывод на основе данных, полученных при неизменной среднemasсовой осевой скорости в решетке, в то время как проточную часть осевых компрессоров обычно проектируют таким образом, чтобы на расчетном режиме осевая скорость оставалась постоянной или несколько увеличивалась в первых ступенях и снижалась в последних ступенях, а при эксплуатации осевых компрессоров на нерасчетных режимах, соответствующих пониженным частотам вращения, увеличение осевой скорости может происходить и в последних ступенях.

Отсутствие необходимых опытных данных затрудняет разработку методов расчета вторичных потерь в решетках с изменяющейся осевой скоростью и, соответственно, выбор оптимальной формы профилей и меридионального обвода проточной части осевых компрессоров.

Цель работы. Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование характеристик прямых компрессорных ре-

I

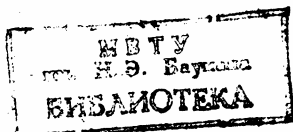
НБТУ им. Н.Э. Баумана



1434066

Сб. инв. В. К. Вост.

Вост.



шесток в широком диапазоне изменения основных геометрических и режимных параметров при различных величинах отношения средне-массовых осевых скоростей на входе и выходе из решетки и создание на основе полученных данных методики расчета вторичных потерь и их распределения по высоте лопатки в решетках осевых дозвуковых компрессоров. Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- исследовать влияние отношения среднемассовых осевых скоростей на входе и выходе из решетки на величину вторичных потерь, их распределение по высоте лопатки и угол отставания потока в прямых компрессорных решетках переменной геометрии при различных углах атаки и скоростях набегающего потока;
- исследовать влияние отношения среднемассовых осевых скоростей на входе и выходе из решетки на развитие отрывных явлений в концевых областях прямых компрессорных решеток;
- разработать методику расчета вторичных потерь и их распределения по высоте лопатки в решетках осевых дозвуковых компрессоров в зависимости от геометрических параметров решеток, режима их обтекания и отношения среднемассовых осевых скоростей.

Научная новизна работы заключается в том, что

- получены новые данные о закономерностях изменения потерь и углов отставания потока в прямых компрессорных решетках без радиального зазора в широком диапазоне изменения геометрических параметров решеток и режимов их обтекания при различных отношениях среднемассовых осевых скоростей на входе и выходе из решетки;
- исследовано влияние отношения среднемассовых осевых скоростей на развитие отрывных явлений в концевых областях прямых компрессорных решеток;
- предложен обобщающий параметр, характеризующий нагруженность концевых сечений компрессорных решеток;
- предложена методика расчета интегральных величин вторичных потерь и их распределения по высоте лопатки в решетках осевых дозвуковых компрессоров в широком диапазоне изменения геометрических параметров решеток, режимов их обтекания, при различных отношениях среднемассовых осевых скоростей.

Практическая ценность работы заключается в том, что полученные результаты позволяют сократить время и затраты на экс-

М434066

периментальную доводку лопаточных аппаратов осевых компрессоров за счет более достоверного учета влияния геометрических и режимных параметров на характеристики решеток при различных значениях отношения среднemasсовых осевых скоростей и повысить экономичность осевых компрессоров за счет выбора оптимальной формы профилей и меридионального обвода проточной части. Предложенная методика расчета потерь в концевых областях компрессорных решеток, учитывающая изменение среднemasсовой осевой скорости в решетке, позволяет повысить точность определения КПД и уточнить существующие методы расчета характеристик осевых компрессоров.

Внедрение. Результаты экспериментального исследования и методики расчета вторичных потерь в ступени осевого компрессора внедрены в Производственном объединении "Невский завод" им. В.И. Ленина и используются при проектировании перспективных ГТУ.

Апробация работы. Основные результаты докладывались на ХУП, ХУШ, ХІХ и ХХ научно-технических конференциях УДН им. П. Лумумбы (г. Москва, 1981, 1982, 1983 и 1984 г.г.) ; УІ Всесоюзной научно-технической конференции по компрессоростроению "Повышение технического уровня, надежности и долговечности компрессоров и компрессорных установок". (г. Псков, 1982 г.) ; Научно-техническом семинаре отделения І00 ЦИАМ им. Баранова (г. Москва, 1982 г.) ; Научно-техническом семинаре по газотурбинным и комбинированным установкам им. проф. Уварова В.В. (г. Москва, 1982 г.) .

Публикации. Основные материалы диссертационной работы опубликованы в четырех печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 142 страницах, иллюстрируется 62 рисунками, состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы из 115 наименований и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы и отмечены основные задачи работы.

В первой главе представлен обзор работ, посвященных изучению особенностей течения в решетках осевых компрессоров. Про-

веден анализ данных работ, рассмотрены причины возникновения потерь в межлопаточных каналах решеток и методы их расчета. Отмечено, что из-за сложности структуры течения в компрессорных решетках считается методически целесообразным условно разделять потери в них на профильные, состоящие из потерь энергии от трения и вихреобразований в следе за решеткой, и вторичные, под которыми подразумеваются все потери, обусловленные пространственным характером течения в концевых областях. Среди основных составляющих вторичных потерь в решетках без радиального зазора выделяются следующие: потери на трение и отрыв пространственного пограничного слоя, развивающегося на торцевых поверхностях и в угловых зонах между поверхностями лопаток и торцевыми поверхностями; потери, связанные с образованием парного вихря, потери из-за отрыва потока в месте сопряжения входной кромки лопатки с торцевой стенкой; потери вследствие возникновения вторичных течений в углах между лопатками и торцевой стенкой, направленных вдоль биссектрис углов из середины течения в углы, с последующим растеканием в обе стороны; потери из-за перетеканий в пограничном слое на поверхности профиля при обтекании лопатки со скольжением. Вышеперечисленные виды течений взаимодействуют друг с другом, образуя сложную вихревую картину, в целом не поддающуюся теоретическому описанию, в связи с чем существующие теоретические методы расчета вторичных потерь, имеющие в своей основе теорию пограничного слоя, теорию индуктивного сопротивления крыла и теорию канала не нашли широкого применения, так как они предполагают чрезмерную идеализацию течения и подтверждаются экспериментальными данными только в частных случаях.

Сложность и недостаточная точность теоретических методов привели к тому, что на практике для расчета вторичных потерь обычно используют эмпирические формулы, полученные в результате обобщения данных по продувкам прямых и кольцевых решеток профилей. Правомерность переноса результатов исследований прямых решеток профилей на решетки рабочих колес и спрямляющих аппаратов подтверждается достаточно большим количеством исследований и имеющимся опытом проектирования осевых компрессоров.

В работе рассмотрены характерные режимы обтекания по углу атаки, используемые при обобщениях, приведены основные эмпирические формулы, применяющиеся для расчета составляющих по-

терь. Показано, что расчет вторичных потерь по формулам различных авторов дает значительный разброс результатов.

Отмечено, что практически все экспериментальные исследования, на основании которых получены формулы для расчета вторичных потерь, проводились при отношении среднемассовых осевых скоростей $W_{a2}/W_{a1} = 1,0$, соответствующем частному случаю течения в лопаточном аппарате осевого компрессора, в то время как имеются данные, свидетельствующие о значимом влиянии отношения W_{a2}/W_{a1} на потери в компрессорных решетках, а конструкция осевых компрессоров обычно предусматривает изменение осевой скорости в лопаточных венцах, особенно на нерасчетных режимах. Также отмечена крайняя ограниченность данных по влиянию параметров решетки и потока на характер распределения вторичных потерь по высоте лопатки при $W_{a2}/W_{a1} \neq 1$, значение которого необходимо при решении задачи оптимизации закрутки по радиусу.

Анализ литературных данных позволил сформулировать задачи настоящей работы.

Во второй главе приводится описание экспериментальной установки, методика проведения экспериментальных исследований, методика обработки опытных данных и оценка погрешности измерений.

Экспериментальные исследования прямых компрессорных решеток проводились на стенде для продувок решеток профилей лаборатории "Турбомашин" УДН им. П. Лумумбы. Стенд включал в себя центробежный шестиступенчатый компрессор типа ТГ-80-1,8, теплообменник, систему трубопроводов с дроссельными заслонками, ресивер с сеткой и хонейкомбом, рабочую часть открытого типа и манометрический щит. На решетках вблизи торцевой поверхности размещалась отсечная пластина, за счет изменения наклона которой регулировалась величина отношения W_{a2}/W_{a1} . При проведении испытаний производилось измерение полного давления, статического давления и направления потока в различных сечениях по высоте лопатки при помощи пневмометрических насадков. Необходимая величина отношения W_{a2}/W_{a1} устанавливалась следующим образом. Сначала проводились методические эксперименты, в которых измерялось статическое давление на входе и выходе из решетки при различных отношениях входной и выходной высот ло-

паток h_1/h_2 и числах Маха на входе в решетку M_1 . По результатам методических экспериментов строились тарировочные графики $W_{a2}/W_{a1} = f(h_1/h_2; M_1)$, в соответствии с которыми при продувках решеток устанавливалось отношение высот h_1/h_2 , обеспечивающее необходимое значение W_{a2}/W_{a1} при заданном числе M_1 .

Исследованные решетки имели следующие основные геометрические параметры: угол изгиба средней линии профиля $16,9^\circ \leq \varepsilon \leq 58^\circ$; густоту $0,75 \leq \tau \leq 2,0$; угол установки профиля $43^\circ \leq \vartheta \leq 77,5^\circ$; удлинение лопаток $1,67 \leq \bar{h} \leq 2,0$; относительную максимальную толщину профиля $0,078 \leq \bar{c}_{max} \leq 0,1$; относительную координату максимального прогиба средней линии профиля $0,45 \leq \bar{x}_f \leq 0,5$. Параметры потока на входе в решетку изменялись в следующих пределах: угол атаки $i_{\mu} - 4^\circ \leq i \leq i_{\mu} + 8^\circ$, где i_{μ} — угол атаки, соответствующий режиму максимального качества решетки; число Маха $0,23 \leq M_1 \leq 0,58$; число Рейнольдса $1,4 \cdot 10^5 \leq Re_\tau \leq 3,5 \cdot 10^5$; относительная толщина пограничного слоя на торцевой стенке $\bar{\delta}_t = 0; 0,067$.

Каждая решетка испытывалась при четырех — шести значениях отношения среднemasовых осевых скоростей в диапазоне $0,98 \leq W_{a2}/W_{a1} \leq 1,27$.

По результатам испытаний определялись следующие величины:

— коэффициенты потерь в текущем сечении z по высоте лопатки на входе и выходе из решетки

$$\xi_{см1z} = \frac{1}{t} \int_0^t \frac{\rho_1^* - \rho_{1i}^*}{\rho_1^* - \rho_1} dt; \quad \xi_{полн z} = \frac{1}{t} \int_0^t \frac{\rho_1^* - \rho_{2i}^*}{\rho_1^* - \rho_1} dt; \quad (I)$$

— коэффициенты вторичных и концевых потерь в сечении z

$$\xi_{вм z} = \xi_{полн z} - \xi_{проф} - \xi_{см1z}; \quad \xi_{кz} = \xi_{полн z} - \xi_{проф}, \quad (2)$$

где $\xi_{проф}$ — коэффициент профильных потерь, равный коэффициенту $\xi_{полн z}$ при $z = h/2$ и отсутствии смыкания зон вторичных потерь в среднем сечении лопатки;

— приведенные коэффициенты потерь

$$\xi_{см1}^* = \int_0^{h_2/2b} \xi_{см1z} d\left(\frac{z}{b}\right); \quad \xi_{вм}^* = \int_0^{h_2/2b} \xi_{вмz} d\left(\frac{z}{b}\right); \quad \xi_{к}^* = \int_0^{h_2/2b} \xi_{кz} d\left(\frac{z}{b}\right); \quad (3)$$

— коэффициенты потерь, осредненные по высоте лопатки

$$\xi_{зм} = \frac{\xi_{зм}^*}{h_2/2b}; \quad (4)$$

- коэффициент суммарных потерь в решетке

$$\xi_{\Sigma} = \xi_{зм} + \xi_{проф}; \quad (5)$$

- угол выхода потока в среднем по высоте сечения лопатки

$$\beta_2 = \frac{1}{t} \int_0^t \beta_{2i} dt. \quad (6)$$

Оценка погрешности измерений производилась по стандартным методикам.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования влияния отношения среднемассовых осевых скоростей на характеристики прямых компрессорных решеток в широком диапазоне изменения их геометрических параметров и режимов обтекания.

Установлено, что величина W_{a2}/W_{a1} оказывает существенное влияние на уровень потерь в решетках и их распределение по высоте лопатки. На рис.1 представлено распределение коэффициента $\xi_{полн\ 2}$ при различных величинах W_{a2}/W_{a1} в одной из исследованных решеток. В средних сечениях лопатки величина коэффициента $\xi_{полн\ 2}$ практически постоянна и равна соответствующему коэффициенту профильных потерь. При приближении к стенке потери увеличиваются, причем более интенсивно с уменьшением W_{a2}/W_{a1} . Глубина проникновения зоны вторичных потерь с уменьшением W_{a2}/W_{a1} также растет. В работе показано, что такое протекание характеристик обусловлено изменением степени диффузорности течения в решетке, зависящей от отношения W_{a2}/W_{a1} и определяющей интенсивность отрыва пространственного пограничного слоя, образующегося в результате взаимодействия пограничных слоев на поверхностях лопаток и торцевой поверхности. Так как при $i = i_{\nu}$ течение в средних сечениях компрессорных решеток практически безотрывное, то указанное изменение степени диффузорности течения в большей степени влияет на вторичные потери, чем на профильные (рис.2). Аналогичное влияние отношения W_{a2}/W_{a1} на потери полного давления и их распределение по высоте лопатки было выявлено во всех исследованных решетках

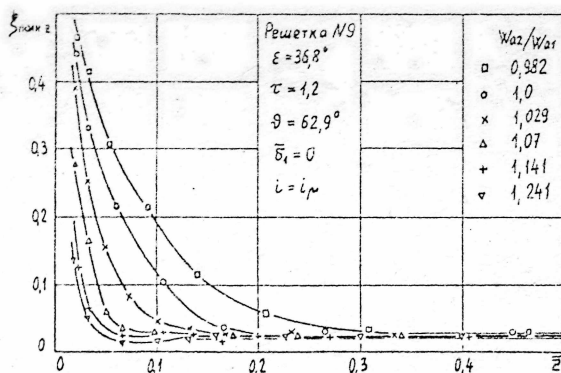


Рис. 1. Влияние W_{a2}/W_{a1} на распределение потерь по высоте лопатки.

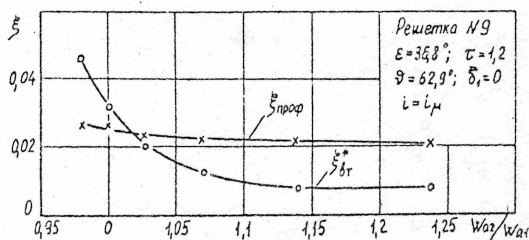


Рис.2. Зависимость составляющих потерь от W_{a2}/W_{a1} .

как при наличии входного пограничного слоя на торцевой поверхности, так и при его сливе, причем количественное изменение коэффициентов потерь при одном и том же изменении W_{a2}/W_{a1} отличалось в решетках разной геометрии.

На основании полученных экспериментальных данных в работе построены зависимости коэффициентов потерь от густоты, угла изгиба профиля, угла установки профиля в решетке, числа Маха и угла атаки набегающего потока при различных величинах W_{a2}/W_{a1} .

Установлено, что оптимальные с точки зрения обеспечения минимума вторичных потерь значения густот растут с уменьшением отношения W_{a2}/W_{a1} ; увеличение вторичных потерь с ростом кривизны профиля и уменьшением угла установки профиля в решетке происходит более интенсивно при меньших значениях W_{a2}/W_{a1} ; в исследованном диапазоне изменения отношения W_{a2}/W_{a1} число Маха набегающего потока практически не оказывает влияния на уровень вторичных потерь и их распределение по высоте лопатки вплоть до $M_1 = M_{1кр}$.

В четвертой главе разработана методика расчета интегральных величин вторичных потерь и их распределения по высоте лопатки в решетках осевых дозвуковых компрессоров при переменном отношении среднemasовых осевых скоростей.

Проведенный в работе анализ структуры течения в концевых областях компрессорных решеток показал, что основную часть вторичных потерь составляют потери из-за отрыва пространственного пограничного слоя в угловых областях между лопаткой и торцевой поверхностью и потери на трение в пограничном слое на торцевой поверхности. Уровень этих составляющих вторичных потерь зависит от степени диффузорности течения в решетке, определяемой геометрией решетки, углом атаки, величиной отношения W_{a2}/W_{a1} и оцениваемой при помощи факторов диффузорности

D и D_w . Вместе с тем, большинство из известных соотношений для расчета вторичных потерь выведены путем обобщения экспериментальных данных, полученных при $W_{a2}/W_{a1} = 1$ и основаны на разделении вторичных потерь на слабо зависящие от нагрузки на лопатку стеночные потери и пропорциональные C_y^2 потери от парного вихря или на прямой пропорциональности вторичных потерь профильным, что в общем не соответствует физической картине течения. С целью проверки возможности использования структуры

этих соотношений при выводе эмпирической формулы для расчета вторичных потерь при переменном отношении W_{a2}/W_{a1} было проведено расчетное исследование влияния W_{a2}/W_{a1} на относительную величину

$$\xi_{\beta m}^* = \frac{\xi_{\beta m}^*}{\xi_{\beta m}^* W_{a2}/W_{a1} = 1}, \quad (7)$$

с последующим сравнением с полученными экспериментальными данными. Расчеты проводились по формулам Хауэлла, Довжика, Вавры, Комарова и Стюарта. Входящий в них коэффициент C_y определялся как

$$C_y = \frac{4 \sin \beta_m (\operatorname{ctg} \beta_1 - W_{a2}/W_{a1} \cdot \operatorname{ctg} \beta_2)}{\tau (1 + W_{a2}/W_{a1})}. \quad (8)$$

В соответствии с расчетом коэффициент $\xi_{\beta m}^*$ увеличивается при уменьшении W_{a2}/W_{a1} практически линейно (кривые разных авторов отличаются в основном углом наклона), в то время как из эксперимента следует, что после уменьшения W_{a2}/W_{a1} до определенной величины вторичные потери резко возрастают из-за усиления интенсивности отрывных явлений в угловых областях решеток.

Выявленное несоответствие расчета с экспериментом, а также анализ литературных данных позволили сделать вывод о том, что использование коэффициента C_y и близкого к нему по смыслу па-

раметра $\operatorname{ctg} \beta_m \cdot \delta_u$, в котором $\delta_u = \frac{2}{1 + W_{a2}/W_{a1}} \left(\operatorname{ctg} \beta_1 - \frac{W_{a2}}{W_{a1}} \operatorname{ctg} \beta_2 \right)$,

в качестве критериев нагруженности концевых сечений компрессорных решеток, а также введение прямой пропорциональности вторичных потерь профильным затупляет получение удовлетворительных соотношений для расчета вторичных потерь при переменном отношении среднemasовых осевых скоростей. С другой стороны использование в качестве критериев нагруженности факторов диффузорности D и D_w позволило ряду авторов (Либлейн, Конрад, Стюарт) на основе теории пограничного слоя установить наличие однопараметрической зависимости между этими факторами и толщиной потери импульса в следе за решеткой при двухмерном обтекании.

В работе показано, что существует также однопараметрическая

зависимость между безразмерной площадью потери импульса от вторичных течений $\bar{\theta}_{am}^{*k} = \theta_{am}^{*k} / b \cdot t$ и модифицированным фактором диффузности D_{μ}^{*} (рис.3), определяемым как

$$D_{\mu}^{*} = b_1 \cdot b_2 \cdot D, \quad (9)$$

где $D = 1 - \frac{\sin \beta_1 W_{a2}}{\sin \beta_2 W_{a1}} + 0,5 \frac{\sin \beta_1}{\tau} \left(\operatorname{ctg} \beta_1 - \frac{W_{a2}}{W_{a1}} \operatorname{ctg} \beta_2 \right)$ — известный

фактор диффузности, а $b_1 = 1 + 1,1 \frac{\vartheta - \vartheta^{*}}{\vartheta}$ и $b_2 = \frac{1}{1 - 1,8 \frac{\beta_1 - \beta_{1\mu}}{\beta_{1\mu}}}$ —

предложенные автором коэффициенты, учитывающие, соответственно, отличие угла установки профиля в решетке ϑ от предложенного Комаровым оптимального угла установки ϑ^{*} и угла входа потока β_1 от угла входа $\beta_{1\mu}$, отвечающего режиму максимального качества решетки. Каждой решетке, испытанной при заданном угле атаки, на рис. 3 отвечают 4 – 6 точек, соответствующих различным значениям отношения W_{a2}/W_{a1} . Для расчетного определения $\bar{\theta}_{am}^{*k}$ автором предложена аппроксимационная формула

$$\bar{\theta}_{am}^{*k} = \frac{0,002}{1 - 2,08 D_{\mu}^{*}}, \quad (10)$$

при этом фактор диффузности D_{μ}^{*} рекомендовано рассматривать как параметр, определяющий нагруженность концевых сечений компрессорных решеток. Как следует из рис. 3, резкое возрастание вторичных потерь происходит при $D_{\mu}^{*} > 0,4 \dots 0,42$.

Расчет вторичных потерь по выражению (10) следует проводить в следующем диапазоне изменения геометрических параметров решеток и режимов их обтекания: $\varepsilon = 16,9 + 58^{\circ}$; $\tau = 0,75 + 2,0$; $\vartheta = 43 + 77,5^{\circ}$; $i = i_{\mu} - 4^{\circ} + i_{\mu} + 8^{\circ}$; $\delta_1 \leq 0,067$; $M_1 \leq M_{1кр}$; $Re_1 \geq 1,4 \cdot 10^5$; $W_{a2}/W_{a1} = 0,98 + 1,27$.

Анализ эпюр распределения потерь по высоте лопатки, полученных при различных величинах отношения W_{a2}/W_{a1} , позволил установить, что при $i = i_{\mu}$ глубина проникновения зоны вторичных потерь $\bar{z}_p$ за которую было принято расстояние от торцевой поверхности, на котором $\xi_{полн} = 1,1 \xi_{проф}$ пропорциональна приведенному коэффициенту концевых потерь $\xi_k^{*} = \xi_{am}^{*} + \xi_{см1}^{*}$, определяемому нагруженностью решетки и толщиной входного пограничного слоя. Близкая к линейной зависимость $\bar{z}_p$ от ξ_k^{*} в работе аппроксимирована формулой

$$\bar{z}_p = 6 \xi_k^{*}, \quad (11)$$

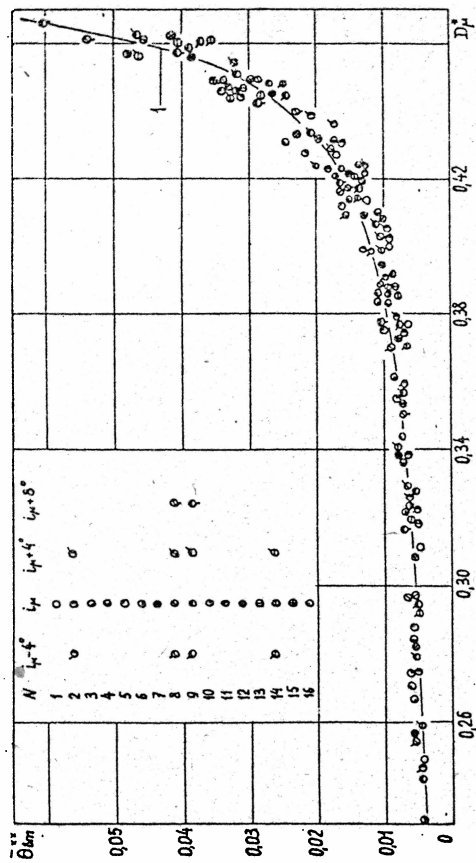


Рис.3. Связь между параметрами $\bar{\theta}_{\theta m}^{xx}$ и D_{μ}^* . Кривая I соответствует выражению (10).

которую можно использовать для проверки отсутствия смыкания зон вторичных потерь в среднем сечении лопатки и, тем самым, подтверждения применимости выражения (10). При вычислении $\bar{Z}_p$ по формуле (11), входящие в коэффициент ξ_{κ}^* составляющие ξ_{8m}^* и ξ_{cm}^* , находятся, соответственно, по выражению (10) с учетом соотношения, связывающего площадь потери импульса с приведенным коэффициентом вторичных потерь $\theta_{8m}^{xx} = 0,5 \xi_{8m}^* \left(\frac{W_{a2}}{W_{a1}} \right)^2 \sin^2 \beta_2 / \sin^2 \beta_1$, и известному из расчета предыдущей ступени распределению скоростей во входном пограничном слое, определяющему величину ξ_{cm}^* .

Сопоставление эшпор распределения потерь в исследованных решетках различной геометрии при переменном отношении W_{a2}/W_{a1} показало, что при $i = i_{\mu}$ форма эшпор практически одинакова и не зависит от M_1 и δ_1 , если их построить в виде зависимости коэффициента концевых потерь $\xi_{\kappa z} = \xi_{8m z} + \xi_{cm z}$ от относительной координаты $\bar{z}/\bar{Z}_p$ (рис. 4), где $\bar{Z}_p$ — глубина проникновения зоны вторичных потерь, определенная по выражению (11). Представленная на рис. 4 обобщенная зависимость аппроксимирована следующей формулой

$$\xi_{\kappa z} = \frac{0,125}{\bar{z}/\bar{Z}_p + 0,12} - 0,11, \quad (12)$$

которая рекомендована для расчетов при $i = i_{\mu}$; $\varepsilon = 16,9 + 58^\circ$; $\tau = 0,75 + 2,0$; $\vartheta = 43 + 77,5^\circ$; $\delta_1 \leq 0,067$; $M_1 \leq M_{1kr}$; $Re_1 \geq 1,4 \cdot 10^5$; $W_{a2}/W_{a1} = 0,98 + 1,27$. Для вычисления коэффициента $\xi_{8m z} = \xi_{\kappa z} - \xi_{cm z}$ необходимо использовать выражение (12) и данные по распределению скоростей во входном пограничном слое, определяющему величину коэффициента $\xi_{cm z}$.

В работе показано, что определение поправки к углу отставания потока в компрессорных решетках, учитывающей влияние отношения W_{a2}/W_{a1} , по формуле Комарова

$$\delta - \delta_0 = 0,2(90 + \varepsilon - \vartheta)\sqrt{\varepsilon}(1 - W_{a2}/W_{a1}), \quad (13)$$

рекомендованной им для расчетов при $i = i_{\mu}$ в диапазоне $0,7 \leq W_{a2}/W_{a1} \leq 1,05$, дает удовлетворительное совпадение с экспериментом и при $1,05 \leq W_{a2}/W_{a1} \leq 1,27$, что расширяет область ее применения на режимы с повышенными значениями W_{a2}/W_{a1} .

По предложенной методике выполнен расчет коэффициента ξ_{8m}^* и распределения коэффициента $\xi_{\kappa z}$ по высоте лопатки в решетках различной геометрии, проведено сопоставление результатов

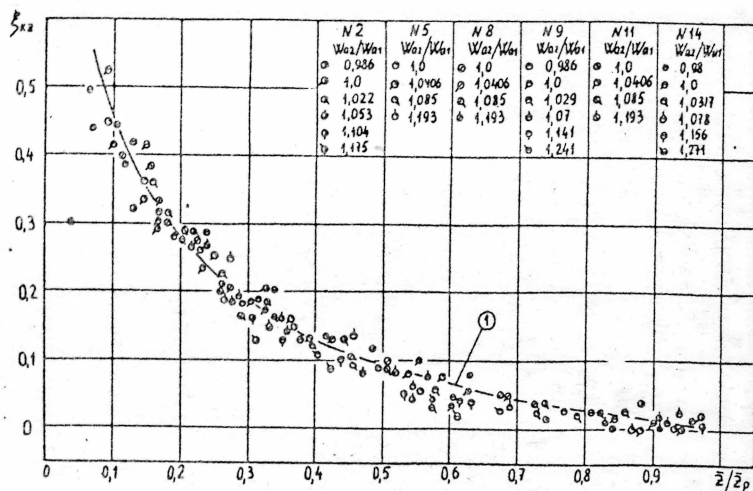


Рис. 4. Связь между параметрами $\xi_{\kappa z}$ и $\bar{z}/\bar{z}_p$. Кривая I соответствует выражению (I2).

расчета с экспериментальными данными.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенного экспериментального исследования прямых компрессорных решеток в широком диапазоне изменения их геометрических параметров и режимов обтекания: густоты решетки $0,75 \leq \tau \leq 2,0$; угла изгиба средней линии профиля $16,9^\circ \leq \varepsilon \leq 58^\circ$; угла установки профиля в решетке $43^\circ \leq \vartheta \leq 77,5^\circ$; в автомобильной области по числу Рейнольдса; числа Маха на входе в решетку $0,23 \leq M_1 \leq 0,58$; угла атаки $i_{\mu} - 4^\circ \leq i_{\mu} \leq 8^\circ$; толщины пограничного слоя на входе в решетку $\delta_1 = 0; 0,067$; отношения среднемассовых осевых скоростей $0,98 \leq W_{a2}/W_{a1} \leq 1,27$ получены зависимости коэффициентов потерь и углов отставания потока от геометрических и режимных параметров при различных отношениях среднемассовых осевых скоростей.

2. Исследовано влияние отношения среднемассовых осевых скоростей на развитие отрывных явлений в концевых областях прямых компрессорных решеток различной геометрии. Установлено, что интенсивность отрывных явлений в концевых областях решеток резко возрастает при определенных величинах отношения W_{a2}/W_{a1} .

3. Проведено обобщение экспериментальных данных по вторичным потерям в прямых компрессорных решетках. В качестве обобщающего параметра, характеризующего нагруженность компрессорных решеток в концевых областях, предложено использовать модифицированный фактор диффузорности D_{μ}^* . Показано, что умеренный уровень вторичных потерь обеспечивается при $D_{\mu}^* < 0,4$.

4. Показано, что предложенная Комаровым формула для расчета угла отставания потока в компрессорных решетках при изменении отношения среднемассовых осевых скоростей в диапазоне $0,7 \leq W_{a2}/W_{a1} \leq 1,05$ применима и при $1,05 \leq W_{a2}/W_{a1} \leq 1,27$.

5. Предложена методика расчета интегральных величин вторичных потерь и их распределения по высоте лопатки в решетках осевых дозвуковых компрессоров в широком диапазоне изменения геометрических параметров решеток, режимов их обтекания, при различных отношениях среднемассовых осевых скоростей. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных, показавшее их хорошее соответствие.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Евтеев И.В., Орехов В.К. Экспериментальное исследование вторичных течений в прямых компрессорных решетках при разных углах наклона торцевой поверхности. - В кн.: Повышение экономичности и эффективности поршневых и газотурбинных двигателей. - М.: УДН, 1981, с. 32 - 36.

2. Евтеев И.В., Орехов В.К. Вторичные потери в прямых компрессорных решетках с различными углами наклона торцевой поверхности. - В кн.: Процессы в тепловых двигателях. - М.: УДН, 1983, с. 42 - 51.

3. Евтеев И.В., Орехов В.К. Экспериментальное исследование потерь на наклонных торцевых поверхностях прямых компрессорных решеток. - Повышение эффективности, надежности и долговечности компрессоров и компрессорных установок: Материалы VI Всесоюзной конференции по компрессоростроению. - Л., 1983, с. 63 - 66.

4. Евтеев И.В., Орехов В.К. Распределение потерь по высоте лопатки в прямых компрессорных решетках. - В кн.: Процессы в тепловых двигателях. - М.: УДН, 1984, с. 31 - 35.

В.И.И.

Типография МВТУ им. Н.Э.Баумана. Тираж 100 экз. Заказ 1413
Подп. к печ. 3.12.1985 г. Л-97732 от 3/ХП-85г. Объем 1 п.л.

