

На правах рукописи

Гурьянова Марина Михайловна

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РАСЧЕТА ОТРЫВНОГО ДИФФУЗОРА
КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ**

Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рыбинск – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева».

Научный руководитель :

Пиралишвили Шота Александрович, заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Мингазов Биал Галавтдинович, доктор технических наук, профессор, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, г. Казань, заведующий кафедрой авиационных двигателей и энергетических установок»;

Христофоров Игорь Леонидович, кандидат технических наук, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, доцент кафедры «Теория воздушно-реактивных двигателей».

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет)», г. Самара.

Защита состоится 25 июня 2013 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.210.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» по адресу: 152934, г. Рыбинск, Ярославская область, ул. Пушкина, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева».

Автореферат разослан «23» мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Конюхов Борис Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Требования уменьшения массы ГТД и повышения его эффективности обуславливают необходимость проектирования оптимальной геометрии проточной части двигателя с точки зрения минимума гидравлических потерь. При этом основное внимание уделяется профилированию проточной части в том числе и переходников. Структура потока в каналах достаточно сложна, а характеристики течения: входная неравномерность потока, нестационарность отрывных явлений, начальная турбулентность, оказывают существенное влияние на распределение газодинамических параметров: расход воздуха по кольцевым каналам и охлаждающим поясам отверстий жаровой трубы, перепад давления на фронтальном устройстве, поля скорости и температуры на выходе из камеры сгорания и, в конечном счете, на потери давления в ней.

Степень разработанности темы исследования.

В доступных литературных источниках приведены методики оценки гидравлических потерь в диффузорах камер сгорания, учитывающие влияние основных режимных и геометрических параметров, таких как: степень расширения, осевое и радиальное положения жаровой трубы, расходы через кольцевые каналы. Однако они не содержат необходимый объем данных по совместному влиянию турбулентности и неравномерности потока за компрессором с учетом геометрических и режимных параметров на интегральные аэродинамические характеристики отрывных диффузоров камер сгорания. Представленный в открытой печати материал практически не учитывает совместного влияния комплекса отмеченных факторов.

В виду ограниченности экспериментальных данных по продувкам кольцевых диффузорных каналов с большими углами раскрытия в условиях неравномерного и несимметричного потока на входе возникает необходимость проведения экспериментальных исследований, направленных на подробное изучение структуры течения. Эти исследования необходимы для оценки влияния газодинамических параметров течения на эффективность диффузоров и возможности их использования при разработке уточненных методов расчета диффузоров в широком диапазоне скорости потока, несимметричной эпюры скорости и наличии начальной турбулентности.

Цель и задачи работы.

Модельным экспериментированием и численными расчетами провести исследование комплексного влияния на гидравлику отрывного диффузора камеры сгорания ГТД режимных и геометрических параметров с учетом входной несимметричности эпюры скорости и начальной турбулентности рабочего тела. С использованием положений теории подобия и методов анализа размерностей разработать уточненные зависимости и составить модель расчета характери-

стик аэродинамического качества его проточной части.

Для достижения цели необходимо решить ряд **задач**:

- обосновать критериальную основу газодинамического и геометрического подобия, аэродинамических процессов в отрывных диффузорах кольцевых камер сгорания газотурбинных двигателей с использованием методов теории подобия и анализа размерностей;

- численными методами на основе геометрического отображения проточной части диффузора определить эпюры входной скорости с возможными коэффициентами несимметричности, которые затем использовать в дальнейших исследованиях рабочего процесса отрывного диффузора камеры сгорания;

- экспериментально исследовать совместное влияние несимметричности профиля входной скорости и начальной интенсивности турбулентности на интегральные аэродинамические характеристики отрывного диффузора;

- обобщить полученные результаты в виде расчетных зависимостей с учётом опубликованных в доступной литературе результатов исследований диффузоров кольцевых камер сгорания. Составить на их основе модель расчета характеристик аэродинамического качества проточной части, оценить область применения и ограничения использования при расчете геометрически подобных конструкций диффузоров, а также возможность снижения величины потерь полного давления при сохранении удельных характеристик на уровне лучших существующих аналогов;

- оценить с точки зрения практической направленности область применения разработанных и уточненных расчетных зависимостей на начальном этапе проектирования диффузоров кольцевых камер сгорания ГТД.

Научная новизна работы:

- выявлены особенности и получены закономерности влияния входной несимметричности профиля скорости рабочего тела в отрывном диффузоре кольцевой камеры сгорания газотурбинного двигателя на структуру течения в нем, дающие возможность прогнозировать интегральную величину гидравлического сопротивления;

- экспериментально установлен характер зависимости коэффициента гидравлических потерь от числа Рейнольдса при несимметричной эпюре скорости в преддиффузоре, позволяющий оценить условия возникновения потери устойчивости течения, обусловленной отрывом потока и рост потерь давления;

- полученные новые данные и установленные закономерности влияния начальной интенсивности турбулентности течения в отрывном диффузоре позволили определить диапазон значений режимных параметров, обеспечивающих достижение максимального коэффициента сохранения полного давления;

- на основе расчетных и экспериментальных исследований предложен комплекс уточненных расчетных зависимостей, позволивший выявить совместное

влияние входных параметров рабочего тела на интегральные характеристики эффективности отрывного диффузора кольцевой камеры сгорания.

Теоретическая и практическая значимость.

Предложенный комплекс расчетных зависимостей аэродинамических параметров отрывного диффузора камеры сгорания ГТД позволяет проектировать его эффективные конструкции, отличающиеся низкой величиной потерь полного давления. Полученные новые знания по аэродинамике течения в диффузорных каналах с входной несимметричностью эпюры скорости рабочего тела и начальной турбулентностью сокращают объем исследований, сроки и затраты материальных ресурсов на создание конструкций диффузоров авиационных двигателей и энергетических установок.

Методология и методы исследования.

В работе использованы эмпирические и теоретические методы исследования. Решения поставленных задач основаны на экспериментальных данных, полученных с использованием методов постановки теплофизического эксперимента, а также на теоретических положениях и основополагающих закономерностях аэродинамики, газодинамики, теории турбулентных течений и массообмена, численных методах с их верификацией.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты расчетных и экспериментальных исследований;
- уточненная критериальная основа расчета отрывного кольцевого диффузора;
- комплекс уточненных расчетных зависимостей влияния входных параметров потока на интегральные аэродинамические характеристики отрывного кольцевого диффузора, определяющие его эффективность;
- модель расчета характеристик аэродинамического качества проточной части отрывного диффузора камеры сгорания ГТД.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность и обоснованность научных результатов базируется на применении основных законов сохранения, обеспечивается адекватным выбором методики проведения эксперимента и подбором экспериментальной аппаратуры, прошедшей необходимую поверку. Она подтверждается удовлетворительным совпадением результатов численных расчетов с опытными данными, полученными как в рамках работы, так и с результатами опытных и численных исследований других авторов.

Основные результаты выполненных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- I Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию доктора технических наук, профессора Пиралишвили Ш.А. «Энергетические установки: тепломассообмен и процессы горения», г. Рыбинск, 2009 г;

– XVII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях», г. Жуковский, 2009 г.;

– Международной молодежной научной конференции «XIX Туполевские чтения», г. Казань, 2011 г.;

– Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», г. Самара, 2011 г.;

– Международной молодежной научной конференции «XXXIX Гагаринские чтения» посвященные 50-летию полета первой женщины космонавта В. В. Терешковой и 80-летию со дня запуска первой экспериментальной советской ракеты с РЖД «ГИРД-10», г. Москва, 2013 г.

По материалам диссертации опубликованы 4 статьи в изданиях, утверждённых ВАК, 6 докладов в трудах конференций, 2 тезиса докладов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 133 страницах машинописного текста, включая 4 таблицы, 103 рисунка. Список литературы включает 128 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, изложена краткая характеристика работы, сформулированы цели и задачи исследований, отмечена научная новизна, практическая значимость полученных результатов и положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации выполнен обзор работ по изучению направлений развития современных камер сгорания и энергетических установок. Проанализированы пути повышения параметров, определяющих эффективность камеры сгорания с позиций совершенствования аэродинамики течения. Рассматривается влияние газодинамических, конструктивных, режимных и геометрических параметров отрывного диффузора и профиля проточной части камеры сгорания на ее аэродинамическое совершенство.

Анализ литературных данных показывает, что тенденции повышения удельных параметров, теплонапряженности, уменьшения массогабаритных характеристик стимулируют внедрение ведущими производителями ГТД и ГТУ новых схем организации течения и горения в камере сгорания. Положительные результаты дает применение ярусной компоновки фронтальных устройств с «обедненным» составом предварительно перемешанной смеси, однако открывает ряд проблем организации аэродинамики потока в диффузоре, связанных с обеспечением распределения расхода воздуха между ярусами, неравномерность которого в низкоэмиссионных камерах сгорания не должна превышать 2 – 3 %. Обобщение доступных источников показало, что снижение массогабаритных

характеристик ГТУ и ГТД обусловило применение «коротких» кольцевых камер сгорания с отрывными диффузорами и соотношением высоты камеры сгорания к ее длине в диапазоне $\bar{H} = H/L \approx 1,2 - 1,5$. Отмечается, что в условиях жестких требований по уровню гидропотерь в камере сгорания современных ГТД, суммарная величина которых не должна превышать 3 – 5 %, при проектировании диффузора требуется учитывать влияние неравномерности потока за компрессором на гидравлическое сопротивление камеры. Обсуждаются работы, посвященные исследованию рабочего процесса диффузоров камер сгорания и показывающие, что проектирование диффузоров для высокофорсированных ГТД и ГТУ связано с поиском технико-экономического компромисса между длиной (определяющей массогабаритные характеристики) и углом раскрытия (определяющим условия отрыва потока, потери полного давления, устойчивость течения). Показано, что единые методы решения проблемы отсутствуют, а применяемые на практике заметно осложняются ограниченностью эмпирической информации о влиянии входных параметров потока на интегральные аэродинамические характеристики диффузора. Проведенный анализ выявил, что имеющиеся немногочисленные экспериментальные данные о влиянии несимметричности и интенсивности турбулентности входного потока на гидравлические потери в диффузоре часто носят противоречивый характер и не позволяют сформировать единые представления о методах его учета на стадии проектирования.

Обосновано, что возможность создания адекватных современным требованиям расчетных методик проектирования диффузоров камер сгорания, требует учета совместного влияния основных параметров (степени расширения преддиффузора, положения жаровой трубы, распределения расходов воздуха между кольцевыми каналами) и входных параметров потока на их эффективность. Получение такой информации возможно лишь при постановке тщательно спланированного эксперимента. Изучение доступной литературы показало, что вопрос влияния входной интенсивности турбулентности потока на аэродинамику диффузора и проточной части камеры сгорания остается открытым, поскольку большинство исследований выполнены в малотурбулентных аэродинамических трубах, в то время как в реальном двигателе интенсивность турбулентности изменяется при переходе между различными режимами работы. Поэтому актуальная проблема уточнения методик проектирования диффузоров камер сгорания требует целенаправленного изучения характера влияния входных параметров течения на их интегральные характеристики с обобщением данных в виде расчетных зависимостей.

Во второй главе приведены и проанализированы результаты численного исследования газодинамики отрывного диффузора камеры сгорания. Численное моделирование выполнялось в 2D и 3D постановке. Возможность применения

2D расчета обоснована анализом опубликованной литературы, показывающим, что диффузоры камер сгорания с относительной высотой жаровых труб $1 \leq L/H \leq 2$ можно условно считать плоскими. Цель исследования состояла: в поиске геометрических профилей (необходимых для последующей постановки эксперимента) входного участка, позволяющих сформировать несимметричные

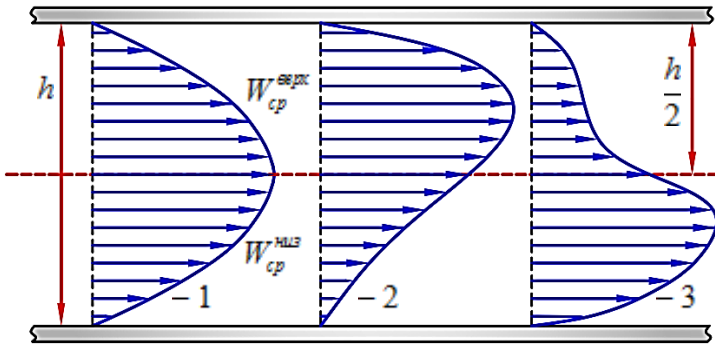


Рисунок 1 – Профиль скорости на входе в диффузор: 1 – равномерный ($K = 1$); 2 – профиль смещен в верхний полуканал ($K > 1$); 3 – профиль смещен в нижний полуканал ($K < 1$)

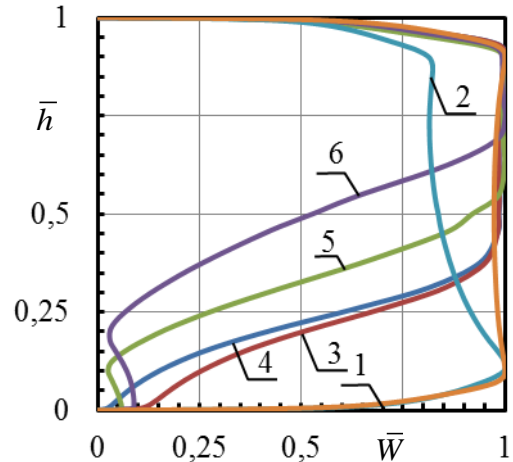


Рисунок 2 – Эпюры скорости на входе в диффузор: 1 – $K = 1$; 2 – $K = 0,78$; 3 – $K = 2,53$; 4 – $K = 3,48$; 5 – $K = 4,66$; 6 – $K = 6,45$

относительно оси канала эпюры скорости потока на входе в диффузор, коррелирующие с соответствующими эпюрами в камере сгорания; изучении влияния несимметричности входной эпюры скорости и начальной интенсивности турбулентности на интегральные аэродинамические характеристики отрывного диффузора. Среди таких параметров наиболее важными являются:

– коэффициент гидравлических потерь ξ , характеризующий отношение потерь полного давления к скоростному напору во входном сечении диффузора

$$\xi = (p_{вх.}^* - p_{вых.}^*) / (\rho W_{вх.}^2 / 2),$$

где $p_{вх.}^*$ – полное давление на входе в диффузор; $p_{вых.}^*$ – полное давление на выходе из диффузора; $\rho W_{вх.}^2$ – динамический напор на входе в диффузор;

– коэффициент восстановления статического давления, характеризующий степень преобразования динамического напора в потенциальную энергию давления

$$\beta_p = (p_{вых.} - p_{вх.}) / (\rho W_{вх.}^2 / 2),$$

где $p_{вх.}$ – осредненное статическое давление на входе в диффузор; $p_{вых.}$ – осредненное статическое давление на выходе из диффузора;

– коэффициент сохранения полного давления $\sigma = p_{вых.}^* / p_{вх.}^*$.

Коэффициент несимметричности оценивался с использованием выражения $K = W_{cp}^{верх} / W_{cp}^{низ}$, где $W_{cp}^{верх}$, $W_{cp}^{низ}$ – среднерасходная скорость потока в верхнем и нижнем полуканале поперечного сечения преддиффузора (рисунок 1).

В численном расчете рассматривалось турбулентное течение вязкого сжи-

маемого газа с использованием осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. С целью выбора модели замыкания выполнена серия расчетов с использованием k - ε standard, k - ε RNG, k - ω standard, k - ω SST и RSM моделей турбулентности. Наилучшее согласование с опытными данными дала k - ω SST модель. Влияние геометрического профиля входного участка на распределение скорости по высоте входного сечения диффузора показано на рисунке 2. Полученные эпюры скорости на входе в диффузор, соответствующие диапазону значений коэффициента несимметричности $0,14 \leq K \leq 7,1$, и геометрические профили формирующих их источников искажения потока использованы для проведения экспериментальных исследований (результаты приведены в 3 – 4 главах). Сеточная 3D модель отрывного диффузора с входным участком и генератором несимметричности показана на рисунке 3.

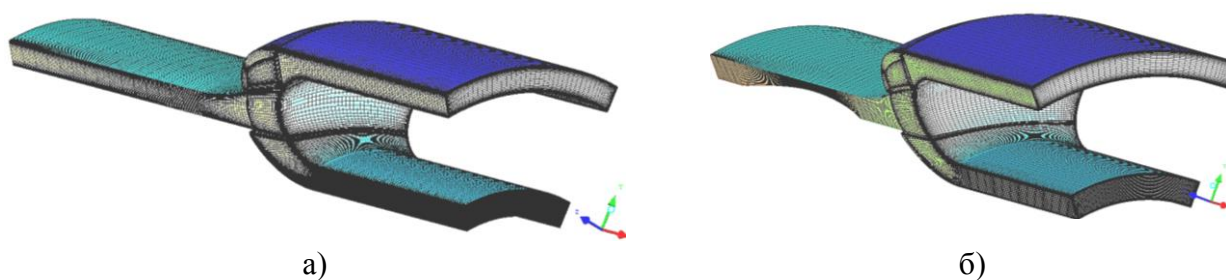


Рисунок 3 – Сеточная модель отрывного диффузора: а) $K = 1$; б) $K = 2,53$

Результаты исследований (рисунок 4 – 5) показали, что 2D постановка задачи позволила найти зависимость $\xi = f(K)$, однако не дала адекватных результатов влияния начальной интенсивности турбулентности $0,81 \% < \varepsilon < 5 \%$ на гидравлические потери и коэффициент восстановления статического давления. В случае наполнения эпюры скорости в верхнем полуканале входного участка диффузора, величина коэффициента гидравлических потерь растет с увеличением K (рисунок 4). При этом на секторе диффузора 45° абсолютное расчетное значение ξ изменяется в 2,6 раза от $\xi \approx 0,18$, в случае равномерного профиля скорости на входе, до $\xi \approx 0,48$ для $K = 6,45$. На развертке $1/8$ сектора отрывного диффузора расчетная величина ξ возрастает в 3,4 раза в том же диапазоне изменения K . Результаты позволили сделать вывод о необходимости учета влияния входных параметров потока на аэродинамические характеристики диффузора при проектировании перспективных камер сгорания двигателей нового поколения, отличающихся высокими термодинамическими параметрами и КПД.

Анализ исследований влияния K на ξ при наполнении входной эпюры скорости в нижнем полуканале (рисунок 5) показал, что зависимость $\xi = f(K)$ имеет степенной характер. В диапазоне $0,14 \leq K \leq 1$ величина потерь уменьшается в 2,8 раза. Полученные зависимости (рисунок 4 – 5) имеют корреляцию, поскольку при $K = 1$, в отсутствии привнесенных искажений эпюры скорости на входе в диффузор (симметричный профиль), дают одинаковую величину коэффициента

гидравлических потерь в диффузоре $\xi \approx 0,2$. Полученные в 4 главе результаты опытных исследований подтверждают (рисунки 4 – 5), что увеличение начальной интенсивности турбулентности от 0,81 % до 5 % обуславливает возрастание ξ на 40 %.

Исследования показали, что изменение расположения максимума эпюры скорости по высоте входного участка преддиффузора обуславливает перераспределение потерь между кольцевыми каналами на 25 %.

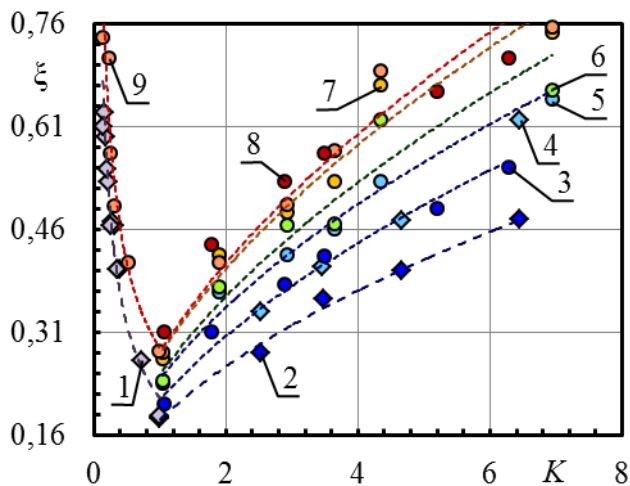


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента гидравлических потерь от коэффициента несимметричности профиля скорости K :

- 1, 4, 5, 6, 7, 9 – развертка 1/8 сектора ОД;
- 2, 3, 8 – сектор диффузора 45° ; 1 – 2D расчет ($0,81\% \leq \varepsilon \leq 5\%$); 2 – 3D расчет ($\varepsilon = 1,01\%$);
- 3 – эксперимент ($\varepsilon = 1,01\%$); 4 – 2D расчет ($\varepsilon = 1,01\%$); 5 – эксперимент ($\varepsilon = 1,01\%$);
- 6 – эксперимент ($\varepsilon = 2,8\%$); 7 – эксперимент ($\varepsilon = 3,72\%$); 8 – эксперимент ($\varepsilon = 5\%$);
- 9 – эксперимент ($\varepsilon = 5\%$)

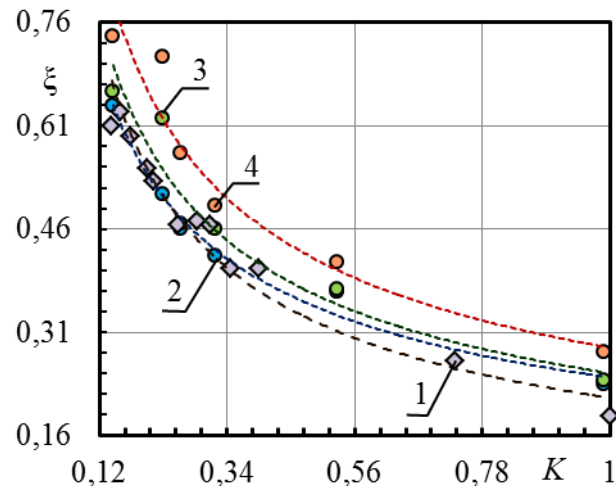


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента гидравлических потерь от коэффициента несимметричности профиля скорости K

- 1 – 2D расчет ($0,81\% \leq \varepsilon \leq 5\%$);
- 2 – эксперимент ($\varepsilon = 1,01\%$);
- 3 – эксперимент ($\varepsilon = 2,8\%$);
- 4 – эксперимент ($\varepsilon = 5\%$);
- 1 – 4 развертка 1/8 сектора отрывного диффузора

Основное влияние на течение в отрывном диффузоре оказывают два вихря, формирующиеся при внезапном расширении потока, размеры которых определяют долю воздуха, участвующую в их вращательном движении.

Третья глава посвящена описанию экспериментальной установки для исследования аэродинамических характеристик отрывного диффузора камеры сгорания. Описаны методика постановки опытов и экспериментальная установка. Выполнена оценка погрешностей измерений. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 6.

Приведена методика обработки опытных данных и методов осреднения параметров. Разработана методика опытного исследования, позволившая изучить влияние несимметричности профиля скорости ($0,9 \leq K \leq 4,4$ для прямоугольной развертки, $0,8 \leq K \leq 5,2$ для секторной) и начальной интенсивности турбулентности ($0,8\% < \varepsilon < 5\%$) на потери в диффузоре кольцевой камере сгорания. Мак-

симальные относительные погрешности измерений составили: расхода воздуха – 3,2 %; скорости – 5,1 %; давления – 2,4 %; температуры – 1,5 %.

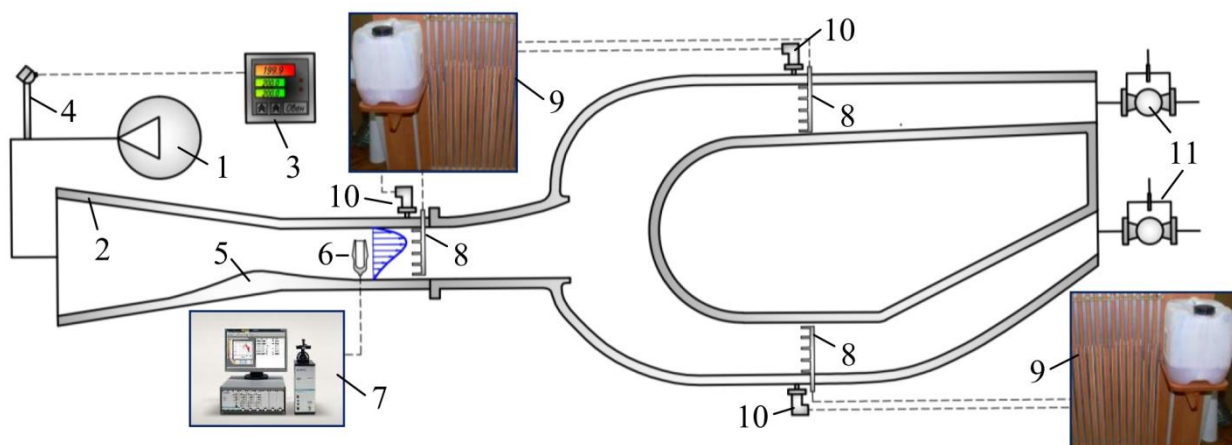


Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки: 1 – вентилятор; 2 – рабочий участок; 3 – измеритель температуры; 4 – датчик температуры; 5 – генератор несимметричности потока; 6 – датчик скорости и турбулентности потока; 7 – термоанемометр; 8 – датчик полного давления (гребенка); 9 – батарейный манометр; 10 – датчик статического давления; 11 – дроссельная заслонка

В четвёртой главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния режимных и геометрических параметров на величину потерь полного давления в диффузоре на прямоугольной развертке его $1/8$ сектора и на секторной модели 45° . Результаты изучения аэродинамики отрывного диффузора с несимметричным профилем скорости на входе показали, что коэффициент гидравлических потерь увеличивается с ростом K . На рисунке 7 представлены зависимости ξ от числа Рейнольдса и коэффициента несимметричности профиля скорости K .

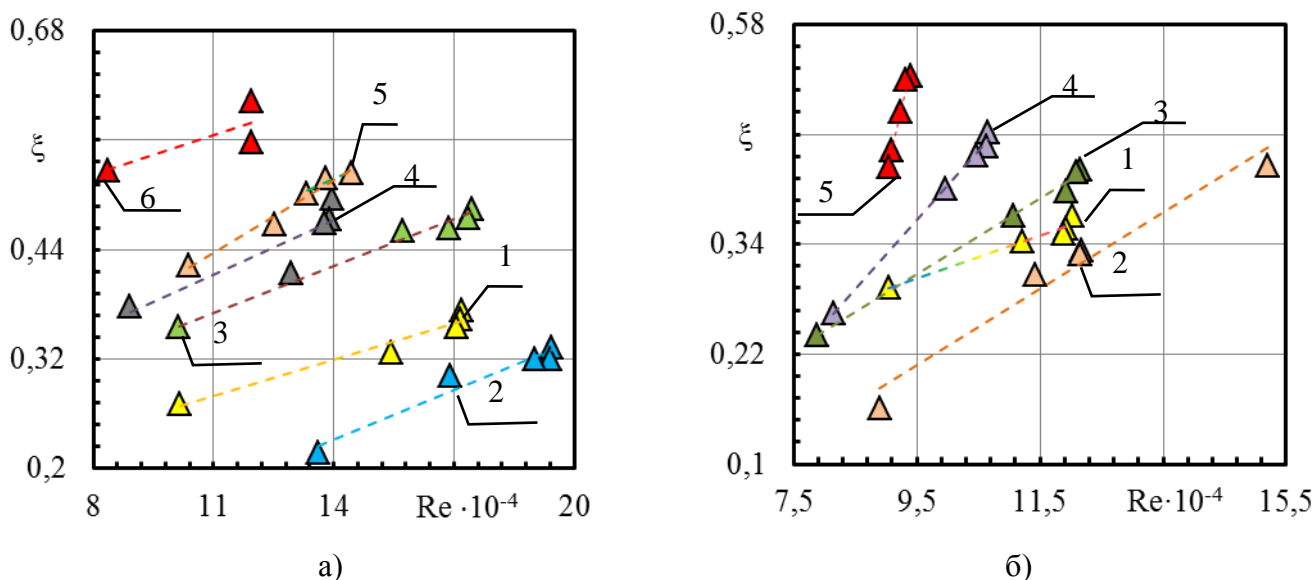


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента гидравлических потерь ξ от числа Re :
 1 – $K = 0,93$; 2 – $K = 1,05$; 3 – $K = 1,91$; 4 – $K = 2,93$; 5 – $K = 3,66$; 6 – $K = 4,36$;
 а) $\varepsilon = 0,81 \%$; б) $\varepsilon = 1,35 \%$

Исследования позволили экспериментально подтвердить, что минимальное

значение гидравлических потерь наблюдается в случае симметричного профиля скорости (эпюра 1 на рисунке 2) на входе в диффузор при всех исследованных величинах интенсивности турбулентности ε набегающего потока. Увеличение числа Рейнольдса сопровождается монотонным возрастанием ξ по зависимости, близкой к линейной, на величину от 30 % до 55 %, определяемую значением начальной интенсивности турбулентности. Выявлено, что максимум гидрорезистивности соответствует значениям входной интенсивности турбулентности в пределах $1,66 \% > \varepsilon > 5 \%$.

Анализ опытных данных позволил получить и обосновать, что искажение профиля скорости на входе в диффузор, как в область $K < 1$, так и в область $K > 1$, приводит к росту ξ относительно его значений в случае симметричной эпюры скорости на входе (при $Re, \varepsilon = const$).

Выявлено, что увеличение интенсивности турбулентности потока на входе в диффузор сопровождается возрастанием тангенса угла наклона прямых $\xi = f(Re)$ во всем исследованном диапазоне $0,93 < K < 6,95$. Полученные эмпирические данные позволили выявить условие и обосновать причины возникновения критического роста гидравлического сопротивления,

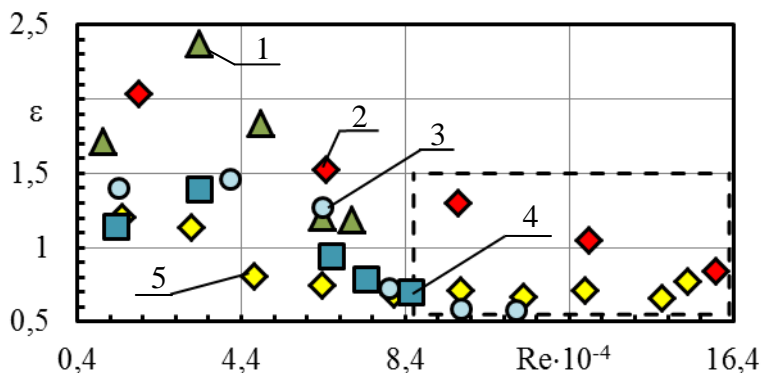


Рисунок 8 – Зависимость $\varepsilon = f(Re)$ для применяемых турбулизующих решеток: 1 – $d_{отн} = 0,04$; 2 – $d_{отн} = 0,37$; 3 – $d_{отн} = 0,07$; 4 – $d_{отн} = 0,41$; 5 – $d_{отн} = 0,06$; $d_{отн} = d/h_{ex}$ – относительный размер ячейки турбулизующей решетки; h_{ex} – высота преддиффузора

диффузора камеры сгорания выполнен поиск автомодельных по числу Re режимов течения в преддиффузоре для исследуемого диапазона $0,8 \% \leq \varepsilon \leq 5 \%$.

Их применение позволило исключить влияние индивидуальных особенностей генератора турбулентности на характеристики диффузора в случае перестройки режима течения при изменении коэффициента несимметричности эпюры входной скорости. Сравнительные результаты измерения генерируемой набором турбулизующих решеток и хонейкомбов интенсивности турбулентности, показаны на рисунке 8.

Уточненное, с использованием результатов исследований, уравнение И. Е. Идельчика для определения величины гидравлических потерь в отрывном

критического роста гидравлического сопротивления, при $\varepsilon \geq 1,35 \%$ и $K < 2,93$ (рисунок 7 б), обусловленного потерей устойчивости течения вследствие критической смены режимов течения в результате возбуждения пространственных колебаний точки отрыва потока от стенки диффузора.

С целью изучения влияния начальной интенсивности турбулентности на интегральные аэродинамические параметры

диффузоре камеры сгорания с $1,5 \leq L/H \leq 2$ имеет вид

$$\xi = 0,9 \cdot K^{0,5} \cdot \varepsilon^{0,3} \cdot \left[\xi_m + (\xi_{mp} / \bar{n}_D^2) \right], \quad (1)$$

при $1,46 \leq \bar{n}_D \leq 1,6$; $10^4 \leq Re \leq 2 \cdot 10^4$; $0,8 \leq K \leq 7$; $0,8 \% \leq \varepsilon \leq 5 \%$, где ξ_m – коэффициент местных потерь, зависящий от степени расширения \bar{n}_D .

Для отрывных диффузоров камер сгорания с $1,2 \leq L/H \leq 1,5$ уточненные уравнения имеют вид

$$\begin{aligned} \xi &= 0,2 \cdot \left[K^{0,5} \cdot \varepsilon^{0,3} \cdot \bar{F}^{0,174} \cdot \bar{D}^{-0,014} \cdot \bar{S}^{-0,046} \cdot \bar{n}_D^{0,042} \right]; \\ \sigma &= K^{-0,04} \cdot \varepsilon^{-0,02} \cdot \bar{F}^{-1,8 \cdot 10^{-3}} \cdot \bar{D}^{0,5 \cdot 10^{-3}} \cdot \bar{S}^{0,1 \cdot 10^{-3}} \cdot \bar{n}_D^{-0,9 \cdot 10^{-3}}; \\ \beta_p &= 0,52 \cdot \left[K^{-0,05} \cdot \varepsilon^{-0,02} \cdot \bar{F}^{0,021} \cdot \bar{D}^{4,3 \cdot 10^{-3}} \cdot \bar{S}^{-0,048} \cdot \bar{n}_D^{-0,181} \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

Они справедливы при $1,48 \leq \bar{n}_D \leq 1,66$; $0,8 \leq K \leq 7$; $0,8 \% \leq \varepsilon \leq 5 \%$; $0,7 \leq \bar{D} \leq 1,148$; $0,777 \leq \bar{F} \leq 1,518$.

Уточненные зависимости (1), (2) использованы в главе 5 для разработки методики проектирования отрывных диффузоров камер сгорания, позволяющей рассчитать геометрию и режим работы реального объекта с учетом заданных параметров.

В пятой главе выполнено обобщение результатов проведенных в работе исследований в виде расчетных зависимостей и модели расчета характеристик аэродинамического качества проточной части отрывного диффузора камеры сгорания ГТД. Полученная модель (блок-схема которой показана на рисунке 9) дает возможность определить наиболее важные интегральные параметры, оценка которых позволяет сократить объем экспериментальных доводочных работ отрывных диффузоров камер сгорания.

В процессе расчета определяются геометрические характеристики проточной части диффузора, интегральные термогазодинамические параметры потока в характерных сечениях, коэффициенты гидравлических и энергетических потерь, коэффициент восстановления статического давления, выполняется оценка влияния входных параметров течения на эффективность работы диффузора.

Проверяется соответствие расчетных и заданных параметров. Общая структура метода расчёта заключается в использовании полученных и уточненных уравнений, а также интегральных балансовых соотношений и известных методик расчета аэродинамических процессов и геометрических характеристик отрывных диффузоров камер сгорания, нашедших отражение в литературе.

Изложены результаты применения разработанной модели расчета к созданию конструкций отрывных диффузоров камер сгорания ГТД. Приведена последовательность расчёта диффузора, позволяющая получить значения основных интегральных термогазодинамических параметров диффузора и его геометрических характеристик.

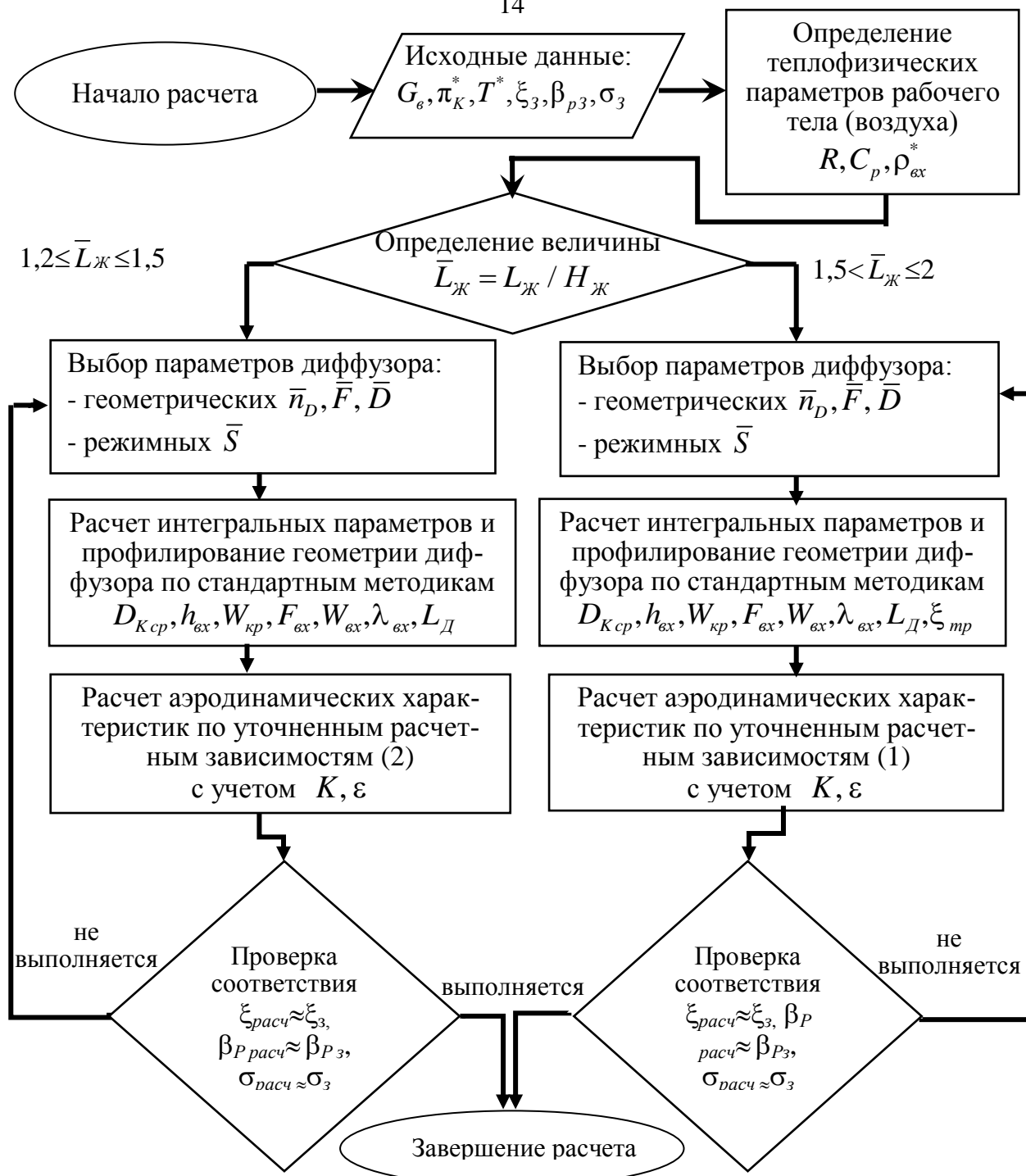


Рисунок 9 - Блок-схема модели расчета отрывных диффузоров камер сгорания ГТД

Результаты расчетов и экспериментов подтвердили возможность применения предложенного метода оценки характеристик отрывного диффузора, учитывающего влияние характера эпюры скорости на входе, для создания перспективных отрывных диффузоров камер сгорания ГТУ и ГТД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанная модель расчета характеристик аэродинамического качества отрывных диффузоров кольцевых камер сгорания ГТД, построенная на основе впервые полученных и известных обобщенных данных в виде расчетных зависимостей для определения гидравлических потерь, коэффициентов сохра-

нения полного и восстановления статического давления, позволяет рассчитать геометрию и режим работы с учетом заданных для расчета параметров и обеспечить на реальном объекте требуемую точность с предельным расхождением, не превышающим 10%.

2. Результаты исследований показали, что несимметричность профиля скорости на входе в диффузор оказывает влияние на потери полного давления в нем. Увеличение K от 0,8 до 7 сопровождается изменением коэффициента гидравлических потерь в 4 – 4,2 раза от 0,18 до 0,75, с минимумом $0,18 \leq \xi \leq 0,25$ в области значений $0,93 \leq K \leq 1,07$, соответствующим равномерному и близкому к нему профилю скорости рабочего тела на входе.

3. Увеличение числа Рейнольдса на входе в отрывной диффузор в диапазоне $10^5 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5$ обуславливает монотонное увеличение коэффициента гидравлических потерь по найденным линейным зависимостям от значения $\xi = 0,16$ при $K = 1,05$ до $\xi = 0,37$ при $K = 0,93$ в области $K \leq 1$ и до $\xi = 0,42$ при $K = 1,9$ в области $K \geq 1$. Максимальные значения гидропотерь соответствуют величинам входной интенсивности турбулентности в пределах $1,6 \% < \varepsilon < 5 \%$ в диапазоне K от 0,8 до 7.

4. Потеря устойчивости течения, обусловленная отрывом потока от стенок диффузора при $K > 2,93$ и $\varepsilon > 1,35 \%$, сопровождается ростом гидравлического сопротивления до $\xi = 0,75$.

5. Уточненная система расчетных зависимостей позволяет выполнять оценку величины гидравлических потерь, коэффициентов сохранения полного и восстановления статического давления в отрывном диффузоре камеры сгорания газотурбинного двигателя с $1,2 \leq \bar{N} \leq 2$.

6. Результаты расчетов и экспериментов подтвердили возможность применения полученных расчетных зависимостей и основанной на них модели расчета характеристик аэродинамического качества отрывного диффузора, учитывающих влияние входной несимметричности профиля скорости рабочего тела и начальной турбулентности для создания перспективных отрывных диффузоров камер сгорания ГТД и ГТУ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1 **Гурьянова, М. М.** Аэродинамика камеры сгорания с отрывным диффузором / М. М. Гурьянова, Ш. А. Пиралишвили, С. В. Веретенников // Авиакосмическое приборостроение. – 2009. – № 11. – С. 1 – 7.

2 **Гурьянова, М. М.** Экспериментальное исследование выходных параметров потока за компрессором на гидравлическое сопротивление отрывного диффузора / М. М. Гурьянова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королева (национального исследовательского университета). – 2011. – №3 (27). – Часть 1. – С. 151 – 159.

3 **Гурьянова, М. М.** Газодинамика отрывного диффузора камеры сгорания /

М. М. Гурьянова, Ш. А. Пиралишвили // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – 2011. – №2(20). – С.176 – 182.

4 **Гурьянова, М. М.** Влияние выходных параметров потока за компрессором на гидравлическое сопротивление отрывного диффузора камеры сгорания / М. М. Гурьянова, Ш. А. Пиралишвили // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – 2012. – №2(23). – С.203 – 211.

5 **Гурьянова, М. М.** Исследование влияния начальной турбулентности и неравномерности профиля скорости на входе в отрывной диффузор КС на гидравлические потери / М. М. Гурьянова, Ш. А. Пиралишвили, С. В. Веретенников // Материалы I Международной научно-технической конференции Энергетические установки: тепломассообмен и процессы горения. – Рыбинск. – 2009. – С. 159 – 168.

6 **Гурьянова, М. М.** Исследование аэродинамики элементов проточной части камеры сгорания ГТД / М. М. Гурьянова, С. В. Веретенников // Материалы XVII Школы – семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева. Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях. М.: МЭИ. – 2009. – Т.1. – С. 294 – 297.

7 **Гурьянова, М. М.** Исследование газодинамических характеристик диффузора камеры сгорания с учетом неравномерности потока на входе / М. М. Гурьянова // Материалы Международной молодежной научной конференции XIX Туполевские чтения посвященной 50-летию первого полёта человека в космос. – 2011. – Т.1. – С. 284 – 286.

8 **Гурьянова, М. М.** Экспериментальное исследование влияния выходных параметров потока за компрессором на гидравлическое сопротивление отрывного диффузора камеры сгорания / М. М. Гурьянова // Материалы Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Самара: СГАУ. – 2011. – Т.1. – С. 280 – 282.

9 **Гурьянова, М. М.** Влияние выходных параметров потока за компрессором на гидравлическое сопротивление отрывного диффузора камеры сгорания / М. М. Гурьянова, Ш. А. Пиралишвили // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – 2012. – №2(23). – С.203 – 211.

Зав. РИО М. А. Салкова

Подписано в печать 23.05.2013.

Формат 60×84 1/16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100. Заказ 155.

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П. А. Соловьева (РГАТУ имени П. А. Соловьёва)

Адрес редакции: 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

Отпечатано в множительной лаборатории РГАТУ имени П. А. Соловьёва
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53