

*На правах рукописи*

АКИМОВ Герман Александрович

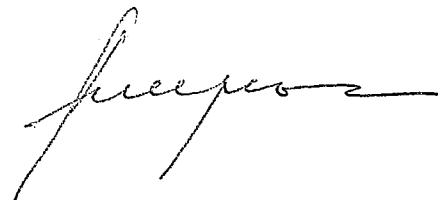
**Развитие прикладной газодинамики учеными  
Ленинграда – Санкт-Петербурга  
во второй половине XX века**

специальность 07.00.10 –  
История науки и техники (по техническим наукам)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Санкт-Петербург

2005



Работа выполнена на кафедре процессов управления Балтийского государственного технического университета – «Военмех» имени Д.Ф. Устинова

Официальные оппоненты

доктор технических наук,  
доктор экономических наук, профессор  
*Райзберг Борис Абрамович*

*доктор технических наук, профессор  
Стасенко Альберт Леонидович*

доктор технических наук, профессор  
*Трушков Александр Сергеевич*

Ведущая организация

Федеральное государственное  
унитарное предприятие  
Научно-производственное  
объединение машиностроения

Защита состоится 02 февраля 2006 г. в 15. 00. на заседании Диссертационного совета ДР 002.051.11 при Институте истории естествознания и техники (ИИЕТ) им. С.И. Вавилова РАН по адресу: 109012, Россия, Москва, Старопанский пер. д. 1/5.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института истории естествознания и техники (ИИЕТ) им. С.И. Вавилова РАН по адресу: 109012, Россия, Москва, Старопанский пер. д. 1/5.

Автореферат разослан «20 декабря» 2005 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



А.В. Пилипенко

## Общая характеристика работы

Настоящее исследование посвящено истории развития прикладной газовой динамики в 1950-70-х годах и в последующие годы XX века.

Газовая динамика (механика газа) сформировалась как самостоятельная часть механики в середине 30-х годов двадцатого века. Для технических приложений весьма важен её раздел, предметом исследований которого являются внутренние течения в ограниченных объёмах, каналах и струях, формирующихся в результате взаимодействия газа с окружающей средой. Этот раздел газодинамики принято называть «прикладной газовой динамикой».

**Актуальность темы исследования.** Развитие прикладной науки, как правило, определяется общественной потребностью. Эта известная мысль убедительно подтверждается историей науки двадцатого века. Мощным стимулом для развития прикладной газодинамики, как и ряда других научных областей, в середине XX века явилось интенсивное развитие авиационной и ракетно-космической техники. Создание летательных аппаратов с реактивными двигателями невозможно без исследований газодинамических процессов, сопровождающих каждый этап движения аппарата: стартовый участок, основная траектория, маневрирование на траектории, спуск, посадка.

1950-70-е годы – годы расцвета космонавтики – сопровождались направленной материально-финансовой и организационной помощью государства, что, очевидно, содействовало результативности газодинамических исследований, которыми занимались специалисты многих научных центров в Советском Союзе и за рубежом. Существенный вклад в решение проблем газодинамики, связанных с проектированием ракетно-космических комплексов, внесли ученые Ленинграда.

Полученные результаты имели, прежде всего, конкретное техническое значение и, во многих случаях, общенаучное. В процессе исследований выявились новые свойства и особенности газовых течений – ударно-волновые взаимодействия, автоколебательные режимы течения, отрывные течения; совершенствовались известные и развивались новые методы изучения газодинамических явлений, усложнялись их физические и математические модели, увеличивались соответственно возможности их реализации (создание экспериментальных стендов и широкое использование компьютерной техники), расширялись области применения.

Многие результаты газодинамических исследований были ценны не только для рассматриваемого в работе периода, но и явились начальным этапом дальнейшего развития новых направлений прикладной газодинамики, которые не только способствовали совершенствованию ракетно-космической техники, но и сыграли большую роль в создании новых технологий.

История науки новейшего времени лишь отчасти отражена в трудах отечественных ученых. Это относится и к вопросам истории прикладной газовой динамики периода 1950-70-х годов, когда были достигнуты результаты, существенно способствовавшие развитию ракетно-космической техники и повлиявшие на современное развитие этой науки (1980-90-е годы) и её приложений.

Это определяет целесообразность и актуальность темы настоящего исследования.

**Цели и задачи исследования.** Основная цель настоящей работы – комплексное исследование развития прикладной газодинамики в 1950-70-е годы учеными Ленинграда (Санкт-Петербурга), её связи с ракетно-космической техникой; влияния достигнутых результатов на развитие науки и техники в конце XX века.

Для этого представляется целесообразным решить следующие задачи:

— раскрыть содержание научной деятельности ленинградских ученых в области прикладной газодинамики; описать методы исследований и их совершенствование, полученные результаты, их научное и прикладное значение;

— изложить историю развития газодинамических исследований на кафедре гидроаэромеханики и в газодинамической лаборатории ЛГУ и в Ленинградском Военномеханическом институте, которые стали основными центрами научной деятельности в области прикладной газодинамики, объединившими целенаправленные исследования, результаты которых использовались проектными организациями;

— проанализировать основные этапы формирования научной школы в области газодинамики сверхзвуковых струй, выявить научное и прикладное значение полученных результатов;

— раскрыть содержание конкретных исследований в различных направлениях прикладной газодинамики, подчеркнув их связь с задачами проектирования ЛА и стартового комплекса;

— установить преемственность и сохранение традиций научной школы в последующих исследованиях, выделив развитие новых направлений в прикладной газодинамике, связанных с технологическими процессами.

**Объект исследования** – прикладная газовая динамика.

**Предмет исследования** – развитие прикладной газодинамики в 1950-70-е годы ленинградскими учеными: направления и этапы развития газодинамики внутренних и струйных течений, значение полученных результатов для науки и инженерной практики. Преемственность исследований в 1980-90-е годы.

**Методология исследования** определяется характером и взаимосвязью объекта и предмета, а также поставленными целью и задачами. Развитие науки, как всякий процесс, подчиняется общим законам диалектики. Это определяет изучение и исследование рассматриваемых в работе вопросов на основе диалектического единства прошлого, настоящего и будущего. Развитие науки происходит в конкретных исторических условиях. Рассматриваемый автором период явился началом научно-технической революции (НТР). Он выделяется отечественными исследователями как современный период в развитии технических знаний, которые рассматриваются в единстве с прогрессом естественно-научных знаний. Очевидно, что развитие космонавтики и компьютеризация многих сторон жизни общества имеют прямое отношение к предмету исследования.

В развитии прикладной газодинамики проявляются общие закономерности, присущие и другим наукам: взаимодействие разных областей научных знаний, математизация научных исследований, ускоренное развитие научных знаний, усиление связи науки с производством по мере усложнения технических объектов.

Метод исследования рассматриваемых в работе вопросов основывается на критическом анализе содержания имеющихся источников, где основными факторами являются:

— полнота описания газодинамического процесса или явления;

— объяснение его закономерностей с физической точки зрения;

— возможность воспроизведения явления (физическое и математическое моделирование);

— полученный результат (эмпирическая формула, аналитическое или численное решение уравнений, выражающих законы сохранения в конкретном случае);

— значение результата: научное – вклад в теоретическую и экспериментальную газовую динамику, прикладное – возможность применения в технике и в технологических процессах.

Обобщение результатов анализа, с учетом общих закономерностей развития науки, даёт возможность судить о развитии отдельной науки в определенный период, и, следовательно, о развитии прикладной газодинамики в XX столетии.

**Теоретической основой** исследования явились труды отечественных и зарубежных ученых; например, В.И. Вернадский «Избранные труды по истории науки»;

Дж. Бернал «Наука в истории общества»; В.А. Кириллин «Страницы истории науки и техники».

Автор работы ознакомился с современными подходами к проблеме взаимосвязи науки и техники (в частности, прикладной науки), изложенными в учебных пособиях Л.Н. Бесова «История науки и техники с древнейших времен до конца XX века», В.С. Поликарпова «История науки и техники», авторы которых неоднократно подчеркивают необходимость продуманной инженерной деятельности, максимально защищающей Природу и, следовательно, Человечество от возможных негативных последствий.

К предмету исследования непосредственно относятся монографии Н.М. Меркуловой «История механики газа (19 век)» и «Развитие газовой динамики в СССР». В последней книге дается обзор работ ведущих отечественных ученых по внешним задачам газовой динамики (аэродинамике).

Различные аспекты методологических основ истории науки и техники обсуждаются авторами многих публикаций в журнале «Вопросы истории естествознания и техники» и трудов Института истории естествознания и техники.

В заключение этого раздела введения автор считает целесообразным подчеркнуть всеобщий характер технических (прикладных) наук как области научного знания и вида научной деятельности. Прикладные науки – необходимое связующее звено между точными науками (естествознанием) и инженерной деятельностью (техникой).

**Источниковую базу исследования составляют:**

— монографии, учебники, учебные пособия по аэрогазодинамике, работы основоположников аэродинамической науки Н.Е. Жуковского и С.А. Чаплыгина, классическое учебное пособие Н.Е. Кочина, И.А. Кибеля, Н.В. Розе «Теоретическая гидромеханика» и другие труды отечественных и зарубежных ученых;

— тематические сборники трудов (труды ЦАГИ, сборники «Газодинамика и теплообмен» ЛГУ и др.), тезисов конференций, семинаров и совещаний по проблемам теоретической и прикладной газодинамики;

— диссертации и авторефераты диссертаций по теме исследования;

— статьи, опубликованные в периодических изданиях («Механика жидкости и газа», «Инженерно-физический журнал», «Вестник ЛГУ» и др.);

— материалы из архива Ленинградского Военно-механического института и личных архивов;

— материалы, собранные при обсуждении предмета исследования с участниками научных работ 1950-70-х годов, их учениками и сотрудниками.

**Научная новизна исследования:**

1. Впервые исследована история развития прикладной газодинамики учеными Ленинграда во второй половине XX в.

2. Установлены и изучены основные факты творческой биографии профессора Исаака Павловича Гинзбурга (1910–1979) – крупного ученого в области механики полета ЛА, гидрогазодинамики и теории пограничного слоя, организатора масштабных исследований в этих областях науки, создателя научной школы.

3. Проведен анализ научной деятельности школы газодинамических исследований в 1950–60–70-е годы. Установлены основные направления, в которых впервые были получены результаты, наиболее значимые для ракетно-космической техники: газодинамика сверхзвуковых струйных течений, газодинамика внутрикамерных течений (РДТТ), газодинамика старта ЛА и др. Результаты внедрены в практику проектирования летательных аппаратов.

4. Установлен приоритет ленинградских ученых, которые впервые разработали инженерные методы расчета сверхзвуковых газовых струй и внутренних тече-

ний в ограниченных объемах и каналах, создали теории газодинамических процессов внутрикамерных и струйных течений.

5. Выявлены направления исследований, эффективно решающих важные технологические проблемы (в металлургии, горном деле, аэроакустике и т.п.).

6. Установлена преемственность исследований в работах ленинградских-петербургских ученых 1980–90-гг. Рассмотрено дальнейшее развитие научных направлений 1950–70-х гг., на базе которых сформировались новые научные школы (ударно-волновых взаимодействий, газодинамики старта ЛА, внутрикамерных течений (газодинамика РДТТ)), результаты деятельности которых внедряются в практику проектирования современных летательных аппаратов.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что её материалы могут использоваться в курсе «Введение в специальность» для студентов специальностей «Аэрогидродинамика» и «Динамика полета и управления ЛА», в общем курсе «Аэрогазодинамика» (исторический обзор) и спецкурсах, в которых рассматриваются исследования 1950–70-х годов, как предшествующие современному этапу развития прикладной газодинамики. Обзоры исследований в конкретных направлениях рекомендуется использовать специалистам, разрабатывающим технологические процессы, связанные с газодинамическими явлениями. Результаты исследований 1950–70-х годов целесообразно учитывать при проектировании современных типов ЛА.

**Апробация работы.** Диссертация обсуждалась на заседании кафедры «Процессы управления» факультета «Авиа- и ракетостроения» Балтийского государственного технического университета.

О результатах исследований автор докладывал на следующих конференциях и семинарах:

— XVII и XVIII Международные семинары «Течения газа и плазмы» (1997 и 2000 гг., СПб) – Пленарные доклады;

— XXXV и XXXVIII Чтения памяти К.Э. Циолковского (2000 и 2003гг., Калуга);

— VII (1998), VIII (1999), IX (2000), X (2001), XII (2003) Международные конференции ученых Украины, России и Белоруссии «Прикладные проблемы механики жидкости и газа» (г. Севастополь, Украина);

— «I-е Чтения памяти генерального конструктора В.Ф. Уткина » (2002 г., СПб);

— конференция «Санкт-Петербург и мировая наука» (2003 г., СПб) – секция «История математики и механики», секция «История и методология технических наук».

— семинары кафедр А5 и М4 БГТУ.

По теме работы опубликованы 12 статей и монография (25 печатных листов); по вопросам прикладной газодинамики – 10 статей в центральных и ведомственных изданиях и 23 статьи в сборниках трудов Ленинградского Механического института (с 1963 г.)

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Исследована история развития прикладной газодинамики учеными Ленинграда в 1950–60–70-е годы: основные этапы; направления исследований; связь с ракетно-космической техникой; полученные результаты; научное и прикладное значение; внедрение в инженерную практику.

2. Собраны и изложены основные факты творческой биографии профессора И.П. Гинзбурга (1910–79), крупного ученого в области прикладной механики и гидрогазодинамики. Выявлено значение его научной и научно-организационной деятельности для развития школы газодинамических исследований.

3. Установлен приоритет ученых Ленинграда в разработке инженерных расчетных методов и создании теории газодинамических процессов внутрикамерных и струйных течений, открытии новых газодинамических явлений.

4. Проанализировано содержание деятельности научной школы газодинамики сверхзвуковых струйных течений. Полученные результаты (методы расчета динамического и теплового воздействия струй на элементы ЛА и стартового комплекса) были внедрены в практику ведущих проектных организаций.

5. Установлено, что в результате целенаправленных исследований в 1980-90-х годах сформировались научные школы в следующих разделах прикладной газовой динамики:

- а) газодинамика шахтного старта ЛА;
- б) газодинамика внутрикамерных течений (РДТТ);
- в) теория ударно-волновых взаимодействий.

6. Установлена преемственность исследований и сохранение традиций научной школы в 1980-90-х годах, дальнейшее развитие:

- а) газодинамики двухфазных течений;
- б) теории отрывных течений;
- в) применения газодинамики в технологических процессах.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения, содержащего документы и фотографии. Объем диссертации 293 с., рисунков 40, список литературы насчитывает 951 наименование.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении формулируется тема исследования, выясняется её актуальность, устанавливаются объект и предмет исследования, формулируется цель и задачи работы, определяется методология исследования, дается характеристика источников, выясняется научная новизна данной работы, формулируются положения выносимые на защиту.

### **Часть I. СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ШКОЛЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЛЕНИНГРАДСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ И ВОЕННО-МЕХАНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ (1950-70-Е ГОДЫ). РОЛЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОФЕССОРА И.П. ГИНЗБУРГА.**

**Глава 1. Творческая биография профессора И.П. Гинзбурга (1930-40-е годы).** Собраны и изложены факты творческой биографии ученого: формирование научных интересов, прикладная значимость научных работ 1930-40-х гг.

**1.1. Годы учебы в ЛГУ.** Исаак Павлович Гинзбург родился в местечке Монастырщина Смоленской губернии 10 марта 1910г. После окончания школы в 1927 г. он поступил в Ленинградский государственный университет на математико-механическое отделение, которое окончил в 1931г.

**1.2. Начало научной деятельности.** И.П. Гинзбург успешно закончил университет в 1931 г. Годы учебы И.П. Гинзбурга в аспирантуре под руководством Н.Е. Кочина и И.А. Кибеля завершились в 1937г. защитой кандидатской диссертации на тему "К вопросу о движении реальных газов при больших скоростях". В конце 1930-х годов он опубликовал работы, посвященные исследованию распространения волн взрыва и теории корабельных волн. Можно заключить, что 1930-е годы - это годы формирования научных интересов И.П. Гинзбурга.

**1.3. Первые публикации.** Первая печатная работа – статья "К вопросу о распределении скорости по сечению потока в случае равномерного движения (некоторые замечания по теории равномерного турбулентного движения)". Она была опубликована в сборнике трудов Академии Наук СССР в 1935г.

В статье рассматриваются уравнения равномерного турбулентного движения жидкости. Для получения замкнутой системы уравнений после введения осредненных и пульсационных характеристик потока предлагается использовать зависимость для величины кинетической энергии  $\Phi$ .

Перечень довоенных работ И.П. Гинзбурга следует дополнить статьей "К теории корабельных волн и волнового сопротивления". В начале излагаются известные теории Мичеля и Хавелока. Автор статьи дополняет результат Хавелока, указывая способ определения величины  $\sigma$  - плотности системы источников, непрерывно распределенных вдоль поверхности. Это позволяет использовать зависимость, полученную для определения потенциала  $\Phi$  абсолютного движения жидкости вследствие волнообразования.

Работы И.П. Гинзбурга, выполненные в 1930-е годы показывают направленность его научных интересов: проблемы турбулентности и гидрогазодинамики.

**1.4. Годы Великой Отечественной войны.** Ввиду сложного положения на фронтах некоторые лаборатории факультетов и институтов университета 19 июля 1941 г. были эвакуированы в г. Елабугу Татарская АССР где возник филиал ЛГУ. И.П. Гинзбург, М.А. Ковалев, П.Г. Макаров под руководством академика В.И. Смирнова выполняли задания Государственного Комитета Обороны по исследованию аэродинамики оперенных снарядов, мин и авиабомб. За эти работы и в связи со 125-летием университета В.И. Смирнов, И.П. Гинзбург, М.А. Ковалев были награждены орденами.

По материалам исследований военных лет И.П. Гинзбург подготовил докторскую диссертацию, которую защитил в 1944г. Ее материал вошел в монографию "Устойчивость движения и кучность боя мин и реактивных снарядов" (1949г.).

Работа состоит из двух частей. Первая часть "Устойчивость движения и кучность боя мин и авиабомб" (8 глав); вторая часть "Устойчивость движения и кучность боя реактивных снарядов" (4 главы).

В приложении к монографии изложены методы определения аэродинамических сил и их коэффициентов. Установлено, что монография была одной из первых в специальной литературе на эту тему.

**1.5. Первые послевоенные годы (1944–49).** В 1944г. по инициативе И.П. Гинзбурга возобновилась работа по созданию газодинамической лаборатории. Первой работой, завершенной в лаборатории, была работа Н.М. Маркевич по исследованию пневматических систем управления. С этой диссертации (1947г.) ведется отсчет кандидатов наук, которых подготовил И.П. Гинзбург – итоговая цифра 123 (!).

**1.6. Начало научно-педагогической работы в Военно-механическом институте.** В 1946г. в жизни И.П. Гинзбурга произошло знаменательное событие: он был приглашен на должность профессора в Ленинградский Военно-механический институт. Одновременная работа в двух высших учебных заведениях разной направленности позволила И.П. Гинзбургу, с одной стороны, внести в исследования, проводимые в ЛГУ, понимание проблем современной техники, а, с другой стороны, обогатить и усилить решение прикладных задач в ЛВМИ применением современной математической теории, т.е. соединить университетскую (академическую) науку и инженерные проблемы новой авиационно-космической техники.

Следующая глава посвящена анализу развития газодинамических исследований в этих ВУЗах и формированию научной школы.

...

И.П. Гинзбург принадлежит к поколению замечательных отечественных ученых-аэрогидромехаников, питомцев Ленинградского университета, чье научное творчество начиналось в предвоенные годы. К этим ученым, внесшим существенный



вклад в науку, относятся академик С.А. Христианович, профессор, засл. д. н. Н.Н. Поляхов, чл.-корр. АН С.В. Валландер, профессор А.Е. Донов, профессор А.А. Гриб и другие.

С 1946 года начинается основной этап творческой биографии И.П. Гинзбурга, связанный с кафедрой гидроаэромеханики и газодинамической лабораторией (ГДЛ) в ЛГУ и кафедрой аэрогазодинамики и динамики полета ЛА в Военномеханическом институте, которые стали центрами исследований по прикладной газодинамике в Ленинграде благодаря его научной и организаторской деятельности.

## **Глава 2. Развитие газодинамических исследований (1946-1988).**

В главе раскрыто содержание газодинамических исследований в ЛГУ и выявлены основные работы, имеющие научное и прикладное значение (2.1-2.3).

**2.1. Исследования по прикладной гидрогазодинамике в ЛГУ.** В 1950-е годы И.П. Гинзбург публикует ряд статей, продолжая исследования предвоенных лет.

В работе "О расчете гидравлического удара в трубах переменного сечения" (1952г. в соавторстве с Д.Н. Волковым) приводится решение задачи о гидравлическом ударе в трубах переменного сечения.

Следующая работа "Движение газа в узкой щели" (1953). В ней рассматривается установившееся движение вязкого газа в узкой щели, причем одна из стенок, образующих эту щель, движется с некоторой скоростью.

Статья "Истечение вязкого газа из подвижной щели" (1953). Решается более общая задача об установившемся истечении газа из баллона через подвижную щель.

В работе 1955г. "Установившееся истечение газа из сосудов при наличии трения и местных сопротивлений" решается задача об определении расхода газа, вытекающего из сосуда через систему трубопроводов при наличии местных сопротивлений.

Еще одна работа 1956 года – статья "Гидравлический удар в трубах из упруго-вязкого материала". Рассматривается влияние вязкости материала на затухание колебаний жидкости, вызванных гидравлическим ударом.

Обобщением этого цикла работ явилась монография "Прикладная гидрогазодинамика" (1958), получившая высокую оценку специалистов.

**2.2. Исследования по теории пограничного слоя.** Цикл работ был выполнен им совместно с аспирантами кафедры. В статье "Турбулентный пограничный слой пластинки в сжимаемой жидкости" дается решение задачи о движении газа в турбулентном пограничном слое пластинки, исходя из основных соотношений полуэмпирической теории турбулентности. Тема была продолжена И.П. Гинзбургом и К.М. Шляхтиной в работе "Пограничный слой плоскопараллельной струи сжимаемой жидкости". Задача решается на основе предположений относительно пути перемешивания, принятых в полуэмпирической теории турбулентности.

Следующая работа И.П. Гинзбурга "Турбулентный пограничный слой в сжимаемой жидкости (смеси газов)". На основе полуэмпирической теории турбулентности дается приближенное решение задачи об определении сопротивления трения и теплопередачи пластинки в сжимаемой жидкости.

В следующей статье "О связи между теплосодержанием и скоростью при движении газа в пограничном слое" рассматривается важный для решения задач пограничного слоя вопрос о связи теплосодержания и скорости.

Влияние вдува на трение и параметры турбулентного пограничного слоя рассматривается в статье "Турбулентный пограничный слой пластинки в несжимаемой жидкости с подводом вещества".

Вопросы влияния магнитного поля на течение в пограничном слое жидкости были исследованы И.П. Гинзбургом и его учениками (Л.И. Скуриным и др.). В статье "Турбулентный магнитогидродинамический пограничный слой в жидкости с

постоянной электропроводностью” решается задача о турбулентном обтекании диэлектрической пластинки, находящейся в поперечном магнитном поле.

Результаты работ И.П. Гинзбурга и его учеников обобщены в монографии «Теория сопротивления и теплопередачи», являющейся заметным вкладом в теорию пограничного слоя. Установлено, что разработанные методы расчета сопротивления и теплопередачи нашли широкое применение в инженерной практике.

**2.3. Сборники “Газодинамика и теплообмен”.** С 1968 г. в рамках “Ученых записок ЛГУ” стал выходить сборник “Газодинамика и теплообмен”. При жизни И.П. Гинзбурга вышло 5 сборников (в 1968, 1970, 1972, 1975, 1977 гг.). В сборниках были помещены результаты обобщающих работ, выполненных в газодинамической лаборатории ЛГУ, и на кафедре в ЛМИ.

Анализ деятельности ГДЛ за 30 лет выявил основные направления исследований:

- *теория пограничного слоя* – исследованы различные физические модели созданы методы расчета трения и тепловых потоков на поверхности ЛА;
- *сверхзвуковые газовые струи* – методы расчета взаимодействия с ЛА;
- *течения в донной области и в ближнем следе за обтекаемым телом* ;
- *теория нестационарных ударно-волновых процессов* – созданы методы расчета давления ударных волн на поверхностях различных форм.

Среди учеников И.П. Гинзбурга в ЛГУ необходимо выделить профессоров В.Г. Дулова, С.К. Матвеева, Е.Ф. Жигалко, Е.А. Угрюмова, Л.И. Скурина, Ю.З. Алешкова.

**2.4. Научные исследования в ЛВМИ (ЛМИ).** Творческие планы И.П. Гинзбурга, связанные с масштабными научными исследованиями, могли быть реализованы только в коллективе специалистов высокой квалификации. Изучение истории кафедры, созданной им в 1949 году, позволило выявить этапы ее научной деятельности.

*Организация научно-исследовательской работы.* Постоянное финансирование исследований позволяло иметь штат научных сотрудников. В 1969г. на кафедре была организована проблемная научно-исследовательская лаборатория (ПНИЛ).

*Развитие кафедры (1949-1988).* В истории кафедры, которой свыше 30 лет руководил И.П. Гинзбург (с 1949г. по 1979г.), можно выделить четыре этапа.

Первый этап (1949-1958гг.) - период становления кафедры. Штат кафедры постоянно увеличивался. В 1949г. началось еженедельное проведение научных семинаров. За 30 лет было проведено более тысячи таких семинаров (!).

Второй этап (1958-1969гг.). В эти годы эпоха космических исследований полностью востребовала научный потенциал И.П. Гинзбурга и его замечательные организаторские способности. В 1957г. под его руководством был проведен Первый Всесоюзный семинар по газовым струям, который собрал сотни специалистов ведущих организаций страны.

Основным научным направлением в течение многих лет (с 1959г.) стали исследования сверхзвуковых газовых струй. Полученные в течение 20 лет результаты, их значимость для науки и технических приложений (в первую очередь, для ракетно-космической техники) позволили утверждать о создании научной школы в этой области прикладной газодинамики.

Установлено, что 1960-е годы, образно говоря, были годами выхода кафедры на “расчетный режим”: был создан научно-педагогический коллектив высококвалифицированных специалистов; организована проблемная лаборатория (ПНИЛ), стал выходить сборник “Газодинамика и теплообмен”, продолжалось развитие НИР по аэрогазодинамике и динамике управляемых систем, стали регулярными всесоюзные семинары по проблемам прикладной газодинамики.

Третий этап развития кафедры - продолжение исследований для ракетной техники (1970-е годы); обобщение результатов в докторских диссертациях и монографиях (Г.Т. Алдошин, Г.А. Лукьянов, Ю.П. Савельев, И.А. Белов, А.С. Шалыгин, В.Н. Усков, А.М. Сизов).

После кончины И.П. Гинзбурга начинается четвертый этап истории кафедры. В течение года (1979-1980г.) обязанности заведующего кафедрой исполнял профессор Юрий Петрович Савельев, а с 1980 по 1988г. кафедрой заведовал профессор Герман Александрович Лукьянов.

В 1988г. решением Ученого совета ЛМИ на основе кафедры были созданы кафедра «Динамики полета ЛА и аэрогидромеханики» (позже - кафедра «Процессы управления»), зав. кафедрой - проф. А.С. Шалыгин; кафедра «Газодинамических устройств» (позже - кафедра «Газоплазмотермодинамики и теплотехники»), зав. кафедрой - проф. Г.А. Лукьянов (ныне проф. В.Н.Усков); научный центр под руководством - проф. А.М. Сизов.

В лучших традициях школы И.П. Гинзбурга научные исследования кафедры в 1980-е годы в различных разделах газодинамики и плазмотермодинамики успешно продолжались.

В 1988г. завершилась история единой кафедры, созданной профессором Исааком Павловичем Гинзбургом. Научная школа в последующие годы не только сохранилась, но и продолжала развиваться.

...

Раскрыта роль И.П. Гинзбурга в создании научно-исследовательских центров в ЛГУ и ЛВМИ (ЛМИ). В ЛГУ в течение 30 лет (с 1947г.) им было подготовлено 25 кандидатов наук, из которых впоследствии докторами наук стали В.Г. Дулов, Ю.З. Алешков, С.К. Матвеев, Е.Ф. Жигалко, Е.А. Угрюмов, Л.И. Скурин.

Специальная кафедра в ЛМИ стала основой центра газодинамических исследований и научной школы. Установлены основные направления исследований, в которых были получены наиболее значимые научные и прикладные результаты: *сверхзвуковые газовые струи; газодинамика старта ЛА; внутрикамерные течения; течения в следе за ЛА; нестационарные ударные волны; струи плазмы; турбулентные сверхзвуковые струи и аэроакустика; теория отрывных течений; двухфазные течения; применение газовых струй в металлургии.*

Содержание деятельности научной школы раскрыто во II части работы (главы 3 и 4), которая является центральной частью диссертационного исследования.

## **Часть II. ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (1950-60-70).**

Во второй части работы анализируется деятельность Ленинградских ученых в области прикладной газодинамики: ее содержание, научная и прикладная значимость, внедрение в инженерную практику.

**Глава 3. Развитие газодинамики сверхзвуковых струйных течений ЛА.** Сильнейшим стимулом развития газодинамики струйных течений в 50-х годах XX столетия явилась необходимость решения целого ряда проблем аэрокосмической техники. В последующие годы область приложений быстро увеличивалась, включая в себя вопросы проектирования газоструйных аппаратов, разработку технологических процессов (например, в металлургии), создание газодинамических излучателей звука, использование высокоскоростных газовых струй для бурения горных пород и т.д.

В основной части главы дается подробное изложение и анализ вклада ученых Ленинграда, создавших научную школу в этой области прикладной газовой динамики.

**3.0. История исследований струйных течений (до 1950-х гг.).** Установлено, что история исследований сверхзвуковых газовых струй начинается в 19 веке. Прак-

тические приложения исследуемых газодинамических явлений тогда были неясны, поэтому работы не имели системного характера.

В первых экспериментах Э. Маха и П. Зальхера использовались оптические методы, основанные на взаимодействии светового источника с исследуемой средой. Можно сделать вывод, что они впервые начали исследовать сверхзвуковую газовую струю. Полученные фотографии были настолько необычны, что необходимость более детального изучения струи воздуха стала очевидной.

В 1950-е годы начинается современный этап исследований газоструйных течений, который был вызван развитием авиационной и ракетно-космической техники. Как уже отмечалось, важные для науки и техники результаты были получены впервые в ЛВМИ (ЛМИ) и ЛГУ.

**3.1. Осесимметричные сверхзвуковые струи.** Актуальной задачей в 1950-е гг. был расчет начального ударно-волнового участка.

Первое оригинальное теоретическое исследование начального участка струи выполнил В.Г. Дулов (1958). На рисунке приведена схема идеальной (невязкой) сверхзвуковой недорасширенной струи, истекающей в затопленное пространство.

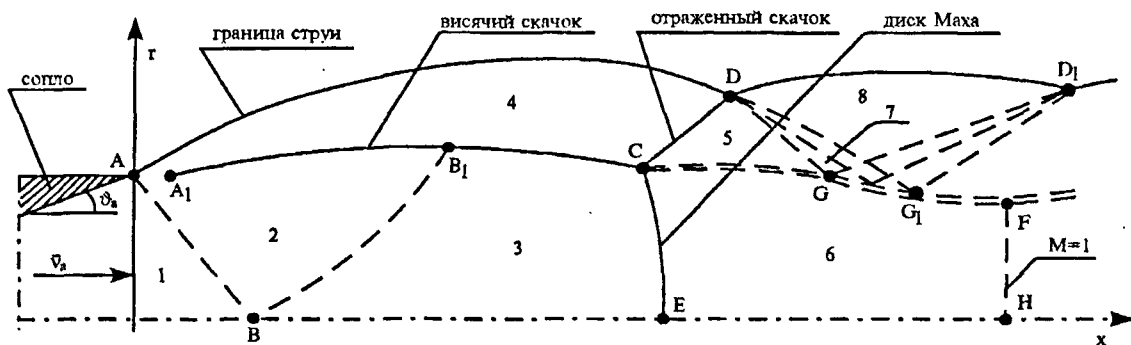


Схема невязкой сверхзвуковой струи на начальном участке: (1+8) — зоны струи;  $AB, B_1E$  — граничные характеристики;  $CF$  — контактная поверхность

Метод широко применялся в инженерной практике.

**3.2. Составные сверхзвуковые струи.** Этот класс струй исследовался с начала 1960-х годов. Первую серию экспериментов провел А.Л. Исаков. Анализ полученных результатов показал, что скачки уплотнения в составной струе, образующиеся при взаимодействии струй, нарушают осесимметричность течения. Впервые разработана схема взаимодействия двух струй, представленная на рисунке: структура двухсопловой струи в плоскости симметрии (а) и в плоскости взаимодействия (б).

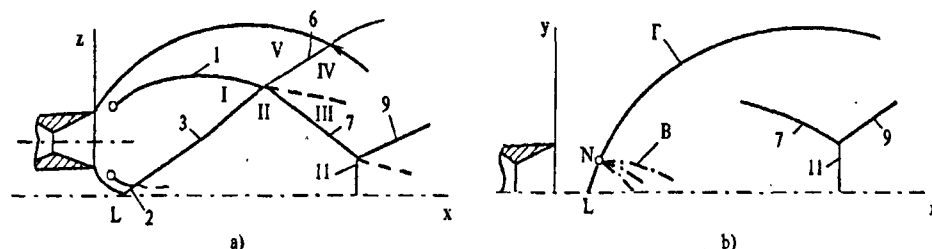


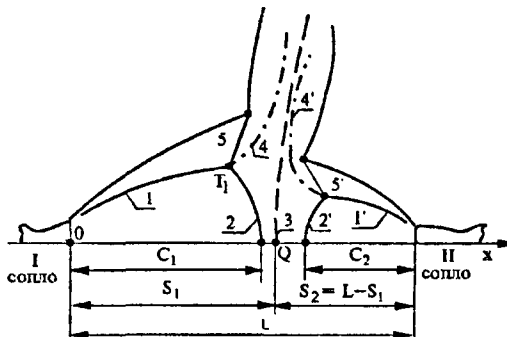
Схема взаимодействия двух струй в осевой плоскости (а) и в плоскости взаимодействия (б); (1+11) — скачки уплотнения (I-V) — зоны струй

Интерференционная волна 2, взаимодействуя с "висячим скачком" 1 одиночной струи, образует результирующий ударный фронт 3, нарушая осесимметричность течения.

**3.3. Встречные сверхзвуковые струи.** Исследование сверхзвуковых струй, взаимодействующих со встречным сверхзвуковым потоком, связано с задачей торможения летательного аппарата.

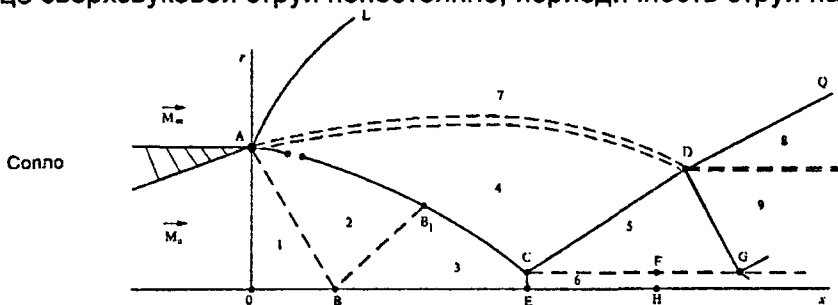
В 1970-е годы основное экспериментальное исследование провел Е.И. Соколов, в результате которого была выявлена качественная картина течения и получены эмпирические формулы для определения основных геометрических характеристик волновой структуры (см.рис.).

Встречное взаимодействие струй характеризуется наличием поверхности раздела, которая проходит через точку торможения на оси, отделяя газ одной струи от другой.



**3.4. Сверхзвуковая струя в спутном потоке.** Спутный поток охватывает струю, вытекающую из сопла двигателя. Наибольший интерес представляет случай  $M_\infty > 1$  (сверхзвуковой полет). Этот класс струйных течений детально исследовал Б.Н. Собколов (1968).

При взаимодействии нерасчетной струи с внешним сверхзвуковым потоком образуются системы ударных волн и волн разрежения (см. рис.). Давление на границе сверхзвуковой струи непостоянно; периодичность струи нарушается.



Начальный участок сверхзвуковой струи при наличии спутного потока, AD – граница струи

**3.5. Взаимодействие сверхзвуковой с преградой.** Экспериментальное исследование важных для инженерной практики режимов взаимодействия нерасчетной струи с преградой провели (1961) А.Л. Исаков, Б.Н. Собколов, Г.А. Акимов.

1. *Качественная картина течения.* Зона 1. Вблизи сопла интенсивность "висячего" скачка уплотнения мала. Поэтому центральный скачок взаимодействует непосредственно с границей струи. Форма скачка близка к сферической. Зона 2. Форма центрального скачка в этой зоне изменяется мало (см. рис.), но существенно увеличивается расстояние между скачком и преградой. Зона 3. Если поперечные размеры преграды больше маховского диска свободной струи, то устойчивое течение перед преградой нарушается, хотя ее

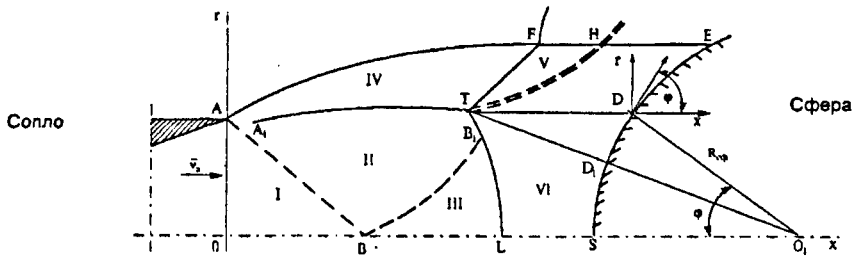


Схема взаимодействия сверхзвуковой струи со сферической преградой

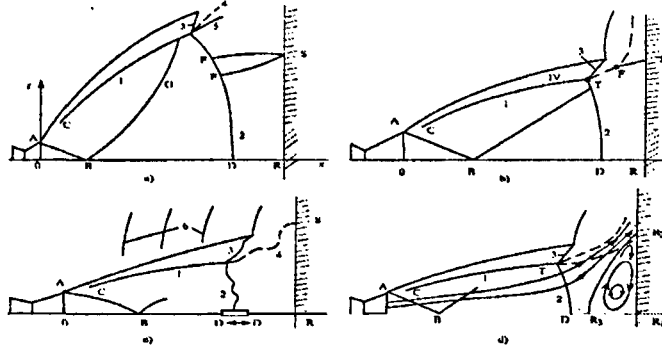
положение и параметры струи не изменяются. Было установлено, что зоне неустойчивости приближенно соответствует зона дозвукового течения в свободной струе.

2. *Взаимное положение скачков уплотнения и преграды* рассчитывается на основе закона сохранения массы.

3. *Суммарное силовое воздействие струи на преграду* определяется из интегральной формы закона количества движения.

4. *Давление струи на преграду* может быть определено в результате решения уравнений движения в области между соплом и преградой по методу А.А. Дородницына. В процессе расчета проверяется правильность выбора параметров в точках *T* и *D* (Г.А. Акимов и В.И. Погорелов (1965)).

**3.6. Взаимодействие нерасчетной струи с плоской преградой, перпендикулярной потоку.** В начале 1970-х гг. наиболее полные исследования были проведены В.Н. Усковым, Б.Г. Семилетенко и Е.И. Соколовым: эмпирические формулы и качественный анализ течения (см.рис.).



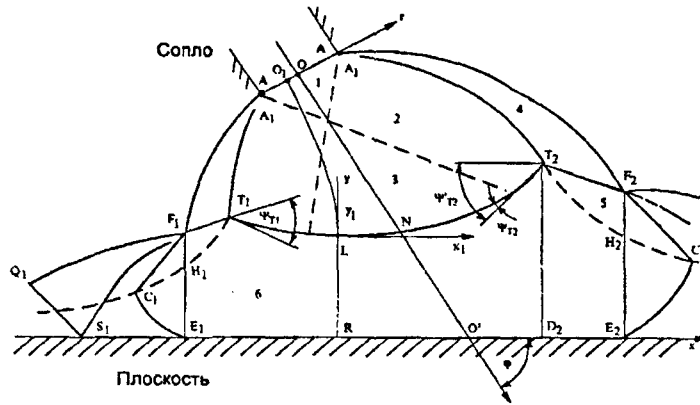
Возможные схемы взаимодействия первой «бочки» недорасширенной струи с плоской преградой:

1, 2 и 3— висячий, центральный и отраженный скачки уплотнения; 4— тангенциальный разрыв; 5— дополнительный скачок уплотнения; 6— пакет ударных волн; *S* и *F*— звуковые точки на преграде и поверхности разрыва; *T*— точка пересечения ударных волн

На рисунке: 1. нормальное взаимодействие струи с преградой  $0 < h < h_{1H}$  (a); 2. сильная неустойчивость  $h_{1H} \leq h \leq h_{1k}$  (b,c); 3. взаимодействие с обратными токами  $h_{1k} < h < h_k$  (d).

**3.7. Взаимодействие струи с наклонной плоской преградой.** Экспериментальное и теоретическое исследование этого класса течений при больших углах наклона преграды выполнили В.Н.Усков и Г.А.Акимов.

На основе анализа фотографий была предложена схема течения (см. рис.).



Взаимодействие недорасширенной сверхзвуковой струи с наклонной плоской преградой;  
EC – звуковая линия

При угле наклона преграды  $\varphi < 90^\circ$  осевая симметрия течения нарушается. За центральным скачком уплотнения оно становится трехмерным, но симметричным относительно продольной плоскости.

**3.8. Взаимодействие струи с преградой при малых углах встречи.** Схема взаимодействия впервые была предложена В.Н. Усковым и Ю.М. Рудовым (1960гг).

При натекании сверхзвуковой струи на преграду образуется ударная волна 1. Ее взаимодействие со скачками уплотнения в струе приводит к образованию течения, подобного течению в двухсопловой струе (см.3.2). Если преграда расположена вблизи сопла, то пристеночная ударная волна - след границы струи на плоскости преграды.

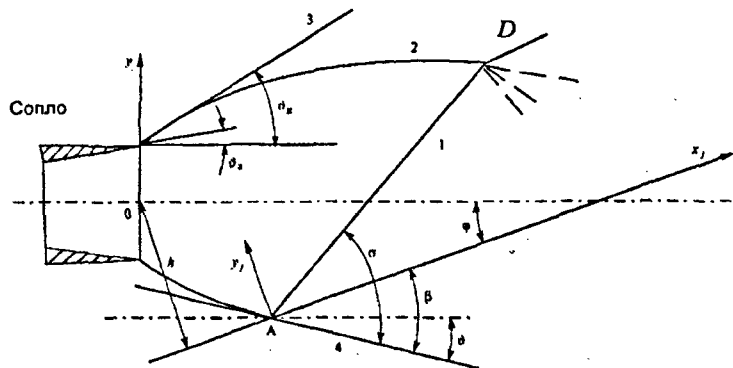


Схема взаимодействия струи с преградой в: А – начальная точка встречи; 1 – пристеночный скачок уплотнения; 2 – граница струи; 3–4 – касательные к границе струи

**3.9. Взаимодействие составной струи с преградой.** Это явление, характеризующееся наиболее сложной ударно-волновой структурой, в 1950-е годы исследовалось только экспериментально. Детальное исследование проблемы в последующие годы выполнил Ю.М. Рудов. Выявлены две основные схемы течения: 1. взаимодействие на малых расстояниях (рис. 1); 2. взаимодействие на больших расстояниях. Возможно возникновение режима нестационарного течения (см.3.6,3.10).

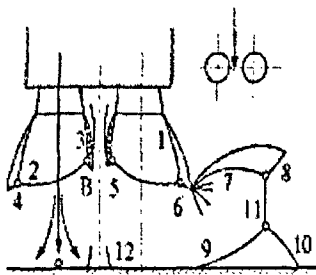


Рис. 1. Схема натекания параллельных струй на преграду: волновая структура

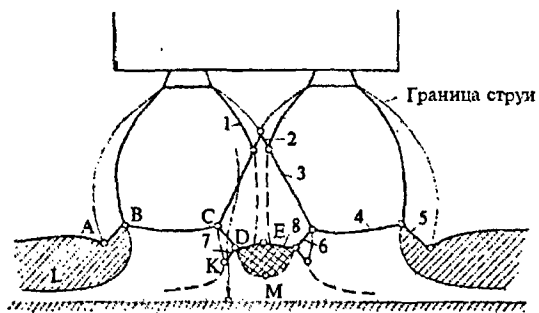


Рис. 2. Волновая структура при устойчивом взаимодействии; (1+8) – скачки уплотнения

**3.10. Неустойчивые режимы взаимодействия сверхзвуковой струи с преградой.** Неустойчивый режим взаимодействия струи со сферической преградой был впервые обнаружен в 1961г. А.Л. Исаковым, Б.Н. Собколовым и Г.А. Акимовым. Было установлено, что режим характеризуется низкочастотными колебаниями скачков перед преградой и интенсивными пульсациями давления на ее поверхности. Условия возникновения неустойчивости: 1. поперечные размеры преграды соизмеримы с диаметром скачка уплотнения; 2. достаточная затупленность преграды, при которой течение перед преградой является дозвуковым; 3. удаленность преграды от сопла, когда масса газа, прошедшая центральный скачок уплотнения, много меньше массы газа, прошедшей "висячий" и отраженный скачки уплотнения. Кроме того, полное давление кольцевого потока существенно больше в этом случае его величины в центральном потоке. Существует критическое отношение  $Ne = (p_0 Q)_5 / (p_0 Q)_6$ , при котором начинается неустойчивое течение. Здесь  $P_0$  – полное давление,  $Q$  – массовый расход, 5 и 6 – индексы кольцевого и центрального потоков. В безразмерной форме:  $\overline{Ne} = (\overline{p}_{05} / \overline{p}_{06}) \cdot [(1/\eta) - 1] \cdot \sin(\theta_{r,6} - \theta_{r,5})$ , где  $\eta$  – отношение расхода через центральный скачок уплотнения к расходу через сопло.

Это явление в дальнейшем исследовалось в ЛМИ: Б.Н. Собколов, В.Н. Усков, Б.Г. Семилетенко (1970-е). В последующие годы были опубликованы работы В.Г. Дулова, В.Е. Кузьминой и Е.А. Угрюмова, а также Е.И. Соколова (1980-е).

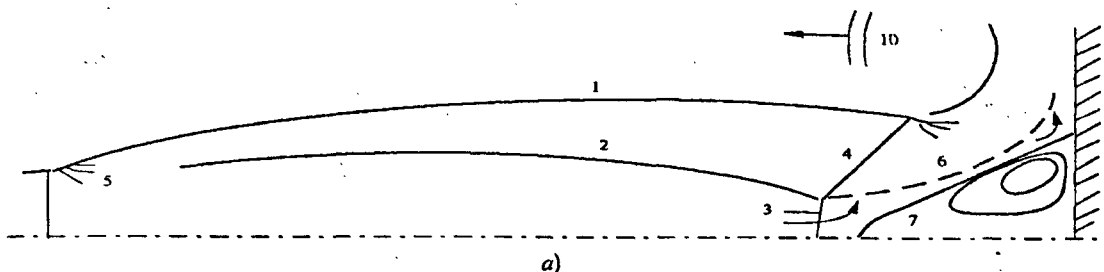
Они обобщили многолетние исследования, основные выводы которых сводятся к следующему.

1. Известно, что при натекании сверхзвуковой струи на перпендикулярную ей плоскую преграду в некотором, достаточно узком, диапазоне определяющих параметров системы "сопло – преграда" течение теряет устойчивость: стационарное обтекание сменяется нестационарным (см. рис.). Мощные пульсации параметров в поле течения на режимах автоколебаний имеют место также при натекании струи на преграду с соосно расположенным заглушенным каналом.

2. Изучение процесса автоколебаний в струе, набегающей на преграду, проводилось в серии расчетов. Решение велось по разностной схеме С.К. Годунова.

3. Рассматривались автоколебательные режимы взаимодействия струи с соосно расположенным заглушенным каналом. При определенном положении реализуются пульсирующие режимы течения, сопровождающиеся большими динамическими нагрузками на преграду и значительным превышением температуры у закрытого конца канала.





Система скачков в струе перед преградой на режимах автоколебаний (схема): а) минимальный отход ЦС от преграды: 1— граница струи, 2— висячий скачок, 3— центральный скачок (ЦС), 4— отраженный скачок, 5— волна разрежения, 6— контактный разрыв, 7— центральная область, 8— волна разрежения, 9— головной скачок, 10— волна сжатия

4. Термоакустические явления в полужамкнутых объемах. Как уже отмечалось, автоколебания при натекании сверхзвуковой струи на преграду с полостью сопровождаются разогревом газа, колеблющегося внутри полости. Большое количество исследований посвящено теоретическому объяснению явления аномального нагрева со значительным превышением температуры у закрытого конца полости над температурой торможения набегающего потока.

Вместе с тем, возможность получения стабильных пульсаций и высоких температур с помощью простого пассивного устройства, являясь уникальной, может быть использована для разработки новых устройств и технологий, которые могут найти применение в области высокотемпературной физики и химии, а также - в области акустики для создания новых газоструйных излучателей звука.

...

Данная глава (наряду с четвертой) является основной главой работы, содержащей анализ развития газодинамики сверхзвуковых струйных течений в ленинградских научных центрах (1950-70-е годы).

Установлено, что впервые были получены следующие результаты:

1. Проанализирована качественная картина течения (ударно-волновая структура) на начальном участке сверхзвуковых газовых струй, характерных для реактивной техники: односопловых, составных, встречных, со спутным потоком.

2. Разработаны методы расчета параметров струи.

3. Выявлены режимы течений и структура ударных волн при натекании сверхзвуковой нерасчетной струи на преграду.

4. Разработаны методы расчета взаимодействия газовых струй с поверхностями различной формы.

5. Открыт режим автоколебаний («сильная неустойчивость») при взаимодействии нерасчетной струи с преградой, и установлены условия его возникновения.

6. Анализ научной и прикладной значимости полученных результатов позволил заключить, что в 1960-70-е создана школа газодинамики сверхзвуковых струйных течений.

**Глава 4. Развитие исследований в области физической газодинамики.** Во многих случаях физическая модель струи должна быть более сложной, т.е. необходимо учитывать, помимо сжимаемости газовой среды, ее вязкие свойства, теплопроводность, наличие твердых частиц и т.д.

Основные исследования проводились в следующих направлениях.

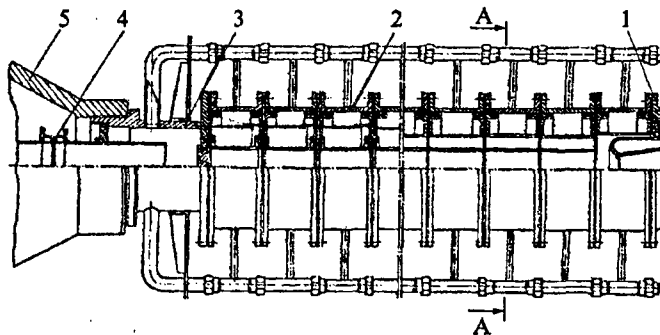
**4.1. Гидрогазодинамика и газодинамика старта ЛА.** Гидрогазодинамика старта ЛА изучалась с 1958 года аспирантами В.М. Супруном и М.Г. Моисеевым, позднее — В.И. Михайловым (1969). Инженерами А.И. Старшиновым и Г.А. Акимовым (1959) были спроектированы стенды для определения присоединенных масс и присоединенных моментов инерции (1959).

Обобщающее исследование по газодинамике старта (1971) выполнил Г.Т. Алдошин. 1950-70-е годы — годы становления школы газодинамики старта ЛА:

разработка методов расчета динамических и тепловых нагрузок на ЛА и стартовый комплекс.

**4.2. Внутрикамерные процессы. Газодинамика РДТТ.** Первые исследования внутренней газодинамики РДТТ были выполнены (1960-64) Б.А. Райзбергом и К.П. Самсоновым, в работах которых была дана теоретическая постановка задачи о влиянии газодинамики на процессы в камере двигателя. Результаты этих работ опубликованы в монографии «Основы теории рабочих процессов в ракетных системах на твердом топливе» (совместно с Б.Т. Ерохиным).

В 1965–1967гг. в ЛМИ был создан ряд экспериментальных установок для исследования внутренних течений в проточных частях камер сгорания (В.Н. Емельянов и сотрудники). Был разработан комплекс модельных установок, использующих в качестве рабочего тела воздух аэродинамических труб высокого давления. Моделирование горения в этом случае воспроизводилось серий моделей, отвечающих определенным моментам времени работы, а подвод рабочего тела за счет горения имитировался распределенным вдувом через пористые поверхности (см. рис.).



Общий вид модельной установки с распределенным газоподводом: 1— сопловая крышка с элементами управления положением сопла, 2— секция имитатора канала с пористой массоподающей поверхностью, 3— расхододелительное устройство, 4— расходомер, 5— ресивер

Сменные секции имитаторов канала позволяли набирать различные конфигурации каналов — цилиндрические, звездчатые, ступенчатые, каналы с проточкой (рис. 1) и т.д. Секция имитатора состояла из унифицированного корпуса, на котором располагались узлы газопровода и вставного блока, обеспечивающего имитацию различных типов и размеров каналов. Модельная установка комплектовалась набором сопловых крышек, позволяющих реализовать широкий набор структурных и конструктивных оформлений околосоплового пространства (рис. 2).

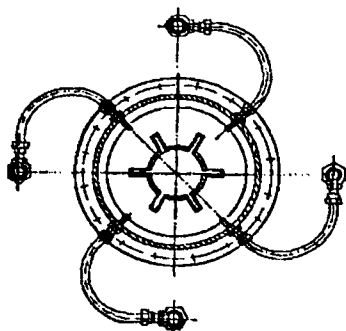


Рис. 1. Сечение модельной установки

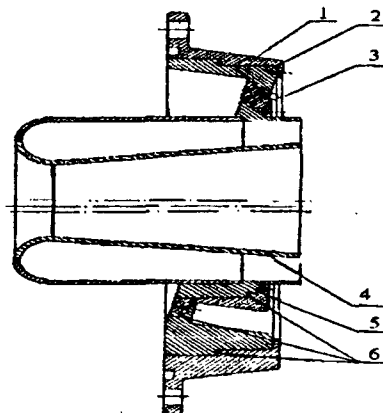


Рис. 2. Сопловая крышка, обеспечивающая угловое смещение сопла

Исследования В.Н. Емельянова (1960-70-е годы) и его учеников Ф.Ф. Спиридонова и Б.Я. Бендерского обобщили многие проблемы внутрикамерных течений.

**4.3. Исследование течений в донной области и следа за ЛА.** Исследование проблемы в 1961г. начал Ю.П. Савельев. Были проведены экспериментальные исследования на различных моделях соплового блока и разработан метод расчета донного давления (1964).

Для исследования ближнего следа была создана и отлажена малая баллистическая трасса, на которой работали сотрудники Ю.П. Савельева – А.Н. Журкин, Д.А. Ярцев, И.М. Фадин, М.М. Степанов (1970-е годы).

Теоретические подходы к определению параметров течения в ближнем следе основывались на использовании уравнений типа пограничного слоя. В результате решения были получены данные по величине донного давления за уступом и статического давления вдоль оси следа.

Физическая взаимосвязь течения во внешнем пограничном слое на поверхности тела, в его донной области и в области следа была детально исследована в работах Ю.П. Савельева в 1970-е годы. Для решения задачи о взаимодействии сверхзвуковой струи с внешним потоком за кормовой частью ЛА были использованы интегральные уравнения высших моментов (подход Л.С. Лейбензона и В.В. Голубева).

Дальнейшие исследования в 1980-е годы были выполнены А.Н. Журкиным (стендовые испытания), Д.А. Ярцевым (измерительные комплексы), М.М. Степановым (метод расчета при наличии химической неравновесности).

Пограничный слой и отрывные течения в сопловых насадках были исследованы М.Г. Моисеевым и сотрудниками (Е.А. Никуличева, В.С. Сумина, В.Ю. Соловьев). На специальном стенде определялись расходно-тяговые характеристики сопел различных типов в широком диапазоне параметров (с 1960-х гг.).

**4.4. Исследования нестационарных ударных волн.** Основные теоретические исследования были выполнены А.К. Полубояриновым (с 1960-х гг.) и его учениками Ю.М. Циркуновым, А.И. Котовым, П.П. Андреевым – решение задач о движении и отражении ударных волн от поверхностей.

Формирование ударной волны было экспериментально исследовано Ю.С. Марковым (1960-е гг.) и А.И. Цветковым (1970-е годы) (см. рис.).

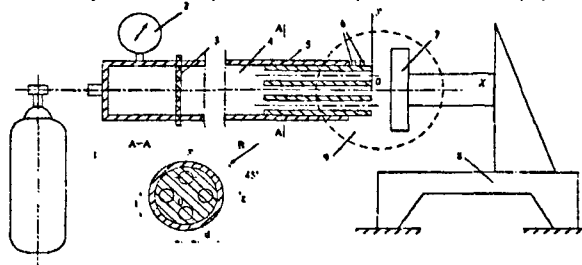
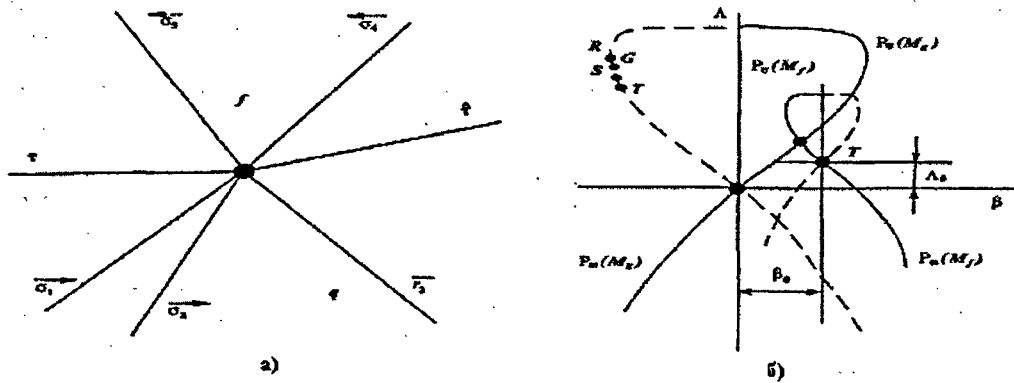


Схема установки: 1— баллон; 2— манометр; 3— диафрагма; 4— ударная труба; 5— блок сопел; 6— датчики скорости ударной волны; 7— преграда; 8— координатник; 9— оптическое поле прибора

**4.5. Теория взаимодействия газодинамических разрывов.** Проблема относится не только к сверхзвуковым нерасчетным газовым струям, но и к тем процессам и течениям, где возможно их формирование и распространение. Исследование проблемы было начато в 1970-е годы В.Н. Усковым, завершено в 1980-е годы.

В его работах дается обобщение различных задач о пересекающихся разрывах. Возможные ударно-волновые структуры сводятся в одну условную обобщенную структуру, из которой каждый конкретный случай выделяется с помощью интерференции разрывов. Расчет газодинамических параметров течения в окрестности точки пересечения сводится к решению трансцендентного уравнения интерференции, общего для различных видов пересечения (см.рис.).



К задаче интерференции нулевого порядка: а) — обобщенная ударно-волновая структура; б) — решение уравнения интерференции на плоскости поля

Проблема интерференции разрывов состоит в определении интенсивностей исходящих разрывов, газодинамических функций и неравномерностей течения за ними по заданным интенсивностям приходящих разрывов.

Прикладное значение теории взаимодействия разрывов раскрыто в работах учеников профессора В.Н. Ускова (А.В. Омельченко, А.О. Кожемякина, М.В. Чернышова и др.): созданы методы расчета сверхзвуковых течений с локальными ударно-волновыми взаимодействиями различных типов.

**4.6. Сверхзвуковые струи плазмы.** Исследования плазменных струй были начаты в конце 1960-х годов. Под руководством Г.А. Лукьянова (ключевое исследование) были выполнены экспериментальные исследования структуры газодинамических и электрофизических параметров струй плазмы различных газов (аргон, гелий, азот, водород). Структура и параметры плазменных струй существенно зависят от способа их получения. Газодинамическая структура сверхзвуковых струй плазмы электротермических источников (плазмотронов) в основных чертах аналогична структуре сверхзвуковых газовых струй. Электромагнитные источники отличаются большим разнообразием конструкций и диапазонов основных параметров. На рисунке показана схема начального участка струи плазмы аргона, истекающей из звукового сопла электродугового источника. Начальный участок состоит из одной «бочки» с «висячим» и центральным скачками уплотнения. На рисунке изображены также характерные продольные и поперечные распределения относительного и полного напора  $p_{\pi} = p'_0/p_0$  ( $p'_0$  - измеренный полный напор) и интегральной интенсивности излучения  $I$ , отнесенной к ее значению на срезе сопла.

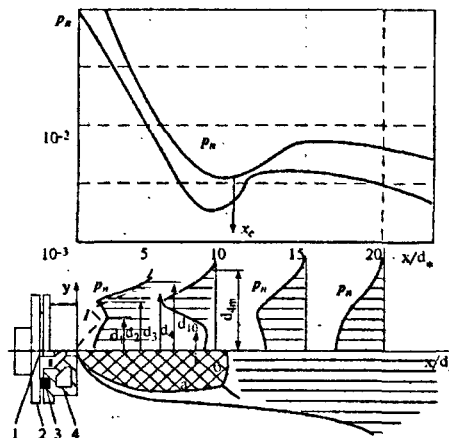


Схема течения на начальном участке недорасширенной затопленной струи плазмы аргона, истекающей из звукового сопла электродугового источника

В заключение отметим, что исследования плазменных струй, обобщенные в монографии профессора Г.А. Лукьянова «Сверхзвуковые струи плазмы», способствовали развитию многих технических приложений, внедренных в последние годы (в частности, разработки электроракетных двигателей).

**4.7. Турбулентные газовые струи. Аэроакустика.** Новая модель турбулентного переноса для струи была разработана В.А. Зазимко (1970-80 гг.). Практическая проверка модели для струй с различным химическим составом была выполнена А.В. Клочковым (1980-е годы). Метод В.А. Зазимко дает возможность составлять расчет начального участка струи (см. гл. 3) и основного (турбулентного).

Используя этот метод В.К. Ерофеев и В.В. Григорьев провели эксперименты по определению акустического излучения газовых струй. Ими были разработаны физические и математические модели процессов и выполнены численные расчеты по определению газодинамических параметров в различных сечениях струи и акустических параметров звукового поля (1980).

**4.8. Численный эксперимент. Теория отрывных течений.** Развитие вычислительной техники привело к реализации сложных вычислительных алгоритмов для решения прикладных задач. В группе И.А. Белова был выполнен цикл работ (с 1970-х гг.) по численному моделированию взаимодействия газовых потоков с телами нетрадиционной формы, когда формируются отрывные зоны, меняющие характер обтекания вблизи тела.

Преднамеренное формирование обладающих высокой устойчивостью и интенсивностью отрывных зон вблизи обтекаемых тел за счет насадок, надстроек и других элементов позволяет существенно улучшить аэродинамические характеристики таких тел. Особый интерес представляют тела диск – цилиндрической формы. На рисунке показана схема течения при отличном от нуля угле атаки.

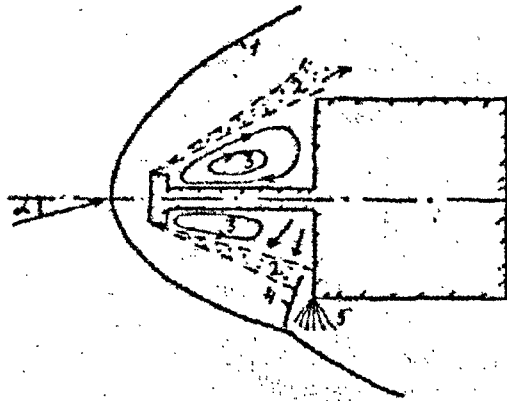


Схема течения : 1 – головной скачок уплотнения, 2 – слой смешения, 3 – циркуляционное течение, 4 – торцевой скачок уплотнения, 5 – волна разрежения

Особо следует выделить исследования С.А. Исаева, развившего численный эксперимент применительно к проблеме управления течениями жидкости. Многие работы С.А. Исаева, посвященные численному эксперименту в гидрогазодинамике отрывных течений, были обобщены позднее в ряде монографий и публикаций (см. гл.6).

**4.9. Исследования теплообмена струи с преградой.** Работы в этом направлении проводились с 1963 года; обобщающее исследование было выполнено Г.Ф. Горшковым в 1970-1980-е годы.

Получены критериальные зависимости для коэффициента теплоотдачи (Г.Ф. Горшков, И.А. Белов, В.С. Терпигорьев).

**4.10. Двухфазные газовые струи и течения.** Исследования двухфазных течений были начаты в 1960-е годы (Т.Н. Рябинина, Л.И. Шуб, Вяч.А. Коробков).

В 1980-1990-е годы цикл оригинальных работ по аэродинамике двухфазных течений выполнил Ю.М. Циркунов с сотрудниками (Н.В. Тарасова, А.Н. Волков).

Результаты Ю.М. Циркунова использовались для решения проблемы тепло-массопереноса в дисперсных системах. Среди этих результатов, получивших международное признание, следует выделить:

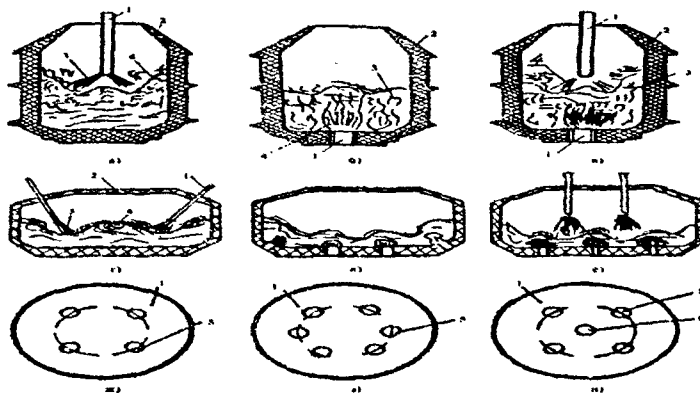
- развитие «полного Лагранжева» подхода к описанию движения примеси в газовом потоке, обтекающем затупленные тела;
- применение усовершенствованного метода универсальных рядов для расчета сжимаемого пограничного слоя с частицами;
- развитие численных и кинетических моделей для описания газозвесей с учетом столкновения частиц.

Двухфазные течения исследовались в течение ряда лет в ГДЛ ЛГУ (Б.А. Баланин – эксперимент; С.К. Матвеев – теоретические разработки): эрозионное воздействие на обтекаемые поверхности.

В 1990-е годы в ЛМИ - БГТУ К.Н. Волковым и В.Н. Емельяновым было проведено численное моделирование движения примеси и теплообмена запыленного потока газа со стенкой. Исследовано влияние дискретной компоненты на пульсационные характеристики турбулентности. Представлены результаты расчетов коэффициента теплоотдачи в зависимости от отношения теплоемкости фаз, концентрации и размера частиц примеси. Разработан метод расчета коэффициента теплоотдачи в критической точке.

**4.11. Применение сверхзвуковых струй в технологических процессах.** Применение сверхзвуковых газовых струй с целью интенсификации металлургических процессов наиболее полно исследовал А.М. Сизов с 1970-х годов.

По способу подачи газа в агрегат выделяют две схемы: струйный централизованный подвод и распределенный подвод газа в жидкую ванну (см. рис.).



Схемы продувки металлургических агрегатов: а, б, в) конвертер с однофурменным верхним (а), нижним (б) и комбинированным (в) дутьем; г, д, е) печи с многофурменным верхним (г), нижним (д) и комбинированным (е) дутьем; ж) схема наконечника фурмы для продувки конвертера

(130–160 тонные конвертеры); з) схема наконечника фурмы для продувки мартеновской печи (650–900 тонные печи); и) схема фурмы для продувки металлургического агрегата с подачей сыпучих материалов в центре блока: 1 – фурма для подачи газа; 2 – металлургический агрегат;

3 – расплав; 4 – газовая струя; 5 – сопло для подачи газа; 6 – сопло для подачи сыпучих материалов

На основе полученных результатов были даны рекомендации, схемы и конструкции устройств для ряда промышленных предприятий (Нижне-Тагильский металлургический комбинат, Западно-Сибирский комбинат и др.).

В 1950-70-е годы были проведены исследования в следующих направлениях физической газовой динамики.

- Газодинамика шахтного старта ЛА.
- Газодинамика внутрикамерных процессов (РДТТ).
- Нестационарные ударные волны.
- Теория взаимодействия стационарных газодинамических разрывов
- Газодинамика донных течений и течений в следе за ЛА.
- Сверхзвуковые струи плазмы.
- Турбулентные сверхзвуковые струи. Аэроакустика.
- Теория отрывных течений.
- Двухфазные струи и течения.
- Применение газовых струй в технологиях.

### Часть III. ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ОТЕЧЕСТВЕННЫМИ УЧЕНЫМИ. ПРЕЕМСТВЕННОСТЬ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В 1980-90-Е ГОДЫ

#### Глава 5. Обзор основных исследований сверхзвуковых газовых струй отечественными учеными (1950-1970).

##### 5.1. Свободные сверхзвуковые струи.

*Экспериментальные исследования.* В.С. Авдудевский (руководитель коллектива) - обобщающие монографии по газодинамике неизобарических струй. В.А. Анцупов - исследование малонерасчетных струй. Н.Н. Шелухин, И.Н. Мурзинов - параметры подобия формы струй.

*Вычислительный эксперимент.* В.М. Емельянов - расчет струи методом характеристик (1965). В.А. Жохов, А.А. Хомутский - «Атлас сверхзвуковых течений свободно расширяющегося идеального газа» (1966). Д.А. Мельников - расчет струи со смешанным течением. Э.А. Ашратов, Т.Г. Волконская - расчет струи методом характеристик (неравновесные физико-химические процессы). А.Н. Крайко - метод сквозного счета полностью сверхзвуковых течений (1970). Е.Н. Бондарев - численные расчеты ламинарной одиночной и блочной струи. В.И. Копченков - расчет турбулентной сверхзвуковой струи в спутном потоке (1980). Б.Д. Ковалев и В.И. Мышенков - расчет ламинарной затопленной струи с использованием полных уравнений Навье-Стокса.

Математические модели двухфазных струй и методы расчета основаны на работах А.Н. Крайко, Л.Е. Стернина, Р.И. Нигматулина; они развиты в работах И.П. Гинзбурга, Т.Н. Рябининой и сотрудников, А.Д. Рычкова, В.И. Благодсконова и А.Л. Стасенко.

*Аналитические исследования.* Большое значение для понимания закономерности расширения газов в струе имела работа М.Д. Ладыженского. В 80-е годы А.Н. Крайко и В.В. Шеломовский получили аналитические решения для приосевой области струи. В дальнейшем В.Н. Гусев получил подробное решение с поправкой на вязкость.

Для сильно недорасширенных струй В.Н. Гусев и Г.В. Климова получили приближенные решения для вязкого сжатого слоя (1960). А.Я. Черкез - одномерная теория первой «бочки» струи. Позднее подобный подход был применен Е.А. Лейтесом. А.В. Иванов - использование подхода, основанного на аналогии гиперзву-

ковых двумерных и нестационарных одномерных течений. Н.Н. Желтухин, Н.М. Терехова - динамика развития продольных вихрей в слое смешения на границе.

## **5.2. Взаимодействие струи с поверхностью.**

*Экспериментальные исследования.* Исследования в ЛМИ в 1960-е годы подробно описаны в главе 3. Аналогичные исследования проводились в НИИТП, ЦНИИМАШ, ЦАГИ и других организациях.

В.И. Немченко - исследование влияния температурного фактора на давление и тепловые потоки на плоскости, параллельной оси струи. Б.Ф. Панов - измерение напряжения трения на плоской преграде. В.В. Лунев - доказательство наличия циркуляционной зоны при взаимодействии струи с преградой.

Исследование автоколебаний на поверхности преграды было проведено в ИПТМ и ЦАГИ.

*Вычислительный эксперимент.* Н.Е. Храмов(1963) - метод интегральных соотношений для течения от источника. М.Г. Лебедев и К.Г. Савинов - расчет по схеме Бабенко-Русанова (1960). М.П. Голомазов - решение задачи методом прямых. Н.В. Дубинская - решение задачи методом установления (1970). М.Я. Иванов, В.П. Назаров - исследование сверхзвуковых течений при боковом взаимодействии струи с преградой. Н.С. Мирончук, Н.Е. Храмов - решение задачи при формировании скачка, отсоединенного от преграды. Г.В. Набережнова, Ю.Н. Нестеров - исследование нестационарного взаимодействия струи с преградой.

*Аналитические решения.* В.В. Лунев, Н.Е. Храмов - описание приосевого течения на основе приближения постоянной плотности в ударном слое.

Краткий обзор работ отечественных авторов по газодинамике струйных течений, конечно, не может охватить всех исследований в этом сложном и важном для практики разделе газовой динамики, но доказывает их очевидную актуальность.

...

Результаты, полученные отечественными учеными (экспериментальные, аналитические, численные) выявили новые особенности газоструйных течений и возможности их применения для решения задач газотермодинамики ракет и космических ЛА.

## **Глава 6. Направления исследований и формирование научных школ в 1980-90-е годы.**

В 1990-е годы перестроечные процессы в экономике вызвали резкое снижение финансирования научных исследований, что, очевидно, сказалось и на работах в области газовой динамики. Во-первых, были существенно сокращены масштабные эксперименты, требующие определенных материальных затрат. Во-вторых, возможность создания полуэмпирических расчетных методов, основанных на экспериментальных данных, стала, соответственно, ограниченной. В третьих, значительно возросла роль численного эксперимента, который до известной степени заменил физический эксперимент.

Существенно возрос интерес к применению достижений газодинамики в технологических процессах и использованию газодинамических явлений для создания технических устройств.

Продолжались в определенных объемах и исследования, связанные с ракетно-космической техникой.

Известное изменение «географии» научной деятельности ряда ученых, начавших исследования в Ленинграде, не повлияло на преемственность исследований и сохранение традиций научной школы. Достаточно указать, что в 1997 году



был проведен XVII Всероссийский семинар «Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах», а в 2000 году – XVIII Международный семинар по проблемам механики жидкости, газа и плазмы, посвященный памяти профессора И.П. Гинзбурга – организатора I Всесоюзного семинара по газовым струям в 1957 году.

На последних семинарах, свыше 100 докладов были сделаны представителями научной школы ЛГУ – ЛМИ (БГТУ). Анализ их содержания позволяет судить о развитии направлений газодинамических исследований, рассмотренных в предыдущих главах работы, формировании в ряде случаев научных школ и развитии новых направлений, вызванных требованиями времени.

### **Газодинамика сверхзвуковых струй (см. гл. 3).**

*Осесимметричные струи.* Зональная методика расчета струи разработана П.В. Булатом, О.Н. Засухиным, В.Н. Усковым. Метод конечных элементов получил развитие в работах группы И.Л. Добросердова.

*Встречное взаимодействие струй.* В исследованиях устанавливается подвижность поверхности раздела струй, которая приводит к появлению новых режимов взаимодействия по сравнению с взаимодействием струй с преградой. В результате анализа данных экспериментов выделен ряд характерных автоколебательных и стационарных режимов (В.И. Погорелов, Е.И. Соколов).

*Осесимметричное взаимодействие струи с преградой.* Классификация типов течения, формирующихся при осесимметричном взаимодействии сверхзвуковой струи с преградой, базируется на двух основных понятиях – предельная нерасчетность струи  $n_*$ , и критический диаметр преграды  $D_*$ . На XVIII семинаре приведены результаты их определения с помощью вычислительного эксперимента (Е.И. Соколов).

*Нестационарное взаимодействие струи с преградой.* Численное исследование Е.А. Угрюмова, В.Е. Кузьминой автоколебательных режимов с полостью в экране показали, что появляющиеся при этом динамические и тепловые нагрузки на преграду могут значительно превышать нагрузки в стационарном режиме.

**Газодинамика старта ЛА (см. 4.1).** Для снижения ударно-волнового воздействия при запуске двигателей ракет-носителей разработан способ предварительного распыла воды.

В настоящее время рассматривается задача создания океанского космодрома, в котором двигатели РН запускаются над поверхностью воды. Для уменьшения интенсивности отраженных волн предлагается схема с предварительным распылом воды (Ю.А. Круглов и др.).

Для снижения уровней теплового воздействия на элементы стартового комплекса (СК) при запуске ракет-носителей (РН) разработаны системы внутрискрутного охлаждения. Происходит значительное торможение и охлаждение газа. (В.П. Зюзликов, Б.Е. Синильщиков, М.В. Ракитская).

В настоящее время разработаны методы снижения акустических нагрузок на ОПН посредством распыла в пространстве вокруг РН и струи дисперсной завесы из капель воды (В.П. Зюзликов, Б.Е. Синильщиков и др.).

Одним из направлений совершенствования стартовых комплексов (СК) является уменьшение их габаритных размеров, в том числе уменьшение габаритов газоотражателей (ГО). Уменьшение габаритных размеров ГО позволяет не только уменьшить массу пускового стола (ПС), но и упростить конструкцию установщика (В.П. Зюзликов, Б.Е. Синильщиков).

Результаты многолетней исследовательской работы дают достаточные основания говорить о формировании школы газодинамики старта ЛМИ - БГТУ.

**Газодинамика внутренних течений (см. 4.2).** Продолжение исследований В.Н. Емельяновым (БГТУ), его сотрудниками и учениками, в том числе д.т.н. Бендерским Б.Я. (г. Ижевск) и д.т.н. Спиридоновым Ф.Ф. (г. Бийск) дает основание говорить о формировании научной школы и в этом направлении прикладной газодинамики. Практически была реализована идея моделирования внутренних течений в камере течением холодного воздуха, что позволяет осуществлять имитацию любых современных схем двигателей.

Особенностями математического моделирования внутренних течений является необходимость расчета характеристик потока в диапазоне скоростей от дозвуковых до транс- и сверхзвуковых, учета влияния конденсированной фазы на распределения газодинамических параметров, моделирования эффектов турбулентного теплопереноса и воспроизведения сложной геометрии ограничивающих течение поверхностей.

**Течения газа в пограничном слое, в донной области и в области следа за ЛА (см. 4.3).** Внутренние течения в сопловых насадках, основанных на регулировании расхода, экспериментально исследованы группой М.Г. Моисеева.

В работе М.М. Степанова даны конкретные рекомендации по организации необходимого режима течения в дальнем следе ЛА и управлению параметрами этой области течения, что необходимо для задач радиосвязи.

**Нестационарные течения и ударные волны (см. 4.4).** Нестационарное истечение из сопла рассчитывается с помощью метода структурно-элементного моделирования, разработанного И.Л. Добросердовым, Е.В. Афанасьевым и С.В. Бобышевым. Метод применен и для расчета нестационарной ударной волны за срезом сопла.

**Взаимодействия ударных волн (см. 4.5).** Направление развития В.Н. Усковым и его учениками. Полученные результаты актуальны не только для газоструйных задач, но и для газодинамического проектирования сверхзвуковых воздухозаборников, аппаратов струйных технологий и других технических объектов.

**Аэроакустика (см. 4.7).** В.К. Ерофеев, И.А. Кольцов «Методика расчета и результаты исследований шумоглушащих устройств газовых потоков». Предложена математическая модель процесса, реализация которой позволяет определять основные показатели глушителя на стадии проектирования устройства.

Ерофеев В.К., Григорьев В.В., Котенок В.А. «Методика расчета и результаты математического моделирования аэроакустических процессов в газовых струях». Создана методика расчета аэроакустических характеристик неизотермических газовых струй, позволяющая оценить влияние газодинамических параметров струи на амплитудно-частотные характеристики шума.

В.К. Ерофеев, В.П. Шалимов «Аэроакустический способ интенсификации процессов в кипящих слоях». Рассмотрено применение газоструйного генератора звука в установках кипящего (псевдооживленного) слоя; возможно использование в металлургии, агропроме (патент на метод сушки зерновых культур).

**Вычислительный эксперимент (см. 4.8).** В работах И.А. Белова, С.А. Исаева и др. выполнен численный анализ механизмов интенсификации теплообмена на криволинейных поверхностях ЛА. Показано, что организация вихревых структур существенно повышает теплообмен на поверхности тела и снижает коэффициент силы сопротивления крылового профиля, увеличивая одновременно коэффициент подъемной силы.

Ряд работ (С.А. Исаев и др.) посвящен детальному анализу управления обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам (численное и физическое моделирование).

**Двухфазные течения и струи (см. 4.10).** Исследования динамики газа с твердыми частицами были начаты в 1974 году (Б.А. Баланин).

Для исследования силового и эрозионного воздействия двухфазного потока на обтекаемые тела была создана установка, значительно превосходящая по своим возможностям установки, существовавшие в то время в нашей стране.

Для математического описания течений газозвеси при наличии хаотического движения твердых частиц в работе была предложена четырехкомпонентная модель (С.К. Матвеев).

Исследования эрозионного износа проводились по заказам предприятий авиационной и ракетно-космической промышленности. В 1980-90-е годы новые эффективные методы расчета были разработаны группами Ю.М. Циркунова и В.Н. Емельянова.

**Применение газодинамики в технологиях (см. 4.11).** Продолжались исследования по применению газовых струй в металлургии (работы А.М. Сизова и сотрудников). Расширились области применения газоструйных устройств (С.И. Жигач).

Воробьева Г.А., Иванов А.П., Иванов Д.А., Сизов А.М. «Пульсирующие струи как средство воздействия на структуру и свойства материалов». Исследован метод упрочения материалов, сочетающий традиционную термическую обработку с дополнительным воздействием импульсных низкоскоростных газовых струй (до 50 м/с) одно- и двухфазных.

**Вопросы экологии** рассматривались в ряде докладов и сообщений на последних семинарах.

Коробков Вяч.А. «Экологическое воздействие на морскую среду при надводном старте и пути его снижения». Рассмотрены особенности космодромов океанского базирования с точки зрения снижения нагрузок на среду при запуске ракет-носителей. Рекомендован старт ЛА с системой водных завес для организации зоны растекания струи продуктов сгорания, системы сбора промывных вод, их нейтрализации и сброса.

Гончарко Н.Н., Коробков Вяч.А. «Оценка химических возмущений, вносимых в атмосферу струей ракетного двигателя». Представлены методика и результаты оценки экологических возмущений атмосферы вдоль активного участка траектории ракеты-носителя. Имея данные для компонентов типа *NO*, *OH*, *Cl* и др., можно оценить локальные и глобальные последствия запусков конкретных ракет-носителей (типа «Энергия», «Протон» «Титан-3»).

...

В 1980-90-е годы в ЛМИ – БГТУ продолжались направленные исследования газодинамики старта и газодинамики внутрикамерных процессов, развивалась теория взаимодействия газодинамических разрывов, существенные результаты были получены в области аэроакустики и ее приложений, особое значение приобрели исследования экологических проблем.

Содержание 6 главы показывает преимущество и дальнейшее развитие прикладной газодинамики учеными Ленинграда – Петербурга (1980-90гг.).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прикладная наука развивается в тесной связи с техническим прогрессом. Стремительное развитие ракетно-космической техники в 1950-70-е годы потребовало глубоких и интенсивных исследований в области газовой динамики, поскольку газодинамические процессы сопровождают все этапы движения летательных аппаратов (ЛА) с реактивными двигателями.

- В диссертационном исследовании впервые изложена история развития прикладной газодинамики учеными Ленинграда в 1950–70е годы, показана преемственность исследований в 1980–90-е годы.

- Установлено, что в двух Ленинградских вузах – Государственном университете (ЛГУ) и Военно-механическом институте (ЛВМИ) были созданы центры газодинамических исследований. Их организатором и научным руководителем стал

профессор Исаак Павлович Гинзбург (1910–1979), крупный ученый в области динамики полета ЛА и прикладной гидрогазодинамики, основатель научной школы, подготовившей свыше 120 кандидатов наук, из числа которых 34 стали впоследствии докторами наук.

- Анализ научной деятельности исследовательских центров выявил следующие основные направления прикладной газодинамики, в которых был сделан существенный вклад в эту область научного знания.

- **Газодинамика сверхзвуковых нерасчетных струй.** Детальный исторический обзор работ до 1950-х годов выполнили Б.Н. Собколов и Г.А. Акимов. Ключевое теоретическое исследование провел В.Г. Дулов – впервые разработан аналитический метод расчета ударно-волнового участка сверхзвуковой газовой струи (1959). Дальнейшие исследования, основанные на этой работе, выполнили: А.Л. Исаков, А.М. Сизов, В.Д. Приходько – составные струи; Б.Н. Собколов – струи с внешним потоком; О.С. Зеленков, В.И. Погорелов, Е.И. Соколов – встречные струи.

- **Взаимодействие струй с преградами (элементами ЛА).** Первое подробное исследование провел Г.А. Акимов (1962) – анализ ударно-волновой структуры и оценка силового взаимодействия струи с преградой. Дальнейшие исследования были выполнены Б.Н. Собколовым, Н.И. Спириным (сферические отражатели); Н.Н. Соколовым, В.Н. Усковым (наклонная плоскость); В.И. Погореловым, В.Н. Усковым, Б.Г. Семилетенко (плоскость, перпендикулярная струе).

**Впервые обнаружен автоколебательный режим взаимодействия с преградой (1961г., А.Л. Исаков, Б.Н. Собколов, Г.А. Акимов).** Явление изучалось многими исследователями: эксперименты – Б.Н. Собколов, В.Н. Усков, Б.Г. Семилетенко; численные решения – Е.Н. Цымбалова, В.В. Цымбалов, В.Е. Кузьмина; анализ механизма автоколебаний – Б.Н. Собколов, Е.И. Соколов, В.Г. Дулов. Детальное исследование при натекании струи на преграду с полостью – В.Г. Дулов, В.Е. Кузьмина, Е.А. Угрюмов (с 1970 года). Открыто явление «аномального» нагрева при втекании струи в глухую трубу (1980).

- **Газодинамика донных течений.** Основное теоретическое исследование течения в донной области ЛА выполнено Ю.П. Савельевым (1966). Экспериментальные исследования проведены Г.С. Дедовым и Т.Г. Опариной (1963), А.М. Сизовым (1970). Основное экспериментальное и теоретическое исследование взаимодействия составной струи с отражателем – Ю.М. Рудов (1969).

**Создана научная школа газодинамики сверхзвуковых струй.**

- **Гидрогазодинамика и газодинамика старта ЛА.** Первый цикл исследований – работы В.М. Супруна (1962), М.Г. Моисеева (1963), В.И. Михайлова (1968). Исследования конкретных схем шахтного старта – В.А. Зазимко (1963), Вал.А. Коробков (1966), И.А. Белов (1967) и другие. Обобщающее исследование газодинамики первых схем старта выполнил Г.Т. Алдошин (1971). В последующие годы новые методы расчета стартовых систем были разработаны в ЛМИ (БГТУ) группами И.Л. Добросердова, Б.Е. Синильщикова, В.П. Зюзликова.

**В ЛМИ – БГТУ создана научная школа газодинамики шахтного старта ЛА.**

- **Газодинамика внутренних течений.** Первое теоретическое исследование внутрикамерных течений в РДТТ выполнил Б.А. Райзберг (1964), продолжение – работы К.П. Самсонова (1966) и В.М. Соболева (1969). Наиболее полное исследование было проведено В.Н. Емельяновым и его учениками Б.Я. Бендерским, И.П. Кректуновой, В.А. Анисимовым, Ф.Ф. Спиридоновым и другими. Впервые созданы стенды для моделирования течений в камерах РДТТ холодным воздухом. Разработана теория газодинамики внутрикамерных течений.

- **Создана научная школа газодинамики РДТТ.**

07

Внутрисопловые течения исследованы группой М.Г. Моисеева (с 1960-х гг.) – измерения расходно-тяговых характеристик сопел различных типов в широком диапазоне параметров на высокоточном стенде оригинальной конструкции.

- **Теория пограничного слоя.** Существенным вкладом в теорию пограничного слоя являются работы И.П. Гинзбурга, выполненные в 1950–60-е годы. Их продолжение и развитие – исследования его учеников С.К. Матвеева, Г.В. Кочерыженкова, Л.И. Скурина и других, в которых учитывалось влияние на течение химических реакций, лучеиспускания, магнитных свойств среды.

Основные работы по изучению следа за обтекаемым телом (ЛА) были выполнены Ю.П. Савельевым и Л.И. Скуриным (1970), позднее – М.М. Степановым (1980).

- **Турбулентные сверхзвуковые струи. Аэроакустика.** Основное теоретическое исследование было проведено В.А. Зазимко (1970-е годы). Была разработана новая модель турбулентного переноса для расчета средних параметров широкого класса струй. Практическую проверку модели (численный эксперимент) провел А.В. Клочков. В области акустики струйных течений базовое теоретическое исследование было выполнено В.К. Ерофеевым – впервые разработан метод расчета акустического поля струи. Эксперименты были проведены его учениками: В.В. Григорьевым (1970-е годы), А.В. Савиным и В.П. Шалимовым (1980-е годы). Разработаны новые конструктивные схемы излучателей звука.

- **Газодинамика нестационарных процессов.** а) Метод формирования ударных волн при запуске двигателя. Основное теоретическое исследование было проведено А.К. Полубояриновым (1963), частные случаи рассмотрены его учениками Ю.М. Циркуновым, А.И. Котовым (1970–80-е годы). Эксперименты в ударной трубе были проведены Ю.С. Марковым и А.И. Цветковым. б) Взаимодействие нестационарных ударных волн с поверхностями теоретически исследовано Е.Ф. Жигалко (1980-е годы).

- **Теория взаимодействия ударных волн.** В 1970–80-е годы теория разработана В.Н. Усковым и в последующие годы его учениками (А.Л. Адрианов, А.Л. Старых и др.). Прикладное значение теории – управление сверхзвуковыми течениями с ударными волнами.

- **Сверхзвуковые струи плазмы.** Ключевые исследования и обобщения выполнены Г.А. Лукьяновым (1974). Струи разреженного газа и низкотемпературной плазмы экспериментально исследованы его учениками (В.В. Сахин, С.И. Иголкин и др.). Создано направление – прикладная плазмодинамика струйных течений.

- **Двухфазные струи и течения.** Первые исследования уравнений движения двухфазной смеси провели Т.Н. Рябинина, Л.И. Шуб и Вяч.А. Коробков (1974). Основные исследования: а) влияние частиц на износ поверхности ЛА (эксперименты Б.А. Баланина и В.А. Лашкова (1980), теоретическое решение С.К. Матвеева (1982)); б) применение статистических методов определения динамики примесей в струе (К.Н. Волков, В.Н. Емельянов (1980)); в) разработка новой модели взаимодействия частиц примеси с поверхностью (работы группы Ю.М. Циркунова с 1980-х гг.).

**Управление аэродинамическими характеристиками обтекаемых тел.** Ключевое исследование было завершено И.А. Беловым в 1976 г. Им были впервые разработаны оригинальные методы организации отрывных течений на обтекаемых поверхностях для снижения сопротивления и увеличения устойчивости ЛА. Исследования были продолжены его учениками (С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев и др.).

**Газовые струи в технологических процессах.** а) Интенсификация металлургических процессов. Основные исследования выполнены А.М. Сизовым (1970-е годы) и продолжены его сотрудниками А.П. Ивановым и Г.А. Воробьевой. Внедрение предложенных методов дало существенный экономический эффект. б) Применение газовых струй в порошковой металлургии (исследование и внедрение изобретений

– А.М. Сизов), позволившее значительно повысить качество покрытий.  
в) Дробление пород газовыми струями (изобретение В.В. Цымбалова, 1974 г.).

– Установлена преемственность исследований (1980–90-х гг.) в основных научных направлениях.

Газодинамика сверхзвуковых струйных течений. Созданы новые расчетные методы для реализации на ЭВМ, учитывающие физические свойства газовой среды (вязкость, химические реакции, турбулентность) – группы И.Л. Добросердова, В.Н. Ускова, В.И. Погорелова, Е.И. Соколова.

Газодинамика старта ЛА. Разработаны и внедрены новые методы газодинамического расчета современных конструктивных схем шахтного старта (под руководством Ю.А. Круглова); группа – И.Л. Добросердов, Е.В. Афанасьев, С.В. Бобышев.

Газодинамика внутрикамерных течений. Сформированы пакеты прикладных программ для расчета широкого класса задач газодинамики современных РДТТ (В.Н. Емельянов).

Теория взаимодействия ударных волн. Созданы новые методы анализа и расчета течений с ударными волнами (В.Н. Усков и сотрудники).

Применение газодинамики в технологических процессах. Изобретены новые способы подачи газовых струй в расплав (А.М. Сизов). Разработаны и испытаны новые типы газоструйных аппаратов (С.И. Жигач). Разработаны конструктивные схемы излучателей звука (В.К. Ерофеев).

Проблемы экологии и газодинамические процессы. Проведены исследования по снижению химической загрязненности воздуха и морской среды при старте ЛА (Вяч.А. Коробков).

#### **Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях**

1. Акимов Г.А. Методы расчета сверхзвуковых струй и их взаимодействия с преградами (обзор) // Прикладные проблемы механики жидкости и газа: Материалы 7-й научной конференции ученых России, Украины, Белоруссии. Севастополь, изд-во СГТУ, 1998. С. 11,12.

2. Акимов Г.А., Казанцева О.В. Исследование взаимодействия струи с преградой (обзор работ БГТУ) // Прикладные проблемы механики жидкости и газа: Материалы 8-й научной конференции ученых России, Украины, Белоруссии. Севастополь, изд-во СГТУ, 1999. С. 56,57.

3. Акимов Г.А. И.П. Гинзбург – основатель научной школы // Тезисы пленарного доклада. Течения газа и плазмы в соплах струях и следах: Материалы XVIII международного семинара. СПб., изд-во БГТУ, 2000. С. 13,14.

4. Акимов Г.А. Развитие газодинамики струйных течений в БГТУ «Военмех» // Тезисы пленарного доклада. Течения газа и плазмы в соплах струях и следах: Материалы XVIII международного семинара. СПб., изд-во БГТУ, 2000. С. 15,16.

5. Акимов Г.А. История развития газодинамики струйных течений в Балтийском техническом университете // Тезисы доклада. XXXV научные чтения, посвященные разработке научного наследия К.Э. Циолковского: Москва, ИИЕТ РАН, 2000. С. 34,35.

6. Акимов Г.А., Казанцева О.В., Озерова О.А. Сверхзвуковые газовые струи (обзор исследований 90-х гг.): Материалы IX международной конференции ученых России, Украины, Белоруссии. Севастополь, изд-во СГТУ, 1999. С. 65–67.

7. Акимов Г.А. Исследования по газодинамике струйных и внутренних течений в БГТУ: Материалы IX научной конференции ученых России, Украины, Белоруссии. Севастополь, изд-во СГТУ, 1999. С. 68.

8. Акимов Г.А. Школа профессора И.П. Гинзбурга в области газодинамики струйных и внутренних течений // Статья «Учебный процесс и исследования в области разработки военно-технических систем»: Сб. научных трудов. СПб., изд-во БГТУ, 2001. С. 5–11.

9. Акимов Г.А. Развитие кафедры аэрогазодинамики и динамики // Статья «Учебный процесс и исследования в области разработки военно-технических систем». Сб. научных трудов. СПб., изд-во БГТУ, 2001. С. 12–16.

10. Акимов Г.А., Санников В.А. Развитие школы газодинамических исследований // Прикладные проблемы механики жидкости и газа: Материалы X-й научной конференции ученых России, Украины, Белоруссии. Севастополь, изд-во СГТУ, 2001. С. 8–11.

11. Акимов Г.А. Школа газодинамических исследований // Статья.- Сб. статей «Современные проблемы неравновесной газо- и термодинамики» под ред. В.Н. Ускова. СПб.: БГТУ, 2002. С. 21–31.

12. Акимов Г.А. Начало творческой биографии И.П. Гинзбурга (1930-е годы) // Статья. - Сборник статей «Современные проблемы неравновесной газо- и термодинамики» под ред. В.Н. Ускова. СПб.: БГТУ, 2002. С. 32–42.

13. Акимов Г.А. Развитие теоретической и прикладной газодинамики школой профессора И.П. Гинзбурга // Монография: СПб., изд-во БГТУ, 2002. (25 печ. листов).

14. Акимов Г.А. Развитие газодинамических исследований школой профессора И.П. Гинзбурга // Статья. - Сб. трудов Международной конференции «3-и Окуневские чтения». СПб.: БГТУ, 2003. С. 174–180.

15. Акимов Г.А., Санников В.А. Кафедра «Аэродинамики и динамики полета БГТУ» (1949-88) // Статья. - Сборник трудов Международной конференции «3-и Окуневские чтения». СПб.: БГТУ, 2003. С. 180–185.

16. Акимов Г.А. Об истории развития газодинамики и вкладе в нее ученых Балтийского технического университета // Тезисы доклада. XXXVIII научные чтения, посвященные разработке научного наследия К.Э. Циолковского: Калуга, 2003. С. 47,48.

17. Акимов Г.А. Исследования газодинамики сверхзвуковых струйных течений в ЛМИ и ЛГУ (1950-70-е годы) // Журнал «История науки и техники». 2003. №9. С. 35–46.

18. Акимов Г.А. Исследование по аэрогазодинамике в БГТУ (обзор) //Статья. - Сборник статей «1-е Рдултовские чтения» СПб.: изд-во БГТУ, 2003. С. 84–90.

19. Акимов Г.А. Развитие газодинамики сверхзвуковых струйных течений // Журнал «Вестник молодых ученых». 2003. №3. С. 3–21.

20. Акимов Г.А. Научная деятельность профессора И.П. Гинзбурга в области прикладной механики // Материалы 12-й научной конференции ученых России, Украины, Белоруссии. Севастополь, изд-во СГТУ, 2003. С. 19-20

21. Акимов Г.А. Газодинамика взаимодействия сверхзвуковых струй с поверхностями (работы БГТУ 1960-80-е годы) // Материалы 12-й научной конференции ученых России, Украины, Белоруссии. Севастополь, изд-во СГТУ, 2003. С. 12-13.

22. Акимов Г.А., Собколов Б.Н., Соколов Е.И. История газодинамики сверхзвуковых течений // «Санкт-Петербург и мировая наука»: Материалы 14-й научной конференции Санкт-Петербургского Российского национального комитета по истории и философии. Сб. «Наука и техника». (23–27июня 2003 г.) СПб., 2003. С. 110–114.

23. Акимов Г.А. Развитие газодинамических исследований школой профессора И.П. Гинзбурга // «Санкт-Петербург и мировая наука»: Материалы 14-й научной конференции Санкт-Петербургского Российского национального комитета по

истории и философии. Сб. «Наука и техника». (23–27июня 2003 г.) СПб., 2003. С. 241–245.

24. Акимов Г.А. Развитие газодинамических исследований школой профессора И.П. Гинзбурга // Механика: Вестник Санкт-Петербургского университета. 2004. Сер.1. Вып.2. (№8). С. 71–74.

Статьи по общим вопросам газовой динамики:

25. Гинзбург И.П., Собколов Б.Н., Акимов Г.А. Об определении параметров течения в струе идеального газа // Газодинамика и теплообмен: Сб. ст. / ЛГУ. 1970. Вып. 2. С. 38–55.

26. Гинзбург И.П., Акимов Г.А. О взаимодействии сверхзвуковой нерасчетной струи с плоской преградой // Гидроаэромеханика и теория упругости: Межвуз. сб. / Днепропетровск, изд-во ДГУ. 1973. С.3–11.

27. Акимов Г.А. Определение силы, действующей на сферическую преграду в недорасширенной струе // Инж.-физ. журнал. Минск. Т. XXXV. №4. 1978. С.668–671.

28. Акимов Г.А., Собколов Б.Н. О протяженности дозвуковой области в сверхзвуковой недорасширенной струе // Инж.-физ. журнал. Минск. Т. XXXVIII. №1. 1980. 0,5 п.л..

29. Акимов Г.А. Об отходе скачка уплотнения при взаимодействии недорасширенной струи со сферической преградой // Газодинамика и теплообмен: Сб. ст. / ЛГУ. 1981. Вып. 6. С.105–109.

30. Акимов Г.А. Особенности взаимодействия сверхзвуковой нерасчетной струи с преградой конечных размеров // Инж.-физ. журнал. Минск. Т. XLVI. №3. 1984. С.375–380.

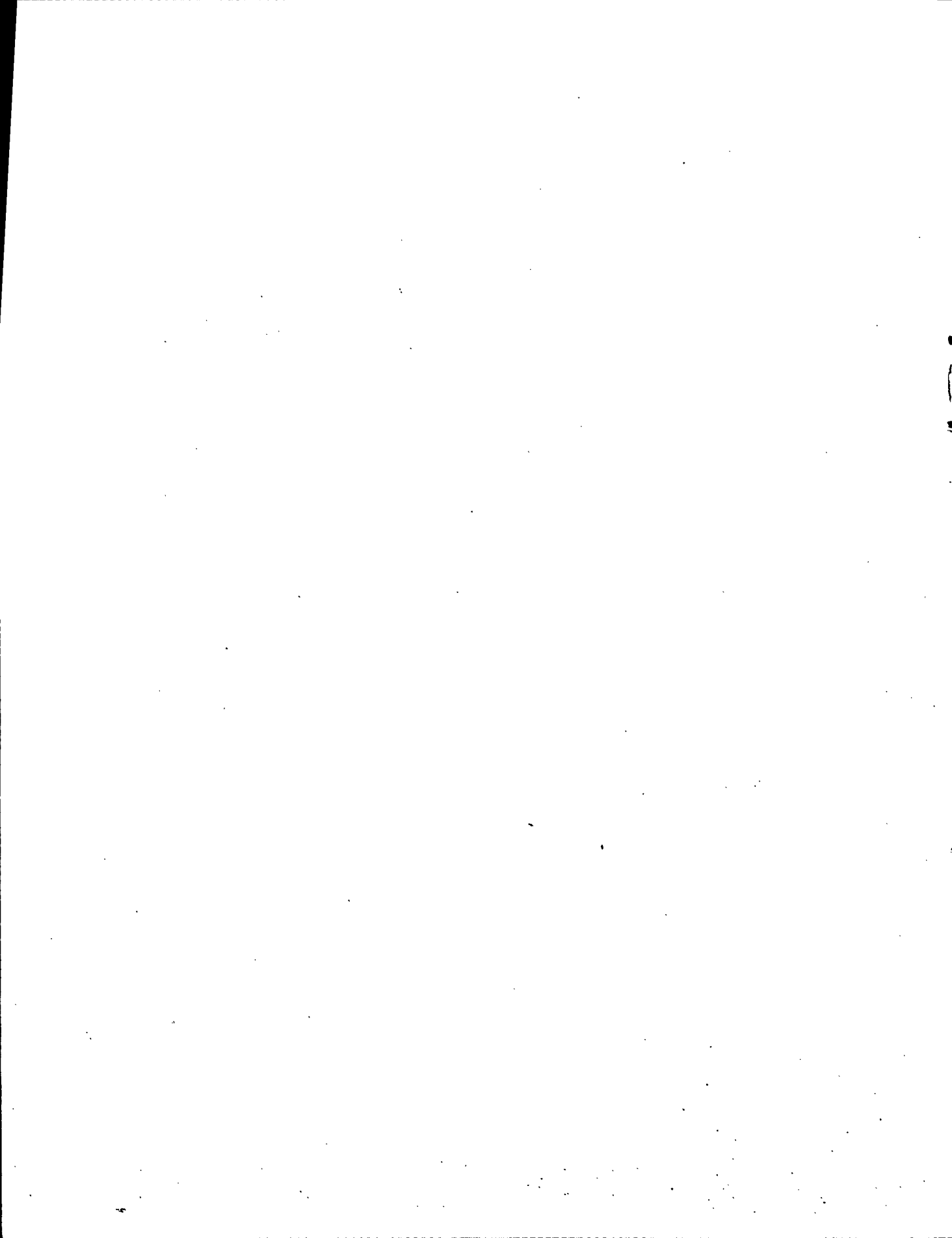
31. Акимов Г.А., Собколов Б.Н. О расчете начального участка сверхзвуковой недорасширенной струи, вытекающей в спутный сверхзвуковой поток // Межвуз. сб. / Л., изд-во ЛИАП. 1984. Вып. 173. С.66–71.

32. О взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с наклонной плоской преградой // Газодинамика и теплообмен: Сб. ст. / ЛГУ. 1987. Вып. 9. С.31–37.

По специальным вопросам газодинамики опубликованы 23 статьи в сборниках трудов Ленинградского механического института.



Подписано к печати 15.12.2005. Объем 2 п.л. Бумага документная. Печать трафаретная.  
Тираж 100 экз. Заказ N 264.  
Типография БГТУ  
190005, С-Петербург, 1-я Красноармейская, 1



1



2



