

## **Экспериментальные газодинамические исследования на кафедре**

### **гидроаэродинамики СПб ГПУ**

Григорьев В.В., Исаков С.Н., Петров Р.Л., Смирнов Г.В.

#### **1. Становление газодинамического эксперимента на кафедре**

Началом газодинамических экспериментальных исследований на кафедре гидроаэродинамики можно считать создание первой ударной трубы рабочим сечением  $0,3 \times 0,07 \text{ м}^2$  в 50-х годах прошлого века. То было время интенсивного развития ракетно-космической техники, возникновения новых научных направлений, в частности, физической газовой динамики, изучающей течения газа с большими скоростями и высокими температурами. Ударная труба стала весьма удачным инструментом для исследования широкого класса задач аэродинамики и физической газодинамики. В условиях вуза весьма ценными оказались такие качества ударной трубы, как малое потребление энергии, простота в эксплуатации, невысокая стоимость, удобство использования в качестве учебной установки. Быстротечность газодинамических процессов в установке, затрудняющая наблюдение процессов и выполнение измерений, компенсировалась применением малоинерционных датчиков, бесконтактных средств измерения с применением оптических приборов (теневых, интерференционных) и использованием радиотехнических средств регистрации и обработки экспериментальных данных.

Газодинамический расчет ударной трубы и первые исследования на установке были выполнены во второй половине 50-х годов силами студентов под руководством д.ф.-м.н., профессора Л. Г. Степанянца. Результаты исследований оформлялись как дипломные работы.

Газодинамические экспериментальные исследования на кафедре, возглавлявшейся д.ф.-м.н., профессором Л. Г. Лойцянским, с самого начала развивались во взаимодействии и при постоянной помощи сотрудников лаборатории № 5 ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР, руководимой в то время д.ф.-м.н. Ю. А. Дунаевым. Весьма существенным было и то обстоятельство,

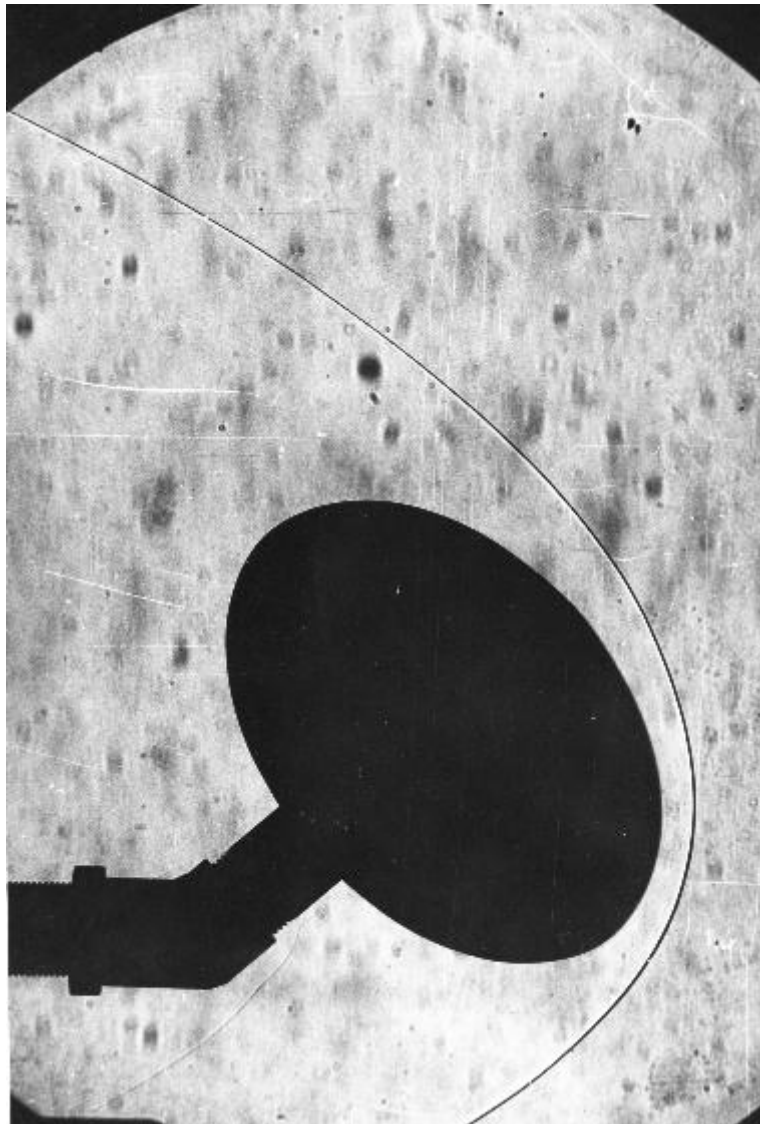
что по инициативе Л. Г. Лойцянского к работе на кафедре был привлечен как совместитель сотрудник ФТИ д.ф.-м.н., профессор Ю. П. Лунькин, возглавлявший там расчетно-теоретическую группу и привлекший сотрудников кафедры к исследованиям по физической газовой динамике.

## 2. Гиперзвуковая ударная труба

В начале 60-х годов было решено создать на кафедре аэродинамическую ударную трубу с соплом Лаваля для моделирования движения тел с большой сверхзвуковой скоростью, соответствующей числу  $M \approx 10$ . Ударная труба позволяла подогреть воздух с помощью ударных волн и предотвращать его конденсацию вследствие значительного охлаждения при сопловом ускорении. Заказы на изготовление основных элементов и узлов установки удалось разместить на заводе «Арсенал» имени Н. В. Фрунзе и на Балтийском судостроительном заводе. В создании установки приняли участие все основные инженерные службы института (отдел главного механика, отдел капитального строительства, отдел главного энергетика и т.д.). Постоянное внимание созданию установки и исследованиям на ней уделял Л. Г. Лойцянский, для ускорения создания установки принявший ряд молодых сотрудников на работу в лабораторию кафедры.

Пробные эксперименты на установке были выполнены в 1967 году. Описание особенностей конструкции, систем измерений, а также результаты исследования газодинамических характеристик установки, геометрические характеристики картин обтекания затупленных тел (сферы, эллипсоида вращения) и результаты исследования отрывных течений на конусе подытожены в работе [1]. Там же приведены результаты исследования режима «сшитой» контактной поверхности, позволяющей увеличить рабочее время установки. Пример теневой картины обтекания эллипсоида вращения с отношением осей, равным 1,5, под углом атаки  $\alpha = 40^\circ$  потоком воздуха с числом  $M = 9$  приведен на рис. 1. На установке велись эксперименты по выявлению особенностей разделения тел в потоках с большой сверхзвуковой скоростью [2]. В дальнейшем установка была модернизирована, оснащена

Проблемы турбулентности и вычислительная гидродинамика (к 70-летию кафедры «Гидроаэродинамика») вторым, клиновидным соплом, электромагнитом, позволяющим исследовать МГД эффекты в сверхзвуковых потоках неравновесной плазмы инертных газов [3]. Исследования сверхзвуковых МГД течений не потеряли актуальность и в настоящее время.



*Рис.1. Теневая картина обтекания эллипсоида вращения с соотношением осей, равным 1.5, под углом атаки  $40^\circ$  потоком воздуха с числом  $M = 9$*

Опыт, приобретенный в процессе исследований на ударных трубах, оказался полезным при анализе работы систем воздуха высокого давления, применявшихся, в частности, на подводных лодках [4].

### **3. Исследование воздействия ударной волны на элементы конструкций**

Одновременно с созданием аэродинамической ударной трубы велась интенсивная работа по совершенствованию техники эксперимента на ударной трубе прямоугольного сечения применительно к воздействию ударной волны

на сооружения, элементы конструкций, в частности, на элементы радиолокационных антенн. Эта задача, связанная с проблемой увеличения живучести сооружений, различных устройств в условиях применения атомного оружия, была весьма актуальной. При воздействии ударной волны на тело возникает весьма сложное нестационарное течение, приводящее к резкому увеличению силовых нагрузок, по сравнению со случаем установившегося обтекания тела спутным потоком, движущимся за ударной волной. Такие исследования можно было вести на ударной трубе, имеющей сечение  $0,3 \times 0,07 \text{ м}^2$  и оснащенной интерферометром. Необходимо было получать высококачественные серии интерферограмм при фиксированной скорости ударной волны, позволяющие исследовать нестационарный процесс взаимодействия ударной волны с моделью. Расшифровка интерферограмм давала распределение плотности на поверхности тела. Пересчитывая тем или иным способом распределение давления, находили суммарную силу воздействия потока на тело как функцию времени.

Вначале исследовали наиболее простой случай слабых ударных волн, когда скорость  $U_1$  ударной волны незначительно превышала скорость звука  $a_1$  в покоящемся газе ( $M_1 = U_1 / a_1 = 1,1 — 1,2$ ). В этом случае возмущенное течение можно было считать изоэнтропическим и для определения давления использовать уравнение адиабаты.

Получение серий интерферограмм или теневых снимков при постоянной скорости ударной волны в традиционной технике эксперимента с применением диафрагм оказалось крайне затруднительным из-за разброса в давлении разрыва диафрагм. Возникла крайняя необходимость замены диафрагмы устройством, позволяющим при строго фиксированном отношении высокого давления в камере к низкому давлению в канале ударной трубы достаточно быстро, за время, сравнимое с временем раскрытия диафрагмы, соединить камеру с каналом. Такое устройство, названное быстродействующим клапаном [5], было разработано, изготовлено и применено на ударных трубах, что позволило существенно расширить возможности ударных труб в

исследовании различного рода нестационарных процессов, в частности, процессов взаимодействия ударных волн с телами.

Наиболее полно результаты исследования взаимодействия слабых ударных волн с телами различной формы приведены в работах [6],[7]. Там же дано описание установки, систем измерений, пояснены принцип действия и конструкция быстродействующего клапана. В этих работах приведены кривые распределения избыточного давления на поверхности цилиндрических тел прямоугольного, квадратного и круглого сечения с образующей, параллельной плоскости ударной волны, в начальной фазе нестационарного взаимодействия ударной волны с моделью. Варьировали отношение сторон в прямоугольном сечении, ориентацию граней относительно ударной волны и расстояние между моделью и нижней стенкой, имитирующей, в частности, земную поверхность. Приведены результаты для 16 вариантов расположения моделей относительно ударной волны и нижней стенки. Для большинства вариантов даны безразмерные нагрузочные коэффициенты как функции безразмерного времени.

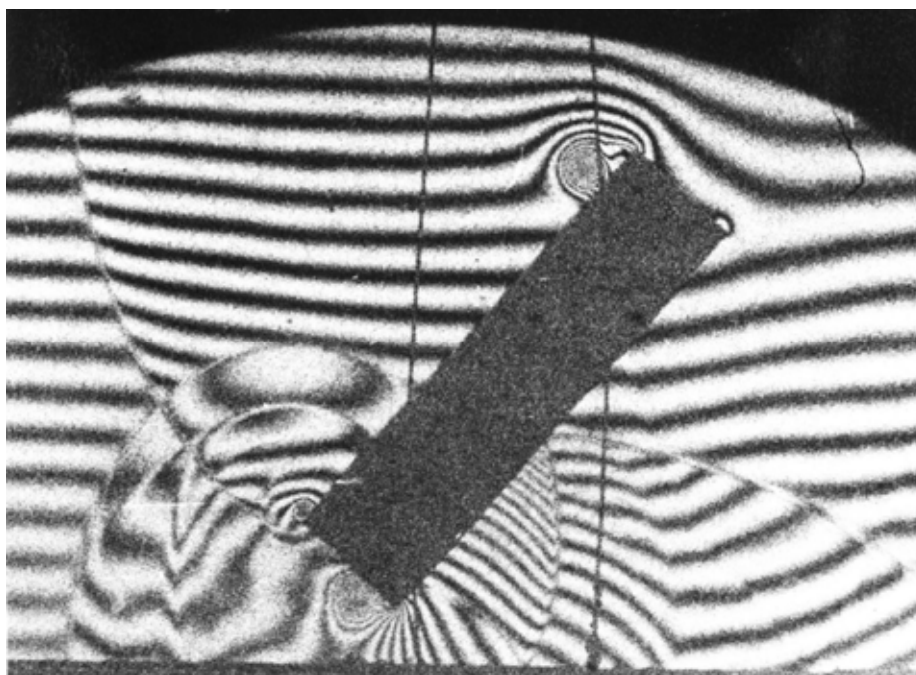
Пример интерферограммы для одной из моделей при  $M_1=1,13$  и  $\tau = U_1 t / b = 1,25$  приведен на рис. 2. Здесь  $U_1$  – скорость ударной волны,  $t$  – время взаимодействия,  $b = 0,04$  м – большая сторона прямоугольника.

Исследован также осесимметричный случай взаимодействия слабой ударной волны с круговым цилиндром, имеющим плоский торец.

Кроме быстродействующего клапана, в экспериментах на ударной трубе было использовано еще одно техническое новшество, связанное с методикой получения слабых и умеренно сильных ударных волн в канале ударной трубы со значительной площадью поперечного сечения. Обычно для этой цели используют ударную трубу с камерой высокого давления, имеющей поперечное сечение гораздо меньшее, чем сечение канала низкого давления. Для согласования камеры и канала приходится применять диффузор значительной длины, иначе возникают заметные неоднородности в спутном потоке за ударной волной. Было предложено заменить протяженный диффузор

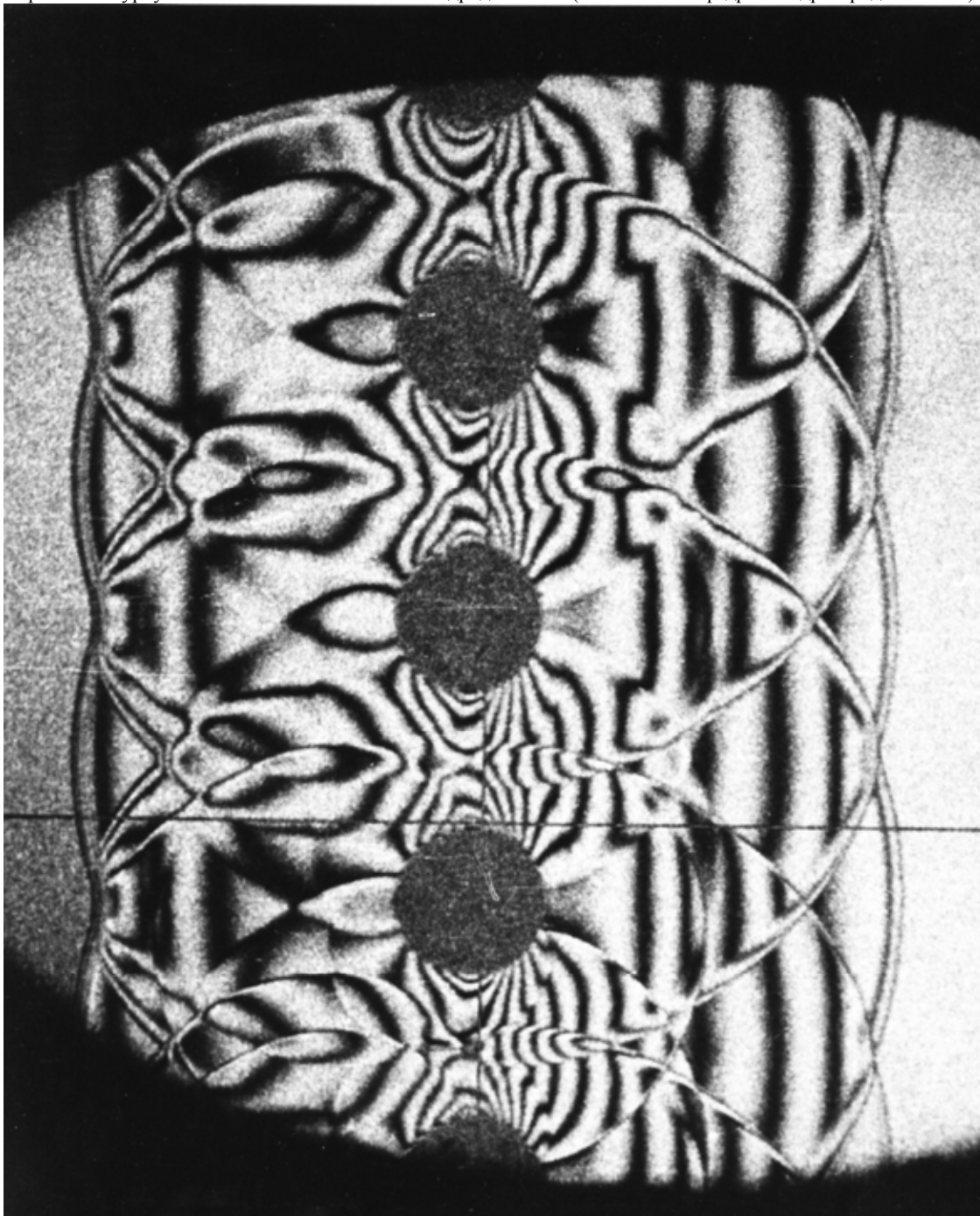
очень коротким, а за ним установить поперек оси канала пластину с большим количеством отверстий. Подбирая форму обвода криволинейной части короткого диффузора, количество и распределение отверстий в пластине, оказалось возможным получить спутный поток за ударной волной с высокой степенью однородности при минимальной длине установки [7].

В дальнейшем диапазон чисел  $M_1$  ударной волны был расширен до значений  $M_1 \leq 2,5$ . Был предложен простой и весьма эффективный приближенный метод расчета давления на поверхности тел по известным из обработки интерферограмм значениям плотности в неизоэнтропических течениях. Наибольшее внимание уделялось при этом определению динамического воздействия ударной волны на одиночный цилиндр и решетку цилиндров. Итоги таких исследований приведены в работе [8].



*Рис.2. Интерферограмма течения при взаимодействии слабой ударной волны с параллелепипедом. Число Маха ударной волны  $M_1=1.13$ ; безразмерное время  $\tau = 1.25$ ;  $b = 0.04$  м – большая сторона прямоугольника*

На рис. 3 приведена интерферограмма течения (линии равной плотности) при взаимодействии слабой ударной волны ( $M_1 = 1,14$ ) с решеткой цилиндров. Диаметр цилиндра  $d = 10$  мм, шаг решетки  $l = 20$  мм, безразмерное время взаимодействия  $\tau = U_1 t / d = 3,3$ .



*Рис.3. Интерферограмма течения при взаимодействии слабой ударной волны с решеткой цилиндров (линии равной плотности). Число Маха ударной волны  $M_1=1.14$ ; безразмерное время  $\tau = 3.3$ ; диаметр цилиндра  $d = 0.01$  м; относительный шаг решетки равен 2*

На рис. 4 показано большое влияние соседних цилиндров в решетке на нагрузочную кривую  $F(\tau)$  для центрального цилиндра в сопоставлении с данными для одиночного цилиндра. Число  $M_1=1,81$ , диаметр цилиндра в решетке  $d = 20$  мм, шаг решетки  $l = 30$  мм,  $F = F_x / [(P_5 - P_2) d]$ ,  $F_x$  – проекция вектора силы, действующей на цилиндр единичной длины в направлении

Проблемы турбулентности и вычислительная гидродинамика (к 70-летию кафедры «Гидроаэродинамика») движения ударной волны,  $P_2$  – давление за падающей ударной волной,  $P_5$  – давление за отраженной от плоской стенки ударной волной.

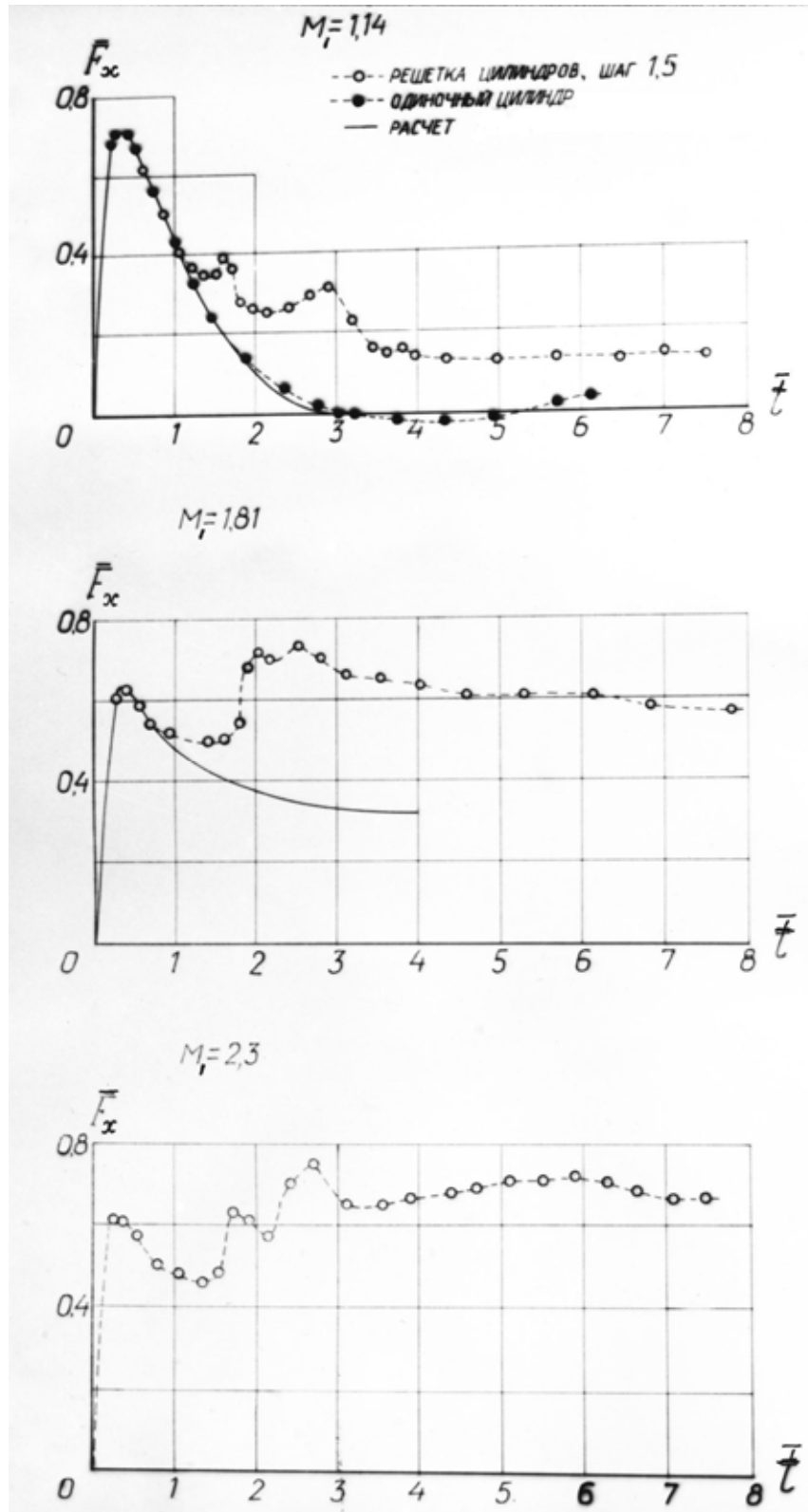


Рис.4. Нагрузочные кривые для цилиндра в решетке цилиндров при взаимодействии с ударной волной в сопоставлении со случаем одиночного цилиндра. Безразмерная сила сопротивления  $\bar{F}_x = F_x / (P_5 - P_2) \cdot d$ ,  $P_5 - P_2$  - перепад давлений на ударной волне, отраженной от плоской



$$\bar{t} = U_1 \cdot t / d$$

Данные о распределении плотности по поверхности одиночного цилиндра и цилиндра в решетке, приведенные в [8], можно считать каноническими.

В исследовании влияния диффузоров на течение в ударной трубе, а также в исследовании взаимодействия ударной волны с цилиндром и решеткой цилиндров активное участие принимал Б. А. Куклин.

#### **4. Исследования процессов в газодинамических и химических лазерах**

К концу 70-х годов тематика экспериментальных газодинамических исследований расширилась. Сотрудники кафедры приняли участие в исследовании газодинамических и химических лазеров. Весьма продуктивным оказалось объединение усилий сотрудников кафедры, ведущих как теоретические, так и экспериментальные исследования, и сотрудников ГИПХ, преимущественно выпускников кафедры. Теоретическими исследованиями руководил зав. кафедрой, д.ф.-м.н, профессор Ю. В. Лапин, ответственным исполнителем теоретических разделов комплексных расчетно-экспериментальных работ был к.ф.-м.н., доцент В. А. Поспелов, много сделавший и для автоматизации обработки экспериментальных данных. Взаимно полезным было сотрудничество экспериментаторов кафедры со специалистами НИИЭФА им. Ефремова, с ИРЭ АН СССР, НПО «Астрофизика», ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР, ИВТ АН СССР. Особенно плодотворной была совместная работа с В. Г. Тестовым (ИРЭ АН СССР) и Ю. И. Гринем (НПО «Астрофизика»).

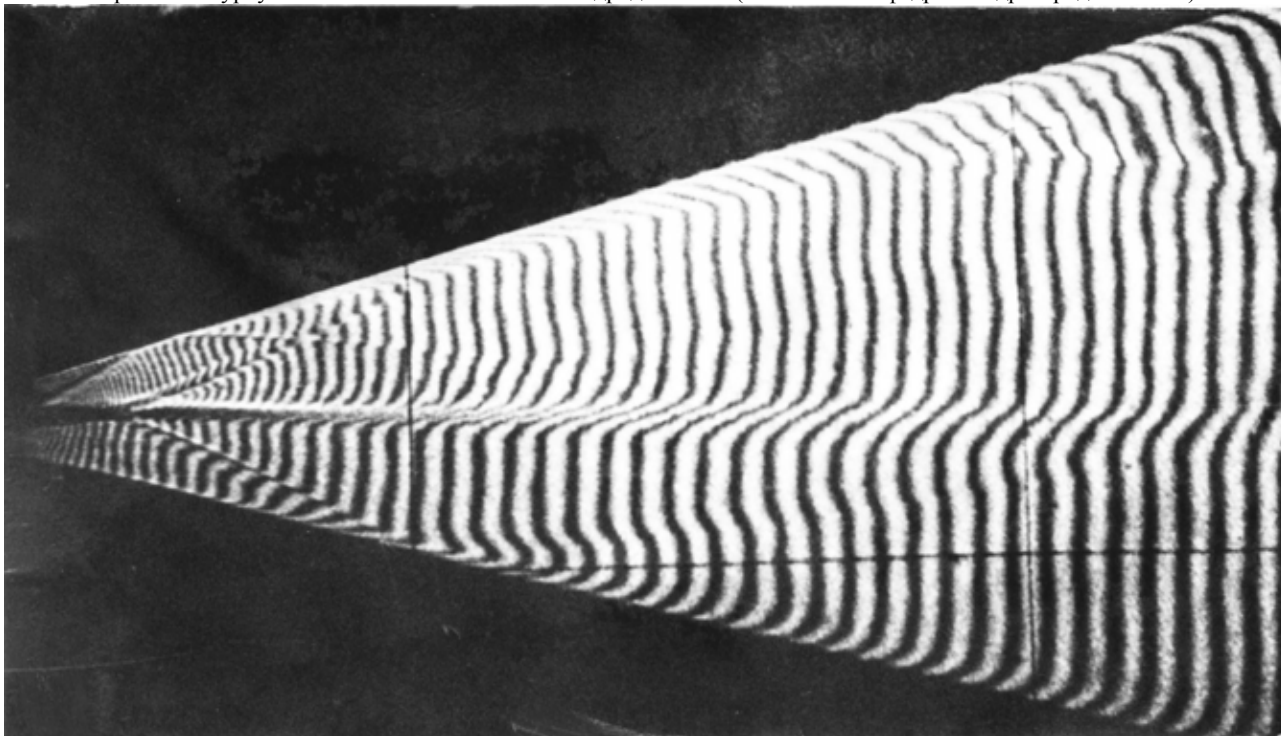
На ударной трубе, оснащенной интерферометром, были выполнены исследования, имеющие прямое отношение к функционированию импульсных газодинамических лазеров [9],[10]. С учетом опыта экспериментальных исследований на ударных трубах были изготовлены для ИРЭ системы измерения скорости ударной волны и нестационарного давления и в режиме

”сшитой” контактной поверхности выполнены эксперименты с регистрацией усиления лазерного излучения [11].

Проблема создания мощных химических лазеров потребовала детального исследования процессов смешения сверхзвуковых струй химически реагирующих газов, истекающих из сопловых блоков сложной геометрии. Экспериментальные исследования на кафедре в связи с этой проблемой развивались по двум направлениям. Во-первых, было решено создать импульсный газодинамический стенд для исследования газодинамических характеристик слоёв смешения сверхзвуковых струй химически не реагирующих газов. Во-вторых, приступили к разработке интерферометра высокой чувствительности для измерений в химически реагирующих потоках легких газов низкой оптической плотности.

Импульсный стенд включал синхронно запускающиеся благодаря применению электроуправляемых быстродействующих клапанов ударную трубу и трубу Людвига, был оснащен интерферометром Маха-Цендера марки ИТ-14 с полем зрения 0,23 м и необходимыми для работы системами измерения.

Стенд позволял исследовать как нестационарные, так и установившиеся взаимодействующие сверхзвуковые струи [12]. Экспериментальные данные, полученные на основе обработки интерферограмм, давали возможность рационально выбирать расчетные методики, особенно в слоях смешения [14]. Пример интерферограммы установившегося течения двух сверхзвуковых взаимодействующих струй с различными температурами торможения приведен на рис. 5.



*Рис. 5. Интерферограмма установившегося течения двух взаимодействующих сверхзвуковых струй с различными температурами торможения, истекающих из клиновидных сопел Лавалья. Верхнее сопло: число  $M$  потока на выходе  $M_a = 3.28$ ;  $T_o = 290\text{K}$ ; нижнее сопло:  $M_a = 3.46$ ;  $T_o = 580\text{K}$*

Был разработан, изготовлен и испытан на стенде кафедры многоходовой интерферометр последовательного типа, позволяющий многократно увеличить чувствительность оптической системы [13].

Применение высокочувствительного интерферометра на стенде для исследования химически реагирующих потоков позволило оценить изменение показателя преломления в потоках низкой плотности и выявить газодинамическую структуру таких потоков.

Большая трудоемкость ручной обработки интерферограмм привела к необходимости автоматизировать процесс обработки. Была разработана и в дальнейшем постоянно использовалась полуавтоматическая система на базе оптического прибора БП-3, что позволило ускорить процесс первичной обработки интерферограмм и привести данные к виду, приспособленному для расчетов на ЭВМ [14].

Большой опыт экспериментальных и теоретических исследований в области прикладной газовой динамики нашел и организационное оформление. При кафедре в 1989 году была создана отраслевая лаборатория, которая

Проблемы турбулентности и вычислительная гидродинамика (к 70-летию кафедры «Гидроаэродинамика») участвовала в разработке и исследовании химических лазеров. К сожалению, лаборатория просуществовала недолго. Резкое ухудшение экономической ситуации в стране крайне негативно сказалось на сфере научных исследований. Финансирование прикладных научно-исследовательских работ, связанных не только с лазерной тематикой, но и с заказами промышленности, было прекращено.

### **5. Развитие учебной лабораторной базы**

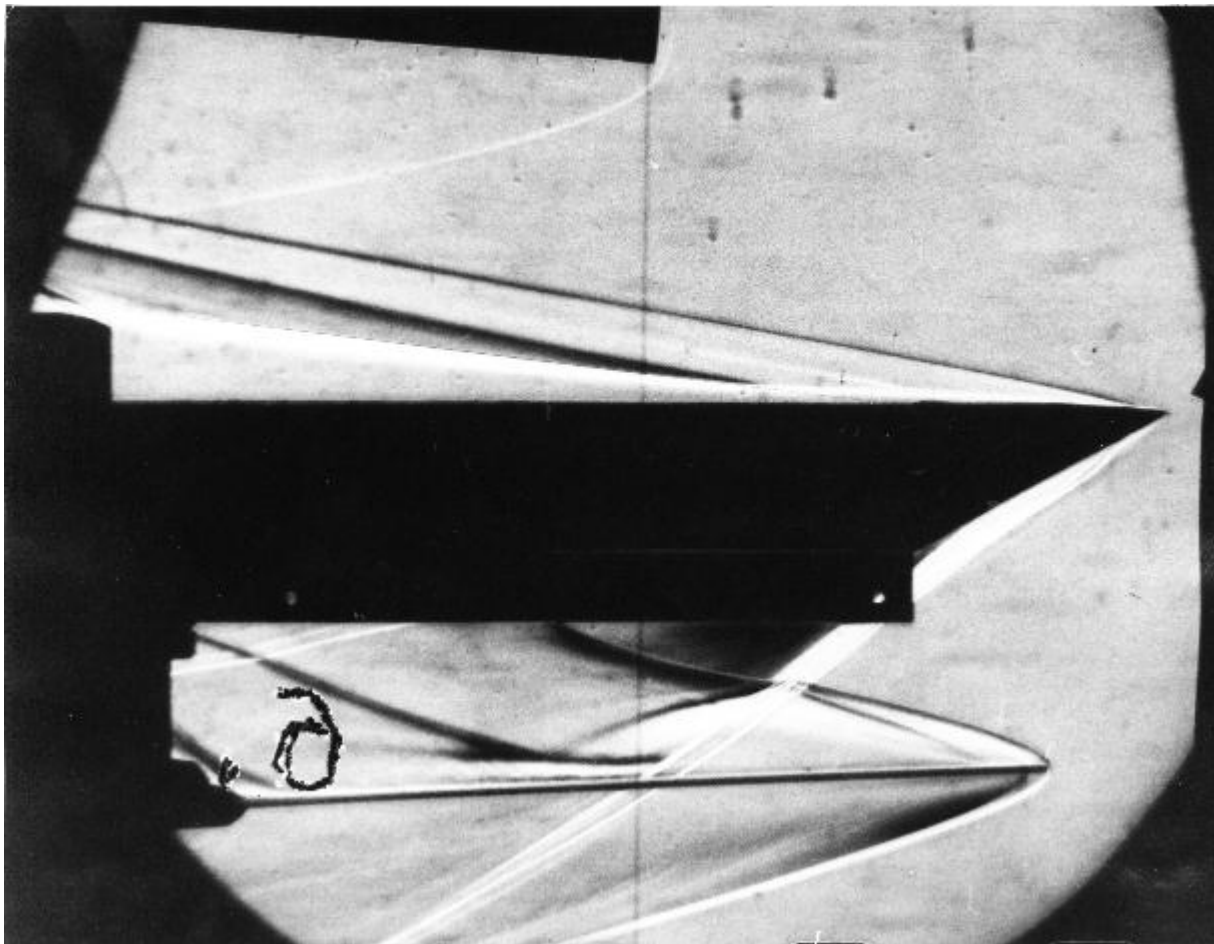
Весьма существенно то обстоятельство, что интенсивно развивавшаяся экспериментальная база кафедры использовалась не только для исследований фундаментального или прикладного характера, но и в лабораторно-учебной практике. Был разработан цикл лабораторных работ по газовой динамике, выполняющихся на установках кратковременного действия [15],[16],[17].

Кроме того, специально для учебных целей были созданы две ударных трубы, где перепад давления на диафрагме создавался только за счет откачки воздуха из канала низкого давления, а камеру высокого давления заполнял атмосферный воздух. Такая модификация позволила расширить программу экспериментов и исследовать простыми средствами как нестационарные, так и установившиеся сверхзвуковые течения [18].

Программа лабораторных работ (8 работ) знакомит студентов 3-5 курсов с явлениями фундаментального характера такими, как наличие в сплошной среде скачков уплотнения или ламинарная и турбулентная формы движения сплошной среды, с оптическими методами исследования в газовой динамике, с методами измерений в условиях быстропротекающих процессов. Одна из основных целей лабораторного практикума – дать практический материал для освоения основных положений теоретического курса газовой динамики. Эту же цель имеют и расчетные задания, выполняемые с теми же, что и в опытах, исходными данными.

На рис. 6 приведен пример теневой картины, полученной в лабораторной работе и демонстрирующей отрыв ламинарного пограничного слоя на пластине

с выступом, обтекаемой сверхзвуковым потоком. Число  $M=9$ , число Рейнольдса отрыва  $Re_{отр} = 5 \cdot 10^5$ , угол атаки  $\alpha = 0$ .



*Рис. 6. Исследование отрыва ламинарного пограничного слоя на пластине с выступом. Число Маха набегающего потока  $M = 9$ , число Рейнольдса отрыва  $Re_{отр} = 5 \cdot 10^5$ , угол атаки  $\alpha = 0$ .*

## **6. Разработка импульсных пневматических устройств прикладного назначения**

В 1991 году преимущественно силами бывших сотрудников кафедры было организовано малое научно-производственное предприятие ИСТА (генеральный директор, к.т.н. С. Н. Исаков), арендовавшее часть помещений кафедры и специализирующееся на разработке и производстве специфического пневматического оборудования, основным элементом которого является разработанный ранее быстродействующий клапан для ударных труб. Со времени своего возникновения быстродействующий клапан усовершенствовался, модифицировался, получил российский патент [19] и

патент США [20], имеет много вариантов конструктивного оформления в зависимости от рабочего сечения и давления.

Помимо первых трех авторов статьи в разработке, испытаниях, модернизации, распространении разнообразных пневматических импульсных устройств, выпускаемых предприятием ИСТА, активное участие принимают к.ф.-м.н. С. В. Юркин, к.ф.-м.н. С. В. Булович, П. П. Пархома.

Наибольшее распространение к настоящему времени быстродействующий клапан получил в устройствах обрушения сыпучих материалов. Известно, что сыпучие среды, используемые в пищевой, химической промышленности, в энергетике, в сельском хозяйстве, при транспортировке и хранении в бункерах, по мере изъятия из бункера могут в нем завестись, нарушая непрерывность технологических процессов. Устройство с быстродействующим клапаном является по сути дела ударной трубой с открытым на атмосферу каналом низкого давления. Канал, в виде трубы длиной несколько метров, вводят в бункер и, запуская клапан с заданной периодичностью, создают в газовой среде бункера ударные волны. Эти ударные волны воздействуют на сыпучий материал и приводят к его обрушению. Сотни таких устройств с избыточным давлением не более 0,6 МПа действуют весьма эффективно в течение многих лет на хлебозаводах, где мука из бункеров должна поступать на участки подготовки теста.

Другой весьма важный класс устройств с быстродействующим клапаном в качестве основного элемента – пневматические линеметы, используемые как спасательные средства пожарными, профессиональными спасателями. Линемет служит для метания линя (веревки) терпящим бедствие на воде, в частности, при кораблекрушениях, в практике спасательных работ на пожарах, при необходимости забрасывать линь на высотные здания, на высоковольтные линии электропередач и в других экстремальных ситуациях. Обычный линемет при объеме баллона  $(1 — 1,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , давлении около 5 МПа и массе снаряда 0,5 кг забрасывает линь погонной массой 2 г/м на высоту около 80 м и на

Проблемы турбулентности и вычислительная гидродинамика (к 70-летию кафедры «Гидроаэродинамика») дальность до 150 м. Пример линемета, используемого пожарным расчетом, приведен на рис. 7.



*Рис. 7. Пожарный расчет готовит к работе спасательный линемет «ИСТА-100»*

Более сложный вариант – морской линемет, которым в обязательном порядке оснащают морские суда и который должен метать лить на дальность не менее 230 м. В настоящее время большинство морских линеметов – пороховые устройства, имеющие очевидные эксплуатационные недостатки.

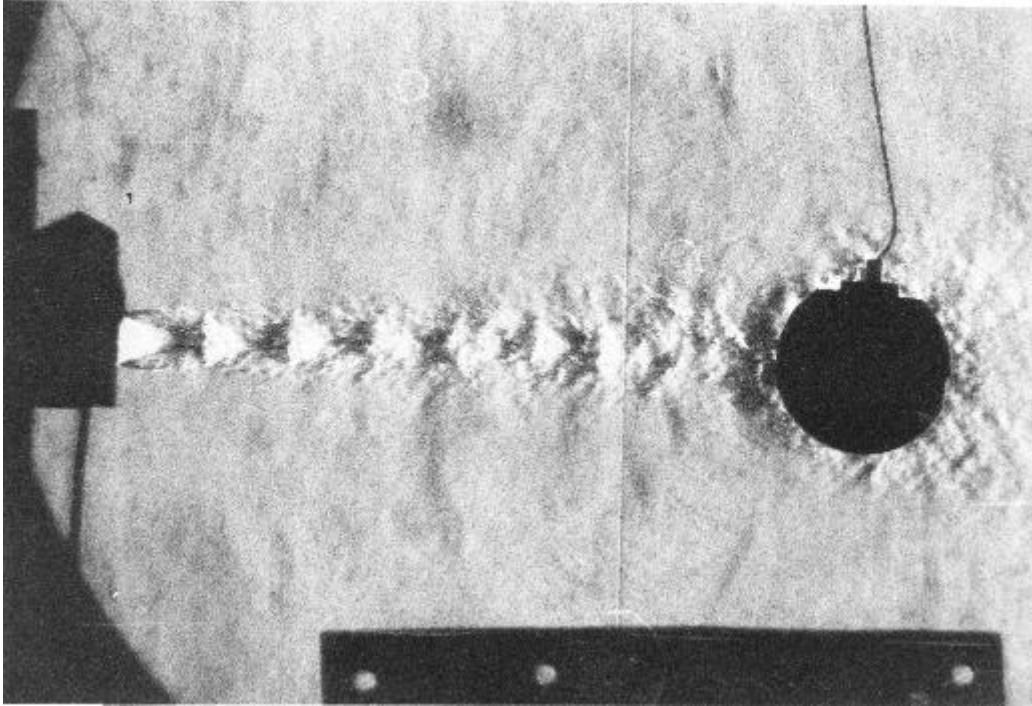
В течение ряда лет на предприятии ИСТА велись интенсивные расчетно-экспериментальные исследования с целью создать линемет, превосходящий по эксплуатационным характеристикам единственный известный сертифицированный аналог, производимый компанией RECTEC NORWAY. За счет размещения литья внутри снаряда, оптимизации геометрических параметров линемета, использования пневмогасителя отдачи удалось создать линемет, обладающий малыми габаритами и массой (длина – 1,30 м, масса в снаряженном состоянии – 6,3 кг). Как показали испытания, линемет позволяет вести прицельное метание с плеча на дальность, требуемую международными соглашениями. Линемет прошел испытания по программе морского регистра РФ.

Весьма важное применение быстродействующего клапана удалось реализовать на железнодорожном транспорте. Завершены отраслевые испытания пневматической системы торможения железнодорожных вагонов на сортировочных горках и началось внедрение таких систем с быстродействующим клапаном на сортировочных узлах.

При поддержке предприятия ИСТА возобновлены исследования, начатые на кафедре в конце 70-х годов и направленные на улучшение эксплуатационных характеристик систем обогащения руд в алмазо- и золотодобывающей промышленности. Применение в таких системах быстродействующих электроуправляемых клапанов небольших габаритов позволяет создать дальнобойную струю, воздействующую в нужный момент на ценные фракции движущейся измельченной породы и отделять их от пустой породы. Чем прицельнее воздействие импульса струи на полезную составляющую, тем выше ее концентрация в вынесенной из основного потока породе и тем эффективнее действие всей системы обогащения руды.

В настоящее время на небольшой импульсной установке [21] ведутся модельные многопараметрические экспериментальные исследования воздействия импульсной струи на твердое тело с целью оптимизировать геометрические и газодинамические характеристики струйной установки. Проводятся также расчеты нестационарных струйных течений для начальных условий, соответствующих экспериментальным данным. Пример картины взаимодействия воздушной струи, вытекающей из цилиндрического отверстия диаметром 8 мм, с шаром диаметром 29 мм и массой 30 г приведен на рис. 8. Начальное давление в камере импульсной установки 0,7 МПа, время воздействия струи на тело 5,3 мс.





*Рис. 8. Теневая картина взаимодействия воздушной струи, вытекающей из цилиндрического отверстия 8 мм, с шаром диаметром 29 мм, массой 30 г. Начальное давление в камере установки 0.7 МПа, время воздействия струи на тело 5.3 мс.*

Благодаря уникальному свойству клапана быстро открывать большие проходные сечения появилась возможность для новых применений его в традиционных видах техники. Это и противопомпажные системы резкого сброса давления в последних ступенях компрессоров, и устройства для очистки крупногабаритных отливок механически обработанных деталей от окалины и металлической стружки, и импульсные снегоочистители железнодорожных стрелок, и аварийные клапаны вместо предохранителей мембранного типа, и устройства очистки дымоходов от сажи, и водопневматические огнетушители, и многие еще не испытанные устройства.

### Список литературы

1. Петров Р.Л. Исследования газодинамических характеристик гиперзвуковой ударной трубы ЛПИ. Дис. на соискание уч. ст. к.т.н. Л.: ЛПИ, 1976. 179 с.
2. Отделение тела от объекта, движущегося с большой сверхзвуковой скоростью: Отчет о НИР / ЛПИ; кафедра гидроаэродинамики, тема 9235/0067; - Л., 1973. - 94 с.
3. Акатнов Н.И, Бабинский М.Г., Васильева Р.В., Григорьев В.В., Донской К.В., Исаков С.Н., Козырева И.А., Петров Р.Л. Исследование на ударной трубе с соплом сверхзвуковых МГД каналов на неравновесной плазме инертного газа // ЖТФ. 1982. Т. 52. В5. С.884-892.
4. Исаков Ю.И., Петров Р.Л. Распространение ударных волн в трубопроводе с быстродействующим клапаном. Труды ЛПИ №313. Аэротермодинамика, 1970. С.127.
5. Исаков С. Н., Пакин П.А., Смирнов Г.В. Пусковой клапан для ударных труб. А. С. 496405 // Б.И. 1975 № 47.
6. Исследование импульсных нагрузок на элементах конструкций: Отчет о НИР / ЛПИ; кафедра гидроаэродинамики, тема 8431; - Л., 1974. 153 с.
7. Исаков С. Н. Ударная труба с быстродействующим клапаном и исследование в ней взаимодействия ударной волны с преградой. Дис. на соискание уч. ст. к.т.н. Л.: ЛПИ, 1976. 167 с.
8. Бабинский М.Г., Григорьев В.В., Исаков С.Н., Куклин Б.А., Петров Р.Л. Интерферометрическое исследование взаимодействия плоской ударной волны с цилиндром и решеткой цилиндров в ударной трубе с диффузором // Нестационарные течения газов с ударными волнами; Сб. научн. тр. ФТИ им. А.Ф Иоффе. 1990. С. 67.
9. Голуб В.В., Гринь Ю.И., Исаков С.Н., Набоко И.М., Петров Р.Л., Тестов В.Г. Исследование газодинамического лазера. // ЖТФ. 1982. Т.52. В. 12.

10. Голуб В.В., Григорьев В.В., Гринь Ю.И., Исаков С.Н., Набоко И.М., Петров Р.Л., Тестов В.Г. Исследование струйных течений за щелевым и клиновидным соплами на ударной трубе. // ПМТФ 1982. №6.
11. Гринь Ю.И., Исаков С.Н., Петров Р.Л., Тестов В.Г. Исследования ГДЛ на ударной трубе в режиме «сшитой» контактной поверхности и распределения плотности в сверхзвуковой струе за срезом сопла. // Препринт ИРЭ.М. 1980. №8 (291).28 с.
12. Бабинский М.Г., Григорьев В.В., Исаков С.Н., Петров Р.Л., Поспелов В.А. Импульсный стенд для исследования взаимодействия плоских сверхзвуковых струй // Физическая газодинамика: эксперим. моделиров. и диагностика. Сб. научн. тр. ИТПМ АН БССР. Минск. 1985. С.92.
13. Бабинский М.Г., Григорьев В.В., Гринь Ю.И., Исаков С.Н., Петров Р.Л. Применение интерферометра последовательного типа для исследования процессов смешения сверхзвуковых неизотермических газовых струй. // Высокоскоростная фотография и метрология быстропротекающих процессов: Тезисы докл. 11 всесоюзн. конф. ВНИИАФИ. М. 1983.
14. Исследование процесса смешения сверхзвуковых химически реагирующих потоков газа: Отчет о НИР / ЛПИ, каф. гидроаэродинамики, тема 504304, № гос. регистр. 183.0000030; - Л., 1985. -
15. Петров Р.Л. Измерение скорости ударной волны и определение чувствительности пьезоэлектрических датчиков давления на малой ударной трубе: Описание лабораторной работы. - Л: ЛПИ, 1977.-39 с.
16. Бабинский М.Г., Петров Р.Л. Газодинамические исследования при больших сверхзвуковых скоростях: Методические указания к лабораторным работам. - Л: ЛПИ, 1980.- 48с.
17. Григорьев В.В., Исаков С.Н., Петров Р.Л. Газовая динамика. Метод интерферометра: Методические указания к лабораторным работам. - СПб.: СПбГТУ, 1996. - 38 с.
18. Петров Р.Л. Экспериментальные исследования сверхзвуковых течений газа: Методические указания к лабораторным работам. - Л: ЛПИ, 1990.-37с.

19.Исаков С.Н., Исаков И.Н. Пусковой клапан для импульсных установок

Патент РФ 2005249, регистр. в Госреестре изобр. 30 дек. 1993.

20.Isakov S.N., Isakov I.N., Yurkin S.V. Pneumatic Launcher.VS 005450839A

Patent Number 54,450,839, Date of Patent Sep. 19. 1995.

21.Акатнов Н.И., Викульцев Ю.А., Исаков С.Н., Петров Р.Л., Смирнов Е.М.

Свободные струйные течения: Методические указания к лабораторным работам. - Л.: ЛПИ, 1991. - 43 с.

## **Экспериментальные газодинамические исследования на кафедре гидроаэродинамики СПб ГПУ**

Григорьев В.В., Исаков С.Н., Петров Р.Л., Смирнов Г.В.

Прослежено развитие газодинамических экспериментальных исследований на кафедре гидроаэродинамики с 50-х годов прошлого века до настоящего времени. Дана характеристика созданных экспериментальных установок кратковременного действия (ударных труб, труб Людвига), отмечены основные результаты исследования взаимодействия ударных волн, сверхзвуковых потоков с различными телами, а также результаты исследования струйных течений, моделирующих течения в газодинамических и химических лазерах. Даны характеристики пневматических устройств, разработанных на основе изобретенного быстродействующего клапана и производящихся на НПП «ИСТА».

## **Experimental gasdynamic research at the hydroaerodynamic department of St-Pb SPU**

Grigor'ev V.V., Isacov S.N., Petrov R.L., Smirnov G.V.

The history of development of gasdynamic experimental researches at the hydroaerodynamic department since the 50-th years of the last century till now is stated. The characteristic of the created experimental installations of short-term action (shock tubes, Ludvig pipes) is given. The basic results of research of interaction of shock waves, supersonic flows with various bodies are marked. The results of research of jet currents simulating current in gasdynamic and chemical lasers are marked. The characteristics of the pneumatic devices developed on the basis of the invented high-speed valve and made on NME «ISTA» are given.

### **Сведения об авторах**

Григорьев Василий Васильевич – ведущий электроник каф.  
гидроаэродинамики, раб. тел.552 65 93, дом. тел. 552 98 13;

Исаков Сергей Николаевич– к.т.н, генеральный директор НПП ИСТА, раб. тел.  
552 65 93, адрес электронной почты [ista@ista-pneumatics.ru](mailto:ista@ista-pneumatics.ru);

Петров Руслан Леонидович –к.т. н., доцент каф. гидроаэродинамики, раб. тел.  
552 65 93 дом. тел. 542 60 33, 470 94 13;

Смирнов Герман Вениаминович-к.т.н., пенсионер.

Авторский коллектив представляет Р. Л. Петров