



ОТДЕЛЕНИЕ "ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ И ТЕПЛОФИЗИКИ" - "ЛАБОРАТОРИЯ ЧЁРНОГО" В ЦИАМ

Александр Николаевич Крайко, д.ф.-м.н., начальник отдела. ГНЦ РФ ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова"

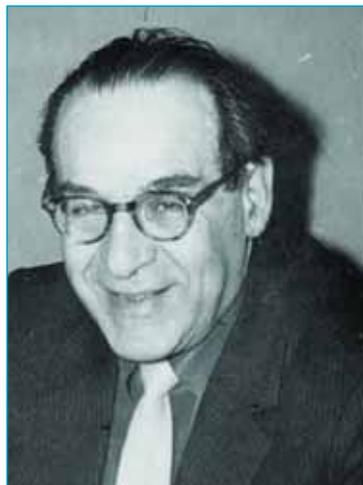
Сергей Юрьевич Крашенинников, д.т.н., начальник отделения. ГНЦ РФ ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова"



Академик Л.И. Седов (1907-1999)



Академик Г.Г. Чёрный (1923-2012)



Профессор Г.Н. Абрамович (1911-1995)



Заместитель Г.Г. Чёрного к.т.н. Л.И. Соркин

1. Из истории "Лаборатории Чёрного"

Лаборатория "Газовой динамики" ЦИАМ (далее - Лаборатория), как и кафедра МФТИ, была создана в 1952 г. Инициатор её создания - бывший тогда заместителем начальника ЦИАМ член-корреспондент АН СССР (с 1953 г. академик) Леонид Иванович Седов. Во главе вновь созданной Лаборатории был поставлен 29-летний ученик Л.И. Седова, прошедший всю Великую Отечественную и закончивший в 1949 г. МГУ Горимир Горимирович Чёрный. Г.Г. Чёрный оставался начальником Лаборатории до 1970 г., а его влияние на выбор направлений научного поиска, уровень, методологию и стиль исследований, формирование коллектива и становление личностей теоретиков и экспериментаторов ощущалось до его смерти в 2012 г. Неоценимо и то влияние, которое не только через своего ученика оказал на учёных Лаборатории Л.И. Седов. Несколько позже в Лабораторию пришёл Генрих Наумович Абрамович - известный специалист по прикладной газовой динамике. Некоторое время спустя, приказом начальника ЦИАМ он был назначен научным руководителем Лаборатории.

В 1956-1970 гг. заместителем Г.Г. Чёрного был Лев Иосифович Соркин, взявший на себя организацию работ по воздухозаборникам и соплам ВРД, за газодинамическое совершенство которых изначально отвечала Лаборатория. Один из главных результатов его активной деятельности по созданию экспериментальной базы для изучения этих объектов - сверхзвуковая установка УВ - 16. Пройдя модернизацию и осовременивание, она и теперь является основным стендом для газодинамических исследований в Лаборатории. Творческий и инициативный подход Л.И. Соркина к перечисленным вопросам позволил Г.Г. Чёрному в большей мере направить свои усилия на формирование научного климата Лаборатории. Л.И. Соркин создал Г.Г. Чёрному такие условия для творчества, каких позднее у него никогда уже не было.

После Г.Г. Чёрного начальником Лаборатории примерно год был Л.И. Соркин. За ним до конца 1982 г. начальником Лаборатории был выпускник МФТИ Донат Алексеевич Огородников (1930-2000). При нём в 1975 г. Лаборатория стала отделением. В декабре 1982 г. Д.А. Огородников стал начальником ЦИАМ. Вместо него и.о. начальника Лаборатории менее чем на год стал Н.М. Беля-

нин, пока на этот пост по конкурсу не был избран Сергей Юрьевич Крашенинников, возглавляющий Лабораторию (теперь - отделение "Газовой динамики и теплофизики") до сих пор.

При создании Лаборатории её основной научный костяк составили связанные с Л.И. Седовым выпускники МГУ. Однако вскоре главную роль в пополнении Лаборатории научными кадрами стала играть кафедра МФТИ, на которой Г.Г. Чёрный читал курс "Теоретической газовой динамики". Став в 1970 г. кафедрой факультета "Аэромеханики и летательной техники" (ФАЛТ) МФТИ, она при активном участии учёных Лаборатории стала основным поставщиком в Лабораторию научной молодёжи. Уже 45 лет студенты МФТИ приходят в ЦИАМ, а затем в Лабораторию и в другие научные подразделения ЦИАМ с кафедры ФАЛТ.

Начало 1950-х годов, когда была создана Лаборатория, - время революционного развития реактивной техники, около- и сверхзвуковой авиации и ракетной техники. Достойный вклад в советские аэрокосмические достижения внесли учёные ЦИАМ и его лаборатория "Газовой динамики". При этом с самого начала Г.Г. Чёрным были поставлены и решены на удивление разнооб-

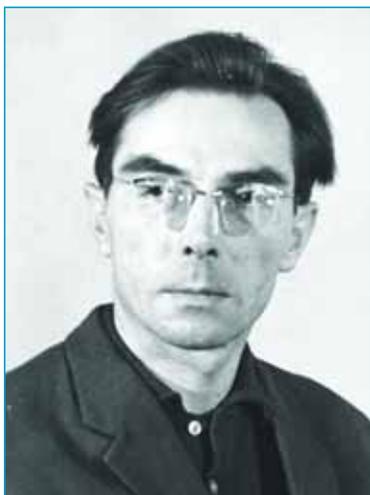


Начальник Лаборатории в 1971-82 гг. Д.А. Огородников



Начальник Лаборатории с 1983 г. С.Ю. Крашенинников





К.т.н. И.П. Некрасов (1923-1978)

разные, важные для теории и приложений газодинамические задачи. Даже неполное их перечисление удивляет и восхищает.

2. О научных направлениях "Лаборатории Чёрного"

Ещё в дипломной работе (опубликована в 1954 г., включена в докторскую диссертацию в 1956 г.) Г.Г. Чёрный построил теорию течений в пограничном слое с поверхностями разрыва фазового состояния вещества. Эта теория нашла многочисленные приложения: при создании методов расчёта абляции тел, обтекаемых высокотемпературным потоком воздуха, и тепловой защиты вдувом газа через пористые поверхности камер сгорания и лопаток турбин.

В 1953 г. Г.Г. Чёрный решил крайне важную для описания работы сверхзвуковых воздухозаборников задачу об устойчивости течения в канале с замыкающим сверхзвуковой поток скачком уплотнения. Её актуальность определялась необходимостью организации эффективного торможения сверхзвукового потока в каналах воздухозаборников сверхзвуковых самолётов. Поэтому замыкающий скачок нужно располагать вблизи минимального сечения, где число Маха слегка больше единицы. В силу уравнений одномерного течения при фиксированном давлении на выходе из канала скачок может находиться и до, и после минимального сечения. Два стационарных решения сделали необходимым анализ устойчивости этих течений. В квазицилиндрическом приближении Г.Г. Чёрный показал, что при отсутствии отражения возмущений от сечения выхода из канала течение с замыкающим скачком в расширяющемся



Д.ф.-м.н. Г.М. Бам-Зеликович (1923-2001)

канале устойчиво, а в сужающемся - неустойчиво. В 1975-77 гг. ученики Г.Г. Чёрного в Лаборатории обобщили его результаты на произвольные каналы и коэффициенты отражения от сечения выхода.

В 1954-56 гг. Г.Г. Чёрный выполнил исследования, важные при создании простых ("инженерных") моделей течения в каналах. Он и Л.И. Седов при квазиодномерном описании таких течений обосновали процедуру осреднения параметров с сохранением интегральных характеристик потока. В 1956 г. Г.Г. Чёрный получил критерий, определяющий расход и тягу сопла при наличии закрутки. Двумерные расчёты, выполненные в Лаборатории через 20 лет, показали, что этот критерий применим при закрутках, уменьшающих расход на десятки процентов. В 1950-56 гг. Г.Г. Чёрный в рамках модели радиально уравновешенного течения поставил ряд задач оптимизации ступени турбомшины (раздел кандидатской диссертации в 1953 г.). Сложность этих задач и



К.т.н. Н.М. Белянин (1932-2011)

отсутствие в то время компьютеров не позволили довести их решение до обозримых результатов. Это сделано в Лаборатории в 1999 г.

При создании сверхзвуковых воздухозаборников нужно знать, как скачки уплотнения взаимодействуют с пограничным слоем. В решении этой проблемы ключевую роль сыграли исследования, начатые при участии Г.Г. Чёрного ещё до создания Лаборатории в Филиале ЦИАМ (тогда НИИ-1, а теперь - Центре им. М.В. Келдыша). Чтобы понять, как повышение давления в падающем скачке распространяется по дозвуковой части пограничного слоя и отражается от него, Г.Г. Чёрный в 1952 г. решил задачу о взаимодействии косоугольного скачка с текущим у стенки дозвуковым потоком. Внешний сверхзвуковой и пристеночный дозвуковой потоки считались невязкими, однако решение было получено в нелинейном приближении. В "докомпьютерную эпоху" такое стало возможно только благодаря чрезвычайно высокому теоретическому уровню исследователя (в 1949 г. Тзянь и Файнстон сумели решить ту же задачу лишь в линейном приближении).

В экспериментальном исследовании, результаты которого были опубликованы в год создания Лаборатории, его авторы, оставшиеся в НИИ-1 Георгий Иванович Петров и Валентин Яковлевич Лихушин (первый, ставший впоследствии академиком, а второй - начальником НИИ-1) и сотрудники новой Лаборатории Лев Иосифович Соркин и Игорь Петрович Некрасов получили чрезвычайно важные результаты. Главный из них - обнаружение "критического" перепада давления. В разных течениях при перепадах, меньших критического, поток в пограничном слое сохраняется практически безотрывным. При перепадах, превышающих критический, пограничный слой отрывается, а перепад давления на скачке, который образуется при обтекании зоны отрыва, равен критическому.

Пограничный слой может отрываться и при непрерывном торможении потока. Поэтому нужно знать, когда такой отрыв происходит, и наоборот, когда несмотря на торможение, реализуется безотрывное обтекание. В 1954 г. молодому сотруднику Лаборатории, ученику Л.И. Седова Григорию Михайловичу Бам-Зеликовичу на основе достаточно общих соображений о свойствах пограничного слоя с привлечением аппарата теории подобия и размерности удалось сформулировать требуемые условия для ламинарного и турбулентного пограничных слоёв. Затем ученик Г.Г. Чёрного Николай Михайлович Белянин нашёл зависимость критерия отрыва от числа Маха внешнего потока, температурного фактора и ряда других параметров. Тогда же он разработал весьма простой и несомненно на это достаточно точный интегральный метод расчёта турбулентного пограничного слоя на плоских и осесимметричных телах. Много лет метод Н.М. Белянина был лучшим среди методов указанного класса.

Взаимодействие скачков с пограничным слоем, его отрыв и способы предотвращения отрыва стали предметом интенсивных, в первую очередь, экспериментальных исследований, проводимых в Лаборатории. На начальном этапе определяющую роль в них играл И.П. Некрасов, защитивший в результате кандидатскую диссертацию (1956 г.). Позднее эти исследования были существенно расширены.

В середине 1950-х годов Г.Г. Чёрный создал принёсший ему мировое признание оригинальный асимптотический метод решения уравнений газовой динамики гиперзвуковых течений с сильными ударными волнами. Указанный период - время освоения больших сверхзвуковых ("гиперзвуковых") скоростей в ракетно-космических приложениях. Хотя для ЦИАМ и Лаборатории такие приложения в те годы не были основными, высокий научный уровень школы Л.И. Седова оказался востребованным. В итоге были получены результаты, прорывные не только в эпоху, предшествующую широкому применению компьютеров и численных методов, но и при их бурном



Рис. 1. Книга: Чёрный Г.Г. Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. М.: Физматгиз, 1959. 220 с.

последующем развитии. Тогда же, когда первые результаты численных расчётов гиперзвукового обтекания тел только становились реальностью, ценность метода Г.Г. Чёрного, позволявшего не только весьма просто получать приемлемые количественные данные, но и объяснять многие на первый взгляд непонятные особенности течений, оказалась чрезвычайно большой. В этом отношении его значение не утрачено и в наше время.

И во время создания, и позднее метод Г.Г. Чёрного оказался широко востребован. Во всём мире он вызвал появление обширной литературы, насчитывающей сотни работ. Все основные качественные результаты теории гиперзвукового обтекания тел, подтверждённые затем результатами вычислительной газовой динамики и экспериментами, первоначально были установлены методом Г.Г. Чёрного. Этим методом с привлечением "нестационарной аналогии" Г.Г. Чёрный изучил особенности гиперзвукового обтекания удлинённых тел с малыми затуплениями. Найденные при этом параметры подобия признаны универсальными. Выполненное Г.Г. Чёрным исследование гиперзвукового обтекания треугольных крыльев позволило дать полную классификацию возможных режимов их обтекания на всех углах атаки. Результаты, полученные этим методом в первые несколько лет его применения, составили основное содержание монографии, представленной на рис. 1. Вскоре она была издана в США. Исследование гиперзвуковых течений, включая изучение обтекания конусов совершенным газом с близким к единице показателем адиабаты и истечения сверхзвуковых струй в пустоту, продолжили в Лаборатории теперь с привлечением и численных методов ученики Г.Г. Чёрного.

В 1959 Г.Г. Чёрному за создание "Теории течений с сильными ударными волнами и её приложения к аэродинамике гиперзвуковых скоростей" была присуждена самая престижная для советских аэродинамиков "I премия и Золотая медаль им. Н.Е. Жуковского". Одновременно "II премию им. Н.Е. Жуковского" за "Цикл работ по исследованию пограничного слоя в сверхзвуковом потоке" получили семь исследователей: трое из НИИ-1 во главе с Г.И. Петровым ("Серебряная медаль") и четверо из ЦИАМ (все из Лаборатории: И.П. Некрасов, Г.М. Бам-Зеликович, Л.И. Соркин и А.И. Зубков). Н.М. Белянин стал лауреатом "Премии им. Н.Е. Жуковского" в 1977 г.

Второе по месту, занимаемому в исследованиях Г.Г. Чёрного, научное направление относится к течениям с детонационными волнами. Здесь первой решённой им задачей (1959 г.) стало обтекание конуса с детонационной волной Чепмена-Жуге. Такая волна возможна не только при строго определенном угле конуса ("угле Чепмена-Жуге"), но и при меньших углах, включая нулевой, когда конуса нет. При таких углах к ней примыкает течение разрежения, ограниченное ударной волной, а за ней до поверхности конуса следует течение сжатия. Обнаруженная конфигурация стала первым для нормального (в частности, совершенного) газа примером автомодельного течения с расходящимися из одной точки детонационной и ударной волнами "одного семейства". В развитие указанной работы недавно в Лаборатории выполнены исчерпывающие расчёты таких течений.

Продолжая начатые исследования, Г.Г. Чёрный и его аспирант Владимир Алексеевич Левин в 1960-х гг. установили асимптотические законы поведения детонационной волны. В 1967 г. В.А. Левин, построив приближённое решение задачи о сильном точечном взрыве в горючей смеси, получил критерий, определяющий время перехода пересжатой детонационной волны в волну Чепмена-Жуге. Начав свой творческий путь в Лаборатории, В.А. Левин (теперь - академик РАН) стал одним из ведущих учёных этого направления,

создав школу теоретического и экспериментального изучения детонации в Институте механики МГУ.

Работы по течениям с детонационными волнами, выполненные в Лаборатории Г.Г. Чёрным и под его руководством, сыграли решающую роль в понимании особенностей таких течений и в привлечении интереса к ним. Этот интерес поддерживался в Лаборатории и после ухода из неё Г.Г. Чёрного и В.А. Левина, не в последнюю очередь, благодаря продолжавшимся контактам с ними. Один из результатов этих контактов - изобретение Г.Г. Чёрным и А.Н. Крайко с коллегами из ЦИАМ принципиально новой схемы сверхзвукового пульсирующего детонационного двигателя (патент 1999 г.). Одно из отличий от таких двигателей известных схем в том, что в нём благодаря периодическим изменениям расхода топлива детонационная волна движется в сверхзвуковом потоке, а не в покоящейся горючей смеси. Для изучения процессов в камере сгорания такого двигателя в НИЦ (Научно-испытательном центре) ЦИАМ создана установка детонационного горения (рис. 2).

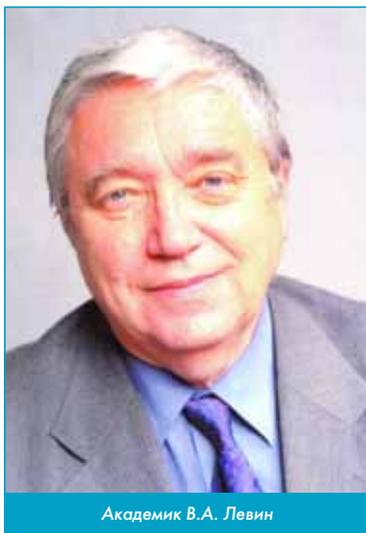
Эксперименты на ней в режиме "присоединённого трубопровода" подтвердили возможность инициирования волн детонации, движущихся против сверхзвукового потока хорошо перемешанной горючей смеси. Испытания с пилонами подачи топлива в камере сгорания обнаружили самоподдерживающийся автоколебательный режим с детонационными волнами, регулярно возникающими в конце камеры сгорания и затухающими вблизи пилонов. Такой режим наблюдался в модели без клапана изменения подачи топлива и постоянно или периодически работающего источника зажигания. Важные следствия его обнаружения - новые схемы детонационных двигателей, предложенные А.Н. Крайко, А.А. Баскаковым и др. (патенты 2013 и 2015 гг.). В последние годы в Лаборатории есть серьёзные достижения и в расчётно-теоретическом изучении течений с волнами детонации.

Г.Г. Чёрный был одним из инициаторов работ по гиперзвуковым летательным аппаратам с прямоточным двигателем сверхзвукового горения (ГПВРД). При нём в Лаборатории началась работа по модели водородного ГПВРД. Именно она, хотя и в другом подразделении ЦИАМ, в ноябре 1991 г. была успешно испытана в полёте на ракете системы С-200 при числе Маха 5.7. В ЦИАМ до середины 80-х годов работал руководимый Г.Г. Чёрным Всесоюзный семинар по ГПВРД (учёный секретарь семинара - сотрудник Лаборатории к.т.н. В.А. Виноградов).

Наряду с перечисленными выше проблемами Г.Г. Чёрный внёс существенный вклад в развитие одного из важнейших газодинамических направлений - построению оптимальных по сопротивлению (тела и их части), тяге (сопла), аэродинамическому качеству (крылья) и т.д. плоских, осесимметричных и пространственных конфигураций. Первое точное в рамках уравнений Эйлера решение задачи построения оптимальной формы получено Г.Г. Чёрным в ЦИАМ ещё до создания Лаборатории. В 1950 г. он рассмотрел плоские стационарные возмущения течения около клина, обтекаемого сверхзвуковым потоком с головным скачком "слабого семейства". Малые возмущения могли приходить на скачок с набегающим потоком и от слегка искривлений образующей клина, а их эволюция определялась коэффициентами взаимодействия со скачком. В те годы задачей взаимодействия стационарных возмущений с косым скачком занимался ряд к тому времени весьма известных учёных (Дж. Лайтхилл, А.А. Дородницын). Наряду с большей полнотой и отсутствием ошибок отличие результатов начинающего инженера Г.Г. Чёрного от результатов других авторов состояло в приложении к задаче построения головной части плоского тела, которая при за-



Рис. 2. Установка детонационного горения в НИЦ ЦИАМ



Академик В.А. Левин

данных габаритах реализует минимум волнового сопротивления. Г.Г. Чёрный показал, что при обращении в нуль коэффициента отражения возмущений, приходящих на скачок от тела, оптимальная образующая - прямая. Разработанный Г.Г. Чёрным для получения этого результата метод "варьирования в характеристических полосках" с тех пор широко применяется при решении вариационных задач газовой динамики.

Позднее, уже в Лаборатории Г.Г. Чёрный и А.Л. Гонор выполнили важные исследования по построению осесимметричных и пространственных головных частей, оптимальных в рамках приближенных моделей "локального взаимодействия" (формулы Ньютона и Ньютона-Буземана). В дальнейшем под руководством А.Н. Крайко построение оптимальных аэродинамических форм стало в Лаборатории одним из главных научных направлений. Более того результаты её учёных в значительной степени определяют уровень данного направления в целом. В 1979 г. за работы по оптимальному профилированию ракетных сопел А.Н. Крайко с коллегами из других организаций удостоен Государственной премии СССР. Его многолетнее сотрудничество с двумя из них - Юрием Дмитриевичем Шмыглевским (1926-2007 гг., ВЦ АН СССР-РАН) и Леонидом Евгеньевичем Стернником (НПО "Энергомаш") исключительно плодотворно. Основные результаты оптимального газодинамического профилирования в XX веке (в большинстве - учёных Лаборатории), описаны в монографиях, представленных на рис. 3.

В последующие годы работы по построению оптимальных аэродинамических форм получили в Лаборатории дальнейшее развитие. Основное внимание при этом уделяется многокритериальной



Рис. 3. Монографии: Крайко А.Н. Вариационные задачи газовой динамики. М.: Наука, 1979. 447 с. и Крайко А.Н., Пудовиков Д.Е., Якунина Г.Е. Теория аэродинамических форм, близких к оптимальным. М.: "ЯНУС-К", 2001. 132 с.

многодисциплинарной оптимизации, опирающейся на прямые методы с широким привлечением "генетических алгоритмов", представления искомым конфигураций кривыми Бернштейна-Безье и эффективные приёмы ускорения решения таких задач. Так, при оптимизации вентиляторов современных двухконтурных ВРД нужно учитывать деформацию их длинных быстро вращающихся лопаток. Поэтому при профилировании лопатки необходимо решать и газодинамическую, и прочностную задачи и удовлетворять ограничениям по допустимому уровню напряжений. Результат включения в программный комплекс оптимизации быстрого модуля пространственного расчёта напряжённо-деформированного состояния методом конечного элемента (К.С. Пьянков, Н.И. Тилляева, 2009 г.) демонстрирует рис. 4. На нём в разных ракурсах показаны распределения напряжений на оптимизируемой лопатке вентилятора. Созданный оригинальный программный комплекс на кластере из 30-ти одноядерных процессоров строит оптимальную лопатку за месяц непрерывного счёта. За такое же время зарубежные аналоги решают подобные задачи на кластерах из многих сотен и тысяч процессоров.

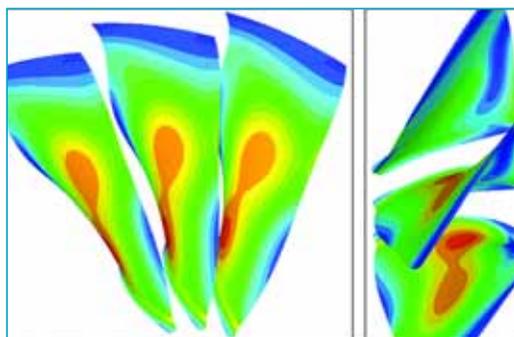


Рис. 4. Распределения напряжений, рассчитываемых при оптимизации лопатки вентилятора

Г.Г. Чёрный оказал неоценимое влияние и на те научные исследования в Лаборатории, по которым он не был автором или соавтором публикаций. Так, в начале 1960-х гг. в Лаборатории

по его инициативе были начаты экспериментальные и теоретические работы по магнитной гидродинамике, электрогазодинамике, плазматронам, электроракетным двигателям и МГД-генераторам. Хотя Г.Г. Чёрный был одним из официальных руководителей этих работ, к тому же обсуждавшихся на руководимых им семинаре и научно-техническом совете, он не стал соавтором ни одной из многих публикаций по этой, тогда "новой" тематике.

Работы по новой тематике выполнялись в тесной кооперации с многими научными организациями СССР, в частности, с Институтом механики МГУ, директором которого Г.Г. Чёрный, оставаясь начальником Лаборатории, стал в 1960 г. О высоком уровне выполненных в указанных направлениях исследований можно судить по монографиям, представленным на рис. 5. Первая из них отмечена "Премией им. С.А. Чаплыгина". До этого (1964 г.), один из её авторов, А.Б. Ватажин был награждён "II премией и Серебряной медалью им. Н.Е. Жуковского". За создание рабочего образца ионного двигателя и испытание его на баллистической ракете руководитель работы - Г.Г. Чёрный был награждён "Золотой медалью ВДНХ СССР", а сотрудники Лаборатории - основные участники работы - дипломами МАП СССР. До начала 2016 г. исследования по электрогазодинамике успешно продолжались в Лаборатории под руководством д.ф.-м.н. профессора А.Б. Ватажина (1935-2016).

Высокий уровень работ по газовой динамике, который определили исследования, выполнявшиеся под руководством Г.Г. Чёрного, требовал расширения применения вычислительной техники, которая уже широко использовалась в теоретических исследованиях.

Настал момент, когда появилась вычислительная газовая динамика с моделированием течений на основе численного решения уравнений газовой динамики. Прорыв в этой области был сделан группой энтузиастов под руководством ученика Г.Г. Чёрного - А.Н. Крайко.

Первые работы по вычислительной газовой динамике выполнены в Лаборатории во взаимодействии с сотрудниками ВЦ АН СССР. Например, успех в расчёте неравновесных течений обеспечил предложенный А.Н. Крайко (1963 г.) простой способ интегрирования "жёстких" уравнений химической кинетики. Позднее учёные Лаборатории сыграли главную роль в применении разностной схемы С.К. Годунова (теперь - академика) в газовой динамике. Расскажем об этом подробнее.

Схема С.К. Годунова (СГ) была предложена её автором, когда он участвовал в атомном проекте. Безотносительно к газовой динамике статья с описанием СГ опубликована в "Математическом сборнике" в 1959 г. До 1969 г. единственной публикацией с решённой по СГ конкретной газодинамической задачей была статья С.К. Годунова, А.В. Забродина и Г.П. Прокопова (1961 г.) с расчётом обтекания с отошедшей ударной волной. Их результаты, однако, уступая расчётам, выполненным при решении той же задачи другими методами, не стали рекламой СГ. В противоположность этому первые же результаты расчётов по СГ смешанных течений в соплах (М.Я. Иванов и А.Н. Крайко, 1969 г.) продемонстрировали несомненные достоинства СГ. В 1970 г. эти результаты отмечены "I премией и Золотой медалью (А.Н. Крайко) им. Н.Е. Жуковского".

Начиная с 1969 г., СГ стала активно применяться в ЦИАМ и в сотрудничавших с ЦИАМ организациях для расчётов нестационарных и (установлением по времени) смешанных течений. Полный же триумф СГ наступил после реализации в Лаборатории в 1972 г. её сверхзвукового стационарного аналога для маршевого счёта свер-



Рис. 5. Книги: Ватажин А.Б., Любимов Г.А., Регирер С.А. Магнитогидродинамические течения в каналах. М.: Наука, 1970. 672 с. и Ватажин А.Б., Грабовский В.И., Лихтер В.А., Шульгин В.И. Электрогазодинамические течения. М.: Наука, 1984. 344 с.



Рис. 6. Книга: Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

хзвуковых течений. Простота реализации, малое время счёта и "робастность" сверхзвукового аналога СГ поставили его вне конкуренции со всеми созданными к тому времени различными схемами при решении любых задач сверхзвуковой газовой динамики. После этого СГ нашла широчайшее применение для расчёта нестационарных, смешанных и особенно стационарных сверхзвуковых течений всех размерностей. В работах, выполнявшихся с применением двух вариантов СГ, вместе с учёными Лаборатории участвовали специалисты других подразделений ЦИАМ, многих НИИ, ОКБ и ВУЗ'ов СССР. По их результатам в 1969-1975 гг. опубликовано почти четыре десятка статей в ведущих отечественных журналах.

Естественным результатом описанного развития стало написание монографии, изображённой на рис. 6. Состояние книги из библиотеки "Экспериментального машиностроительного завода им. В.М. Мясищева" - свидетельство востребованности СГ на аэрокосмических предприятиях СССР. Эта монография, названная из-за цвета переплёта "Жёлтой книгой" и ставшая настольной книгой отечественных вычислителей, сыграла решающую роль в поистине триумфальном шествии СГ по Советскому Союзу. За рубежом достоинства СГ были оценены почти с двадцатилетней задержкой. Те-



Рис. 7. Один из отделов Лаборатории в 1974 г. Стоят (слева направо): М.Я. Иванов, Р.К. Тагиров, В.Т. Гринь, А.Н. Крайко, Н.Н. Славянов, В.И. Копчёнов Сидят: А.М. Конкина, Е.Я. Черняк, В.М. Шуварикина, Л.П. Фролова, Н.И. Тилляева, Е.В. Шуварикина

перь, однако, разные её модификации стали и там основным инструментом вычислительной газовой динамики. На рис. 7 представлена фотография отдела Лаборатории, обеспечившего широкое распространение СГ в нашей стране.

В последующие годы в работах, выполненных в Лаборатории, СГ получила дальнейшее развитие. Хотя сам Г.Г. Чёрный не занимался вычислительной газовой динамикой, однако то, что учёные его Лаборатории внесли столь заметный

вклад в развитие этого научного направления, неслучайно.

Ещё одно из основных научных направлений Лаборатории изучение турбулентных течений начиналось с турбулентных струй, специалистом по которым Г.Н. Абрамович стал ещё до прихода в Лабораторию. Экспериментальное и расчётно-теоретическое изучение турбулентных струй продолжалось и далее, о чём свидетельствуют представленные на рис. 8 монографии 1974 и 1984 гг. Признание авторитета Г.Н. Абрамовича - руководимый им Всесоюзный семинар по турбулентным струям. В 1967-80 гг. его заседания регулярно проходили в ЦИАМ.

С привлечением новых средств и методов измерений и с развитием математического аппарата описания турбулентных течений, вычислительной техники и численных методов их исследования под руководством учеников Г.Н. Абрамовича - С.Ю. Крашенинникова и А.Н. Секундова продолжается и в наши дни. Существенно расширилось и многообразие изучаемых течений, а главными стали вопросы генерации и уменьшения шума и описания процессов горения.

А.Н. Секундов, занявшись разработкой дифференциальных моделей турбулентности для замыкания осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), в 1971 г. построил одну из первых моделей этого типа. Позднее возглавляемому им коллективу удалось создать одну из наиболее удачных однопараметрических моделей турбулентной вязкости "v_t-92". Лишь несколько одно- и двухпараметрических моделей имеют сравнимую с "v_t-92" точностью и универсальность.

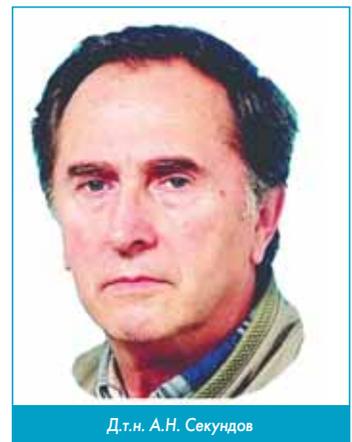
Наряду с дифференциальными моделями для описания коэффициентов переноса в связи с необходимостью описания горения серьёзным достижением стало получение уравнений для функций распределения плотности вероятности (ФРПВ) пульсаций. В 1972 г. В.Р. Кузнецов (1939-1994) получил уравнение, определяющее ФРПВ для пульсаций концентрации пассивной примеси. Это уравнение сыграло важную роль при разработке теории диффузионного горения с образованием вредных веществ в авиационных камерах сгорания. Крупное событие, суммирующее результаты этого направления, - выход изобретённой на рис. 9 монографии В.Р. Кузнецова и сотрудника ЦАГИ В.А. Сабельникова. В 1990 г. она издана в США. В 1987 г. вклад В.Р. Кузнецова отмечен "I премией и Золотой



Рис. 9. Книга: Кузнецов В.Р., Сабельников В.А. Турбулентность и горение. М.: Наука, 1986. 287 с.



Д.ф.-м.н. А.Б. Ватажин



Д.т.н. А.Н. Секундов



Д.т.н. В.Р. Кузнецов (1939-1994)

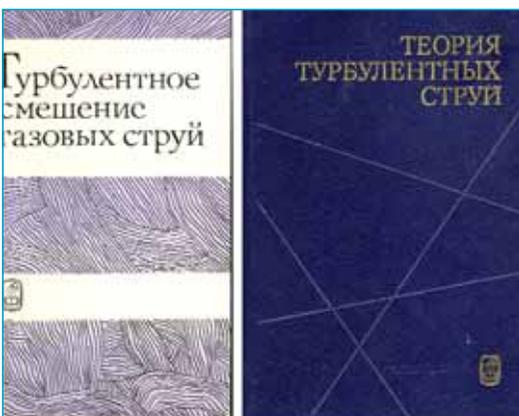


Рис. 8. Книги: Абрамович Г.Н., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П. Турбулентное смешение газовых струй. М.: Наука, 1974. 272 с. и Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю. Секундов А.Н., Смирнова И.П. Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984. 717 с.

медалью им. Н.Е. Жуковского".

Главные направления исследований С.Ю. Крашенинникова - связь процессов переноса в струях с лагранжевыми и эйлеровыми характеристиками турбулентности; эффекты нестационарности и турбулентности в отрывных течениях; влияние пограничных слоев, закрутки, трёхмерности, лепестков и шевронов на смешение и шум струй. В 2011 г. С.Ю. Крашенинников награждён "II премией и Серебряной медалью им. Н.Е. Жуковского" за работу "Разработка и обоснование предложений по технологиям снижения шума реактивной струи ТРДД". Вмести с ним премию получили три учёных Лаборатории: А.Н. Секундов, Д.А. Любимов и А.К. Миронов. Ранее А.Н. Секундов был лауреатом такой премии в 1992 г.

Шум реактивных струй, ставший теперь ещё одним из основных объектов исследования учёных Лаборатории, имеет в ней давнюю историю. Возглавив сопловую тематику, Л.И. Соркин в 1960-х гг. стал одним из ведущих специалистов этого направления. Тогда основным источником шума самолетов была реактивная струя и первые документы по определению их шума основывались на характеристиках шума струи. На рис. 10 показана брошюра, выпущенная в 1968 году Л.И. Соркиным со специалистами ЦАГИ и других организаций.

Основные этапы, ход исследований и результаты А.Н. Секундова, В.Р. Кузнецова, С.Ю. Крашенинникова и их коллег обсуждались на семинаре, который Г.Г. Чёрный продолжал вести в Лаборатории и после 1970 г.

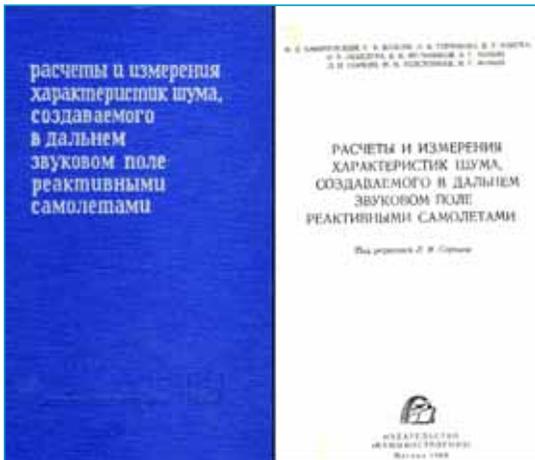


Рис. 10. Брошюра: Расчеты и измерения характеристик шума, ... / Под ред. Л.И. Соркина. М.: Машиностроение, 1968. 97 с.

Витого до уровня универсальной программы, названной "СОBRA" (код Браилко). Следующим этапом стало широкое освоение методов вычислительного моделирования для решения всего разнообразия задач по тематике Лаборатории. Благодаря усилиям и инициативе учёных Лаборатории произошло освоение технологий вычислительного и экспериментального исследования трехмерных, отрывных и нестационарных течений. Ведущий специалист этого направления - к.т. н. В.А. Степанов.

После того, как замыкание RANS дифференциальными моделями турбулентности получило широкое развитие, настало время подходов следующего уровня - модели "крупных вихрей" (LES) и комбинирования LES и RANS. То, что и здесь учёные Лаборатории среди лидеров, подтверждают защищённые в 2014 г. учениками А.Н. Секундова докторская (Д.А. Любимов) и кандидатская (С.А. Чепрасов) диссертации. Совокупность описанных выше достижений Г.Г. Чёрного, его учеников и коллег каждое из которых имеет продолжение в исследованиях, ведущихся в Лаборатории, оправдывает название, данное ей в заголовке статьи.

Актуальность и востребованность описанных выше результатов Г.Г. Чёрного, Г.Н. Абрамовича, их коллег, учеников и последователей была обусловлена запросами авиакосмических НИИ и ОКБ, постоянная связь с которыми - традиция, родившаяся вместе с Лабораторией при определяющей роли Л.И. Соркина. Наряду с ним в работах по конкретным самолётам значителен вклад: по

воздухозаборникам - Д.А. Огородникова, Д.А. Брюшкова, Н.Н. Захарова и В.Т. Гриня, по соплам и реверсу - В.П. Сафонова, И.А. Браилко, А.А. Святогорова и Ю.М. Клёстова, по попаданию в воздухозаборник реверсивной струи и предметов с поверхности аэродрома

- С.Ю. Крашенинникова, Ю.М. Клёстова и Д.Е. Пудовикова.

К 70- и 50-летним юбилеям ЦИАМ (2000 г.) и Лаборатории (2002 г.) был создан уникальный ретроспективный сборник "Газовая динамика. Избранное" в 2-х томах. В нём 118 глав - заново отредактированных статей сотрудников Лаборатории, оказавших, по мнению составителей (А.Н. Крайко, А.Б. Ватажина и А.Н. Секундова), заметное влияние на развитие газовой динамики. Главы сгруппированы в 13 частей по темам: квазиодномерные течения, пограничный слой и взаимодействие с ним скачков уплотнения, гиперзвуковые течения, вариационные задачи газовой динамики и оптимальные формы, нестационарные течения, течения с детонационными волнами, численные методы, околосвуковые течения, турбулентные струи, турбулентность, двухфазные, магнито- и электрогазодинамические течения. Введения и библиографии к каждой части дают достаточно полное представление о результатах учёных Лаборатории по названным темам. На рис. 11 представлен первый том второго издания этого сборника.

В 2003 г. к 80-летию Г.Г. Чёрного был создан другой также ретроспективный сборник работ юбиляра, 15-ти его учеников и коллег: Механика жидкости и газа. Избранное / Редакторы-составители А.Н. Крайко (отв.), А.Б. Ватажин, Г.А. Любимов. М.: Физматлит, 2003. 752 с. В него вошли работы пяти учеников и коллег Г.Г. Чёрного из Лаборатории (А.Н. Крайко, А.Б. Ватажина, А.Н. Секундова, Н.М. Белянина и Л.И. Соркина), а работы юбиляра включают не только, сделанные в Лаборатории. Однако и этот сборник - подтверждение того, что она - "Лаборатория Чёрного", особенно если учесть, что ещё три его ученика (А.Л. Гонор, В.А. Левин и А.И. Зубков) начинали свой творческий путь в ней.

Высокий уровень исследований, сформированный благодаря основателям научных и прикладных направлений работы Лаборатории, частично отражен в выпущенном к 80-летию ЦИАМ сборнике "Теоретическая и прикладная газовая динамика" в 2-х томах. Его 1-й том представлен на рис. 12. Сборник содержит 44 главы, сгруппированные в 5 разделов: 1. Прикладные задачи газовой динамики; 2. Задачи, связанные с горением; 3. Аэроакустика; 4. Задачи оптимизации; 5. Физическая газовая динамика. Как правило, главы сборника - расширенные варианты статей, которые незадолго до его выхода были опубликованы (или приняты к печати) в ведущих периодических изданиях соответствующих профилей. Более близкое ознакомление с материалами сборника показывает, что учёные "Лаборатории Чёрного" достойно продолжают дело её первого Руководителя.



Рис. 11. 1-й том сборника: Газовая динамика. Избранное. В 2-х томах. Издание второе. Исправленное. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. Т. 1. 720 с., т. 2. 752 с.

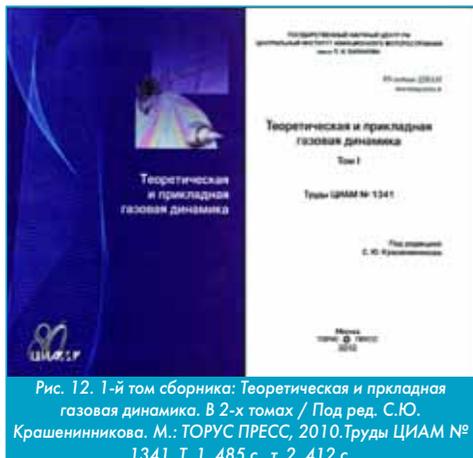


Рис. 12. 1-й том сборника: Теоретическая и прикладная газовая динамика. В 2-х томах / Под ред. С.Ю. Крашенинникова. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. Труды ЦИАМ № 1341. Т. 1. 485 с., т. 2. 412 с.