

возбуждения (p, n)-реакции. В этом подходе измерение функции возбуждения на тандемном ускорителе ЭГП-10 с разрешением $\Delta E \ll 10$ кэВ позволило изучить структуру ГТР, выделить вклады узких ИАР, найти не только полные, но и парциальные ширины нейтронного и протонного распадов ГТР. Получить эти сведения другим способом крайне затруднительно. Первая же работа, посвященная этой теме (наблюдение ГТР в составном ядре ^{118}Sb), преподнесла и неожиданности. В функции возбуждения реакции $^{117}\text{Sn}(p, n)^{117}\text{Sb}$ вместо одного резонанса обнаружено два, причем с ширинами, существенно меньшими (в $\approx 3,5$ раза), чем ширины ГТР в ядрах $^{116,120}\text{Sb}$, полученные в реакциях прямой перезарядки при разрешении $\approx 0,6$ МэВ.

Приведенный материал не исчерпывает все осуществленные на электростатических ускорителях ВНИИЭФ исследования прикладного и фундаментального характера. За 50 лет использования этих ускорителей на них были выполнены исследования, результаты которых опубликованы в более чем 250 статьях в научных журналах, материалах отечественных и зарубежных международных конференций. Эти публикации обеспечили признание, известность и авторитет в мировом научном сообществе коллективу исследователей, работавших и продолжающих работать на электростатических ускорителях ВНИИЭФ. Свидетельством тому являются три международных конференции по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, проведенные во ВНИИЭФ в 1996, 2001 и 2006 гг.

Целесообразно отметить большую роль электростатических ускорителей ВНИИЭФ в учебно-педагогической работе и подготовке кадров высшей квалификации. По работам, выполненным на ускорителях, были защищены 4 докторских и 10 кандидатских диссертаций. Ряд аспирантов и соискателей проводят исследования в рамках готовящихся диссертаций. Немало выпускников вузов, часть которых работает в различных подразделениях ВНИИЭФ и других на-

учных центрах России, выполняли свои дипломные работы на ускорителях Ван де Граафа ВНИИЭФ. В настоящее время ускоритель ЭГП-10 используется при проведении лабораторных работ по курсу физики атомного ядра для студентов СарФТИ (Саров).

В заключение несколько слов о людях, работавших над созданием, модернизацией и эксплуатацией ускорителей, а также проводивших на них эксперименты и исследования.

Ключевыми фигурами коллектива, обеспечившего создание, эксплуатацию и модернизацию ускорителей ЭГ-2, ЭГ-5 и ЭГП-10, были Ю. М. Хирный (канд. физ.-мат. наук), Л. Н. Кочемасова, Ю. М. Большаков (ионные источники), Ф. Ф. Мынцов и В. М. Деваев (механика и технология изготовления ускорительных трубок), Ю. А. Серов (автоматизированная система управления), В. В. Опасин, Г. Н. Слепцов, Л. А. Моркин (эксплуатация). Руководил этими работами А. В. Алмазов.

Самые первые исследования на ЭГ-2, опубликованные в открытой печати, были выполнены В. И. Серовым (канд. физ.-мат. наук) и Б. Я. Гужовским. В дальнейших исследованиях на ускорителях активное участие принимали кандидаты физ.-мат. наук Ю. В. Стрельников, М. Ф. Андреев, А. Г. Звенигородский, Э. Ф. Фомушкин, Л. Н. Генералов, С. В. Трусилло, В. В. Чулков, Г. Ф. Новоселов и С. А. Дунаева, доктора физ.-мат. наук С. Н. Абрамович и Ю. И. Виноградов, а также В. С. Руднев, В. А. Перешивкин, Л. А. Моркин, В. Н. Протопопов, В. А. Завгородний, В. В. Гаврилов и многие другие.

АБРАМОВИЧ Сергей Николаевич — главный научный сотрудник ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук, профессор

СЕРОВ Виктор Иванович — начальник лаборатории ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, кандидат физ.-мат. наук

ТЕНЕВОЕ ФОТОГРАФИРОВАНИЕ В ФИЗИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

С. И. ГЕРАСИМОВ, В. А. ВИКТОРОВ

Уникальной возможностью обладают схемы теневого метода, которые позволяют одновременно визуализировать как оптические неоднородности по ненулевой второй производной показателя преломления (ударные волны, зоны отрыва, пограничные слои, турбулентные следы и т. д.), так и проекции непрозрачных тел,

исследуемых в опыте (метаемый объект, кумулятивная струя, нагружаемая поверхность) и/или сопровождающих изучаемый процесс (частицы среды, частицы объекта изучения, уносимые в результате абляции, разрушения, неустойчивости).

Рассмотрим характерные примеры использования таких схем в

различных экспериментах. Фотографии получены при применении разработанных во ВНИИЭФ взрывных источников света на базе газодинамического компрессора с рекордной яркостью и малым временем свечения (Герасимов С. И., Файков Ю. И., Холин С. А. Кумулятивные источники света. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002).

Простейший теневой метод (метод светящейся точки) заключается в том, что обтекаемая воздушным потоком модель на мгновение освещается точечным источником света. Тень модели проектируется на экран или открытую фотопленку. Построенная теневым методом картина делает обтекание видимым и позволяет разобраться в физической сущности самого явления обтекания в данном опыте с данной моделью. Такая видимая картина называется аэродинамическим спектром. Прилегающий к модели слой воздуха называют пограничным слоем, в нем на движение воздуха влияют силы вязкости. В пограничном слое движение частиц воздуха изменяется от нуля до скорости набегающего потока в данном его сечении. Пограничный слой при стекании с модели образует завихрения — спутную струю. В пограничном слое течение может быть ламинарным и турбулентным. Одна из задач, которые ставятся при аэродинамических исследованиях теневым методом, и заключается в вопросе перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный. Аэродинамические спектры некоторых моделей показаны на рис. 1.

Сверхзвуковые скорости данных движущихся моделей визуализируются на картинке в виде присутствия головных ударных волн. Видно, что любой излом образующей поверхности меняет характер течения — соответствующие скачки уплотнения на спектрах. Вторая модель показывает, как

растет по длине толщина пограничного слоя, а на третьей хорошо видны границы дозвукового течения за головной ударной волной.

Наличие спектров обтекания модели позволяет исследовать вопросы влияния уровня шероховатости поверхности на характеристики пограничного слоя. Для проведения испытаний пользуются выводами теории подобия. Чтобы с достаточной для практики точностью переносить результаты испытаний модели на натуру, необходимо, чтобы модель и летательный аппарат были подобны. Существует геометрическое, кинематическое и динамическое подобие. При геометрическом подобии модель имеет размеры, пропорциональные натуре. При кинематическом подобии, помимо сходных размеров, должны быть пропорциональны и скорость, и ускорение в сходных точках. При динамическом подобии, включающем в себя первые два, пропорциональными должны быть и силы, действующие на натуру и объект.

Применяется ряд критериев динамического подобия. Например, критерий Эйлера, дающий отношение сил давления к силам инерции, или критерий Фруда — отношение сил тяжести к силам инерции. Но наиболее популярным является критерий Рейнольдса, являющийся по сути мерой отношения сил инерции к силам вязкости в воздухе,

$$Re = \rho L v_0 / \mu,$$

где ρ — плотность воздуха, L — характерный размер обтекаемой модели, v_0 — скорость воздушно-

го потока до встречи с моделью, μ — коэффициент вязкости (трения) воздуха.

Чем больше этот критерий, тем больше силы инерции, и течение от ламинарного переходит к турбулентному (при числах Рейнольдса меньше критических, где трение осуществляется за счет перемещения молекул воздуха в их колебательном движении из слоя с одной скоростью в слой с другой скоростью), где сопротивление зависит, в основном, от скорости потока.

Характерный размер модели называют миделевым сечением, или миделем. Это наибольшее сечение, перпендикулярное набегающему потоку. Чем больше это сечение, тем большее сопротивление воздушного потока испытывает модель.

При движении тела со скоростью больше скорости звука в воздухе (M — отношение скорости тела к скорости звука в невозмущенном воздухе), сопротивление воздуха возрастает, поскольку при этом создаются ударные волны. Сила, возникающая в результате взаимодействия воздуха с поверхностью движущейся модели, называется полной аэродинамической силой, т. е. являющейся равнодействующей всех сил трения и давления, действующих на эту модель. Силы трения возникают между поверхностью движущейся модели с воздухом, возрастая с увеличением шероховатости поверхности. Силы давления образуются в результате разности давлений между передними и задними

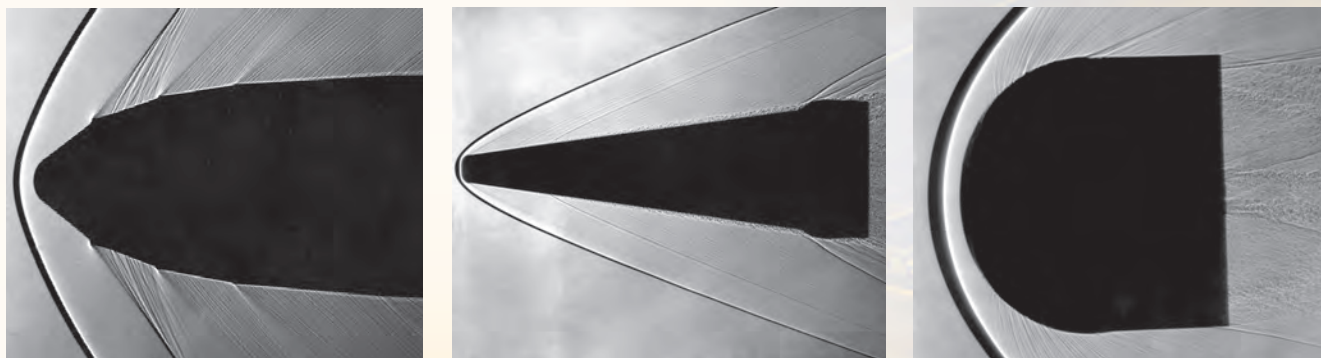


Рис. 1. Аэродинамические спектры некоторых моделей в воздухе



$M = 2,82; Re = 8,8 \cdot 10^6; h = 1,5 \cdot 10^{-6}$

$M = 2,85; Re = 8,4 \cdot 10^6; h = 7,5 \cdot 10^{-4}$

$M = 2,68; Re = 8,1 \cdot 10^6; h = 5 \cdot 10^{-3}$

Рис. 2. Теневой спектр обтекания модели

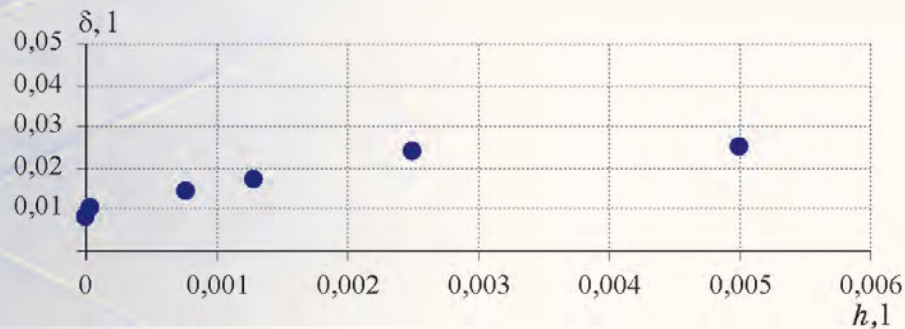


Рис. 3. Зависимость толщины пограничного слоя от высоты микронеровностей (отношение к диаметру мидаля, l)

частями летательного аппарата при его движении в атмосфере воздуха. Составляющими полной силы, в общем виде, являются подъемная сила, сила лобового сопротивления, боковая сила.

Лучшей формой модели, с точки зрения аэродинамики, будет та, которая при данном значении скорости имеет наименьший коэффициент лобового сопротивления (состоящий из коэффициента трения, коэффициента сопротивления от давления воздушных потоков по нормали к аэродинамическим поверхностям модели, коэффициента донного сопротивления и коэффициента индуктивного сопротивления).

Исследования влияния уровня и структуры шероховатости боковой поверхности проводились на моделях притупленных конусов. Диаметр мидаля объектов испытаний изменялся от 80 мм для пушечных моделей, испытываемых в аэробаллистическом тире ВНИИЭФ, до 800 мм для натуральных макетов, испытываемых на ракетном треке ВНИИЭФ.

Уровень шероховатости боковой поверхности характеризовал-

ся относительной среднеарифметической высотой микронеровностей h (здесь и далее все размеры отнесены к диаметру мидаля). В экспериментах относительная высота микронеровностей изменялась в пределах от $1,5 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-3}$. Структура шероховатости моделировалась с помощью различных видов механической обработки (шлифование, токарная обработка, пескоструйная обработка). Упорядоченная структура микронеровностей создавалась нанесением тканевой маски с помощью взрыва накладного заряда и методом накатки. На натурном макете шероховатая структура боковой поверхности получалась в результате обжига корпуса в струе ракетного двигателя.

На рис. 2 приведены результаты теневой фотографии спектров обтекания конусов с различным уровнем микронеровностей. Анализ, проведенный с использованием теневых спектров, показал, что увеличение высоты микронеровностей приводит к росту толщины пограничного слоя и степени его турбулизации. По результатам этой регистрации получены зави-

симости относительной толщины пограничного слоя δ от высоты микронеровностей h (рис. 3).

Результаты экспериментов показали, что увеличение толщины пограничного слоя происходит до высоты менее $2,5 \cdot 10^{-3}$. Дальнейшее увеличение высоты микронеровностей до $(2,5-5,0) \cdot 10^{-3}$ практически не меняет толщину пограничного слоя.

ГЕРАСИМОВ
Сергей Иванович —
начальник отдела
РФЯЦ-ВНИИЭФ
доктор физ.-мат. наук

ВИКТОРОВ
Владимир Александрович —
начальник лаборатории
РФЯЦ-ВНИИЭФ