

Технические инновации и газодинамические исследования

Б.Б.Дьяков¹, В.И.Кузнецов¹, С.А.Поняев¹

¹Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе РАН (Санкт-Петербург, Россия)

На примере достижений лаборатории физической газовой динамики Физико-технического института имени А.Ф.Иоффе, руководимой лауреатом Ленинской премии профессором Ю.А.Дунаевым, хорошо видно, как фундаментальные исследования позволяют находить технические решения. Так были созданы теплозащитные покрытия обитаемых космических аппаратов и боеголовок ракет, термоэмиссионные преобразователи энергии и экспериментальные установки для испытания моделей космических аппаратов.

Ключевые слова: Физико-технический институт, Дунаев, газовая динамика, космонавтика, термоэмиссионные преобразователи.

Наш институт неслучайно имеет в названии слово «технический» — со времени своего основания он всегда находился в эпицентре разработок инновационной техники. И если работы ФТИ во многих областях науки и техники, например, по созданию полупроводниковой электроники широко известны, как и высокая оценка их вплоть до Нобелевской премии, то исторически сложилось, что вклад физтеховцев в ряде других областей физики и ее приложений знаком читателям значительно меньше. Постараемся частично восполнить этот пробел, рассказав о создании и достижениях лаборатории физической газодинамики.

Аэрогазодинамика высоких скоростей

Число научных, производственных и инженерных организаций, которые прямо или косвенно создавали ракетно-космическую технику в СССР, сложно назвать точно. Роль же Физико-технического института имени А.Ф.Иоффе в этой сфере в открытой научно-технической литературе до



Борис Борисович Дьяков, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физической газодинамики Физико-технического института имени А.Ф.Иоффе РАН. Область научных интересов — физика плазмы, история физики и техники, история научных учреждений.
e-mail: Boris.Dyakov@mail.ioffe.ru



Виктор Иосифович Кузнецов, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заместитель руководителя отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики того же института. Занимается физикой плазмы, термоэмиссионным преобразованием энергии.



Сергей Александрович Поняев — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией физической газодинамики того же института. Специалист в области физики плазмы, плазмааэродинамики, электромагнитного ускорения тел.

недавнего времени освещалось весьма скупо. А ведь «Восток» Юрия Гагарина возвращался на Землю под защитой от теплового перегрева в плотных слоях атмосферы*, разработанной в лаборатории физической газодинамики ФТИ, которой руководил Юрий Александрович Дунаев. Именно здесь был не только предложен надежный метод теплозащиты обитаемых космических аппаратов и боевых частей межконтинентальных ракет при спуске в плотных слоях земной атмосферы, но и создана технология нанесения теплозащитных покрытий.

Удивительно, что хотя эти исследования, как и вся наука газодинамика, были новым направлением для ФТИ, коллективу лаборатории понадобилась всего пара лет, чтобы предложить фактически новую идею и воплотить ее в работающих в космосе отечественных изделиях.

В чем тогда состояла проблема («проблема №1», как ее называли в официальных документах [1])? Когда баллистические ракеты начали преодолевать порог дальности в 1000 км и соответственно выросли скорости, с которыми они входят в атмосферу, перед разработчиками встала серьезная задача — защита от возникающих при этом тепловых перегрузок.

Уже для ракеты средней дальности Р-5 (1200 км) эта проблема стала актуальной. А для следующего носителя, рассчитанного на дальность 8000 км, сегодня известного как легендарная Р-7, она была критической. И решение требовалось, как всегда, в кратчайшие сроки. Для этого в ОКБ-1 под руководством С.П.Королёва был создан специальный проектно-конструкторский отдел по головным частям, а к сотрудничеству были привлечены многие научные организации страны, в том числе и ФТИ в Ленинграде.

Лаборатория, получившая номер 5 (первоначально не имевшая названия из-за требований секретности), была создана в институте в 1953 г. Ее возглавил доктор технических наук, профессор Юрий Александрович Дунаев — ученик А.Ф.Иоффе и непосредственный участник Атомного проекта СССР [2, 3]. Он также вошел в специально созданный совет при ОКБ-1 (руководители — академик Г.И.Петров и член-корреспондент К.Д.Бушув).

Перед лабораторией, в которой первоначально было пять человек, но которая быстро разраста-



Ю.А.Дунаев.

лась, стояли и теоретические, и методологические, и практические задачи. Требовалось понять, что происходит с головной частью, когда она входит в атмосферу со скоростью несколько километров в секунду (около 3 км/с для Р-5 и близко к 8 км/с для Р-7), какие температуры получаются при баллистических и космических полетах, и, конечно, создать метод защиты от тепловых нагрузок в несколько тысяч градусов, как было определено в одном из первых отчетов лаборатории, вышедшем в том же 1953 г. (рис.1). Этот отчет сохранил не только формулировку двух основных задач, поставленных перед лабораторией, но и список их исполнителей.

Существовавшие материалы не выдерживали тепловых нагрузок, и требовалось придумать что-то принципиально иное. Таким стал сам подход к теплозащите: вместо того чтобы повышать жаропрочность, Дунаев предложил «жертвовать» частью теплозащитного слоя. При движении головной части в атмосфере с высокой скоростью теплозащита сгорает, а потоки горячего газа уносят продукты сгорания, но при этом не взаимодействуют непосредственно с головной частью. Такой физический механизм теплозащиты, названный уносом массы, или абляцией, и был предложен лабораторией Ю.А.Дунаева совместно с другой лабораторией ФТИ, руководимой доктором химических наук А.П.Обуховым.

Для того чтобы такой метод работал, требовалось найти и соответствующий материал. Дунаев предложил композитный состав, состоящий из карбида кремния и бакелита (органической смолы). Карбид кремния эффективно поглощает тепло и тем самым не дает ему воздействовать на защищаемые части изделия. А бакелит, во-первых,

* К 50-летию полета Ю.А.Гагарина. Участие ФТИ в создании ракетно-космической техники СССР (www.ioffe.ru/HTML/about/k50.html).

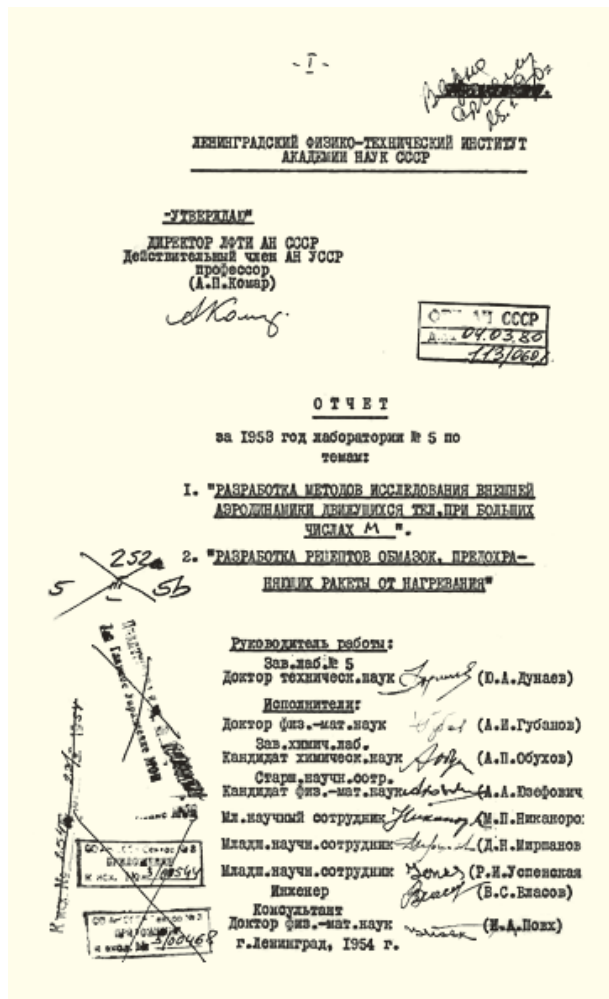


Рис.1. Титульный лист первого отчета лаборатории Дунаева.

«связывает» слои теплозащиты и, во-вторых, сгорая, способствует охлаждению с помощью «уноса массы» продуктов сгорания, имеющих к тому же колоссальную вязкость. В официальных документах такие покрытия получили обозначение «обмазки Дунаева», а в лабораториях Дунаева и Обухова были разработаны технологии их получения и нанесения на натурные изделия, а не только на экспериментальные образцы.

Именно благодаря этой защите 2 февраля 1956 г. ракета Р-5М впервые в мире пронесла через космос из Капустина Яра до ядерного испытательного полигона в Казахстане головную часть с боевым атомным зарядом. Преодолев 1200 км, она без разрушения успешно достигла цели, и заряд взорвался в заданной точке. Операция получила название «Байкал», и именно за ее успех главный конструктор Королёв был награжден своей первой звездой Героя Социалистического труда. Сотрудники Физтеха — участники работ — также были удостоены правительственных наград.

Другая сторона задачи по «устранению траекторных разрывов» при полете ракеты в атмосфере потребовала не менее глубоких и долгосрочных исследований, и одним из первых полученных результатов была новая форма «носка» ракеты (рис.2).

За Р-5М последовала Р-7, которая в 1957 г. вывела на орбиту первый искусственный спутник Земли, а в 1961 г. — первого космонавта планеты. Покрытия, разработанные в Физтехе, использовались и для запусков других отечественных обитаемых космических кораблей. Сразу после полета Юрия Гагарина в 1961 г. Дунаев в составе группы сотрудников ОКБ Королёва был удостоен Ленинской премии СССР с формулировкой «за разработку технологии высокотемпературных покры-

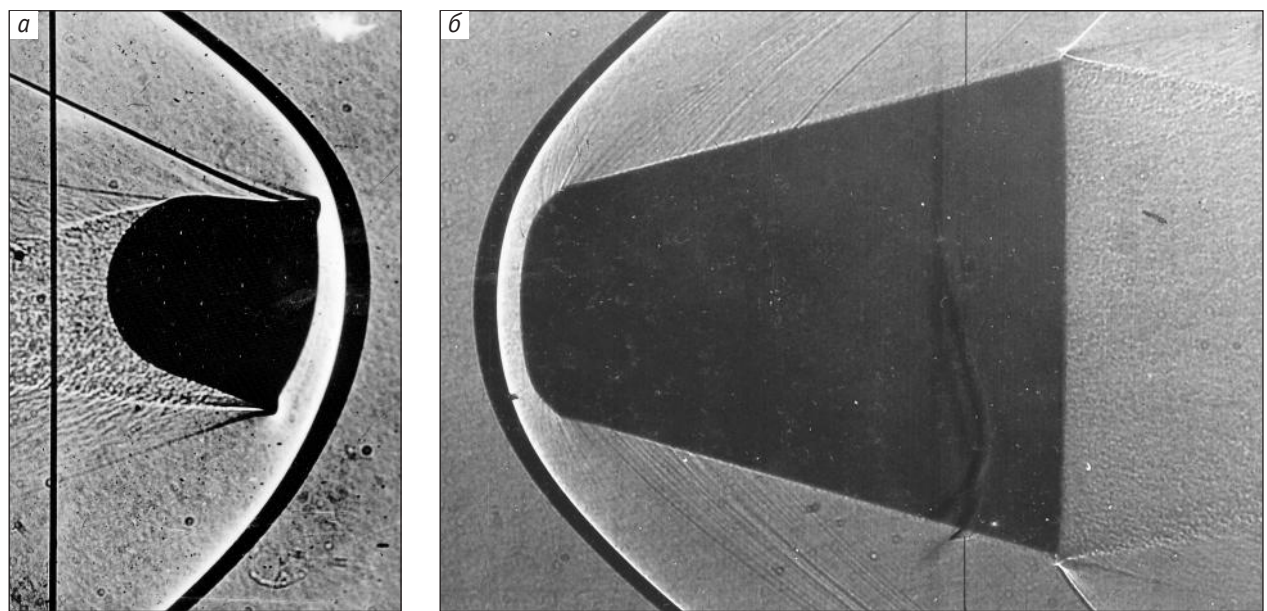


Рис.2. Картины обтекания моделей космического корабля «Союза» (а) и боевых частей ракет (б) при числе Маха М = 2.5.

тий для первых отечественных пилотируемых космических аппаратов», а его сотрудники — правительственных наград. Эти и другие достижения были отмечены также именными памятными медалями АН СССР.

Заметим, что еще в 1955 г. в ФТИ работала проверяющая комиссия Президиума АН СССР, которая в своем закрытом заключении отметила нетипичность и несвойственность задач лаборатории Дунаева традиционной тематике ФТИ. Но с присущей ученым дальновидностью рекомендовала не закрыть тематику и не перевести лабораторию в более подходящие по профилю учреждения, а... вернуться к данному вопросу после выполнения целей, поставленных перед ней. Следует ли говорить, что в результате последующих событий никакие комиссии к этому вопросу больше не возвращались? Но сами события десятилетиями не получали должного упоминания в открытой литературе. Поэтому участники работ и нынешний состав лаборатории глубоко благодарны академику Борису Евсеевичу Чертоку — автору многотомной истории космической эпопеи, напрямую рассказавшему о роли лаборатории в этой истории: «...Самую большую помощь нашим разработчикам головных частей (и не только королёвским, но и всем последующим) оказали сотрудники лаборатории физической газодинамики Ленинградского физико-технического института Академии наук. Еще в 1954 году ее руководитель — профессор Юрий Александрович Дунаев — получил соответствующим постановлением поручение разработать средства защиты боевой части нашей ракеты Р-5М (с атомным зарядом) от «воздействия внешнего потока воздуха». Многие работы ФТИ... были связаны с исследованиями в области ядерной физики, и поэтому режим закрытости по нашей тематике там был даже более жестким, чем в ОКБ-1, где реализовались предложения ФТИ. Непосредственную связь с лабораторией Дунаева осуществлял сам Королёв...» [4, с.385].

Лаборатория №5 продолжила исследования в области физической газодинамики. Менялся коллектив и руководители, расширялась тематика (в частности, в конце 1950-х — начале 1960-х годов). Дунаев возглавил в институте исследования по разработке новых источников энергии — магнетогидродинамических и термоэмиссионных, применимых и на Земле, и в дальних космических перелетах. Развитие же науки — физической газовой динамики — иллюстрируется созданием уни-

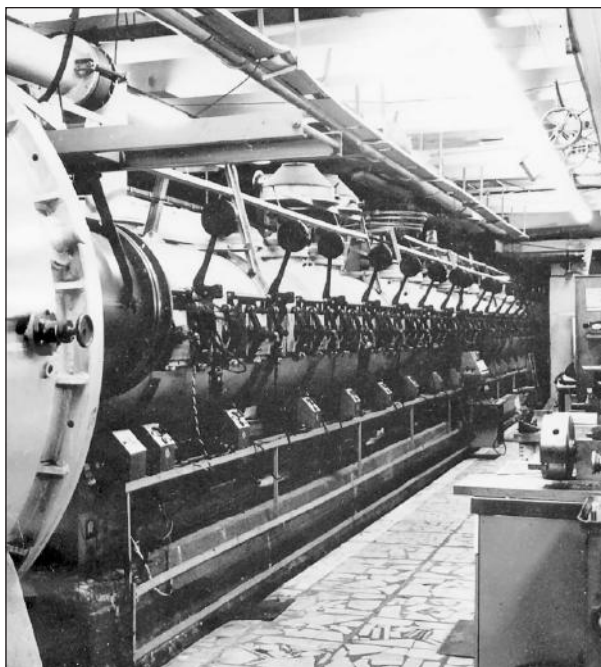


Рис.3. Большая баллистическая установка лаборатории.

кальной экспериментальной базы лаборатории (рис.3 и 4) и результатами (рис.2).

В настоящее время в лаборатории ведутся работы в разных областях современной аэродинамики и физики преобразования энергии. Аэродинамические исследования проводятся на экспериментальной базе, состоящей из ударных труб различных параметров [5]. По данной тематике в последние годы действуют две экспериментальные установки. Исследования захватывают новую и инте-



Рис.4. Малая баллистическая установка лаборатории.

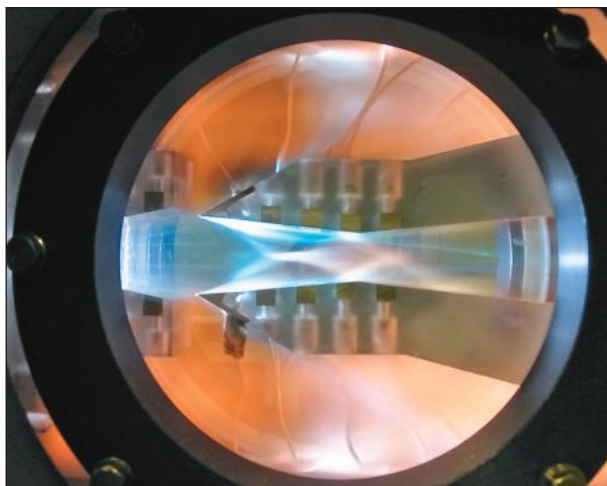


Рис.5. Сверхзвуковое течение плазмы ксенона во внешнем магнитном и электрическом полях. Хорошо видны присоединенные и отраженные ударные волны.

ресную область высокоскоростной аэродинамики, а именно плазмааэродинамику — изучение возможности с помощью внешних электрических и магнитных полей управлять течением в каналах, картиной обтекания тел и тепловыми потоками на их поверхности (рис.5) [6].

Решение задач по такому управлению позволит нам приблизиться к высоким скоростям полета для реальных летательных аппаратов, что с существующими в данный момент технологиями почти невозможно. При проведении работ идет развитие диагностической базы. Так, в содружестве с Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого испытан для применения на импульсных установках новый градиентный датчик теплового потока (ГДТП), который показал хорошие характеристики при работе в сильных электрических и магнитных полях. С его помощью можно определять значение теп-

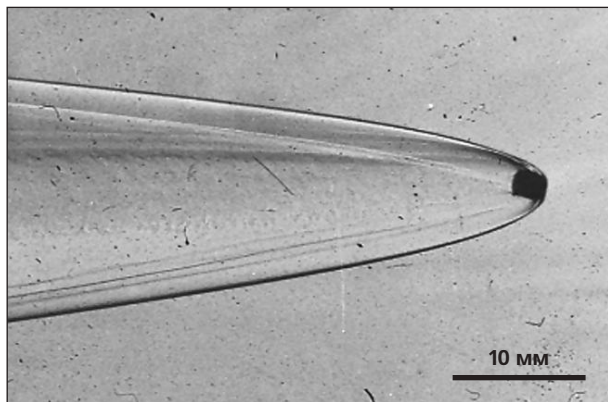


Рис.6. Картина полета кубика размером $2 \times 2 \times 2$ мм, ускоренного в электромагнитном рельсовом ускорителе до скорости 5.7 км/с.

лового потока на поверхность модели при гиперзвуковом обтекании. В рамках проведенных исследований с использованием легкоионизирующихся модельных газов найдены режимы взаимодействия, при которых внешние электрическое и магнитное поля приводят к существенной перестройке течения в каналах, т.е. показана принципиальная возможность управления течением.

Другая тема, активно разрабатываемая сейчас в лаборатории, — это электромагнитное ускорение тел малой массы в электромагнитных рельсовых ускорителях. В таких устройствах непроводящее тело ускоряется с помощью плазменного поршня, который движется между двумя рельс-электродами под действием магнитного поля, сгенерированного протекающим через рельсы и плазменный поршень тока. Работы по такому способу ускорения тел были начаты в лаборатории с 1985 г. и постепенно развивались все последние годы. Сейчас у нас действуют два стенда с ускорителями тел для разных масс. На первом происходит ускорение тел размером от $1 \times 1 \times 1$ мм до $3 \times 3 \times 3$ мм с массой от 1 до 30 мг, при этом достигаемая скорость при атмосферных условиях составляет до 5.7 км/с (рис.6). На этом стенде за последние годы выполнен ряд работ по изучению высокоскоростного взаимодействия ударника с тонкими металлическими пластинами [7] и по моделированию активных космических экспериментов [8].

В целом фундаментальные исследования в этом направлении позволяют уточнять расчетные модели разрушения материалов, что важно с точки зрения создания надежных расчетных пакетов по динамике разрушения. Второй стенд, создаваемый в настоящее время, — это стенд для ускорения тел размером до $1 \times 1 \times 1$ см и массой до 3 г. На этом стенде будут вестись исследования по ускорению как непроводящих тел плазменным поршнем, так и непосредственно проводящих тел, ускоряемых током через рельсы-электроды. Ожидается, что скорости ускоряемого тела превысят 2 км/с. Можно рассчитывать, что наши знания в областях высокоскоростного контакта металл—металл, электромагнитного ускорения, внешней баллистики высоких скоростей и, конечно, высокоскоростного соударения существенно расширятся.

Таким образом, и в современном мире лаборатория продолжает активно участвовать в актуальных исследованиях.

Термоэмиссионное преобразование энергии

Работы по созданию термоэмиссионного преобразователя энергии (ТЭП), нагреваемого от ядерного реактора, в ФТИ начались в начале 1960-х годов в связи с идеей использования ТЭП на атомных подводных лодках для получения электрической энергии. К концу 1950-х годов в СССР уже

был создан эффективный источник тепловой энергии — ядерный реактор с выходными параметрами, удовлетворяющими требованиям ряда технических областей. Началось строительство атомных подводных лодок, на которых электрическую энергию предлагалось получать с помощью обычных турбогенераторов.

В отличие от турбогенератора в ТЭП осуществляется прямое преобразование тепловой энергии в электрическую, поскольку здесь нет ни движущихся элементов системы, ни промежуточных ступеней преобразования (например, фазовых превращений рабочего тела). Для подводных лодок отсутствие движущихся частей создает такие существенные преимущества, как компактность и малая шумность. Идею использования ТЭП на подводных лодках предложили офицеры-подводники, в то время — сотрудники Первого института ВМФ СССР (начальник инженер-вице-адмирал Л.А.Коршунов) М.Б.Барабаш и Г.А.Спиридонов. Тогдашний директор ФТИ академик Б.П.Константинов поддержал идею по созданию термоэмиссионных реакторов-преобразователей и предложил проводить соответствующие исследования и технические разработки в лаборатории физической газодинамики, руководимой Дунаевым. Для проведения работ в ней был создан сектор ТЭП, который возглавил Барабаш.

В ТЭП — устройстве на манер вакуумного диода — ток создается за счет эмиссии электронов с горячего эмиттера, а напряжение — за счет разности работ выхода эмиттера и коллектора. Чтобы увеличить проходящий ток, нужно компенсировать объемный заряд электронов, для чего используют ионы легкоионизирующихся веществ. Как правило, в межэлектродный промежуток вводят

пары цезия. Ионы образуются либо в объеме организации вспомогательного разряда, либо путем ионизации на поверхности эмиттера. В первом случае реализуется дуговой режим, во втором — бесстолкновительный (кнудсеновский). В дуговом режиме около 0.5 В теряется при получении ионов. В кнудсеновском же потеря в плазме нет.

Аналогичные работы проводились параллельно в ряде организаций СССР. Везде было принято решение использовать дуговой режим ТЭП. Все работы, касающиеся создания реактора-преобразователя на основе ТЭП, были засекречены. Сравнительно недавно имеющиеся материалы по данной проблеме стали доступны, и их анализ позволяет сделать небезынтересные выводы. В ФТИ первоначальной задачей стало поисковое проектирование полномасштабной электрогенерирующей установки с реактором-преобразователем для подводной лодки (август 1961 г.). План-график проведения исследовательских работ был подписан руководителями ведущих учреждений ряда союзных ведомств, включая АН СССР [9]. Возможно, столь высокий уровень инициаторов и позволил довести дело до опытных образцов. Первые успехи заинтересовали разработчиков космической техники: была сформулирована задача создания преобразователя для космической ракеты с ресурсом 17 тыс. ч.

Работы по созданию в ФТИ многоэлементного ТЭП с ядерным нагревом эмиттера иллюстрируются испытанным трехэлементным электрогенерирующим каналом (ЭГК) «Гвоздь» (рис.7), который монтировался на специальной штанге и устанавливался в петлевом канале реактора. Показаны только два ТЭП из трех, расположенных по высоте канала и соединенных в последовательную цепь. На рисунке можно увидеть все элементы ТЭП, включая



Рис.7. Схема трехэлементного ЭГК типа «Гвоздь», который монтировался на специальной штанге и устанавливался вертикально в петлевом канале реактора. Нижняя часть — продолжение верхней.

ядерное горючее, катод, межэлектродный зазор, анод, электроизоляцию анода, несущую трубку, зазор для прохода органического теплоносителя, чехлы, через которые проложены термопары для контроля температур ряда узлов ЭГК, и т.д. Предусмотрено отверстие, служащее для вакуумной откачки зазора и прохода паров цезия, имеется бакчок, предназначенный для накопления в нем возникающих в процессе реакторных испытаний ЭГК газообразных продуктов деления ядерного горючего в катодах.

Испытания полномасштабных ТЭП на реакторе ВВР-М проводились в г. Гатчине совместно с сотрудниками тогдашнего Гатчинского филиала ФТИ (теперь это Петербургский институт ядерной физики имени Б.П.Константинова НИЦ «Курчатовский институт»). Преобразователь работал в дуговом режиме на созданной специально для этой цели петле низкого давления с использованием двух сквозных каналов в бериллиевом отражателе с органическим теплоносителем под давлением 6 атм и при температуре 350°C. Испытания начались 18 июня 1962 г. и закончились в ноябре 1965 г. Руководил реакторными испытаниями В.А.Шустов при научном руководстве Ю.А.Дунаева. Первые успешные реакторные испытания многоэлементного ТЭП с ядерным нагревом эмиттера состоялись 2 июля 1962 г. [9]. Такое событие произошло впервые в нашей стране. В дальнейшем отрабатывались различные режимы функционирования, и по их результатам была достигнута стабильная удельная мощность порядка 2 Вт/см² на протяжении свыше 200 ч [10].

После 1965 г. реакторные испытания в ФТИ были завершены. Однако в других организациях СССР такие испытания были продолжены. В результате в 1987 г. термоэмиссионная ядерная энергетическая установка «ТОПАЗ» успешно отработала на орбите в составе советского космического аппарата «Космос-1867» в течение года.

После завершения работ, связанных с испытаниями термоэмиссионных реакторов-преобразователей, в лаборатории начались исследования процессов, протекающих в кнудсеновском режиме ТЭП. С физической точки зрения этот режим наиболее перспективен, поскольку именно в нем при высоких температурах эмиттера реализуются преимущества ТЭП как преобразователя тепловой энергии в электрическую и КПД преобразования оказывается более высоким, чем в дуговом режиме. На практике данный режим достигается при использовании Cs-Ba-наполнения. Компенсация объемного заряда обеспечивается за счет ионов цезия, образующихся на поверхности горячего эмиттера, а необходимая эмиссия электронов — благодаря адсорбции атомов бария на поверхности эмиттера и понижению его работы выхода. Для проведения физических исследований кнудсеновского режима в секторе был создан стенд, обеспечивающий вакуум не хуже 10⁻⁶ тор,

экспериментальный прибор с изменяемым зазором, выбраны материалы деталей прибора, совместимые между собой и с Cs-Ba-средой, система регистрации вольт-амперных характеристик (ВАХ). Всеми физическими исследованиями руководил старший научный сотрудник ФТИ А.Я.Эндер [11, 12].

В дальнейшем экспериментально была достигнута удельная мощность 15 А/см² и КПД около 20% при температуре эмиттера 2300 К. Проведенные теоретические оценки показали, что кнудсеновский режим можно обеспечить при температурах эмиттера вплоть до 2600 К. При этом удельная мощность будет достигать 50 Вт/см², КПД — 30% (рис.8), а температуру коллектора можно повысить до ≈1500 К [13]. Благодаря высокой оптимальной температуре коллектора удастся сильно уменьшить размеры холодильника-излучателя космической термоэмиссионной энергетической установки, где сброс отработанного тепла может быть осуществлен только излучением.

Высокая температура коллектора кнудсеновского ТЭП позволяет в наземных энергетических установках использовать тепло, сбрасываемое с коллектора, для дальнейшего преобразования в электрическую энергию, т.е. создавать двухкаскадные системы [14]. В качестве второго каскада можно, например, использовать бесшумный двигатель внешнего сгорания на основе цикла Стирлинга. Высокотемпературный ТЭП обеспечивает КПД 20–30%. КПД двигателя Стирлинга способен превысить 30%. В результате полный КПД двухкаскадного преобразователя должен составить 45–50%. Такой бесшумный источник электрической энергии может быть использован для энергообеспечения подводных лодок, а также в удаленных районах, поскольку он не требует подвоза топлива.

В лаборатории предложен проект энергетической установки на основе высокотемпературного Cs-Ba-ТЭП, в которой нагрев эмиттера осуществляется с использованием солнечной энергии. Для достижения высоких температур с КПД порядка 90% необходимо так сконцентрировать излучение, чтобы получить в 10 000–20 000 раз большую освещенность. С целью создания столь высокой концентрации мы предложили использовать двухступенчатый концентратор, состоящий из параболического зеркала и фокон^{*}, входное отверстие которого расположено в фокальной плоскости зеркала. Для расчета параметров такого устройства была разработана специальная компьютерная программа. Наши эксперименты подтвердили возможность нагрева эмиттера солнечным излучением с использованием только одного параболического

* Фокон представляет собой зеркало специальной формы, у которого внутренняя поверхность образуется путем вращения куска параболы, наклоненного под определенным углом. Основная особенность фокон состоит в том, что он сильно увеличивает плотность солнечной энергии.

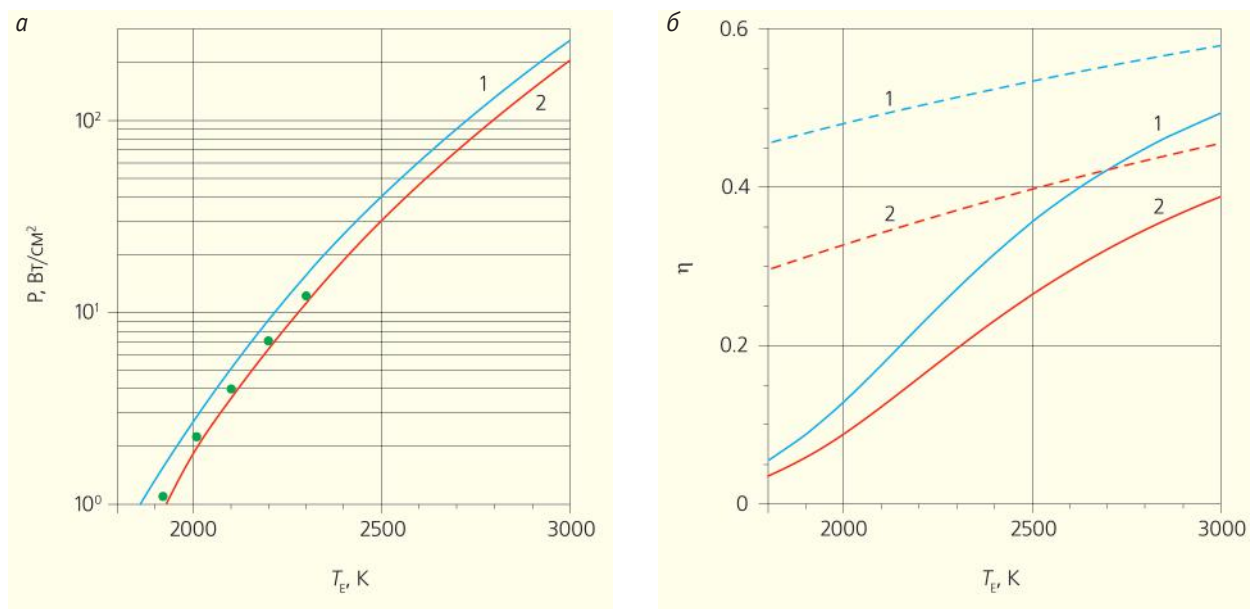


Рис.8. Теоретические зависимости максимальной удельной мощности (а) и КПД (б) от температуры эмиттера. Поток атомов цезия на поверхность эмиттера $F_{Cs} = 10^{18} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, $d = 1 \text{ мм}$, приведенная степень черноты пары эмиттер—коллектор $e = 0.17$. Кривая 1 — работа выхода коллектора $\phi_c = 1.7 \text{ эВ}$, 2 — 2.2 эВ (данные экспериментов в ТЭП с Cs-Va-наполнением).

зеркала до 1900 К. В экспериментах, проводившихся в США и Японии, с помощью двухступенчатого концентратора удалось достичь температур приемника 2400–2500 К.

Уже в первых экспериментах было обнаружено, что в кнудсеновском режиме ТЭП развиваются нелинейные колебания тока большой амплитуды, имеющие релаксационный характер. В лаборатории физической газодинамики экспериментально изучили влияние на колебания параметров диода, давления паров наполнителей, элементов внешней цепи, а также внешнего магнитного поля [15–17]. Согласно созданной теории нелинейных колебаний в кнудсеновском диоде, колебательный процесс состоит из чередования двух стадий: медленной и быстрой. На медленной стадии происходит перераспределение ионов в межэлектродном пространстве с характерным временем порядка среднего времени пролета ионов между электродами. В определенные моменты этой стадии в плазме возникают условия для возникновения электронной неустойчивости Бурсиана—Пирса. В ходе развития неустойчивости распределение потенциала в межэлектродном промежутке сильно изменяется (при практически неизменном распределении ионов), и происходит резкий обрыв тока. Это и есть быстрая стадия колебательного процесса, и протекает она за время порядка среднего времени пролета электронов между электродами. Обнаруженные нелинейные колебания в ТЭП носят универсальный характер и могут возникать в ограниченной кнудсеновской плазме при наличии пучка электронов независимо от способа

генерации ионов. Проведенные в ряде стран эксперименты на кнудсеновских диодах с поверхностной ионизацией подтвердили основные положения теории.

На основе данных об эффекте резкого обрыва тока, возникающего в результате развития неустойчивости Бурсиана—Пирса, в ФТИ были предложены два технических решения, позволяющие создавать генераторы переменного тока на основе термоэмиссионного диода:

- получать переменный ток повышенного напряжения непосредственно из ТЭП,
- преобразовывать постоянное напряжение в переменное без использования дополнительного внешнего управления в специальном диоде-модуляторе.

Работоспособность обоих устройств была подтверждена в экспериментах, получены патенты.

* * *

Итак, в лаборатории физической газодинамики были выполнены исследования физических процессов в кнудсеновском плазменном диоде, позволившие получить ряд фундаментальных результатов в физике плазмы, а также создать ряд новых технических устройств. И если работы по ракетной теплозащите уже стали историей Физтеха, заняв в ней почетное место, то исследования по термоэмиссионным преобразователям энергии успешно продолжают, и в будущем мы рассчитываем создать новое поколение преобразователей тепловой энергии в электрическую, превосходящее другие подобные устройства по плотности энергии и КПД. ■

Литература / Reference

1. Прудников И.С. Решение «проблемы №1». Авиация и космонавтика. 1994; 1–2. [Prudnikov I.S. Solving the Problem Number One. Aviation and Cosmonautics. 1994; 1–2. (In Russ.).]
2. Дьяков Б.Б., Студенков А.М. Юрий Александрович Дунаев. Научная биография, жизнь и судьба ученого. Воспоминания о прошлом. СПб., 2004. [Dyakov B.B., Studenkov A.M. Yurii Aleksandrovich Dunaev. Scientific biography, scientist's live and fate. Memories of the Past. SPb., 2004. (In Russ.).]
3. Алхазов Д.Г., Донской К.В., Журков С.Н. и др. Памяти Юрия Александровича Дунаева. УФН. 1975; 116: 169–170. [Alkhasov D.G., Donskoi K.V., Zburkov S.N. et al. Yurii Aleksandrovich Dunaev. Sov. Phys. Usp. 1975; 18: 389–390.]
4. Черток Б.Е. Ракеты и люди. Кн.4. М., 2006. [Chertok B.E. Rockets and People. Book 4. M., 2006. (In Russ.).]
5. Experimental Methods of Shock Wave Research. Shock Wave Science and Technology Reference Library. V.9. Berlin, Heilderberg, 2016. Doi:10.1007/978-3-319-23745-9.
6. Lapusbkina T.A., Erofeev A.V. Supersonic flow control via plasma, electric and magnetic impacts. Aerosp. Sci. Technol. 2017; 69: 313–320.
7. Poniaev S.A., Kurakin R.O., Sedov A.I. et al. Hypervelocity impact of mm-size plastic projectile on thin aluminum plate. Acta Astronaut. 2017; 135: 26–33.
8. Poniaev S.A., Kurakin R.O., Reznikov B.I. et al. Laboratory modelling of an active space experiment using railgun as a launch device. Acta Astronaut. 2017; 135: 63–68.
9. План-график по созданию опытного образца технологического канала реактора — термоэмиссионного преобразователя. Научный архив ФТИ. Ф.3. Оп.1. Д.3226. Л.1–3, 1960. [Timetable of the work on the fuel channel prototype of the thermionic conversion reactor. Scientific archive of the Ioffe Institute. F.3. I.1. Case 3226. S.1–3, 1960. (In Russ.).]
10. Кирсанов Г.А. Об испытаниях термоэмиссионных преобразователей энергии на реакторе ВВР-М. Реактору ВВР-М 50 лет. Сборник воспоминаний и научных статей. СПб., 2009; 247–248. [Kirsanov G.A. On thermionic energy converter tests in WWR-M reactor. WWR-M reactor 50th anniversary. Recollections and scientific papers. SPb., 2009; 247–248. (In Russ.).]
11. Эндер А.Я. Идеальный кнудсеновский термоэмиссионный преобразователь в поперечном магнитном поле. ЖТФ. 1970; 40 (3): 551–560. [Ender A.Ya. Collisionless thermionic converter in a transverse magnetic field. Sov. Phys. Tech. Phys. 1970; 15: 426–433.]
12. Бабанин В.И., Дунаев Ю.А., Мустафаев А.С. и др. Исследование ТЭП с Cs-Ba-наполнением в передокомпенсированном кнудсеновском режиме. ЖТФ. 1972; 42(8): 1662–1668. [Babanin V.I., Dunaev Yu.A., Mustafaev A.S. et al. Investigation of a thermionic converter filled with Cs-Ba under over-neutralized Knudsen conditions. Sov. Phys. Tech. Phys. 1973; 17: 1326–1332.]
13. Ender A.Ya., Kuznetsov V.I., Sitnov V.I. et al. Ultra-high temperature thermionic system for space solar power application. 11th Symp. on Space Nuclear Power and Propulsion. Albuquerque, USA. CONF 940101. AIP. 1994; 2: 861–867.
14. Ender A.Ya., Kolyshkin I.N., Kuznetsov V.I. et al. Cascaded space solar power system with high temperature Cs-Ba thermionic converter and AMTEC. STAIF-98, Albuquerque, USA. AIP Conf. Proc. 1998; 1565–1570.
15. Кузнецов В.И., Эндер А.Я. О нелинейных колебаниях в одномерной ограниченной кнудсеновской плазме. ЖТФ. 1977; 47(11): 2237–2246. [Kuznetsov V.I., Ender A.Ya. Nonlinear oscillations in an one-dimensional bounded Knudsen plasma. Sov. Phys. Tech. Phys. 1977; 22: 1295.]
16. Кузнецов В.И., Эндер А.Я. Особенности электронной стадии колебательного процесса в кнудсеновском диоде с поверхностной ионизацией. ЖТФ. 1981; 51(11): 2250–2259. [Kuznetsov V.I., Ender A.Ya. Electron stage of the oscillatory process in a surface-ionization Knudsen diode. Sov. Phys. Tech. Phys. 1981; 26: 1326–1332.]
17. Кузнецов В.И., Эндер А.Я. Расчет нелинейных самосогласованных колебаний в кнудсеновском диоде с поверхностной ионизацией. Исследование функции распределения ионов по скоростям. ЖТФ. 1983; 53(12): 2329–2338. [Kuznetsov V.I., Ender A.Ya. Calculation of nonlinear self-consistent oscillations and the ion velocity distribution function in a surface-ionization Knudsen diode. Sov. Phys. Tech. Phys. 1983; 28: 1431–1436.]

Gasdynamic Researches and Technological Innovations

B.B.Dyakov¹, V.I.Kuznetsov¹, S.A.Ponyaev¹

¹Ioffe Physical-Technical Institute, RAS (Saint Petersburg, Russia)

On the example of achievements of the Laboratory of Physical Gasdynamics of the Ioffe Physical-Technical Institute headed by Lenin Prize Winner, professor Yu.A.Dunaev it is clearly seen how fundamental researches allow finding technical solutions. Thus, heat-shielding coatings of manned space vehicles and rocket warheads, thermionic energy converters, and experimental setups for spacecraft models were created.

Keywords: Ioffe Physical-Technical Institute, Yu.A.Dunaev, gasdynamics, cosmonautics, thermionic converters.