

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Ядерная энергия для космических полетов

Ю.Я. Ставиский

Проводится краткий обзор работ, проведенных в 1952–1988 годах в Физико-энергетическом институте им. А.И. Лейпунского (Обнинск) по созданию и осуществлению аппаратов для космических полетов и энергообеспечения в космосе на основе цепной реакции ядерного деления. Работы проводились по инициативе директора Института члена-корреспондента АН СССР Д.И. Блохинцева при активной поддержке академика С.П. Королева.

PACS numbers: 01.65. + g, 28.50. – k

DOI: 10.3367/UFNr.0177.200711f.1241

Содержание

1. Введение (1241).
 2. Развитие космических аппаратов в ЛФЭИ (Обнинск) (1243).
 3. Электрореактивные движители (ЭРД) (1244).
 4. Ядерно-энергетические источники (1246).
 5. Системы с большой тягой (1248).
- Список литературы (1249).

1. Введение

В 1911 г., наблюдая рассеяние α -частиц в золоте, Эрнест Резерфорд открыл ядро как "точечное" сосредоточение массы атома. Отсюда любому мало-мальски образованному человеку могло стать понятным, что вся энергия, запасенная в веществе, кроется в ядрах атомов, и лишь за ничтожную ее часть отвечают их электронные оболочки — за собственно "атомную" энергию... Великий фантаст и социолог Герберт Уэллс уже в 1915 г., через четыре года после открытия Резерфорда, в разгар Первой мировой войны публикует книгу *Освобожденный мир*, где описывает ядерную войну. Технические детали были, конечно, достаточно наивны — летчик "летающей этажерки", что-то вроде "Фармана", берет в руки атомную (ядерную) бомбу, перекусывает зубами некую трубку и бросает бомбу за борт. Важен результат — Москва, Нью-Йорк, Петербург, Лондон, Берлин, Вашингтон, Сан-Франциско, другие крупные города мира — радиоактивные развалины, обнесенные колодой проволокой...

Дмитрий Иванович Блохинцев с юных лет проникся идеями завоевания космоса. Он постоянно переписывался с К.Э. Циолковским и аналогично Уэллсу рано почувствовал все значение ядерной энергии для дальних космических полетов — ведь ее энергоемкость в миллионы раз выше, чем у лучших химических топлив. Я тесно общался с Блохинцевым вторую половину его жизни — с 1950 г. в Обнинске. В июне 1950 г. он был назначен директором объекта "В" МВД СССР (ныне — Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, ЛФЭИ), где он до того заведовал теоретическим отделом. Туда же, после окончания инженерно-физического факультета Московского механического Института (ММИ), получил направление и я. Я убежден, что его жизненный выбор — заняться физикой, поступить на физфак МГУ был обусловлен именно его "космическими" интересами.

6 августа 1945 года, Хиросима. Атомная бомбардировка, вроде против японцев, а по сути, чтобы показать русским всю мощь ядерного оружия. В противном случае наши "тридцатьчетверки" остановил бы только Атлантический океан. Недаром союзники так торопились взорвать первую бомбу на полигоне в Аламогордо — 22 июля 1945 г. начиналась Потсдамская конференция, которая должна была подвести итоги второй мировой войны... Об успешном испытании 16 июля Сталин, я думаю, узнал раньше Трумэна, тогдашнего президента США. Началось интенсивное развитие советского "атомного проекта". Для подготовки кадров для этой области науки и техники в Московском механическом институте Министерства боеприпасов в сентябре 1945 г. был создан факультет для "нового боеприпаса" — инженерно-физический. Создание этого уникального факультета, аналога которому я не знаю, — заслуга крупнейшего советского физика, академика АН УССР Александра Ильича Лейпунского.

Фундаментальные науки — физику и математику нам преподавали на университетском уровне выдающиеся ученые. Общую физику — Семен Эммануилович Хайкин, теорию относительности — Игорь Евгеньевич Тамм, электродинамику — Евгений Львович Фейнберг, методы математической физики — Андрей Николаевич Тихонов, экспериментальную ядерную физику — Лев Андреевич Арцимович и т.п. В то же время программа

Ю.Я. Ставиский. Лаборатория нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований
141980 Дубна, Московская обл., Российская Федерация
Тел. +49 (0) 961 6-34-15-05. Факс +49 (961) 6-28-56
E-mail: stavss@freenet.de

*Статья поступила 8 июня 2007 г.,
после доработки 27 августа 2007 г.*

для всего потока включала полный набор технических предметов, как в лучших инженерных вузах — 12 листов черчения, сопротивление материалов, металловедение, технологию обработки материалов, расширенный курс аналитической химии. Теорию механизмов и машин (ТММ — "тут мы вас угробим") читал "сам" Иван Иванович Артоболевский. Но наибольшее впечатление на нас производили лекции по деталям машин Николая Николаевича Высоцкого, причем не столь своим достаточно тривиальным содержанием, сколь манерой изложения... Очень серьезен был экспериментально-физический практикум, который вел Евгений Сергеевич Трехов, инвалид войны на двух протезах. Его хитроумные задачи видятся до сих пор в кошмарных снах... В процессе создания и развития нового института, МИФИ, включившего инженерно-физические факультеты Московского механического и Московского энергетического институтов эти особенности постепенно испарились. Со временем МИФИ превратился в гигантский муравейник с узкой специализацией отдельных направлений.

Александр Ильич Лейпунский — один из "первых" учеников Абрама Федоровича Иоффе, основателя советской школы технической физики ("первым среди равных", любимым был Игорь Васильевич Курчатов). Лейпунский в конце двадцатых годов (в 1928 г.) был направлен Иоффе на Украину и создает там, в Харькове (тогда — столице УССР), с участием П.Л. Капицы и И.В. Обреимова Украинский (Харьковский) физико-технический институт — УФТИ (ХФТИ). С начала тридцатых Лейпунский работает у Резерфорда в Кембридже. В 1934 году экспериментально подтверждает существование нейтрино, предложенного Паули, чтобы объяснить сохранение энергии при β -распаде. Соответствующая статья была опубликована, по представлению лорда Резерфорда, в журнале *Philosophical Magazine*. Возвратившись в Союз и отсидевши в тюрьме положенные полгода в 1937 г., А.И. Лейпунский проводит в УФТИ широкий круг нейтронно-физических исследований, единственный в своем роде последовательный цикл экспериментальных ядерных исследований в Союзе в довоенное время. Резерфорд (1871–1937 гг.), открывший ядро, до последних своих лет твердил о гигантских масштабах таящейся в нем энергии, но проявляющейся только в отдельных актах ядерных реакций. В "макроскопических" же количествах она, мол, никогда не будет доступна для человеческой практики. После открытия в 1932 г. нейтрона Джеймсом Чадвиком, его учеником, Резерфорд этих слов уже не повторял...

Фактически Курчатов и Лейпунский первыми стояли у истоков нашего "атомного проекта" — Курчатов как общий его научный руководитель с февраля 1943 г. после успешного завершения "операции Уран", как назвал Сталин план разгрома немцев под Сталинградом (после обсуждения осенью 1942 г. с Вернадским, Иоффе и Берия информации разведки о работах по атомному оружию в Великобритании и писем Г.Н. Флерова). Лейпунский — после письма Сталину Манфреда фон Арденне — как научный руководитель ядерных исследований, проводимых в Союзе с участием немецких специалистов. С лета 1945 г. он заместитель по науке Авраамия Павловича Завенягина, начальника 9-го управления МВД СССР, члена высшего органа по атомной проблеме — Спецкомитета при Совете Министров СССР (председателем

Спецкомитета с 20 августа 1945 г. по июль 1953 г. оставался Л.П. Берия, который в декабре 1945 г. ушел из всех силовых структур). Александру Ильичу были тогда подведомственны четыре лаборатории, в которых работало около 300 немецких специалистов, занятых ранее в немецком атомном проекте (Лаборатории "А" и "К" под Сухуми, ныне Физико-технический институт АН Грузии, Лаборатория "Д" на Урале в окрестностях г. Касли, теперь ВНИИТФ — Всероссийский НИИ технической физики, Снежинск). И, наконец, Лаборатория "В" под Москвой, у станции Обнинское, ныне — Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, в создание и развитие которого АИЛ (так мы между собой называли Александра Ильича) внес решающий вклад. С 1957 г. по 1968 г. он научный руководитель Института. Манфред фон Арденне, известный немецкий инженер-физик, в гитлеровские времена руководил атомным проектом в министерстве связи Германии. В своем письме Сталину через неделю после Победы, 15 мая 1945 г., он предложил свои силы и силы своих сотрудников для советского атомного проекта. Представление о возможностях советской науки и техники в этой области он получил от выдающегося немецкого физика, коммуниста Фрица Хоутерманса, бежавшего в 1933 г. от нацизма и работавшего в УФТИ у Лейпунского с 1933 г. по 1937 г. Почти три года просидев как "немецкий шпион, притворившийся антифашистом", Хоутерманс был обменен НКВД и Гестапо на коммунистов в 1940 г. Из Гестапо его вытащил фон Арденне и продержал всю войну в своем институте под Берлином. Хоутерманс первый в Германии, еще в 1941 г., додумался до плутониевого варианта ядерного оружия, но помалкивал и держал свои заметки в сейфе до конца войны...

В Обнинске А.И. Лейпунский вначале вел работы по созданию синхрофазотрона — ускорителя протонов на гигантскую тогда энергию — 10 ГэВ. Под благовидным предлогом эти работы "увел" у него Векслер, соорудивший синхрофазотрон в Дубне (тогда — "Гидротехническая лаборатория" Минсредмаша). Примерно с 1949 г. А.И. Лейпунский, видимо с подачи "Бороды" (Игоря Васильевича Курчатова), развивает в Обнинске "быстрые бридеры" для большой энергетики — реакторы на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением, с "расширенным воспроизводством ядерного горючего". С лета 1950 г. мне довелось заниматься вопросами воспроизводства ядерного горючего (измерением эффективных сечений захвата нейтронов в ^{235}U и ^{239}Pu и в конструкционных материалах, "макроскопическими экспериментами" [1, 2]), пуском и физическими исследованиями прототипов энергетических быстрых реакторов. Быстрые реакторы, пожалуй, — единственная из технологий России, где до сих пор "мы впереди планеты всей". Ее последний вариант — программа "БРЕСТ", развиваемая в НИКИЭТ (Научно-исследовательском конструкторском институте имени Н.А. Доллежале) ближайшим учеником и последователем А.И. Лейпунского Виктором Владимировичем Орловым, пока единственный путь создания дешевой, безопасной, экологически чистой большой энергетики с практически неограниченными ресурсами ядерного горючего. Все другие сегодняшние поползновения, к сожалению, безнадежны...

Комплексное решение проблемы атомного оружия в Союзе явилось примером беспрецедентного напряжения

сил общества для решения поистине национальной задачи — обеспечения силового паритета страны в непростых условиях последствий самой разрушительной для России войны. Удалось создать новые научные и технологические направления, производства... И это с учетом нашего еще предвоенного отставания в крайне важной электровакуумной технологии, явившегося одной из основных технических причин поражений 1941 г. — из-за отсутствия войсковой радиосвязи в условиях маневренной войны.

2. Развитие космических аппаратов в ЛФЭИ (Обнинск)

Д.И. Блохинцев, преподававший в конце 1940-х годов основы квантовой механики на физфаке МГУ, приметил и пригласил на работу в ФЭИ (тогда "Объект В МВД СССР") молодого физика Игоря Бондаренко, который буквально бредил космическими кораблями на атомной тяге. Однако, приехав в Обнинск в 1949 г., Игорь попал в сферу интересов А.И. Лейпунского и был вовлечен в его главную тематику — быстрые бридеры.

С назначением Д.И. Блохинцева директором Института вокруг Бондаренко сложилась инициативная группа молодых сотрудников, которых объединила проблема использования ядерной энергии для космических полетов. Кроме Игоря Ильича в группу вошли Виктор Яковлевич Пупко, Эдвин Александрович Стумбур и автор этих строк. Главным идеологом был Игорь. Э.А. Стумбур на несколько более позднем этапе проводил экспериментальные исследования наземных моделей ядерных реакторов космических атомных электростанций (КАЭС), компактных реакторов на быстрых нейтронах с бериллиевым отражателем. Тогда не было адекватных ЭВМ-программ для расчетов распределения энерговыделения по радиусу активных зон таких реакторов и мне пришлось проводить соответствующие расчеты методом Монте-Карло с использованием ручной рулетки. Месяцами ползал я по листам миллиметровки, расстеленным на полу учебного класса бывшего интерната испанских детей на станции Обнинское, тогда — предприятия п/я 276, разыгрывая и прослеживая судьбы нейтронов, родившихся в активной зоне. Набирал статистику... Э.А. Стумбур проводил уже экспериментальные измерения плотности энерговыделения в моделях реакторов с бериллиевыми отражателями различной толщины — от 5 до 20 см. Важно было исключить возможность перегрева крайних, прилегающих к отражателю тепловыделяющих элементов активной зоны за счет деления нейтронами, замедленными в бериллии. На В.Я. Пупко лежали ядерные и теплофизические расчеты различных схем ядерных реактивных двигателей. Впоследствии, когда он стал заведующим отделением космической техники ФЭИ, на него навалилась и большая организационно-техническая работа. Я, прирожденный экспериментатор, "мастер-ломастер", как прозвал меня отец, разобравший все часы в доме, проводил эксперименты по ракетным двигателям "малой тяги" (тяга в них создается своеобразным ускорителем ионов — ионным движителем, который должен был снабжаться электроэнергией от космической АЭС). По сути это было частью работ по энергетическим быстрым реакторам. Все исследования проводились под неусыпным наблюдением директора — ДИ (так мы

между собой называли Дмитрия Ивановича Блохинцева) и при всяческой его поддержке. Александр Ильич Лейпунский в эти работы не вмешивался. Нам, лавируя между двумя боссами, жилось неплохо. Активно помогал нам и заместитель директора, профессор Владимир Николаевич Глазанов. В свое время он, крупный советский электротехник-высоковольтник, после месячной командировки в США, почти десять лет — с 1938 г. — оттаивал электротоком вечную мерзлоту в Норильлаге...

Игорь Ильич Бондаренко был выдающимся физиком широкого профиля. Он тонко чувствовал эксперимент, ставил простые, изящные и эффективные опыты, "чувствовал" фундаментальную физику как ни один экспериментатор, да, пожалуй, и немногие теоретики. Я могу его сопоставить только с Энрико Ферми. Всегда отзывчивый, открытый и доброжелательный, Игорь был поистине душой института. До сих пор ФЭИ живет преимущественно его идеями. Бондаренко прожил неоправданно короткую жизнь: 5 мая 1964 г. на 38-м году жизни он трагически погиб из-за неправильного лечения. Как будто Бог, увидев, как много человек сделал, и решив, что это уже чересчур, скомандовал: "Хватит"...

Любопытна история взаимоотношений Блохинцева и Королева, сыгравших существенную роль в развитии "космических" работ в ФЭИ. Оба, и Сергей Павлович, и Дмитрий Иванович, с давних пор вынашивали мечту о полете человека в космос. Между ними установились тесные рабочие связи, в которые они вовлекли и нашу группу. Но в начале 1950-х годов, в разгар "холодной" войны, средств не жалели только на военные задачи. Ракетная техника рассматривалась лишь как средство доставки ядерных зарядов, о спутниках и не помышляли. Между тем Игорь Бондаренко, зная через ДИ о последних достижениях ракетчиков, настойчиво "агитировал" за создание искусственного спутника Земли на всех закрытых совещаниях. Впоследствии об этом никто и не вспомнил...

История создания ракеты Р-7, выведшей на орбиту первый наш спутник и Юрия Гагарина, неожиданным образом связана с именем Андрея Дмитриевича Сахарова. В конце 1940-х годов он предложил комбинированный делительно-термоядерный заряд — слойку, может быть и независимо от Эдварда Теллера. Теллер предложил вполне аналогичное устройство, назвав его "будильник", года за три-четыре до Сахарова [3]. Для расчетов он уже использовал ЭВМ и смог понять, что больше 500 кт (в толовом эквиваленте) "будильник" (слойка) не даст. Этого ему было мало, он хотел создать "абсолютное" оружие неограниченной мощности против большевиков и забросил свой будильник в мусорную корзину бредовых идей...

После успешных испытаний сахаровской слойки в 1953 г. (мощность ее оказалась ~ 400 кт) и избрания Сахарова в академики его пригласил к себе В.А. Малышев, тогдашний глава Минсредмаша (бывший Министр танковой промышленности) и заставил, не выходя из кабинета, оценить параметры бомбы следующего поколения. Андрей Дмитриевич вынужден был дать, без детальной проработки, весовые характеристики нового, значительно более мощного заряда, — "большой слойки" [4]. Об ограниченности мощности подобной системы тогда сведений не было... Докладная Малышева легла в основу постановления ЦК КПСС и Совета Министров, обязавшего коллектив С.П. Королева разработать под

этот заряд ракету-носитель. Именно такая ракета Р-7 под названием "Восток" и вывела на орбиту искусственный спутник Земли в 1957 г. и космический корабль с первым космонавтом Юрием Гагариным в 1961 г. Использовать ее как носитель тяжелых ядерных зарядов уже не планировали, поскольку развитие термоядерного оружия пошло совсем иным путем... [3].

В 1956 году ДИ был вынужден оставить любимую деятельность и возглавить (по настоянию руководства ЦК КПСС) создание международного научного центра — Объединенного института ядерных исследований в Дубне, чтобы было что противопоставить CERNу. Тут уж спорить было нельзя — пришлось бросить дело жизни и заняться совсем другой работой... Сегодня, в канун 100-летия Дмитрия Ивановича, следует отметить, что с этим он справился блестяще — до сих пор ОИЯИ остается лучшим научно-исследовательским ядерным комплексом России, сохранившим почти все сформированные Блохинцевым традиции — систематическое обсуждение и принятие планов работ и их финансирования на международных программных комитетах и ежегодных ученых советах и т.п....

Программа развития космических аппаратов в ЛФЭИ включала следующие основные направления:

1. Низколетящая крылатая атомная ракета (КАР) с прямоточным воздушно-реактивным ядерным двигателем, совместно с КБ В.Н. Челомея.

2. Баллистические атомные ракеты (БАР), совместно с ОКБ-1 С.П. Королева.

3. Работы, совместно с отделом В.М. Иевлева (НИИ-1), по осуществлению газофазного уран-водородного реактора.

4. Электро-реактивные двигатели (ЭРД) с высокой скоростью истечения и, соответственно, с малой тягой.

5. Ядерно-энергетические установки для питания ЭРД, космических радиолокационных станций и ретрансляторов. Работы велись совместно с ОКБ-670 М.М. Бондарюка, НПО "Красная звезда" Г.М. Грязнова, ОКБ ММЗ "Союз" С.К. Туманского, НПО "Энергия" С.П. Королева.

6. Разработка, совместно с московским НИИ-1, воронежским КБ А.Д. Конопатова, рядом технологических групп и испытания на полигоне в Семипалатинске прототипа двигателя баллистической атомной ракеты.

3. Электро-реактивные двигатели (ЭРД)

Возможность выполнения ракетой той или иной задачи космонавтики определяется скоростью v , которую она приобретает после использования всего запаса рабочего тела (топлива и окислителя в случае химической ракеты):

$$v = \sigma \ln \frac{M_n}{M_k}$$

здесь σ — скорость истечения рабочего тела (относительно тела ракеты), M_n и M_k — начальная и конечная массы ракеты (формула К.Э. Циолковского). В обычных химических ракетах скорость истечения определяется температурой в камере сгорания и молекулярным весом продуктов сгорания. Недаром американцы использовали водород в качестве топлива в спускаемом аппарате при посадке на Луне. Продукт сгорания водорода — вода, чей молекулярный вес сравнительно низок и скорость истечения оказывается примерно в 1,3 раза

выше, чем при сгорании углеводородных топлив. Этого оказывается достаточно, чтобы спускаемый аппарат с космонавтами достиг поверхности Луны и затем вернул космонавтов на орбиту искусственного ее спутника, где их поджидала земная ракета... У Королева работы с водородом были приостановлены из-за тяжелой аварии с человеческими жертвами и гонку за Луну мы проиграли.

Путь достижения практически неограниченных скоростей истечения — ускорение вещества электромагнитными полями. Мне довелось заниматься этим направлением почти 15 лет, пока с уходом Блохинцева в Дубну и трагической смертью Королева это направление, лишившись духовной и материальной поддержки, не скончалось естественным образом...

Ускорение ракеты с электрореактивным двигателем определяется отношением удельной мощности питающей двигатель космической атомной электростанции (КАЭС) к скорости истечения. В обозримом будущем удельные мощности КАЭС, судя по всему, не превысят ~ 1 кВт/кг. При этом возможно создание ракет только с малой тягой, в десятки и сотни раз меньшей веса ракеты, но с очень малым расходом рабочего тела. Такая ракета может стартовать только с орбиты искусственного спутника Земли, с космической платформы, и, медленно ускоряясь, достигать практически неограниченных скоростей. В свое время было показано [5], что использование ЭРД дает заметный выигрыш при скоростях истечения, больших ~ 30 км s^{-1} . В то же время применение скоростей истечения, больших 200 км s^{-1} , привело бы при реальных удельных мощностях источников электроэнергии к чрезмерному удлинению времени разгона ракет.

Наряду с большой скоростью истечения естественна необходимость высокоэффективного преобразования электроэнергии в кинетическую энергию струи рабочего тела (порядка 100 %) и малых паразитных потерь рабочего вещества.

Скорости истечения в указанном диапазоне при реальных уже сегодня удельных мощностях АЭС бы эффективно решать основные задачи космических полетов в пределах Солнечной системы. Для полетов к звездам необходимы уже системы со скоростью истечения близкой к скорости света — "фотонные ракеты". Но это уже область ненаучной фантастики, ибо, чтобы осуществить сколько-нибудь разумный по времени дальний космический полет с фотонной ракетой, необходимы невообразимые удельные мощности космических электростанций. Пока нельзя даже представить, на каких физических процессах они могли бы быть основаны...

Проведенные расчеты показали, что во время Великого противостояния Земли и Марса можно за один год осуществить полет ядерного космического корабля малой тяги с экипажем к Марсу и возвратить его на орбиту искусственного спутника Земли. Полная масса такого корабля около 5 т (включая запас рабочего тела 1,6 т), масса АЭС мощностью 3 МВт порядка 3 т, реактивная тяга определяется 2,5-мегаваттным пучком ионов цезия с энергией 7 килоэлектронвольт (кэВ), что соответствует скорости истечения ~ 100 км s^{-1} . Корабль стартует с орбиты искусственного спутника Земли и выходит на орбиту спутника Марса. Спускаться же на его поверхность пришлось бы в аппарате с водородным химическим двигателем, подобным американскому лунному.

В те годы рассматривалось несколько путей создания ЭРД — ускорение сгустков плазмы в электромагнитных полях, ускорение заряженных капель жидкости или микрочастиц в электрическом поле и т.п. Однако ни одна из этих идей не имела под собой четкой физической основы. Находкой оказалась ионизация цезия на поверхности средних и тяжелых металлов.

Еще в 20-х годах XX века Ирвинг Лэнгмюр открыл явление поверхностной ионизации щелочных металлов [6]. При испарении атома цезия с поверхности металла с работой выхода электронов, превышающей потенциал ионизации цезия, последний практически в 100 % случаев оставляет слабо связанный электрон в металле и оказывается однократно заряженным ионом, подобным атому инертного газа... Именно поверхностная ионизация цезия, например, на вольфраме и есть тот физический процесс, который позволяет создать ионный двигатель с почти 100-процентным использованием рабочего тела и энергетическим к.п.д. близким к единице. Поскольку Лэнгмюр работал с микротоками на микронных проволочках, мы решили провести эксперименты в условиях, близких к практически интересным. Надо сказать, что мало получить пучок ионов с большой плотностью. Надо еще выпустить его в открытый космос. Проблема — объемный заряд пучка и заряд ракеты.

Если рассматривать плоский эмиттер ионов (вольфрамовую пластину, например), необходим также ее подогрев до температуры, при которых время жизни атома цезия на ней достаточно мало и при данном потоке атомов она остается практически чистой, с соответствующей работой выхода. При недостаточной температуре поверхности происходит покрытие ее цезием, работа выхода падает, в пределе — до потенциала ионизации цезия ($\sim 1,6$ эВ) и поверхностная ионизация прекращается. Для получения ионных пучков, плотность которых ограничена объемным зарядом, необходимы температуры вольфрамового эмиттера ~ 1000 К. При этом степень поверхностной ионизации (отношение числа ионов, отлетающих от поверхности к числу отлетающих атомов), медленно спадающая с температурой, еще очень высока — около 99,9 %. Тепловое излучение эмиттера — основная потеря энергии в двигателе. Для плоского эмиттера и, соответственно, плоской ускоряющей системы предельная удельная тяга (на 1 см^2 эмиттера), ограниченная объемным зарядом пучка в ускоряющей системе составит (по закону "трех вторых"):

$$F = 0,8 \times 10^{-3} \left(\frac{v}{d} \right)^2 \text{ г/см}^2.$$

Здесь v и d — ускоряющая разность потенциалов (вольты) и ускоряющий промежуток (сантиметры), соответственно. Но объемный заряд не только ограничивает плотность пучка ионов. Он еще препятствует выводу пучка в открытый космос. Влияние объемного заряда на движение потока заряженных частиц, имеющих заданную начальную скорость в пространстве без поля (в дрейфовом пространстве) впервые рассмотрел В.Р. Бурсиан [7]. Им было показано, что величина тока, который можно "протолкнуть" через дрейфовое пространство, квадратично зависит от его длины L , пропорциональна $1/L^2$, т.е. для вывода пучка положительных ионов в открытый космос необходима компенсация его объемного заряда электронами. Одновременно решил бы и

вопрос нейтрализации заряда ракеты. Таким образом сложилась трехэлектродная схема ионного двигателя с поверхностной ионизацией цезия: первый электрод — вольфрамовая пластина — эмиттер ионов с потенциалом $+7$ кВ относительно потенциала земли, второй — ускоряющая сетка с потенциалом -3 кВ, одновременно запирающая электронный ток со второй сетки, удерживаемой при нулевом потенциале (эмиттер электронов компенсации) на пластину-эмиттер ионов. Для комплексной проверки физических процессов в трехэлектродной схеме, для получения опыта работы с цезием в атмосфере и в вакууме при высоких напряжениях схема была воспроизведена "в металле" и изучена при вакууме $\sim 10^{-6}$ (рис. 1, [8]).

Нагрев вольфрамовой пластины-эмиттера ионов осуществлялся излучением вольфрамовой спирали, источником пучка атомов цезия являлась молекулярная пушка, первая и вторая сетки нагревались прямым током — первая, вольфрамовая, чтобы устранить цезиевое покрытие, и, тем самым — повышенную термоэлектронную эмиссию, вторая, из торированного вольфрама, чтобы обеспечить эмиссию электронов для компенсации объемного заряда ионного пучка. В качестве изоляторов использовался плавленный кварц. Для измерения усилий в скомпенсированном пучке ионов (тяги) применялась откалиброванная уравновешенная пластина ("весы"), располагавшаяся на расстоянии ~ 40 см от модели. Измеренное по отклонению пластины усилие в описанных условиях составило $0,5 \pm 0,1$ г. Расчетное значение тяги — $0,66$ г.

Процесс компенсации объемного заряда был проанализирован Игорем Павловичем Стахановым и его сотрудниками. Было показано, что при взаимодействии электронов, эмитируемых второй сеткой с объемным зарядом ионного пучка, возникает колебательное движение электронов. Сопутствующее интенсивное микроволновое излучение было обнаружено с помощью промышленных волномеров. Зависимость его частоты от плотности тока и ускоряющего напряжения оказались в хорошем согласии с расчетами группы И.П. Стаханова (рис. 2, [9]).

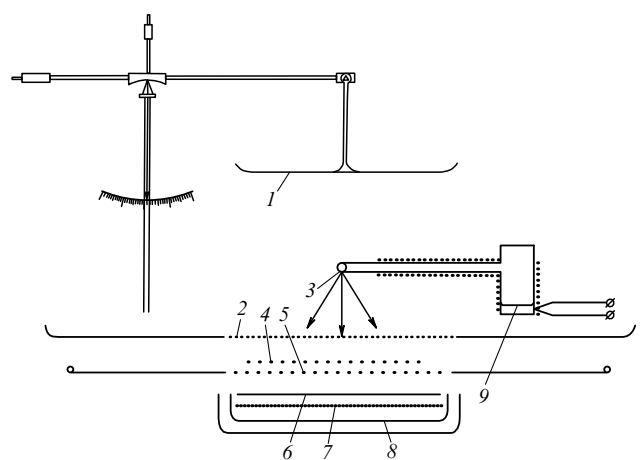


Рис. 1. Схема модели ионного двигателя: 1 — подвижная система для измерения тяги; 2 — экранирующая сетка; 3 — отверстие для подачи паров цезия; 4 — сетка, эмиттирующая электроны; 5 — запирающая сетка; 6 — поверхность, эмитирующая ионы; 7 — нагреватель эмиттера; 8 — тепловые экраны, 9 — испаритель цезия.

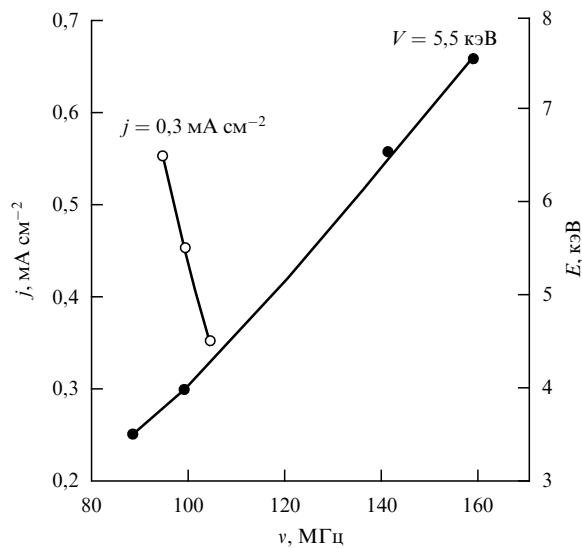


Рис. 2. Зависимость частоты от плотности тока и от энергии ионов.

После этого первого эксперимента был проведен почти десятилетний цикл работ по детальному изучению отдельных процессов в трехэлектродной схеме.

Изучалась степень ионизации цезия при прохождении цезия через пористые эмиттеры из вольфрама и молибдена (см., например, [10]). Применение таких эмиттеров позволило обеспечить равномерную подачу цезия на поверхность и исключить большие его потери, имевшие место при внешней подаче от молекулярной пушки. Исследовалось катодное распыление конструкционных материалов в пучках ускоренных ионов цезия [11]. Изучалась ионная оптика методом моделирования на проводящей бумаге. Испытывались различные конструкции моделей. Один из последних вариантов с пористым эмиттером из профилированного вольфрама, с первой

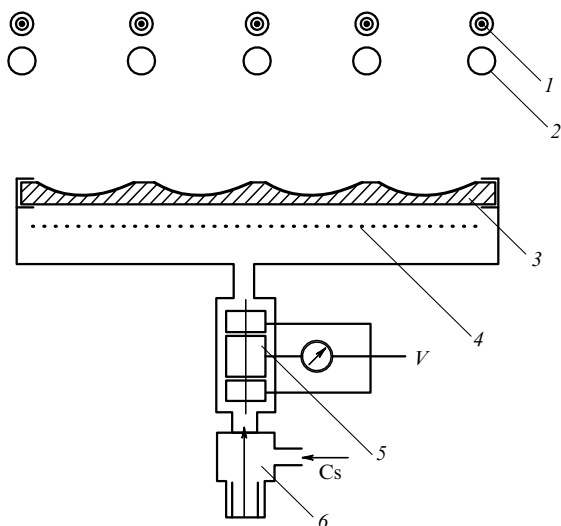


Рис. 3. Схема модели ионного двигателя с пористым эмиттером: 1 — компенсирующая сетка (набор оксидных катодов); 2 — запирающая сетка (стальные трубки, охлаждаемые воздухом); 3 — эмиттер (пластинка из пористого вольфрама); 4 — подогреватель эмиттера; 5 — измеритель давления паров цезия по току поверхностной ионизации на центральную нить; 6 — игольчатый вентиль — дозатор паров цезия.

сеткой из стальных трубок, охлаждаемых воздухом, со второй сеткой с оксидными катодами (рис. 3), испытанный в 1965 г., давал "тягу" около 20 г при токе ионного пучка 20 А, имел коэффициент передачи энергии пучку ионов около 90 % и коэффициент использования цезия $\cong 95$ %.

4. Ядерно-энергетические источники

Пути прямого преобразования энергии ядерного деления в электрическую пока не найдены и еще нельзя обойтись без промежуточного звена — тепловой машины. Поскольку ее к.п.д. всегда меньше единицы, "непереработанное" тепло нужно куда-то девать. На земле, в воде и в воздухе с этим проблем нет. В космосе только один путь — тепловое излучение. Таким образом, космическая АЭС не может обойтись без "холодильника-излучателя". Поскольку плотность излучения пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры излучающей поверхности, температура холодильника-излучателя должна быть как можно более высокой. Тогда удастся сократить площадь излучающей поверхности и, соответственно, массу энергетической установки. У нас появилось предложение использовать "прямое" преобразование ядерного тепла в электричество, без турбины и генератора, что казалось более надежным при длительной работе при высоких температурах.

Из литературы мы знали о работах Абрама Федоровича Иоффе — пионера в исследованиях полупроводников в СССР. Мало кто теперь помнит о разработанных им источниках тока, применявшихся в годы Отечественной войны. Тогда не один партизанский отряд имел связь с "Большой землей" благодаря "керосиновым ТЭГам" — термоэлектрогенераторам Иоффе. "Венец" из ТЭГов (он представлял собой набор полупроводниковых элементов) надевался на мощную керосиновую лампу, а его провода присоединялись к приемно-передающей аппаратуре. "Горячие концы" элементов нагревались пламенем керосиновой лампы, холодные — охлаждались воздухом. Поток тепла, протекая через полупроводник, порождал электродвижущую силу, тока хватало для сеанса приема, а в промежутках между сеансами ТЭГ заряжал аккумулятор, чтобы обеспечить передачу. Когда через десять лет после Победы мы побывали на московском заводе ТЭГов, оказалось, что они еще находят сбыт. У многих деревенских жителей были тогда экономичные радиоприемники "Родина" на лампах прямого накала, работавшие от батарей. Вместо них зачастую применяли иоффовские ТЭГи.

Беда "керосинового" ТЭГа — низкий к.п.д. (около 3,5 %) и невысокая предельная температура (~ 350 К). Но простота и надежность системы привлекали разработчиков. Так, полупроводниковые преобразователи на основе карбида кремния, разработанные группой И.Г. Гвердцители в Сухумском физико-техническом институте АН Грузии нашли применение в космических ядерно-энергетических установках типа "БУК".

В свое время А.Ф. Иоффе предложил также и "вакуумный", термоэмиссионный преобразователь — диод в вакууме. Горячий катод испускает электроны с максвелловским спектром энергий. Часть их, преодолевающая потенциал анода, совершает работу в нагрузке.

От подобной системы ожидался значительно более высокий к.п.д. (до 20–25 %) при рабочей температуре выше 1000 К. Кроме того, в отличие от полупроводника, вакуумный диод не боится нейтронов и его можно совместить с ядерным реактором (полупроводниковый преобразователь приходится выносить из реактора и использовать теплоноситель для передачи к нему тепла). Однако оказалось, что осуществить идею вакуумного преобразователя практически невозможно. Как и в ионном двигателе, препятствием является объемный заряд, но на этот раз не ионов, а электронов. А.Ф. Иоффе предполагал использовать в вакуумном преобразователе микронные зазоры между катодом и анодом, что в условиях высоких температур и термических деформаций весьма затруднительно. Вот тут-то и пригодился цезий: один ион цезия, полученный за счет поверхностной ионизации на катоде компенсирует объемный заряд около 500 электронов. По сути, заполненный цезием вакуумный преобразователь Иоффе — "обращенный" ионный двигатель. Физические процессы в них близки.

Одним из следствий работ Обнинска по термоэмиссионным преобразователям было создание выдающимся технологом Владимиром Александровичем Малыхом и серийный выпуск в его отделении тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) для реактора-преобразователя "Топаз" в виде последовательно соединенных преобразователей — "гирлянд" (рис. 4). Такие "ТВЭЛы" давали до 30 вольт — раз в сто больше, чем одноэлементные преобразователи, созданные "конкурирующими" организациями — ленинградской группой М.Б. Барабаша и позднее — группой Института атомной энергии. Это позволяло "снимать" с реактора-преобразователя в сотни раз большую мощность. Однако надежность систем, содержащих тысячи термоэмиссионных элементов, вызывала опасения. Поэтому мы обратили внимание и на классическое машинное, паротурбинное преобразование ядерного тепла в электричество.

В дальних космических полетах турбогенераторы должны работать год-два, а то и несколько лет. Чтобы уменьшить износ, скорость вращения турбины нужно сделать по возможности более низкой. С другой стороны, турбина работает эффективно, если скорость молекул пара близка к скорости ее лопаток. Поэтому первоначально рассматривалось применение самого тяжелого — ртутного пара. Но нас остановила интенсивная радиационно-стимулированная коррозия железа нержавеющей стали в ртути. Без излучения ртуть десятки лет кипит в корпусах пароструйных высоковакуумных насосов из обычной стали. Но в условиях плотных радиационных полей коррозия в ртутном теплоносителе за две недели "съела" оболочки из арможелеза плутониевых ТВЭЛ быстрого реактора Аргоннской лаборатории ("Клементина", США, 1949 г.) и оболочки из нержавеющей стали 1X18Н9Т аналогичного реактора в ЛФЭИ (БР-2, СССР, 1956 г.).

Заманчивым оказался калиевый пар. Быстрый реактор с керамическим топливом (из окиси урана), охлаждаемый кипящим калием, аналогичный исследовательскому реактору с натриевым охлаждением БР-5 ЛФЭИ, лег в основу разработанной энергетической установки космического корабля малой тяги. Калиевый пар вращал турбоэлектрогенератор. Такой "машинный" способ преобразования позволял получить к.п.д. до 40 %, тогда как реальные термоэмиссионные установки имели всего

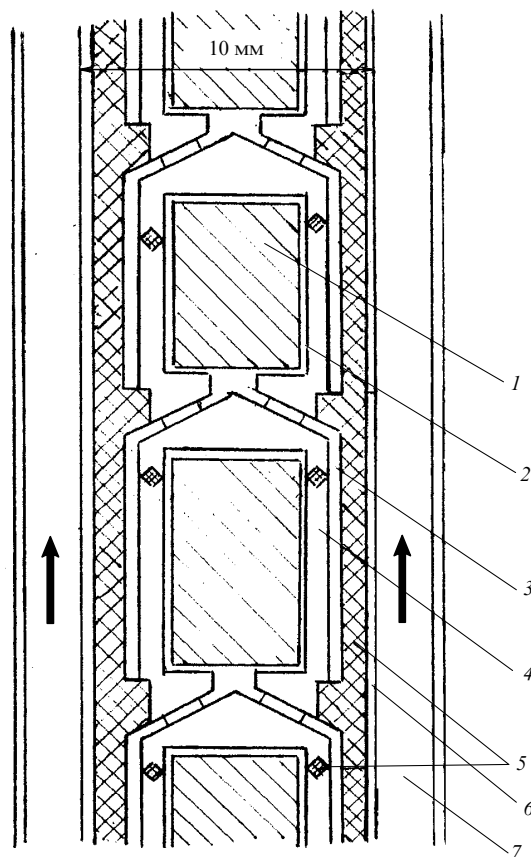


Рис. 4. Схема термоэмиссионного электрогенерирующего канала ("гирлянды" В.А. Малыха): 1 — сердечник из окиси обогащенного урана; 2 — катод (молибден, вольфрам); 3 — анод (ниобий); 4 — вакуумный зазор с парами цезия; 5 — изоляция (окись бериллия); 6 — корпус (сталь); 7 — теплоноситель (натрий-калий).

около 7%. Однако АЭС с машинным преобразованием не получили развития. Дело завершилось выпуском подробного отчета, по сути — "физической записки" к техническому проекту космического корабля малой тяги для полета с экипажем к Марсу. Сам проект так и не был разработан.

В дальнейшем, я думаю, просто пропал интерес к космическим полетам с использованием ракетных ядерных двигателей. После трагической смерти Сергея Павловича Королева поддержка работ ФЭИ по системам малой тяги заметно ослабла. ОКБ-1 возглавил Валентин Петрович Глушко, который не проявлял интереса к подобным системам. Дмитрий Иванович Блохинцев обосновался в Дубне, однако работы по созданию космических АЭС с прямым преобразованием ядерного тепла в электричество еще продолжались — теперь уже для создания источников питания мощных радиотехнических спутников (космических радиолокационных станций и телетрансляторов) вплоть до начала перестройки.

С 1970 г. по 1988 г. в космос было запущено около 30 радиолокационных спутников с ядерными реакторами и полупроводниковыми преобразователями Гвердцители (установки "БУК", рис. 5) и два — с термоэмиссионными реакторами-преобразователями "Топаз" (рис. 6).

БУК, по сути, представлял собой ТЭГ Иоффе, только вместо керосиновой лампы в качестве источника тепла в нем использовался быстрый ядерный реактор мощ-

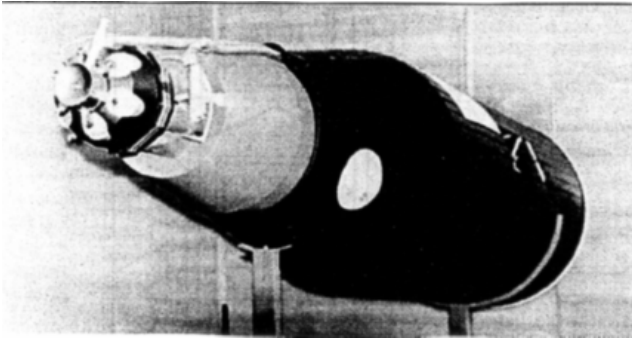


Рис. 5. Ядерно-энергетическая установка "Бук" с полупроводниковым реактором-преобразователем для радиолокационных спутников.

ностью до 100 кВт. Полная загрузка высокообогащенного урана составляла около 30 кг. Передача тепла от реактора к преобразователям осуществлялась циркулирующей эвтектикой натрий-калий. Время работы БУКА — 1–3 месяца. Если установка отказывала, ее переводили на орбиту длительного существования высотой ~ 1000 км. За почти 20 лет запусков было три случая падения спутника на Землю — два в океан и один на сушу, в Канаду, в окрестности Большого Невольничьего озера. Туда упал "Космос 954", запущенный 24 января 1978 г. Он проработал 3,5 месяца. Урановые элементы спутника полностью сгорели в атмосфере. На земле нашли лишь остатки бериллиевого отражателя и полупроводниковых батарей (эти данные приведены в совместном отчете атомных комиссий Канады и США об операции "Утренний свет").

В термоэмиссионной ядерно-энергетической установке "Топаз" использовался реактор на тепловых нейтронах мощностью до 150 кВт. Полная загрузка обогащенного урана была значительно меньше, чем у БУКА — около 12 кг. Основой реактора были тепловыделяющие электрогенерирующие элементы (гирлянды), разработанные и изготовленные отделением В.А. Малыха. Они представляли собой цепочку термоэлементов: катод — "наперсток" из вольфрама или молибдена, заполненный окисью обогащенного урана, анод — многослойная трубка из ниобия, охлаждаемая натрий-калием. Температура катода достигала 1650 К, электрическая мощность реактора — 10 кВт.

Первый летный образец — спутник "Космос 1818" с установкой "Топаз" вышел на орбиту 2 февраля 1987 г. и безотказно проработал полгода до исчерпания запасов цезия. Второй такой спутник, "Космос 1876", был запущен через год и проработал почти вдвое дольше.

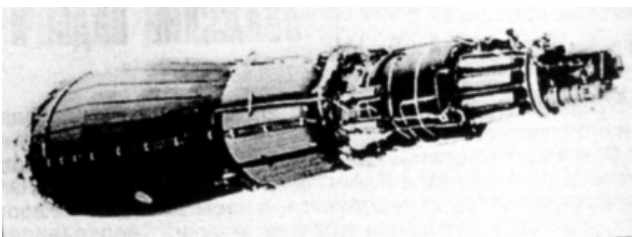


Рис. 6. Ядерно-энергетическая термоэмиссионная установка "Топаз".

Главным разработчиком "Топазов" было ОКБ ММЗ "Союз", возглавлявшееся С.К. Туманским (бывшее КБ конструктора авиамоторов А.А. Микулина).

Термоэмиссионные реакторы-преобразователи, созданные под научным руководством ЛФЭИ — крупнейшее достижение российской науки и техники, которому не было аналогов.

Успех "Топазов" стимулировал разработку ряда проектов с реакторами-преобразователями, в частности установки с электрической мощностью до 500 кВт на основе реактора с литиевым охлаждением. Его создавали совместно ЛФЭИ и НПО "Энергия", где работу возглавлял старейший ракетчик, сотрудник С.П. Королева Михаил Васильевич Мельников. В заключение не могу не поделиться яркими впечатлениями о работах его отделения по созданию лунного двигателя — двигателя на основе химического топлива для третьей ступени ракеты, предназначенной для облета Луны и посадки на ней. Это было в конце 1950-х годов в Подлипках (ныне г. Королев) на площадке № 3 ОКБ-1. Огромный цех площадью около 3000 м² был уставлен десятками письменных столов с трофейными немецкими шестилучевыми шлейфными осциллографами с записью на 100-миллиметровую рулонную бумагу (сегодня хватило бы одного персонального компьютера...). У передней стены цеха — стенд, где монтируется камера сгорания двигателя. К осциллографам идут тысячи проводов — от датчиков скорости газов, давления, температуры, тензодатчиков и т.п. День начинается в 9.00 с зажигания двигателя. Он работает около 20 минут. Сразу после остановки бригада механиков первой смены разбирает его, тщательно осматривает и обмеряет камеру сгорания. Одновременно бригада расчетчиков анализирует осциллографические записи. Вырабатываются рекомендации по изменениям конструкции и режима работы. Во вторую смену конструкторы, инженеры и рабочие мастерских вносят рекомендованные изменения, а в третью на стенде уже монтируется новая камера сгорания с системой диагностики. Ровно через сутки в 9.00 — следующий сеанс. И так без выходных: недели, месяцы, годы. Более трехсот вариантов двигателя за год. Таков был стиль отработки двигателей химических ракет, которым предстояло работать 20–30 минут. Ядерно-энергетические установки и ионно-реактивные двигатели должны непрерывно работать месяцы и годы. Тем самым и полномасштабные испытания материалов и конструкций должны продолжаться соизмеримое время. Соответственно, выбор радиационно- и коррозионно-стойких материалов и оптимальных конструкций занимает не один год. Впечатления о мельниковском "цехе" не пропали даром. Они явились стимулом разработкам предложений по форсированным испытаниям материалов ядерной техники, вплоть до исследований радиационной стойкости конструкционных материалов в сфокусированных пучках энергичных протонов от сильноточных ускорителей средних энергий — мезонных фабрик [15].

5. Системы с большой тягой

Этим направлением мне не довелось плотно заниматься, поэтому ограничусь лишь кратким обзором [14].

На начальном этапе космической ядерной программы ЛФЭИ совместно с КБ В.Н. Челомея разраба-

тывал крылатую атомную ракету "КАР". Это направление развивалось недолго и завершилось расчетами и испытаниями элементов двигателя, разработанных в отделении В.А. Малыха. Речь шла о низколетящем беспилотном самолете с прямоточным воздушно-реактивным ядерным двигателем, несущем ядерную боеголовку (своего рода ядерный аналог "жужжащего клопа" — немецкой V-1). Система должна была стартовать с помощью твердотопливных ракетных ускорителей. После выхода на заданную скорость тяга создавалась атмосферным воздухом, нагреваемым за счет цепной реакции деления в сотах из окиси бериллия, пропитанной обогащенным ураном.

Основное направление в разработке ракет с большой тягой — термические ядерные ракеты. У нас это были баллистические атомные ракеты ("БАР") с радиусом действия несколько тысяч километров (совместный проект ЛФЭИ и ОКБ-1), в США — аналогичные системы типа "КИВИ". Двигатели испытывались на полигонах под Семипалатинском и в Неваде. В такой системе водород нагревается в твердотопливном реакторе до высоких температур, атомизируется и в таком виде истекает из ракеты. Скорость истечения повышается при этом более чем вчетверо по сравнению с водородной химической ракетой. Расчетная температура водорода ~ 3000 К.

В НИИ-1, научным руководителем которого был Мстислав Всеволодович Келдыш (тогда Президент Академии наук СССР), отдел В.М. Иевлева занимался, с участием ЛФЭИ, совсем уж фантастической схемой — газофазным реактором, в котором цепная реакция протекает в газовой смеси урана и водорода. Из такого реактора водород истекает еще раз в десять быстрее, чем из твердотопливного, уран же сепарируется и остается в активной зоне. Одна из идей предполагала использование центробежной сепарации, когда горячая газовая смесь "закручивается" поступающим холодным водородом, в результате чего водород и уран разделяются, как в центрифуге. Иевлев пытался, таким образом, прямо воспроизвести процессы в камере сгорания химической ракеты, используя в качестве источника энергии не теплоту сгорания топлива, а цепную реакцию деления. Но вопрос истечения чистого водорода с малой примесью урана так и остался нерешенным, не говоря уж о проблемах удержания горячих газовых смесей при давлениях в десятки атмосфер.

Работы ЛФЭИ по баллистическим атомным ракетам завершились в 1969–1970 гг. "огневыми испытаниями"

на Семипалатинском полигоне прототипа ядерного ракетного двигателя с твердотопливными элементами. Он создавался в кооперации с воронежским КБ А.Д. Конопатова, Московским НИИ-1 и рядом технологических групп. Основу двигателя с тягой 3,6 тонны составлял ядерный реактор ИР-100 с топливными элементами из твердого раствора карбида урана и карбида циркония. Температура водорода достигала 3000 К при мощности реактора 170 МВт.

Благодарности. С признательностью [И.И. Бондаренко], [С.Я. Лебедеву] и [И.П. Стаханову] за участие в работах, П.Л. Кириллову за предоставленные материалы, Л.Б. Безрукову, [В.Н. Глазанову], Н.К. Гельмиза и В.В. Орлову за помощь и плодотворные дискуссии, Константину Андесу за техническую поддержку.

Список литературы

1. Ставиский Ю Я и др. *Радиационный захват быстрых нейтронов* (М.: Атомиздат, 1970)
2. Кононов В Н, Полетаев Е Д, Прокопец Ю С, Метлев А А, Ставиский Ю Я *Атомная энергия* **32** (1) 85 (1972)
3. Гончаров Г А *УФН* **166** 1095 (1996)
4. Феоктистов Л П *Оружие, которое себя исчерпало* (М.: РК ВМПЯВ, 1999)
5. Steiner E "Possibilities of electrical space propulsion", in *Bericht über den V Internationalen Astronautischen Kongress, Innsbruck, 5–7 August 1954* (Ed. F Hecht) (Wien: Springer, 1954) p. 100
6. Kingdon K H, Langmuir I *Phys. Rev.* **21** 380 (1923)
7. Бурсиан В Р, Павлов В И *Журн. Русск. физ.-хим. общ.* **55** 71 (1923)
8. Ставиский Ю Я и др. *ЖТФ* **29** 962 (1959)
9. Лебедев С Я, Ставиский Ю Я, Бондаренко И И, Маев С А, Стаханов И П, Стумбур Э А *ЖТФ* **31** 1202 (1961)
10. Ставиский Ю Я, Лебедев С Я *ЖТФ* **30** 1222 (1960)
11. Лебедев С Я, Ставиский Ю Я *ЖТФ* **32** 1473 (1962)
12. Лебедев С Я, Ставиский Ю Я, Шутько Ю В *ЖТФ* **34** 1101 (1964)
13. Бондаренко И И и др. "Теоретические и экспериментальные исследования, связанные с разработкой термоэмиссионных реакторов-преобразователей", в сб. *Доклады Третьей международной конф. по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1964* (М.: Атомиздат, 1966)
14. Пупко В Я *История работ по летательным аппаратам на ядерной энергии в ФЭИ им. Лейпунского* (Обнинск: Изд-во ФЭИ, 2002)
15. Ставиский Ю Я, в сб. *Программа экспериментальных исследований на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР: Тр. Всесоюз. семинара, 7–9 дек. 1977 г., Звенигород* (Науч. ред. А С Ильинов, Э А Коптелов) (М.: ИЯИ АН СССР, 1979) с. 37

Nuclear power for space mission

Yu. Ya. Stavisky

*Joint Institute for Nuclear Research,
141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation
Tel. + 49 (0) 961 6-34-15-05. Fax + 49 (961) 6-28 56
E-mail: stavss@freenet.de*

A brief review is given of the 1952–1988 research at the A I Leipunskii Institute of Physics and Power Engineering (Obninsk) on the use of nuclear fission chain reactions in developing space vehicles and their onboard power systems. The research was carried out on the initiative of USSR Academy of Sciences Corresponding Member D I Blokhintsev, head of the Institute, and enlisted the active support of Academician S P Korolev.

PACS numbers: **01.65. + g, 28.50. – k**

Bibliography — 15 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **177** (11) 1241–1249 (2007)

DOI: 10.3367/UFNr.0177.200711f.1241

Received 8 June 2007, revised 28 August 2007

Physics – Uspekhi **50** (11) (2007)