

P13-2007-71

Ю. Я. Стависский

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ

Направлено в журнал «Успехи физических наук»

Ставиский Ю. Я.

P13-2007-71

Ядерная энергия для космических полетов

Представлен краткий обзор малоизвестных работ, проведенных в Физико-энергетическом институте им. А. И. Лейпунского в 1955–1975 гг., по разработке аппаратов для космических полетов и энергообеспечению 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.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Stavisky Yu. Ya.

P13-2007-71

Nuclear Energy for Space Flights

A brief review of little-known works carried out in the State Research Centre of Russian Federation Institute of Physics and Power Engineering in 1955–1975 to construct space vehicles and power supply equipment for space flights on the basis of chain reaction of nuclear fission is presented. The works have been carried out at the initiative of the Director of the Institute, Corresponding Member of AS USSR D. I. Blokhintsev and with the active support of Academician S. P. Korolyov.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

*К столетию Дмитрия Ивановича Блохинцева
(11.01.1908–27.01.1979), директора Физико-
энергетического института
им. А. И. Лейпунского, Обнинск, 1950–1956 гг.*

ВВЕДЕНИЕ

В 1911 г., наблюдая рассеяние α -частиц в золоте, Эрнст Резерфорд открыл ядро как «точечное» сосредоточение массы атома. Отсюда для любого мало-мальски образованного человека следовало, что вся энергия вещества содержится в ядрах и лишь за ничтожную ее часть отвечают электронные оболочки атомов — за собственно «атомную» энергию. . . Недаром великий фантаст и социолог Герберт Уэллс уже в 1915 г., через четыре года после открытия Резерфорда, в разгар первой мировой войны публикует свою книгу «Освобожденный мир», где описывает атомную войну. Технические детали, конечно, достаточно наивны — летчик «летающей этажерки», что-то вроде «Фармана», берет в руки атомную бомбу, перекусывает зубами некую трубку и бросает бомбу за борт. Важен результат — Москва, Нью-Йорк, Петербург, Лондон, Берлин, Вашингтон, Сан-Франциско и другие крупные города мира превращены в радиоактивные развалины, обнесенные колючей проволокой. . .

Дмитрий Иванович Блохинцев с юных лет проникся идеями завоевания космоса. Он постоянно переписывался с К. Э. Циолковским и, подобно Уэллсу, рано почувствовал важность ядерной энергии для космических полетов — ведь ее энергоемкость в несколько миллионов раз превышает энергоемкость лучших химических топлив. Я близко 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, ФЭИ), куда в том же июне получил направление и я после окончания инженерно-физического факультета Московского механического института (ММИ). Я убежден, что его жизненный выбор — пойти на физфак МГУ, заняться физикой — был обусловлен именно его «космическими» интересами.

В 1945 г., после Хиросимы, атомной бомбардировки, направленной вроде против японцев, а по сути — чтобы продемонстрировать русским всю мощь ядерного оружия, началось интенсивное развитие советского «атомного проекта». Для подготовки кадров в этой области науки и техники в Московском

механическом институте Министерства боеприпасов (ММИ) 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 крупные 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 для всего потока включала полный набор сугубо технических предметов, как в лучших технических вузах: черчение, сопротивление материалов, металловедение, технология обработки материалов, расширенный курс аналитической химии. Теорию механизмов и машин читал «сам» Иван Иванович Артоболевский. Но наибольшее впечатление на нас (на простых ребят, не на будущих академиков вроде Ю. М. Кагана или Н. Г. Басова) 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 задачки 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». МИФИ превратился со временем в гигантский муравейник с узкой специализацией направлений.

Александр Ильич Лейпунский, один из «первых» учеников Абрама Федоровича Иоффе, основателя советской школы технической физики («первым среди равных», любимым был Игорь Васильевич Курчатов), был направлен Иоффе на Украину и создал там, в Харькове, в 1928 г. (тогда — в столице УССР) совместно с П. Л. Капицей и И. В. Обреимовым Украинский (Харьковский) физико-технический институт — УФТИ (ХФТИ). С начала тридцатых он работает у Резерфорда в Кембридже. В 1934 г. экспериментально подтверждает существование нейтрино, предложенного Паули, чтобы объяснить сохранение энергии при β -распаде. Соответствующая статья была направлена лордом Резерфордом в редакцию журнала «Philosophical Magazine» в 1936 г. Возвратившись в Союз и отсидев 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), открывший ядро, до последних своих лет говорил, что ядерная энергия практически неисчерпаема, но только в отдельных актах ядерных ре-

акций. В «макроскопических» же количествах она никогда не будет доступна для человеческой практики. После открытия в 1932 г. нейтрона Джеймсом Чадвиком, его учеником, он перестал говорить на эту тему. . .

С середины 1945 г. А. И. Лейпунский — научный руководитель 9-го управления МВД, возглавлявшегося Авраамием Павловичем Завенягиным. Фактически он и Игорь Васильевич Курчатов первыми стояли у истоков нашего «атомного проекта» — Курчатов как общий его научный руководитель с февраля 1943 г., Лейпунский — после письма Манфреда фон Арденне Сталину 15 мая 1945 г. — как научный руководитель 9-го управления МВД. Ему были 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 «В» под Москвой, на станции Обнинское (ныне — обнинский Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского), в создание и развитие которого АИЛ (так мы между собой называли Александра Ильича) внес решающий вклад, и, наконец, лаборатория «Д» на Урале, недалеко от Касли (ныне — ВНИИТФ, Всероссийский НИИ технической физики, Снежинск). Манфред фон Арденне, известный немецкий инженер-физик, в гитлеровские времена руководил атомным проектом в министерстве связи Германии. В своем письме Сталину 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, работавшего в УФТИ у А. И. Лейпунского с 1933 по 1937 г., почти три года просидевшего как «немецкий шпион, притворившийся антифашистом» и обмененный 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, держал до конца войны свои заметки в сейфе . . .

В ФЭИ А. И. Лейпунский развил направление реакторов на быстрых нейтронах с расширенным воспроизводством ядерного горючего и жидкометаллическим охлаждением («быстрых бридеров») для большой энергетики. Работы начались в 1949 г. С лета 1950 г. мне довелось заниматься проблемами воспроизводства (измерением эффективных сечений захвата нейтронов в ядерном горючем и конструкционных материалах, макроскопическими экспериментами [1, 2]), пуском и физическими исследованиями прототипов. До сих пор быстрые реакторы — единственная из мирных технологий России, где мы еще «впереди планеты всей». Ее последний вариант — программа БРЕСТ, развиваемая ближайшим учеником и последователем АИЛа Виктором Владимировичем Орловым в НИКИЭТ (Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежала), — пока единственный путь создания в обозримое время дешевой, безопасной и экологически чистой

большой энергетики с неограниченными ресурсами. Все другие поползновения пока безнадежны. . .

1. РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ФЭИ (ОБНИНСК)

Д. И. Блохинцев, преподававший в конце 1940-х гг. основы квантовой механики на физфаке МГУ, заметил и пригласил на работу в ФЭИ 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 вынужден заниматься его тематикой — быстрыми бридерами.

Когда директором стал Д. И. Блохинцев, вокруг Бондаренко сложилась инициативная группа молодых ученых, которых объединила проблема использования ядерной энергии в космосе. 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 (для минимизации их веса). Первоначально не было адекватных ЭВМ-программ для расчетов распределения тепловыделения по радиусу активных зон таких реакторов и мне пришлось проводить соответствующие расчеты методом Монте-Карло с использованием ручной рулетки для того чтобы проследить судьбу нейтронов, рожденных в активной зоне реактора. Э. А. Стумбур проводил уже детальные измерения плотности энерговыделения с помощью импульсных ионизационных камер со слоями урана-235 в реакторных стендах с различными толщинами бериллиевого отражателя (от 5 до 20 см). Важно было исключить возможность перегрева крайних, прилегающих к отражателю, тепловыделяющих элементов активной зоны. На В. Я. Пупко лежали ядерные и теплофизические расчеты различных схем ядерных реактивных двигателей, а впоследствии, когда он стал заведующим отделением космической техники ФЭИ, большая организационно-техническая работа. Я, прирожденный экспериментатор, «мастер-ломастер», разобравший все часы в отцовском доме, выбрал себе эксперименты по ракетным двигателям «малой тяги» (тяга в них создается своеобразным ускорителем ионов — ионным движителем, который должен снабжаться электроэнергией от космической АЭС). По сути это было продолжением работ по энергетическим быстрым реакторам. Все работы 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: конкуренция — движущая сила развития.

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 гг., в разгар «холодной» войны, средств не жалели только на военные цели. 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 выступал 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, тесно связана с именем Андрея Дмитриевича Сахарова. В конце 1940-х гг. 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 [3] до Сахарова. Для расчетов он уже использовал ЭВМ и смог понять, что больше 500 кт (в толовом эквиваленте) с «будильника» (слойки) не возьмешь. Этого ему было мало, он хотел создать «абсолютное» оружие неограниченной мощности 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 тогдашний глава Минсредмаша (бывший министр танковой промышленности) В. А. Малышев и заставил, не выходя из кабинета, оценить параметры бомбы следующего поколения. Андрей Дмитриевич дал весовые характеристики нового, значительно более мощного заряда [4]. Докладная Сахарова легла в основу постановления ЦК КПСС и Совета Министров, обязавшего С. П. Королева разработать под этот заряд ракету-носитель. Именно такая ракета Р-7 под названием «Восток» и вывела на орбиту искусственный спут-

ник 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 иным путем. . .

К сожалению, в 1956 г. ДИ был вынужден оставить эту деятельность и возглавить, по решению секретариата ЦК КПСС, создание международного научного центра — Объединенного института ядерных исследований в Дубне, чтобы было что противопоставить ЦЕРН. 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, сохранив сформированные Блохинцевым традиции, — систематическое обсуждение и принятие планов работ и их финансирования на программных комитетах и ежегодных ученых советах. . .

Программа развития космических аппаратов в ФЭИ включала следующие основные направления.

1. Электрореактивные двигатели (ЭРД) с высокой скоростью истечения и, соответственно, с малой тягой.
2. Ядерно-энергетические установки для питания ЭРД, космических радиолокационных станций (РЛС) 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.
3. Низколетящая крылатая атомная ракета (КАР) с прямоточным воздушно-реактивным двигателем — совместно с КБ В. Н. Челомея.
4. Баллистическая атомная ракета (БАР) — совместно с ОКБ-1 С. П. Королева.
5. Разработка совместно с Московским НИИ-1 и Воронежским КБ А. Д. Конопатова и рядом технологических групп и испытания на полигоне прототипа двигателя баллистической атомной ракеты (БАР).
6. Работы, проводившиеся совместно с отделом В. М. Иевлева (НИИ-1), по осуществлению газофазного уран-водородного реактора.

2. ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНЫЕ ДВИЖИТЕЛИ (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):

$$v = \sigma \ln M_n / M_k,$$

где 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 Луну. Продукт сгорания водорода — вода, чей молекулярный вес сравнительно низок и скорость истечения оказывается примерно в 1,3 раза выше, чем при сгорании углеводородного топлива. Этого оказывается достаточно, чтобы спускаемый аппарат с космонавтами достиг поверхности Луны и затем вернул космонавтов на орбиту ее искусственного 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 не лишилось материальной и духовной поддержки и 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 массы ракеты, и 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/с. В то же время применение скоростей истечения, больших 200 км/с, 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 малые паразитные потери рабочего вещества.

Скорости истечения в указанном диапазоне при реальных уже сегодня удельных мощностях АЭС позволят эффективно решать основные задачи космических полетов в пределах Солнечной системы. Для полетов к звез-

дам 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 ЭС. Пока нельзя даже представить, на каких физических процессах они могли бы быть основаны. . .

Проведенные расчеты показали, например, что во время великого противостояния Земли и Марса можно за один год осуществить полет ядерного космического корабля малой тяги с экипажем к Марсу и вернуть его на орбиту искусственного спутника Земли. Полная масса такого корабля около 5 т (включая запас рабочего тела — цезия — 1,6 т), масса АЭС мощностью ~ 3 МВт порядка 3 т, реактивная тяга определяется 2,5-МВт пучком ионов цезия с энергией 7 кэВ, что соответствует скорости истечения ~ 100 км/с. 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 в литературе рассматривалось несколько путей создания ЭРД — ускорение ступков 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 поверхностная ионизация цезия на средних и тяжелых металлах (молибден, тантал, вольфрам).

Еще в 20-х гг. прошлого века Ирвинг Лэнгмюр открыл явление поверхностной ионизации щелочных металлов [6]. При испарении атома цезия, например, с поверхности металла с работой выхода электронов, превышающей потенциал ионизации цезия, последний практически в 100 % случаев теряет слабосвязанный электрон и оказывается однократно заряженным ионом, подобным атому инертного газа. . . Именно поверхностная ионизация цезия на, например, вольфраме и есть тот физический процесс, который позволяет создать ионный движитель с почти 100%-м использованием рабочего тела и энергетическим КПД, близким к единице. Поскольку Лэнгмюр проводил эксперименты с микротоками и на тонких проволочках, мы решили провести эксперимент 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.

Если рассматривать плоский эмиттер ионов (вольфрамовую пластину, например), необходим также ее подогрев до температур, 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 эмиттера происходит покрытие ее цезием, работа выхода падает, в пределе — до потенциала ионизации цезия

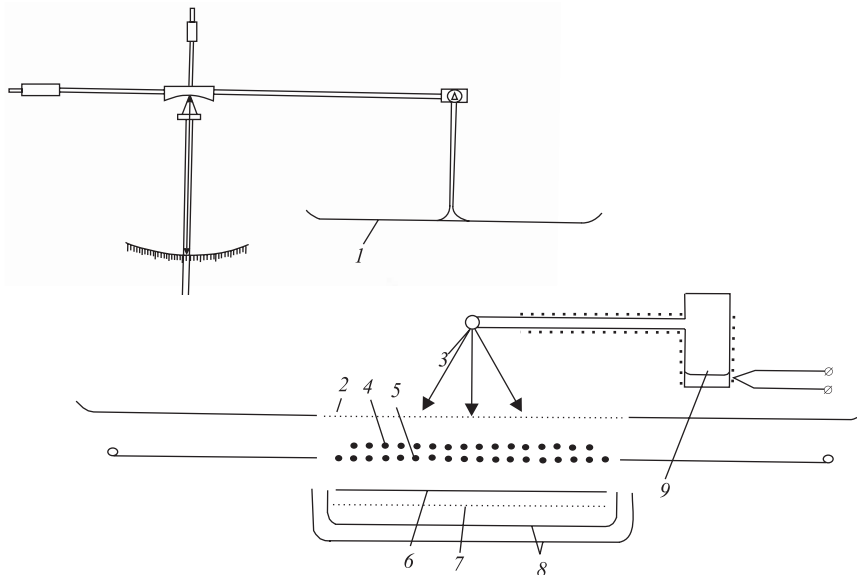


Рис. 1. Схема модели ионного движителя: 1 — подвижная система для измерения тяги; 2 — экранирующая сетка; 3 — отверстие для подачи паров цезия; 4 — сетка, эмитирующая электроны; 5 — запирающая сетка; 6 — поверхность, эмитирующая ионы; 7 — нагреватель эмиттера; 8 — тепловые экраны; 9 — испаритель цезия

($\sim 1,6$ 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 движителе. Для плоского эмиттера и, соответственно, плоской ускоряющей системы с сетками предельная удельная тяга F (на 1 см^2 эмиттера), ограниченная объемным зарядом пучка, составит (по закону «трех вторых»)

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

Здесь v/d — средняя напряженность электрического поля, кВ/см в ускоряющем промежутке d .

Но объемный заряд не только ограничивает плотность пучка ионов. Он еще препятствует выводу пучка в открытый космос. Влияние объемного заряда на движение потока частиц, имеющих заданную начальную скорость

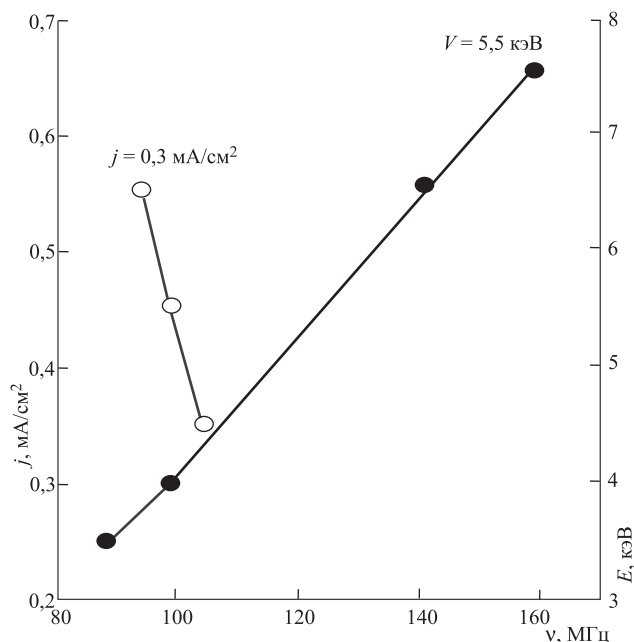


Рис. 2. Зависимость частоты от плотности тока и от энергии ионов

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 , пропорциональной $1/l^2$, т. е. для вывода пучка в открытый космос необходима компенсация его объемного заряда электронами. Одновременно решился 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 — вольфрамовая сетка с потенциалом -3 кВ, запирающая электронный ток со второй сетки — эмиттера электронов компенсации, поддерживаемой при нулевом потенциале, на пластину-эмиттер ионов. Для комплексной проверки физических процессов в трехэлектродной схеме, для получения опыта работы с цезием в атмосфере и в высоком вакууме при высоких напряжениях схема была воспроизведена «в металле» и изучена при вакууме $\sim 10^{-6}$ (рис. 1, [8]).

Нагрев пластины-эмиттера ионов осуществлялся излучением вольфрамовой спирали, источником пучка атомов цезия являлась молекулярная пушка,

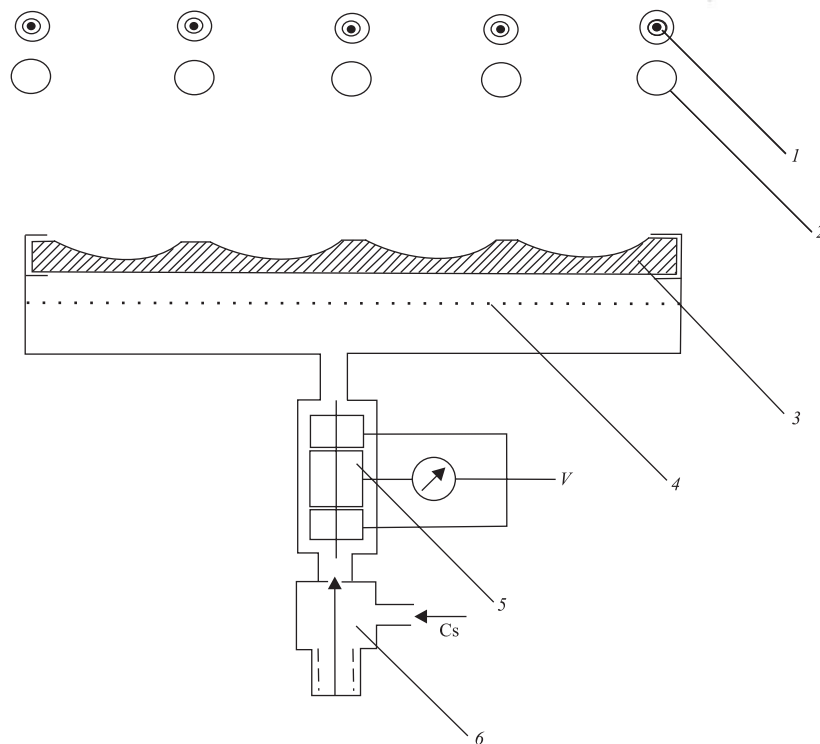


Рис. 3. Схема модели ионного движителя с пористым эмиттером: 1 — компенсирующая сетка (набор оксидных катодов); 2 — запирающая сетка (стальные трубки, охлаждаемые воздухом); 3 — эмиттер (пластинка из пористого вольфрама); 4 — подогреватель эмиттера; 5 — измеритель давления паров цезия по току поверхностной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

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 плавленый 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 в процессе

взаимодействия электронов, эмитируемых второй сеткой, с объемным зарядом ионного пучка возникает колебательное движение электронов. Сопутствующее интенсивное микроволновое излучение было обнаружено с помощью обычных промышленных волномеров. Зависимость его частоты от плотности тока и ускоряющего напряжения оказалась в хорошем согласии с расчетами группы И. П. Стаханова [9] (рис. 2).

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

Изучалась степень ионизации цезия при его прохождении через пористые эмиттеры из вольфрама и молибдена (см., например, [10]). Применение таких эмиттеров позволяло исключить большие потери цезия, имевшие место при внешней его подаче от молекулярной пушки. Исследовалось катодное распыление конструкционных материалов в пучке ускоренных ионов цезия [11]. Изучались ионная оптика методами моделирования на проводящей бумаге и конструкции моделей. Одна из последних моделей с пористым эмиттером из вольфрама, с первой сеткой из стальных трубок, охлаждаемых воздухом, со второй сеткой с оксидными катодами (рис. 3), созданная в 1965 г., давала «тягу» около 20 г. при токе ионного пучка 20 А, имела коэффициент передачи энергии пучку ионов около 90 % и коэффициент использования цезия $\cong 95$ %.

3. 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 КПД 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 появилась идея 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, проходя 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 находили сбыт. У многих деревенских жителей были тогда экономичные радиоприемники «Родина» на лампах прямого накала, работавшие от батарей. Вместо них зачастую применяли ТЭГи.

Беда керосинового ТЭГа — низкий КПД (около 3,5 %) и невысокая предельная температура (~ 350 К). Но простота и надежность 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 и «вакуумный», термоэмиссионный преобразователь — диод в вакууме. Горячий катод испускает электроны с максвелловским спектром энергий. Часть их, преодолевая потенциал анода, совершает работу в нагрузке. От подобной системы прибора ожидался значительно более высокий КПД (20–25 %) при рабочей температуре выше 1000 К. Кроме того, в отличие от полупроводника вакуумный диод не боится нейтронов и его можно совместить с 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 [10].

Одним из следствий работ ФЭИ по термоэмиссионным преобразователям было создание Владимиром Александровичем Малыхом, выдающимся технологом, и серийный выпуск в его отделении тепловыделяющих элементов для реактора-преобразователя «Топаз» в виде «гирлянд» (рис. 4). Они давали до 30 В — раз в сто больше, чем одноэлементные преобразователи, созданные «конкурирующими» организациями: ленинградской группой М. Б. Барабаша

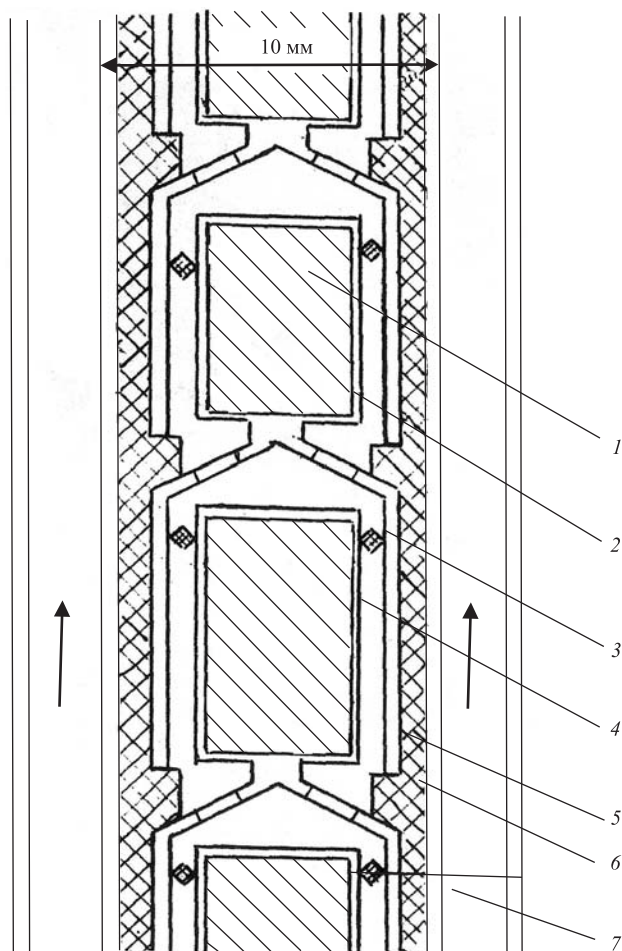


Рис. 4. Схема термоэмиссионного электрогенерирующего канала («гирлянды» В. А. Малыха): 1 — сердечник из окиси обогащенного урана; 2 — катод (молибден, вольфрам); 3 — анод (ниобий); 4 — вакуумный зазор с парами цезия; 5 — изоляция (окись бериллия); 6 — корпус (сталь); 7 — теплоноситель (натрий-калий)

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 годами, 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 испугала интенсивная радиационно-стимулированная коррозия железа и нержавеющей стали в ртути. За две недели коррозия «съела» оболочки из армо-железа плутониевого быстрого реактора Аргоннской лаборатории («Клементина», США, 1949 г.) и оболочки из нержавеющей стали 1X18H9T аналогичного реактора в ФЭИ (БР-2, СССР, 1956 г.). Заманчивым оказался калиевый пар. Быстрый реактор с керамическим топливом, охлаждаемый кипящим калием, лег в основу разработанной нами энергетической установки космического корабля малой тяги. Калиевый пар вращал турбоэлектрогенератор. Такой «машинный» способ преобразования позволял получить КПД до 40 %, тогда как реальные термоэмиссионные установки имели КПД всего около 7 %. Однако АЭС с машинным преобразованием не получили развития. Дело завершилось выпуском подробного отчета ФЭИ, 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 в качестве источников питания мощных радиотехнических спутников (космических радиолокационных станций и телетрансляторов), вплоть до начала перестройки.

С 1970 по 1988 г. в космос запустили около 30 радиолокационных спутников с ядерно-энергетическими установками с полупроводниковыми преобразователями Гвердцителли с быстрым реактором, охлаждаемым эвтектикой Na-K (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 ядерный реактор мощностью до 100 кВт. Полная загрузка высокообогащенного урана составляла около 30 кг. Время работы «Бука» — 1–3 месяца. Если установка отказывалась, ее переводили на орбиту длительного существования на высоте ~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

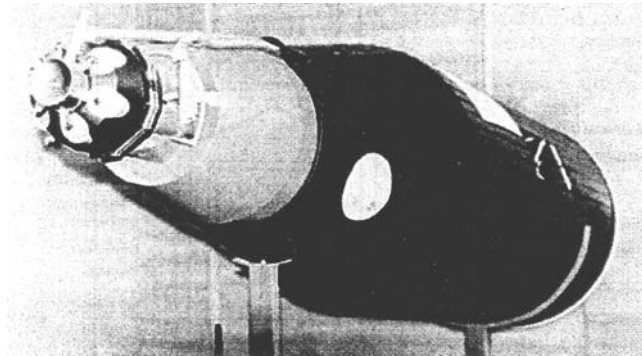


Рис. 5. Ядерно-энергетическая установка «Бук» с полупроводниковым реактором-преобразователем для радиолокационных спутников

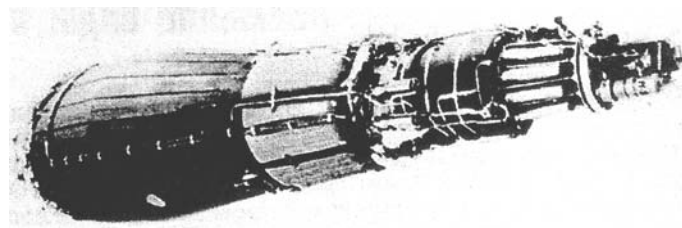


Рис. 6. Ядерно-энергетическая термоэмиссионная установка «Топаз»

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. (Все 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 элементы («гирлянды»), разработанные и изготовленные группой В. А. Малыха. Они представляли собой цепочку термоэлементов: катод — «наперсток» из вольфрама или молибдена, заполненный окисью урана, анод — тонкостенная 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. Главным разработчиком «Топаза» было ОКБ ММЗ «Союз», возглавлявшееся С. К. Туманским (бывшее КБ конструктора авиамоторов А. А. Микулина).

Термоэмиссионные реакторы-преобразователи, созданные под научным руководством ФЭИ, — крупнейшее достижение российской науки и техники, которому не было аналогов в мировой практике. 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 ФЭИ и НПО «Энергия», где работу возглавлял старейший ракетчик Михаил Васильевич Мельников.

4. СИСТЕМЫ С БОЛЬШОЙ ТЯГОЙ

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

На начальном этапе космической ядерной программы ФЭИ совместно с КБ В. Н. Челомея разрабатывал 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 с радиусом действия несколько тысяч километров (совместный проект ФЭИ 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 ФЭИ, совсем уж фантастической схемой — газофазным реактором, в котором цепная реакция протекает в газовой смеси урана и водорода. Из такого реактора водород должен истекать еще раз в десять быстрее, чем из твердотопливного, уран же должен сепарироваться и оставаться

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 энергию 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 ФЭИ 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, с московским НИИ-1 и рядом технологических групп. Основу двигателя с тягой 3,6 т 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.

Автор выражает признательность Павлу Леонидовичу Кириллову и Наталье Кирилловне Гельмиза.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ставиский Ю. Я. и др.* Радиационный захват быстрых нейтронов. М.: Атомиздат, 1970.
2. *Кононов В. Н. и др.* // АЭ. 1972. Т. 32 (1). С. 85.
3. *Гончаров Г. А.* // УФН. 1996. Т. 166. С. 1095.
4. *Феоктистов Л. П.* Оружие, которое себя исчерпало. М., 1999.
5. *Stulinger E.* Possibilities of Electrical Space Propulsion // Bericht ueber den V Internationalen Astronautischen Kongress, Innsbruck, 1954. P. 100.
6. *Kingdon and Langmuir* // Phys. Rev. 1923. V. 21. P. 380.
7. *Бурсиан В. Р., Павлов В. И.* // ЖРФХО. 1923. Т. 55. С. 71.
8. *Ставиский Ю. Я. и др.* // ЖТФ. 1959. Т. XXIX. № 8. С. 962.
9. *Лебедев С. Я. и др.* // ЖТФ. 1961. Т. XXXI. С. 1202.
10. *Ставиский Ю. Я., Лебедев С. Я.* // ЖТФ. 1960. Т. XXX. № 10. С. 1222.
11. *Лебедев С. Я., Ставиский Ю. Я.* // ЖТФ. 1962. Т. XXXII. С. 1473.

12. *Лебедев С. Я., Ставиский Ю. Я., Шутько Ю. В.* // ЖТФ. 1964. Т. XXXIV. С. 1101.
13. *Бондаренко И. И. и др.* Теоретические и экспериментальные исследования, связанные с разработкой термоэмиссионных реакторов-преобразователей // Докл. на III Женевской конференции по использованию атомной энергии, 1964.
14. *Пупко В. Я.* История работ по летательным аппаратам на ядерной энергии в ФЭИ им. Лейпунского. Обнинск: Изд-во ФЭИ, 2002.

Получено 27 апреля 2007 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 04.10.2007.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,37. Уч.-изд. л. 1,73. Тираж 305 экз. Заказ № 55910.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/