

539.1

**ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
В СМЕЖНЫХ ОБЛАСТЯХ НАУКИ И НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ *)***А. И. Лейпунский*

В соответствии с названием доклада я попытаюсь очень кратко рассказать о влиянии, которое оказывала и оказывает «классическая» ядерная физика на научный и технический прогресс нашего общества.

Быстрый рост нашей области науки за последние двадцать с лишним лет определялся ее громадным военным значением. Но влияние ядерной науки и техники на народное хозяйство, на жизнь людей так разнообразно и велико, что сейчас на передний план выходят и мирные применения выдающегося значения. Это вновь привлекает внимание общества к этой области.

Развитие ядерной науки и техники — это одно из героических достижений нашего народа. Поистине героический труд наших ученых, инженеров, рабочих обеспечил в исключительно короткий срок, в тяжелых условиях военного времени и послевоенных трудностей, создание атомного оружия и этим гарантировал мирную жизнь.

Вклад физиков-ядерщиков, естественно, весьма значителен. Они изучили все физические процессы, определяющие успех технических устройств, и, таким образом, заложили фундамент как для оборонной, так и для мирной атомной техники. Физики-ядерщики выполняли и выполняют важнейшие функции по планированию и координации всех главных исследований в атомной технике.

Научно-техническим руководителем всей этой грандиозной государственной работы был в свое время И. В. Курчатов, и именно его талант ученого, широта кругозора и замечательные человеческие качества в значительной степени определили успехи нашей страны. И. В. Курчатов внес настолько фундаментальный вклад, что не только прошлое ядерной науки и техники, но и на многие годы будущее развитие сохранят связь с этой поистине исторической личностью.

В 1939 г. на Харьковской конференции была доложена работа Я. Б. Зельдовича и Ю. Б. Харитона об условиях развития цепной реакции. Уже тогда было ясно, что в системе с обогащенным ураном цепная реакция возможна. Однако ни у кого из участников не было ощущения близкой реальности, и обсуждались задачи измерения определяющих параметров — сечений взаимодействий и чисел нейтронов деления.

Перед войной были несколько расширены работы по ядерной физике и в особенности по делению урана, Г. Н. Флеровым и К. А. Петряковым было открыто спонтанное деление, были измерены некоторые важные сечения, однако дальнейший прогресс ядерной физики прервала Отечественная война. Все три наших ядерных центра: Ленинградский радиевый

*) Доклад на сессии Отделения ядерной физики АН СССР 5 октября 1967 г.

институт, Ленинградский физико-технический институт и Харьковский физико-технический институт — фактически прекратили все работы.

В 1942 г. Г. Н. Флеров написал в правительство записку о возможностях и значении цепной реакции. Эта записка послужила «спусковым механизмом», и вскоре была создана научная организация во главе с И. В. Курчатовым, которая благодаря решительной поддержке партии и правительства смогла уже в 1946 г. пустить первый графитовый реактор.

В 1943 г. появилась идея о гетерогенном размещении урана и были поставлены основные опыты по резонансному поглощению. Примерно в это же время И. И. Гуревичем и И. Я. Померанчуком была создана теория резонансного поглощения.

Развитие шло с такой интенсивностью, с таким нарастающим темпом, что вскоре были не только проведены необходимые исследования, но и построены промышленные реакторы для производства плутония, заводы для разделения изотопов урана, химические заводы и т. д.

Первая стадия развития ядерной физики — цепной реакции — характеризуется следующими этапами:

1939 г. — основные факты, теория Зельдовича — Харитона.

1942 г. — записка Флерова.

1943—46 гг. — основы физики реакторов — эксперимент и теория.

1946 г. — первый графитовый реактор.

1949 г. — взрыв первой атомной бомбы.

С пониманием хода цепной реакции, влияния на нее изменений температуры, возможности управления ею с помощью запаздывающих нейтронов, что было, в сущности, ясно уже в 1939 г., сразу возникла мысль о возможности создания энергетических реакторов. Однако реально подойти к этой возможности удалось только через 10 лет — в 1949 г., когда накопился опыт работы промышленных реакторов.

Основные идеи первой атомной электростанции были сформулированы И. В. Курчатовым. Реализация была передана в Обнинск. Эти идеи опирались на опыт первых промышленных реакторов, и атомная станция также должна была быть графитовой и охлаждаться гораздо более горячей водой. Первая в мире атомная электростанция была пущена в 1954 г. и работает до сих пор.

В то же время, когда в Институте атомной энергии началась работа над этой атомной станцией на тепловых нейтронах, в Обнинске были сформулированы основные идеи реакторов на быстрых нейтронах с расширенным воспроизводством горючего (1948—49 гг.). Но если для реакторов на тепловых нейтронах было точное знание и промышленный опыт, то для реакторов на быстрых нейтронах были главным образом правдоподобные гипотезы. В эти годы началось подробное изучение физики реакторов на быстрых нейтронах, и дальнейшее развитие реакторной науки и техники шло по двум линиям: значительно обгоняющая линия реакторов на тепловых нейтронах и понемногу нагоняющая линия реакторов на быстрых нейтронах.

Сегодняшнее состояние нашей области можно характеризовать таблицей построенных и строящихся атомных электростанций (табл. I) и списком экспериментальных и опытных реакторов на быстрых нейтронах в дополнение к промышленному реактору БН-350 (табл. II): БР-1, мощностью 100 *вт*, построенный в 1954—55 гг., БР-2, мощностью 100 *квт*, пущенный в 1956 г., БР-5, мощностью 5000 *квт*, пущенный в 1958 г., и строящийся в Мелекесе опытный испытательный реактор, мощностью 60 000 *квт* по теплу, который должен быть пущен в 1968 г. Следует отметить, что если нам удастся вовремя пустить реактор БН-350 в Шевченко, то это будет первый в мире промышленный реактор на быстрых нейтронах.

Таблица I

Место	Индекс	Электрическая мощность	Год начала работы	Ответственный физический институт
Обнинск	1-я АЭС	5 Мвт	1954	ИАЭ, ФЭИ
Сибирь	«Сибирская»	600 »	1958	ИАЭ
Ледокол	«Ленин»	44 тыс. л. с.	1959	ИАЭ
Обнинск	ТЭС-3	1,5 Мвт	1961	ФЭИ
Мелекесс	«Арбус»	0,5 »	1963	ИАЭ
Ново-Воронеж	ВВЭР-1	210 »	1964	ИАЭ
Белоярск	БАС-1	100 »	1964	ФЭИ
Москва	«Ромашка»	500 вт	1964	ИАЭ
Мелекесс	ВК-50	50 Мвт	1965	ИАЭ
Белоярск	БАС-2	200 »	1967	ФЭИ
Шевченко	БН-350	150 Мвт, 120 000 м ³ /сутки	1969—70	ФЭИ
Ново-Воронеж	ВВЭР-2	400 Мвт	1968	ИАЭ
Билибино	БАТЭЦ	2×12 Мвт, 2×25·10 ⁶ ккал/ч	1970	ФЭИ

Таблица II

Экспериментальные реакторы БР

БР-1	1955 г.	Обнинск
БР-2	1956 г.	Обнинск
БР-5	1958 г.	Обнинск
БР-60	1968 г.	Мелекесс

Естественно, что это техническое развитие могло и может происходить при интенсивной работе физиков, которые все с большей подробностью и точностью изучают ядернофизические процессы в реакторах. Сейчас сложилась вполне очерченная область ядерной физики, которую называют физикой реакторов. Ее можно разделить на две части:

1. Изучение элементарных ядерных процессов, происходящих в реакторах, защите и т. д.: рассеяние нейтронов (упругое и неупругое), захват, деление, вторичные нейтроны (мгновенные и запаздывающие), угловые распределения реакций, γ -спектры и т. д.— в широкой области энергий нейтронов для всех естественных и искусственных изотопов, действующих в реакторах.

2. Изучение распространения нейтронов в делящихся и педелящихся средах, пространственно-энергетических распределений нейтронов в условиях сложных геометрий, распределений различных ядерных реакций; изучение процессов во времени.

Благодаря усилиям коллективов, главным образом Института атомной энергии, Института экспериментальной и теоретической физики и Физико-энергетического института, в этих областях получены серьезные результаты, обеспечивающие сегодняшний день развития атомной техники.

Я хочу напомнить, что А. Ф. Иоффе считал одной из важнейших задач — создание в нашей стране физико-технических исследований. В области ядерной техники, как и во многих других областях, созданы многочисленные физико-технические коллективы, и руководящую роль в них играли и играют ученики А. Ф. Иоффе, прямые и косвенные.

Невозможно назвать всех участников этой огромной работы, поэтому я ограничусь лишь именами некоторых ученых-ядерщиков старших поколений, сыгравших большую роль в развитии реакторной физики.

Это, кроме уже названных товарищей, Александров, Алиханов, Блохинцев, Бондаренко, Владимирский, Галанин, Грошев, Давиденко, Казачковский, Кикоин, Красин, Марчук, Певзнер, Романов, Сливак, Усачев, Фейнберг, Франк, Фурсов, Шапиро и многие другие. В последние годы появилось множество имен крупных ученых младших поколений, что свидетельствует о здоровом развитии. Так, в 1966 г. в конференции по физике реакторов участвовало около 200 человек.

Несмотря на большой размах работ в этой области, важно отметить необходимость усиления работ, так как все время возникают новые задачи и требования. Наши знания сечений и других параметров взаимодействия нейтронов с ядрами, которые нам нужно было бы измерить с точностью 1—3% во всей области энергий, еще далеки от этого состояния.

Сейчас для развития работ по ядерной физике, в том числе для решения и этих задач, строятся и разрабатываются новые установки: мощный импульсный реактор в Дубне, изохронный циклотрон и перезарядный электростатический генератор в Киеве и, возможно, в Институте атомной энергии, устройство для нейтронной спектроскопии на Гатчинском циклотроне, мощный импульсный нейтронный генератор в нашем институте и т. д. Введение всех этих установок усилит и укрепит экспериментальную технику ядерной физики и поможет нам решить и задачи реакторной физики.

Расчетные методы реакторной физики также нуждаются в усовершенствовании. В частности, необходимо усовершенствовать учет всех особенностей поведения сечений при разных энергиях нейтронов, нужно разработать более точные и эффективные методы учета процессов при реальных геометриях. Мощность имеющихся у нас электронных вычислительных машин еще недостаточна; реакторные задачи, которые ставит перед нами практика, так сложны, что серьезной потребностью является и разработка новых методов, экономящих машинное время.

Недостаточные знания констант взаимодействия нейтронов с ядрами, недостаточное развитие теории и мощи электронных вычислительных машин заставляют нас ставить множество дорогостоящих экспериментов и нередко делать чрезмерные «запасы».

Большой авторитет ядерной физики не только (пожалуй, не столько) помог развитию той ее части, которая необходима для дальнейшего расширения и совершенствования ядерной техники, но и дал возможность широко работать в новой области ядерной физики—элементарных частиц, создавать все более и более крупные ускорители.

Работы по термоядерным реакциям также являются следствием успехов ядерной физики.

Ядерная техника, позволившая получать мощные потоки нейтронов в реакторах и заряженных частиц в ускорителях, оказала чрезвычайно сильное воздействие на развитие науки в различных областях. Главную роль в этом сыграл метод меченых атомов, значение которого невозможно переоценить. Его влияние на науку можно сравнить только с изобретением микроскопа. Невозможно дать даже краткую характеристику всем применениям ядерной техники в различных областях науки. Поэтому ограничусь только перечислением некоторых, наиболее заметных:

1. Изучение структур с помощью нейтронов — магнитные структуры, органические и биологические молекулы, дефекты в твердых телах и т. д.

2. Физика радиационных повреждений — новая часть физики твердого тела.

3. Передача энергии в твердых и жидких телах.

4. Резонансное рассеяние γ -лучей (мессбауэр-эффект) — очень тонкое средство с громадными возможностями применения.
5. Получение сверхнизких температур с помощью He^3 .
6. Ядернофизические исследования.
7. Активационный анализ.
8. Геологические и геохимические исследования.
9. Механизмы химических реакций.
10. Биохимические реакции.
11. Различные применения в биологии, что является одним из важнейших направлений.

Конечно, не трудно прибавить к этому списку еще не одно применение. Во всяком случае, ясно, что практически все отрасли естественных, технических и даже гуманитарных наук (история и археология) испытывают на себе влияние ядерной науки и техники.

Что же дала и даст в ближайшем будущем ядерная наука для техники? Список этого также уже очень внушителен:

1. Изотопные приборы (экономический эффект в 1963 г. — 200 млн. рублей, в 1966 г. 250—300 млн. рублей).
2. Просвечивание изделий изотопными источниками.
3. Стерилизация медицинских инструментов и материалов.
4. Консервирование пищевых продуктов.
5. Изотопы для диагностики и лечения.
6. Взрывы для земляных работ (в будущем).
7. Радиационная химия — «сшивание», полимеризация и т. д. Это, несомненно, будет одним из важнейших применений.
8. Опреснение воды; оно будет широко применяться, так как нужда велика, а тепловая энергия больших атомных электростанций будет дешевой.
9. Энергетика для космоса.
10. Энергетика для транспорта.
11. Энергетика для отдаленных районов (малая). И, наконец:
12. Большая энергетика.

Несомненно, наибольшее влияние на жизнь окажут в ближайшие годы атомная энергетика, о которой я скажу подробнее, и радиационная химия, о которой я говорить не буду.

Прежде чем перейти к рассмотрению атомной энергетики, как наиболее важному применению ядерной физики, я хотел бы отметить, что развитие атомной техники оказало еще и большое косвенное влияние на технический прогресс, так как потребовались более высококачественные материалы, более совершенная технология, дефектоскопия, новые приборы, новые материалы и т. д. Все это повысило в некоторых звеньях общины технический уровень нашей промышленности. Кроме того, атомная техника оказала большое стимулирующее действие и на развитие вычислительной математики и вычислительной техники.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА ДЛЯ КОСМОСА

Рассмотрение четырех направлений применения атомной энергетики я начну с космоса.

В недалеком будущем в космосе понадобятся достаточно мощные и продолжительно работающие источники энергии для выполнения различных функций. Электрическая энергия в космических кораблях может быть использована для питания приборов: например, телевидение и связь требуют бортовых станций в десятки, а в дальнейшем в сотни киловатт при очень больших сроках службы; электрическая энергия нужна для

питания ионных или плазменных двигателей, служащих для коррекции траекторий (сравнительно малые мощности) и для создания реактивной тяги на марше (путешествия к планетам, большие мощности). Наконец, в ядерном реакторе может нагреваться водород до очень высокой температуры $\sim 3000^\circ \text{K}$ и создавать реактивную тягу без посредства электрической энергии.

В зависимости от мощности и функций рассматриваются пять типов устройств для космоса:

1. Изотопные нагреватели термобатарей.
2. Реакторы с термобатареями.
3. Реакторы с турбогенераторами.
4. Реакторы с термоионными преобразователями внутри или вне реактора.
5. Реакторы для реактивных водородных двигателей.

На основе опубликованных данных, главным образом американских и наших, можно сделать оценки существующих и будущих космических энергетических установок. Конечно, такие установки находят применение не только в космосе, но и в других случаях, когда нужна продолжительная автономная работа, например в различного типа геофизических станциях, как, например, наша «Бета-2».

Изотопные источники имеют в настоящее время мощности до десятков ватт, в будущем возможны и киловаттные источники.

Реакторные установки обладают значительно большей мощностью, чем изотопные: в настоящее время — около 500 *вт*, но в будущем возможны десятки, сотни и даже тысячи киловатт.

Известный реактор «Ромашка» — очень интересное сооружение. Это быстрый реактор из дикарида урана UC_2 , в котором тепло теплопроводностью передается на наружную поверхность. К наружной поверхности прижаты горячие спаи термобатарей, а холодные спаи отдают тепло радиатору. Этот реактор хорошо работал, и у него есть будущее.

Также следует отметить, что наиболее обещающими по весовым показателям являются реакторы с прямым термоионным преобразованием внутри каналов реактора с тепловыделяющими элементами. В этих реакторах сами тепловыделяющие элементы являются катодами преобразователя.

В нашем институте разрабатывались и успешно испытывались в реакторах модели таких каналов. Они исправно работают продолжительное время и дают примерно 2 *вт* на 1 см^2 катода.

До создания ракетного реактора с термоионным преобразованием для бортовых станций еще большой путь, тем более, что для хороших весовых показателей требуется увеличение удельной мощности в 5—10 раз, что со временем вполне возможно.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА ДЛЯ ТРАНСПОРТА

Конечно, построен атомный военно-морской флот, и это самое важное транспортное применение атомной энергетики. Но из мирных применений ледокол «Ленин» — самое удачное применение атомных двигателей для транспорта. В ледоколе хорошо используется преимущество атомной энергии — нет необходимости пополнения запасов горючего. США под влиянием успеха нашего ледокола также собираются строить атомные ледоколы. Несомненно, атомная энергия пробьется и в обычный торговый флот, как только атомные энергетические установки подешевеют.

Если когда-нибудь понадобятся двигатели для самолетов или дирижаблей, способных перевозить грузы без дополнительной подпитки горючим на какие угодно расстояния, то такие двигатели также будут атомными.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА ДЛЯ ОТДАЛЕННЫХ МЕСТ

Это, пожалуй, задача, специфичная для нашей страны. На севере и северо-востоке Сибири имеются места с богатейшими природными богатствами, где строятся рудники, предприятия, жилые поселки, требующие электроэнергии и тепла. Доставка горючего в такие районы настолько дорога, что атомные станции даже небольшой мощности становятся экономически выгодными. Первые опытные малые станции были построены в Обнинске (ТЭС-3) и в Мелекесе («Арбус»). Первая промышленная станция строится в Билибине на Чукотском полуострове (см. последнюю строку табл. I). Можно думать, что подобные станции большей и меньшей мощности получат распространение на нашем Севере.

БОЛЬШАЯ АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Большая атомная энергетика — это самое важное применение атомной науки и техники. Опыт, полученный со времени пуска первой атомной станции в 1954 г., опыт исследований и работы многих и разнообразных атомных электрических станций с совершенной несомненностью показывает следующее:

1. Капиталовложения в крупные атомные электростанции с мощностью в блоке около 1 млн. *квт* будут составлять от 100 до 150 рублей за установленный киловатт, т. е. не так уж сильно отличаются от капиталовложений в угольные станции.

2. Топливная составляющая стоимости электрической энергии для атомных станций значительно меньше, чем для угольных, так как теплотворная способность урана в $2 \cdot 10^6$ раз больше, что приводит к значительному удешевлению калории.

Эти два обстоятельства дают уверенность, что атомное электричество и атомное тепло будут дешевле угольного и, следовательно, они будут быстро входить в жизнь.

Страны с развитой атомной наукой и техникой и с высоким промышленным потенциалом строят сейчас много атомных станций. Так, в США в 1965 г. 20% заказанных электростанций были атомными, в 1966 г. — уже 50%. В 1980 г. США предполагают иметь атомных электростанций больше чем на 120 млн. *квт*, так как большая часть вновь строящихся станций будет атомными.

У нас также планируется быстрое развитие атомной энергетики и намечено сооружение крупных атомных электростанций.

В разных странах строятся реакторы разных типов, в зависимости от местных промышленно-экономических условий и накопленного опыта, сделанных уже вложений, доступности обогащенного урана и т. д. Так, США базируют свое развитие в ближайшие годы на водо-водяных реакторах, одноконтурных — кипящих и двухконтурных — без кипения в реакторе. Англия, у которой накоплен опыт работы с графитовыми реакторами, охлаждаемыми CO_2 , разработала экономичный тип такого реактора. В нашей стране мы также считаем выгодным водо-водяные реакторы, как на Ново-Воронежской станции, и графитовые, охлаждаемые кипящей водой, похожие на используемый на первой АЭС в Обнинске. Мы помогаем строить водо-водяные реакторы в Болгарии, Венгрии, ГДР.

Несомненно, самым лучшим реактором на тепловых нейтронах по своим физическим качествам является тяжеловодный. Он потребляет урана меньше других и выдает плутония больше других. Однако только в Канаде тяжеловодный реактор является базовым типом. Институт

экспериментальной и теоретической физики сделал очень много для изучения физики этого реактора и его разработки, помогает сооружению такого реактора в Чехословакии.

Начавшееся бурное строительство атомных электростанций поставило вопрос о ресурсах горючего. Положение оказывается довольно напряженным. Дело в том, что реакторы на тепловых нейтронах конкурентно-способны только при сравнительно низких ценах на уран, не дороже 20 долларов за килограмм. Такого урана сравнительно мало, но очень много урана, который можно добыть по более дорогой цене. Мировые запасы урана (без учета дорогого урана из океана, где запасы колоссальны) оцениваются в табл. III.

Таблица III

Доллары/кг	Известные запасы, тыс. тонн	Возможные запасы, тыс. тонн	Всего тыс. тонн
11—22	682	681	1363
22—33	719	503	1222
33—66	429	$(1,1 \div 11) \cdot 10^3$	11000

Специалисты США считают, что при существующих темпах роста атомной энергетики их урана для реакторов на тепловых нейтронах хватит, по-видимому, на 15—20 лет.

Из сказанного видно, что стадия строительства реакторов на тепловых нейтронах — это промежуточный этап в развитии атомной энергетики и что выгодно возможно раньше начать строить станции с реакторами на быстрых нейтронах с расширенным воспроизводством горючего, исключительно экономно использующими уран и способными с выгодой использовать дорогой уран.

Реакторы на быстрых нейтронах из-за выгодного баланса нейтронов могут вырабатывать из отвалного урана-238 (отвал от диффузионного производства и от плутониевых реакторов) плутония примерно в 1,4—1,6 раза больше, чем его сжигается в реакторе. Эта особенность определяет все замечательные качества реактора на быстрых нейтронах: производство в реакторе нового плутония, достаточного не только для дальнейшего питания этого реактора, но и для сооружения новых реакторов, использование отвалного урана, использование очень дорогого урана или плутония, так как выдается больше дорогого же плутония, чем его сжигается, дешевая топливная составляющая стоимости электрической энергии по этой же причине.

Еще опыты 1954 г. вселили в нас уверенность, что коэффициент воспроизводства в системе $Pu^{239} - U^{238}$ очень велик. В 1955 г. мы измерили его на реакторе БР-1 и получили $2,5 \pm 0,2$. Такое высокое значение коэффициента воспроизводства определило нашу физико-техническую политику. Мы решили, что можно, потеряв несколько на коэффициенте воспроизводства, использовать керамические тепловыделяющие элементы из PuO_2 , UO_2 , обещающие очень высокую температурную стойкость и способность к глубокому выгоранию плутония и урана. Наш первый опытный реактор БР-5, мощностью 5000 квт, был построен с окисными элементами и оправдал все ожидания. Последнее время в европейских странах также перешли на разработку окисных твэлов для быстрых реакторов. США также резко усилили работы по окисным элементам. Второе решение, принятое нами для БН-350, — это создание первой активной зоны реактора не на плутонии, а на уране-235.

И, наконец, третья идея — так называемый смешанный цикл — позволяет весьма эффективно использовать в тех же быстрых реакторах без их переустройства огромные запасы тория. Таким образом, в реакторе на быстрых нейтронах получается расширенное воспроизводство, а следовательно, полное выгорание как урана-238, так и тория.

Перечисленные обстоятельства делают запасы горючего для реакторов на быстрых нейтронах практически безграничными, в особенности если учесть запасы в океанской воде, из которой английские ученые обещают добывать уран по цене около 100 долларов за килограмм.

Если считать, что за 30 лет будет построено атомных станций всего на 400 тыс. *Мвт* (США планируют 800 тыс. *Мвт*), то на их создание и работу потребуется ориентировочно следующее количество урана — табл. IV.

Таблица IV

Тип реактора	Водяной	Тяжеловодный	Газ-графит	Быстрые нейтроны
Уран, тыс. тонн . . .	900	550	750	75

Эта таблица еще раз показывает, как важно возможно раньше ввести в технику реакторы на быстрых нейтронах. Важнейший этап этого дела — пуск БН-350, который даст нам промышленный опыт, докажет в большом масштабе возможность спокойной работы быстрого реактора с натриевым теплоносителем и даст основания для дальнейших разработок и строительства более крупных станций.

В заключение я еще раз подчеркну, как значительно влияние развития ядерной физики на жизнь. Обильное снабжение человечества дешевым электричеством и теплом — исключительно мощное средство для повышения народного богатства. Одно это оправдывает усилия ученых и инженеров.

Не исключено, что ядерная физика и ядерная энергия дадут начало и другим не менее важным применениям. Во всяком случае, можно сказать, что Советский Союз обладает квалифицированными физиками-ядерщиками, которые выполнили свой долг и продолжают успешно развивать науку и технику.