

ФЕНОМЕН XX ВЕКА (К 75-ЛЕТИЮ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ)

L.V. Zyssin, L.P. Steshenkov

A TWENTIETH-CENTURY PHENOMENON: DEDICATED TO THE 75TH ANNIVERSARY OF THE RUSSIAN NUCLEAR INDUSTRY

Приведены данные по истории создания и развития атомной энергетики в России. Отмечены заслуги выдающихся отечественных физиков, работы которых позволили воплотить в жизнь теоретические положения, связанные с использованием ядерной энергии. За всю историю отечественной атомной отрасли нашими специалистами было создано 92 энергетических реактора атомных станций, что составляет 16 % всех когда-либо построенных энергетических реакторов в мире. Из них работают сейчас 70, что также составляет 16 % от всех действующих энергетических реакторов мира. Серьезная авария была только на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС; это единственная крупная авария на реакторе отечественного дизайна. Динамичное развитие атомной отрасли – одно из основных условий обеспечения энергонезависимости России и стабильного роста экономики страны.

АТОМНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ; РЕАКТОР; ИСТОРИЯ; АВАРИЯ; ПРОБЛЕМЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.

The paper presents the data on the history and development of nuclear energy in Russia, paying tribute to the the outstanding Russian physicists whose work allowed to put into effect the theoretical principles related to the use of nuclear energy. In the entire history of the Russian nuclear industry, our specialists created 92 power reactors of nuclear power plants, constituting 16 % of all power reactors ever built in the world. Of these, 70 are now working, which is also 16 % of all currently existing power reactors in the world. The only serious accident involving Russian-designed reactors was Reactor No 4 of the Chernobyl Nuclear Power Plant. The dynamic development of the nuclear industry is one of the basic conditions for ensuring Russia's energy independence and sustainable economic growth.

NUCLEAR INDUSTRY; REACTOR; HISTORY; ACCIDENT; PROBLEMS OF NUCLEAR ENERGY.

Относительно недавно, в 2005 году, у нас в стране появился ещё один профессиональный праздник – «День работника атомной промышленности», отмечаемый 28 сентября. В 1942 году вышло датированное этим числом распоряжение Государственного комитета обороны СССР «Об организации работ по урану», предписывающее

возобновить работы в данной области. Ранее, правда, у нас появление атомной промышленности обычно связывали с пуском 25 декабря 1946 года первого ядерного реактора. Но в любом случае семидесятилетний или семидесятипятилетний юбилей служат поводом обратиться к некоторым примечательным фактам появления

и становления этой уникальной отрасли промышленности; по темпам развития она сопоставима разве что с вычислительной техникой.

Много тысячелетий человечество эмпирически училось полезно использовать энергию огня – тепловую энергию. Путём проб и ошибок были найдены приёмы получения огня и созданы в меру эффективные топочные устройства, освоены способы сжигания разных видов природного органического топлива (уголь, древесина, нефть, газ, сланцы, торф и др.). И только пару столетий назад было установлено, что в основе всех процессов сжигания лежит одна и та же химическая реакция – окисление кислородом воздуха углерода, содержащегося в органическом топливе, в ходе которой при перестройке молекул высвобождается теплота химических связей:



Далее стала развиваться теория горения, которую и в наше время нельзя считать полностью завершённой. Создание тепловых двигателей, благодаря которым смогла появиться современная цивилизация, первую сотню лет также осуществлялось эмпирически, пока не появилась их научная основа – термодинамика.

И вот, в начале XX века возникла обратная ситуация. Сначала теоретически было показано, что энергия экзотермических ядерных реакций, выделяющаяся при перестройке атомного ядра, превосходит химическую энергию на шесть порядков (примерно в 10^6 раз), а уже через несколько десятилетий удалось разработать процессы и оборудование для получения и использования этого нового вида горючего.

Освоение нового вида горючего стало возможным, благодаря прогрессу ядерной физики – науки, возникшей и получившей развитие в первой половине прошлого столетия. Только потом применение ядерной энергии в военных целях и в энергетике вызвало создание атомной промышленности, влияние которой быстро распространилось на самые разные области хозяйства: горную промышленность и машиностроение, химическую промышленность и металлургию, энергетика и судостроение, медицину, транспорт и многие другие. Атомная промышленность породила одновременно не-

ожиданные проблемы: политические, экономические, морально-этические, экологические [1].

К концу XIX столетия сложилось представление, что в физике установлены все общие законы поведения веществ – законы общие и универсальные. Важное место тут принадлежало фундаментальному представлению об атоме как монаде – неделимой единице, понятие о которой восходило к древнегреческим философам. В результате многие физики уже решили, что физика как наука практически закончена. Правда, некоторая неясность, которую старались не замечать, оставалась. В 1859 году немецкие физики Г. Кирхгоф и Р. Бунзен открыли линейчатые спектры газов, которые не могли быть объяснены исходя из волновой теории света. Почему атомы – эти элементарные «кирпичики» Вселенной – обладают разными физическими и химическими свойствами? Периодический закон Д. Менделеева (1869 г.), казалось бы, установил определённый порядок среди атомов, но одновременно он подталкивал к мысли, что атомы являются отнюдь не «кирпичиками» Вселенной, а сложными телами, состоящими из каких-то других элементарных частиц, которыми управляют какие-то иные, пока непознанные законы. Однако не существовало экспериментальных возможностей и теоретических идей для их изучения.

Проникновение в то, что сегодня мы называем микромиром, началось в значительной степени со случайности. В 1896 году французский физик А. Беккерель открыл излучение ураном неких проникающих лучей; оказалось, что упомянутые неделимые «кирпичики» мироздания что-то излучают (!) – позже это явление назовут радиоактивностью. Год спустя французские физики П. Кюри и М. Склодовская выделили полоний, излучавший α -частицы, и позже открыли радий, который тоже оказался радиоактивным. Собственно, уже тогда был обнаружен факт наличия ядерной энергии.

Далее начался каскад открытий: выяснилось, что электричество атомистично, что отрицательное электричество состоит из электронов, имеющих электрический заряд и массу, которая в 1800 раз меньше массы атома водорода, что механика электронов в корне отлична от обычных

законов движения и масса электрона не постоянна — она увеличивается с увеличением скорости и в пределе, при достижении скорости света, становится бесконечной и т. д. Перечисленные открытия вызвали смутение в умах большинства ученых. Казалось, что рушатся и опровергаются с таким трудом познанные законы природы, возрождаются антинаучные идеи алхимиков и изобретателей вечного двигателя.

В дальнейшем оказалось, что явления эти разыгрываются в ничтожных по размерам положительных ядрах атома. Значит, и ядро атома не является кирпичом мироздания, оно само имеет сложную природу. При испускании α - и β -частиц меняется заряд ядра, в результате один элемент переходит в другой.

Страсти несколько улеглись, когда А. Эйнштейн сформулировал принцип относительности, который, в частности, приводит к выводу, что в отдельности принципы сохранения энергии и сохранения вещества неправильны. В микромире действует единый закон сохранения материи, объединяющий в единое целое и энергию, и вещество. Этот закон — закон эквивалентности массы вещества и энергии — имел грандиозное значение, т.к. привел, в конечном счете, к открытию атомной энергии.

В 1911 году английский физик Э. Резерфорд предложил планетарную модель атома, а в 1913 году датчанин Н. Бор создал теорию строения атомного ядра. К этому времени ядерная физика уже оформилась как самостоятельная наука. Общим положением этой науки стал факт, что энергия изотермических ядерных реакций, выделяющаяся при перестройке атомного ядра, превосходит химическую энергию на много порядков, причем подобные ядерные реакции могут, в принципе, происходить на элементах, запасы которых не ограничены. Ныне трудно представить, что далее на протяжении нескольких десятилетий физики даже не пытались наметить пути практического использования упомянутой энергии. Достижения ядерной физики быстро нашли применение в медицине (например, радиология), но только не в области энергетики. Почему?

Дело в том, что долгое время ядерная физика занималась элементарными процессами, раз-

вивающимися на лабораторных ускорителях с весьма ограниченным числом ядер. В экзотермических ядерных процессах, реализуемых в таких условиях, подавляющая часть ускоренных заряженных частиц бесполезно растрчивали свою энергию на ионизацию, и никто не видел возможности преодоления этого. Проведение известных ядерных процессов в макроскопических (промышленных) масштабах представлялось нереальным, поскольку какое-либо ускорение медленных процессов естественной радиоактивности представлялось невозможным. Даже сам создатель ядерной физики Э. Резерфорд вплоть до своей смерти в 1937 году высказывался категорически отрицательно о возможности практического использования ядерной энергии в макроскопических масштабах. Даже открытие в его лаборатории в 1932 году Д. Чэдвигом нейтрона — нейтральной частицы, способной эффективно, без непроизводительных затрат энергии на ионизацию, взаимодействовать с ядрами, не переубедило великого физика. Э. Резерфорд указывал на то, что само получение нейтронов осуществлялось в ядерных реакциях, где основная часть энергии растрчивалась на побочные процессы ионизации и возбуждения атомов веществ.

В этом отношении Э. Резерфорд оказался не таким прозорливым, как его не менее гениальный предшественник и соотечественник М. Фарадей, заложивший основы учения об электромагнитных полях и о возможности взаимных преобразований электрической и механической энергий. Глубоко веря в великое будущее своих открытий, М. Фарадей на вопрос об их пользе для человечества ответил вопросом: «...а какая польза может быть от новорожденного?».

Спустя чуть более года после смерти Резерфорда, в начале 1939 года, Ф. Жолио, О. Ган, Ф. Штрассман и ряд других исследователей экспериментально обнаружили новое явление — возможность при попадании медленного нейтрона в ядра тяжёлых элементов (уран или торий) их деления на два ядра приблизительно равной массы с образованием новых свободных нейтронов. Эти опыты легли в основу теории деления, которую разработали независимо друг от друга в СССР Я. Френкель, а в США — Н. Бор и

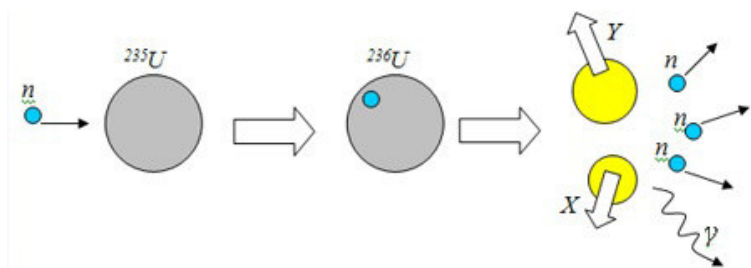


Схема реакции деления атомного ядра урана-235 [5]:
 ^{235}U и ^{236}U – ядра изотопов урана; n – нейтроны; X и Y – осколки деления; γ – излучение

К. Уиллер. Уже в 1939 году расчёты, выполненные на основе этой теории, показали возможность осуществления цепной реакции деления урана-235. Публиковались все эти результаты в открытой печати, даже научно-популярной [2].

На рисунке дана принципиальная схема реакции деления ядра атома изотопа урана-235 (^{235}U). В случае попадания в него нейтрона n атом сначала захватывает нейтрон, превращаясь в неустойчивый изотоп уран-236 (^{236}U), тут же делящийся на два осколка X и Y , обладающих колоссальной кинетической энергией, которую можно использовать.

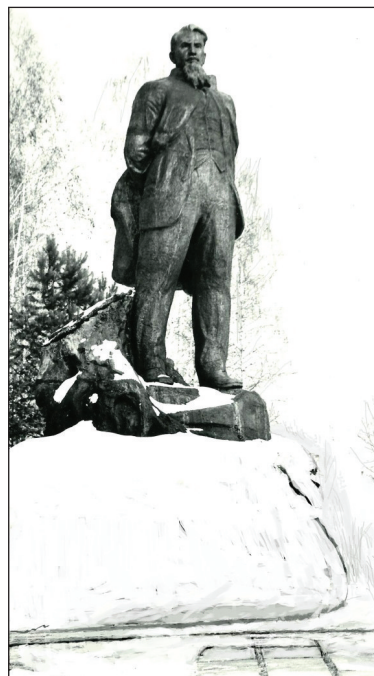
Одновременно выделяются несколько новых нейтронов n , способных поддержать реакцию, а также ионизирующее излучение γ , которое следует рассматривать как неизбежное зло, хотя и его энергию при определённых условиях можно тоже использовать.

Оставалось только экспериментально подтвердить справедливости теоретических решений. Это было сделано в декабре 1942 года, когда в США заработал первый ядерный реактор, созданный под руководством Э. Ферми.

В нашей стране практическое освоение атомной энергии началось в 1944 году, когда на окраине Москвы было образовано специализированное учреждение. Наиболее известны его кодовые названия – ЛИПАН (Лаборатория измерительных приборов АН СССР), или лаборатория № 2 («двойка»). Работы возглавил Игорь Васильевич Курчатов, крупный отечественный физик и выдающийся учёный, организатор науки. Собрав вокруг себя группу молодых физиков, в меру амбициозных и уже сумевших заявить о себе в науке, он взялся за дело, от которого по тем или иным причинам постарался уклониться ряд наших выдающихся учёных старшего поколения.

Жесткий, требовательный, непримиримый, он мог и увлечь, и вдохновить, и создать уникальные условия для работы. Пройдут годы, ЛИПАН превратится в один из крупнейших европейских научных комплексов – Институт атомной энергии имени И.В. Курчатова (ИАЭ), но стиль работы, заложенный Курчатовым, ещё долгие годы будет прослеживаться в деятельности учёных-руководителей институтов и предприятий атомной отрасли.

Когда Курчатов стал во главе проблемы, первой задачей было создание атомного реактора для подтверждения возможности осуществления управляемой реакции деления в промышленных масштабах. Пуск такого реактора – физического реактора Ф-1 (первого на



Памятник И.В. Курчатову в Снежинске работы скульптора А.С. Гилева

Евразийском континенте) — состоялся 25 декабря 1946 года, он подтвердил возможность реализации управляемой реакции деления, а также принципиальные теоретические положения, связанные с использованием ядерной энергии. Остальное стало делом техники — ядерной техники и атомной промышленности, которых не существовало, пришло время начать их создавать.

В начальный период становления атомной отрасли И.В. Курчатова дополнял выдающийся организатор производства Б.Л. Ванников, занимавший в 1945—1953 годах, кроме ряда других важных постов, пост начальника Первого главного управления, которое занималось строительством и управлением создающейся отрасли.

Только перечисление того, что требовалось создать практически с нуля, захватывает дух. Параллельно в нескольких регионах страны форсированными темпами шло крупномасштабное строительство многих предприятий и производств, призванных обеспечить работы по созданию атомного оружия. Сюда относились: комплексы по добыче и переработке урана; предприятия по обогащению урановой руды и по производству ядерного топлива; строительная база со своей индустрией и проектными организациями; специализированные предприятия ядерного и энергетического машиностроения; службы ядерной безопасности, дозиметрии и ядерной медицины; комплексы по хранению и переработке радиоактивных отходов и многое другое. Шло создание новых центров атомной науки и техники, таких, как Физико-энергетический институт (ФЭИ) в г. Обнинске (Калужская обл.), Институт атомных реакторов в г. Дмитровграде (Ульяновская обл.), собственных высших учебных заведений (МИФИ).

Ещё одна яркая фигура в атомной промышленности — Е.П. Славский. Он начал работу в отрасли в 1946 году как заместитель Б.Л. Ванникова, а закончил в 1986 году, причём с 1957 года (с небольшим перерывом) до выхода на пенсию был министром среднего машиностроения, куда входили все предприятия отрасли. Важна его роль в создании «атомных городов», которые росли вместе с комбинатами, рудоуправлениями и другими предприятиями. Большинство «атомных городов» проектировались Ленинградским институтом комплексного проектирования, по-



Е.В. Славский (1898-1991)

этому они трогательно похожи друг на друга [3]. Кроме одинаковых архитектурных решений, их объединяла повышенная комфортабельность и ощутимо более высокий уровень жизни в сравнении с общим положением в стране той эпохи. Правда, выехать за границы охранной зоны этого «государства в государстве» далеко не все имели право, иных и «на похороны близких родственников» не всегда пускали.

Важнейшим и первым в ряду таких предприятий стала организация с кодовым названием КБ-11, филиал ЛИПАНа, разместившаяся на границе Горьковской области и Мордовии. Там формировался научно-технический и производственный центр, где сосредоточились разработка и производство атомной бомбы. Сугубо засекреченный город сменил ряд кодовых названий: наиболее известное из них — «Арзамас-16», а теперь — Саров. И.В. Курчатова привлёк к работам по созданию ядерного оружия ряд лучших отечественных физиков, учёных мирового уровня. Среди них, прежде всего, надо вспомнить Ю.Б. Харитона, главного конструктора и научного руководителя работ по созданию бомбы, Я.Б. Зельдовича, И.К. Кикоина, А.Д. Сахарова.

В 1949 году прошли успешные испытания первой нашей атомной бомбы. Далее на повестку дня стал вопрос создания атомных силовых установок для надводных и подводных кораблей, а также атомных электростанций. Научное руководство и координацию всех работ по созданию как транспортной, так и стационарной энергетики осуществлял А.П. Александров.

С реакторами для силовых установок в теоретическом плане далеко не всё было очевидно. Многих смущало, что ядерные процессы развиваются



А.П. Александров (1903–1994)

спонтанно и молниеносно, полагали, что управлять ими в реальном масштабе времени вряд ли удастся. Добрую службу сыграли тут образующиеся в ходе ядерной реакции деления запаздывающие нейтроны. Среднее время их жизни – примерно 13 с, и благодаря им реакция оказалась управляемой.

Уже 1958 году вышла на ходовые испытания первая отечественная подводная лодка К-3 («Ленинский комсомол»), годом позже – первый атомный ледокол «Ленин», снабжённый ядерной энергетической установкой мощностью 30 МВт. Положительное решение вопроса создания судовых атомных установок автоматически открывало путь к созданию атомных электростанций. Только их реактор должен быть более безопасен и надёжен в эксплуатации, а вырабатываемая с его помощью энергия должна быть хотя бы соизмерима по стоимости с энергией тепловых электростанций.

На этом пути произошло одно событие, попавшее в разряд исторических. В 1954 году в Женеве состоялась первая конференция по мирному использованию атомной энергии. В то время в Физико-энергетическом институте (ФЭИ) шли исследования работы реакторов для подводных лодок. Образующееся в процессе их работы тепло, как ненужное, рассеивалось в атмосферу. Вот и зародилась идея некоего политического решения: снабдить один из экспериментальных атомных реакторов системой утилизации теплоты, энергию которой передать турбине для привода электрогенератора. Подобная схема была реализована, что позволило нашей стране выступить

в Женеве с докладом о создании в СССР первой в мире атомной электростанции.

Подлинное возникновение атомной энергетики в нашей стране следует отнести к 1964 году. Тогда на Нововоронежской АЭС был введён в промышленную эксплуатацию первый энергоблок типа ВВЭР мощностью 210 МВт. Этот блок работал уже достаточно эффективно, и себестоимость электроэнергии оказалась приемлемой. Примерно в те же сроки пущен несколько иной по конструкции энергоблок мощностью 285 МВт на Белоярской АЭС, но его эффективность оказалась несколько ниже. С этого момента в мире начинается масштабное строительство атомных электростанций (АЭС), темпы которого постоянно нарастают, а качество и совершенство оборудования увеличиваются; реакторы типа ВВЭР становятся базовой конструкцией для развития отечественной атомной энергетики. Комплексные теплофизические исследования, выполненные ФЭИ, имели большое значение для обеспечения безаварийной работы судовых, а позже и энергетических реакторов в нашей стране. Среди вдохновителей и организаторов этих работ по теплофизике реакторов хочется вспомнить В.И. Субботина, П.Л. Кириллова, С.С. Кутателадзе, В.Е. Дорошука.

Вспоминая тех, кому принадлежит главная роль в проектировании первых отечественных атомных энергетических установок, начать хочется с Н.А. Доллежаля. В 1946 году НИИ химического машиностроения, которое он возглавлял, привлекли к атомному проекту. Он проектировал первые промышленные ядерные реакторы для производства оружейного плутония; после успешных испытаний атомной бомбы с лета 1949 года начал разработку энергетических реакторов для корабельных установок; в 1954 году под его руководством создана первая реакторная установка



Н.А. Доллежал (1899–2000)

для подводных лодок. В 1952 году Н.А. Доллежалъ возглавил «Специальный институт», он же НИИ-8, нынешний Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники (НИКИЭТ), ныне НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала, которым он руководил 34 года. Совместно с ИАЭ были созданы энергетические уран-графитовые реакторы типа РБМК.

Другой выдающийся организатор работ по созданию ядерных реакторов и оборудования для атомной промышленности, гражданского и военно-морского флота, имя которого долгие годы не упоминалось, — И.И. Африкантов. С 1951 по 1969 год он руководил нижегородским (горьковским) Опытным-конструкторским бюро машиностроения, ОКБМ (ныне «ОКБМ Африкантов»).

Среди его разработок: диффузионные заводы по производству высокообогащённого урана, промышленные и транспортные водо-водяные, уран-графитовые и тяжеловодные реакторы, энергетические реакторы на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем БН-350 и БН-600 [4].

Ядерные энергетические установки первого поколения были двухконтурными и имели корпусной реактор заводского изготовления, что ограничивало его мощность транспортными габаритами. В этой связи весьма перспективным представлялся реактор канального типа (РБМК). Подобные реакторы можно было сооружать непосредственно на объекте; в результате их мощность практически не ограничивалась [4]. Ввод первого такого реактора в 1973 году на Ленинградской АЭС рассматривался как важный этап и основа дальнейшего развития отечественной атомной энергетики.

Семидесятые годы XX столетия отмечены победным шествием атомной промышленности:

быстро наращивались мощности в атомной энергетике, вслед за Ленинградской АЭС пошли станции с реакторами РБМК — Курская, Чернобыльская, Игналинская (последняя с реактором небывалой мощности 1500 МВт);

на Чукотке вошла в строй уникальная Билибинская АЭС с тремя реакторами мощностью по 12 МВт, которую рассматривали как прототип при освоении Севера;

впервые надводный корабль (атомный ледокол «Арктика») достиг Северного полюса;



И.И. Африкантов (1916–1969)

для атомных технологий искали и находили новые области применения — многочисленные атомные взрывы в мирных целях (для создания подземных ёмкостей под хранилища запасов полезных ископаемых; для ликвидации аварийных газовых факелов; для интенсификации добычи нефти и газа; проводилось сейсмическое зондирование земной коры для выявления полезных ископаемых и др.).

Среди специалистов-атомщиков господствует мнение, что АЭС несравненно чище в экологическом отношении традиционных тепловых электростанций (это действительно так, пока нет серьёзной аварии). Впереди уже маячило скорое энергетическое изобилие как база для будущего.

Ситуация у нас в стране и в мире резко изменилась в 1986 году после аварии на Чернобыльской АЭС, случившейся с реактором РБМК. Пока на действующих АЭС — это единственная авария подобного масштаба, имевшая глобальные последствия. И, хотя она произошла из-за грубейших ошибок персонала, в ходе её анализа вскрылся также ряд серьёзных конструктивных дефектов реактора.

После Чернобыля интерес к атомной энергетике во всём мире пропал на долгие годы — новые АЭС не проектировались, а начатые строительства консервировались. Ряд стран, например Швеция, поставили задачу в кратчайший срок полностью ликвидировать АЭС на своих территориях.

После чернобыльской аварии в мире был проведён значительный объём исследовательских и

проектных работ, направленных на повышение эксплуатационной безопасности АЭС, разработаны новые меры предотвращения последствий аварий, ужесточились нормы безопасности. Следующий этап развития атомной энергетики базировался уже на новой технологической базе; изменился и подход к проблеме безопасности, появились принципиально новые, можно сказать, революционные решения активной и пассивной безопасности реактора. Хочется отметить в этой связи работы НИТИ (Научно-исследовательский технологический институт имени А.П. Александрова, г. Сосновый Бор), где исследования по моделированию аварий в атомной промышленности были инициированы ещё в начале 70-х гг. С.Д. Малкиным и В.Б. Хабенским. С 1988 года масштаб, интенсивность и практическая направленность этих работ существенно возросли. В частности совместными усилиями, прежде всего НИТИ, Института химии силикатов РАН, при участии «Атомэнергопроекта» и в кооперации с рядом других организаций, были разработаны устройства, обеспечивающие локализацию в пределах корпуса реактора типа ВВЭР последствий самых тяжёлых аварий, связанных с расплавлением активной зоны [6]. Новейшие АЭС уже оснащаются такими системами.

Новые страны стремятся развивать у себя атомную энергетику. Страны, имеющие АЭС, обновляют и расширяют свои реакторные парки. Развитие атомной энергетики диктуется требованиями ускоренного наращивания энергетических мощностей, а в некоторых странах (например, во Франции) ещё и отсутствием собственных ископаемых энергоресурсов, снижением экологического прессинга энергетики на окружающую среду.

На этом фоне весьма удручающе смотрится авария, случившаяся в 2011 году в Японии на АЭС Фукусима. Экологические последствия её невелики, жертвы минимальны, но дело в том, что в наши дни аварии на Фукусима-1 вообще не должно было быть! Станция построена давно, её первый блок введён в эксплуатацию в 1971 году; когда её строили, многие решения, связанные с безопасностью, не применялись. В частности, реакторы не снабжались системами для дожигания гремучей смеси. Позже необходимость таких систем осознали, их установка стала

обязательной. Почему это не было сделано на Фукусима-1 при очередном ремонте? Как случилось, что за год до аварии контролирующие органы Японии продлили на следующие 10 лет разрешение на эксплуатацию первого реакторного блока (с которого началась авария). Далее: при проектировании АЭС есть понятие «максимальных проектных аварий». На них ориентируются при разработке средств защиты. Один из вариантов самой тяжёлой аварии: полное обесточивание – потеря энергоснабжения. Поэтому в проекте АЭС предусматривается аварийный источник электроснабжения – дизельная электростанция, которая при обесточивании автоматически запускается и уже через несколько секунд (!) обеспечивает работу насосов системы расхолаживания реактора. По требованиям безопасности на АЭС необходимо тройное резервирование средств защиты, и на Фукусиме-1 были три независимые аварийные электростанции. Поскольку станция расположена на берегу океана, то для защиты всех трех дизельных электростанций на случай цунами сооружена дамба.

Но вот в 2010 году на Филиппины обрушивается цунами небывалой силы, высота волны оказывается выше защитной дамбы на Фукусиме-1. Казалось бы, надо срочно наращивать дамбу или найти иное решение для защиты аварийных электростанций от цунами, что не так трудно сделать. Главное, время пока есть, до аварии остаётся год. Однако можно и ничего не делать – ведь столь высокой волны больше может не быть. Всё-таки экономия.

Экологические последствия этой аварии не очень велики – могло быть хуже, а вот материальные потери превышают 100 млрд долл. США, что, скорее всего, в сотни раз превышает стоимость мер по предупреждению аварии.

Число малых и средних аварий, с ущербом менее 20 млн долл. США, после аварии в Чернобыле резко уменьшилось и продолжает уменьшаться. Тем не менее частота таких аварий, как Чернобыль и Фукусима, не подчиняется этой закономерности, такие аварии становятся результатом стечения ряда непредвиденных обстоятельств. Число их невелико, и нам представляется, что было бы значительно продуктивней, если бы человечество вместо патетических филиппик о вреде атомной энергетики, констатируя

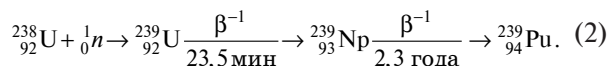
неизбежность аварий, перешло бы к планомерной подготовке к действиям на случай аварии. Что уже само по себе способствовало бы уменьшению их частоты.

Однако атомная энергетика породила одну серьёзную проблему, где остро переплетаются вопросы безопасности и экономики.

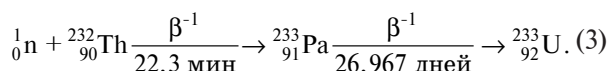
Топливом для подавляющего большинства современных энергетических реакторов служит изотоп урана-235. Его в естественной смеси изотопов природного урана не более 0,71 %, основную массу – около 99,3 % – составляет уран-238. Поэтому топливо искусственно обогащают, поднимая содержание изотопа уран-235 до нескольких процентов; процесс этот очень дорогой, поэтому дальнейшее обогащение невыгодно. Мировые запасы урана-235 невелики и сравнимы с запасами органических топлив, их хватит примерно на сто лет. Дальнейшим этапом будет *бридерная энергетика*, способная обеспечить человечество энергией на многие тысячелетия.

Бридеры (иначе: реакторы-размножители) в процессе своей работы, кроме тепловой энергии, вырабатывают ещё ядерное горючее, причём в количестве большем, чем то топливо, что сгорает в реакторе. Последнее объясняется тем, что из 2,3 (в среднем) свободных нейтронов, выделяющихся при делении урана-235 (см. рис.), для продолжения реакции нужен только один (!). Остальные нейтроны можно использовать, чтоб превратить в ядерное горючее такие весьма распространённые изотопы, как уран-238 или торий-232. Причём запасы тория в 5 раз больше, чем урана. Здесь возможны два основных бридерных цикла:

А. Урановый цикл, в котором бридерный реактор работает на *быстрых нейтронах*. Ядерная реакция идет следующим образом. Уран-238 поглощает нейтрон, превращаясь в уран-239, который, испуская протон, превращается в нептуний-239 (^{239}Np); последний с периодом полураспада 23 дня переходит в плутоний-239, который уже стабилен (период полураспада $2,4 \cdot 10^4$ года). Он является атомным горючим: делится при захвате нейтрона с образованием новых нейтронов, только их примерно в два раза больше, чем при делении урана-235, и процесс «бриденга» может быть продолжен. Схема реакции:



Б. Ториевый цикл осуществляется в реакторе, работающем на *медленных нейтронах*. Исходный материал – размещенный в реакторе торий-232, который переходит в протактиний (^{233}Pa); реакция заканчивается получением урана-233, который по своим свойствам деления подобен урану-235 и плутонию-239:



Главные преимущества бридеров – резкое увеличение ресурсов ядерного топлива, снижение его стоимости и практически неограниченные возможности наращивать энергетические мощности. Недостаток его в том, что плутоний – оружейный материал [5].

Именно бридерная энергетика открывает путь к широкому использованию дешёвой электроэнергии на новой экономической и технологической основе. Этот переход потребует времени и ряда нововведений в технологию промышленности, сельского хозяйства и транспорта. Нововведения включают в себя крупномасштабные многоцелевые энерготехнологические комбинаты, электрификацию строительства и транспорта, электрификацию металлургической и химической промышленности, более эффективные способы переработки отходов. Так атомная промышленность окончательно поглотит не только все сферы производств, но и другие формы человеческой деятельности.

О более отдалённой перспективе сейчас говорить пока ещё рано, однако уже сейчас понятно, что это – использование *термоядерной энергии*, для которой есть практически безграничные источники, их хватит на миллиарды лет. Темпы неуклонного продвижения вперёд в данной области позволяют предположить, что термоядерная энергетика (ТЯЭ), возможно, начнёт конкурировать с бридерной, а может, и заменит её много раньше, чем будут исчерпаны все запасы урана и тория.

На этом фоне появляются и новые, подчас экстравагантные и экзотические, идеи. К ним, наверное, следует отнести *взрывную дейтериевую энергетика* (ВДЭ), где предполагается котёл с множеством термоядерных зарядов [7].

Сейчас много пишут, что вот-вот на смену атомной энергетике придёт нетрадиционная энергетика. Маловероятно. Если это и будет, то не так скоро. Пока альтернативы атомной энергетике нет, поэтому стоит заглядывать в её будущее. Здесь есть несколько вариантов развития. На путь или пути, которые окажутся предпочтительней, будут влиять много факторов, в их числе – талант исполнителей, случайность и просто везение. Изложенный путь нам представляется

естественным, но совершенно не обязательно человечество сразу двинется по нему. История знает много случаев общественных заблуждений не только в жизни, но и в науке и технике, которые надолго замедлили прогресс, а то и на какое-то время пустили его вспять.*

* При написании статьи были использованы некоторые материалы из рукописи Ю.А. Зысина «Энергетика грядущей эры» /архив авторов/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петросьянц А.М.** Атомная энергетика. М.: Наука, 1976. 319 с.
2. **Зысин Ю.А.** Проблема высвобождения внутриядерной энергии // Природа. 1945. № 2. С. 8–13.
3. **Бешер-Белинский Л.Б.** Взгляд изнутри: Книга 2. – Published in Canada by Altaspera Publishing & Literary Agency Inc., 2013. 685 с.; то же: Книга 3, 2014. 685 с.
4. **Нигматулин И.Н., Нигматулин Б.И.** Ядерные энергетические установки. М.: Энергоатомиздат, 1986. 168 с.
5. **Зысин Л.В., Калютик А.А.** Основы ядерной энергетике. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 162 с.
6. **Бешта С.В., Грановский В.С., Хабенский В.Б. [и др.]** Взаимодействие оксидного жертвенного материала устройства локализации с расплавом кориюма при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР. Части. 1–3 // Труды РНКТ-5. Том 1. Общие проблемные доклады. М., 2010.
7. **Иванов Г.А., Волошин Н.П., Ганеев А.С. [и др.]** Взрывная дейтериевая энергетика. Снежинск: Изд-во РФЯЦ, 1997. 138 с.

REFERENCES

1. **Petrosyants A.M.** Atomnaya energetika. M.: Nauka, 1976. 319 s.
2. **Zysin Yu.A.** Problema vysvobozhdeniya vnutyriyadernoy energii. *Priroda*. 1945. № 2. S. 8–13. (rus.)
3. **Besher-Belinskiy L.B.** Vzglyad iznutri. Kniga 2. – Published in Canada by Altaspera Publishing & Literary Agency Inc., 2013. – 685 s.; to zhe: kniga 3, 2014. 685 s. (rus.)
4. **Nigmatulin I.N., Nigmatulin B.I.** Yadernyye energeticheskiye ustanovki. M.: Energoatomizdat, 1986. 168 s. (rus.)
5. **Zysin L.V., Kalyutik A.A.** Osnovy yadernoy energetiki. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2008. 162 s. (rus.)
6. **Beshta S.V., Granovskiy V.S., Khabenskiy V.B. [i dr.]** Vzaimodeystviye oksidnogo zhertvennogo materiala ustroystva lokalizatsii s rasplavom koriuma pri tyazhelay avarii na AES s VVER. Chasti. 1–3. *Trudy RNKT-5. Tom 1. Obshchiye problemnyye doklady*. M., 2010. (rus.)
7. **Ivanov G. A., Voloshin N. P., Ganeyev A. S. [i dr.]** Vzryvnaya deyteriyevaya energetika. Snezhinsk: Izd-vo RFYaTs, 1997. 138 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

ЗЫСИН Леонид Владимирович – доктор технических наук научный сотрудник Института интегративных исследований (ИИИ).
Geula 39, Haifa, 33197, Israel.
E-mail: lv_zyssin@mail.ru

ZYSSIN Leonid V. – Integrative Research Institute.
Geula 39, Haifa, 33197, Israel.
E-mail: lv_zyssin@mail.ru

СТЕШЕНКОВ Леонид Петрович – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. сотр..
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
E-mail: steshenkov@spbstu.ru

STESHENKOV Leonid P. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
E-mail: steshenkov@spbstu.ru