

*Энергия*

*атома*

Идея прогресса, как символ веры в неограниченное нравственное и умственное совершенствование природы человека, оформилась в V веке, в трудах блаженного Августина. Эта столь привычная теперь идея в корне отличается от античных представлений о смене веков — от золотого до железного — и еще более древних учений о круговороте периодов расцвета и упадка человечества. В XVII веке идея прогресса обрела философское и научное основание, а в следующем веке, дополненная верой в поступательное социальное развитие, получила всеобщее признание.

Движущей идеей прогресса стала наука. «Scientia est potentia» — «Знание — сила» — эти крылатые слова Френсиса Бэкона повторяют уже четыре столетия, хотя теперь уже и без былой гордости: в наше время они приобрели устрашающую наглядность. Та же наука, которая в продолжение трех веков питала и утверждала идею прогресса, теперь довольно точно определяет его пределы. Она бесстрастно свидетельствует, что через 50—100 лет на Земле иссякнут запасы нефти и газа, а еще через 300—500 лет — запасы угля; что при нынешних темпах загрязнения наша планета уже в будущем столетии станет непригодной для жизни; что на Земле сейчас освоено 55 % годных к обработке почв и 15 % пресных вод и что она способна прокормить и согреть лишь в три раза больше людей, чем теперь.

Человек впервые сталкивается с проблемами такого глобального, по существу космического, масштаба, и никто не может предсказать, как он с ними справится. Одно несомненно: прежде всего ему предстоит решить проблему энергии, поскольку во все времена — от первого костра до атомной электростанции — на ее добывание человек затрачивал примерно треть усилий. Уже сегодня ясно, что без ядерной энергии эту проблему не решить. И если бы наука нуждалась в оправданиях, одного этого открытия с нее было бы довольно.

Важное преимущество АЭС — их минимальное воздействие на биосферу. АЭС мощностью в 1 ГВт (1 ГВт = 10<sup>9</sup> Вт) «сжигает» всего около 1 кг урана-235 в день. Даже с учетом того обстоятельства, что вес расходуемого урана составляет 2—3 % от общего веса урана, это все-таки много меньше, чем эшелон нефти или угля в день, необходимый для работы тепловой станции равной мощности. Ясно, что при этом во столько же раз снижается объем горных выработок и транспортные расходы.

Много написано об экологической безопасности атомных станций, и это действительно так. Риск погибнуть от радиации в окрестностях АЭС меньше, чем опасность быть убитым молнией или крупным метеоритом. Тепловые станции в этом отношении много вреднее: в каждой тонне угля содержится примерно 80 г урана, поэтому радиоактивность шлейфов дыма мощных ТЭЦ в сотни раз превышает выбросы АЭС, не говоря уж о том, что сернистый газ этого дыма со временем уничтожает в округе все леса и живность.

И все же люди инстинктивно сопротивляются строительству АЭС, по этому поводу устраиваются референдумы и демонстрации, уходят в отставку правительства. Причина этого явления — не только в неосведомленности большей части людей относительно природы атомной энергии: как правило, они отождествляют ее с атомной бомбой. По-видимому, эмоциональное неприятие атомной энергии сродни тем многочисленным психологическим феноменам человеческого сознания, которые часто побуждают нас к поступкам, явно противоречащим нашим же целям. К примеру, многие горожане мечтают жить в тишине, но мало кто из них пожелает поселиться в заброшенном замке — даже если он не верит в привидения и вампиров. Но независимо от капризов психологии логика жизни побеждает: на пепелище Хиросимы вновь выросли дома и рождаются дети. И даже трагедия Чернобыля не может надолго изменить логику развития атомной энергетики: у человечества нет пока другой длительной перспективы выжить. Атомную энергию невозможно теперь «закрыть». Точно так же нельзя упразднить автомобили, корабли и самолеты, несмотря на то, что каждый год десятки и сотни тысяч людей, к сожалению, тонут в кораблекрушениях, гибнут в авто- и авиакатастрофах.

Грядущие проблемы энергетики без атомной энергии решить невозможно — с этим теперь согласны почти все. Но как надолго хватит «уранового топлива»? В каждом грамме земной породы содержится в среднем  $3,5 \times 10^{-6}$  г урана, то есть  $3 \times 10^{-8}$  г урана-235. В пересчете на энергию деления это составляет 600 кал, то есть всего лишь в 10 раз меньше, чем химическая энергия, заключенная в грамме угля. Кстати, в 1 г угля урана больше, а именно  $0,8 \times 10^{-4}$  г, и при сгорании он большей частью остается в золе, которая составляет 20 % от веса исходного угля. Легко сосчитать, что в каждом грамме золы запасено около 60 ккал энергии деления урана-235, то есть примерно в 10 раз больше, чем энергия сгорания самого угля. Таким образом, земля под ногами — это сплошное месторождение ядерного топлива, и нужно только научиться его оттуда извлекать.

Во всем мире считаются рентабельными месторождения с содержанием урана больше чем 10-3 г/г, то есть 1 г на 1 кг породы. В таких месторождениях — около 5 млн. тонн урана или 50 тыс. тонн урана-235, из которых сейчас на планете добывается около 300 тонн в год. Современный уровень потребления электроэнергии соответствует сжиганию около 500 тонн урана-235 в год, то есть при нынешних темпах развития энергетики запасов урана-235 хватит ненадолго — не более чем на 100 лет. Отсюда ясно, что для решения энергетической проблемы будущего нужно найти способ использовать уран-238. Такой способ нашли довольно быстро: Ферми предложил идею «реактора-размножителя», при работе которого ядерного топлива образуется больше, чем сгорает.

Атомный реактор можно уподобить костру, в котором около 1% сухих дров (уран-235), а все остальное — сырые поленья (уран-238). Споры нет, такой костер все равно греет, но все же обидно и неэкономно после того, как он прогорит, разбрасывать кучу тлеющих головешек. А нет ли способа их как-либо использовать? Один из них издревле применяют углежог: они сооружают поленницу из сырых дров, укрывают ее, зажигают внутри костер, и через некоторое время сырые поленья превращаются в первосортный древесный уголь. Нечто похожее можно осуществить и в атомном реакторе, превращая «негорючий» уран-238 в «горючий» плутоний-239.

Чистый плутоний — это тяжелый серебристо-серый металл с плотностью 19,82 г/см<sup>3</sup> и температурой плавления 640 °С. Принято говорить, что его химические свойства изучены сейчас лучше, чем химия железа. В природе плутония практически нет: в урановых рудах его в 400 000 раз меньше, чем радия, но зато сотни тонн плутония хранятся в арсеналах разных стран.

Сейчас известно 15 изотопов плутония — от плутония-232 до плутония-246, все они радиоактивны с периодами полураспада от 20 мин до 76 млн. лет. Самый важный из них — плутоний-239. Его период полураспада  $T = 24\,360$  лет, то есть в масштабе человеческой жизни его можно считать стабильным. Подобно радью, он испускает  $\alpha$ -частицы с энергией 5,1 МэВ и превращается при этом в уран-235:

Плутоний-239, подобно урану-235, обладает редкой способностью делиться под действием медленных нейтронов. Его сечение деления и средняя множественность нейтронов на деление даже больше, чем для урана-235, поэтому плутоний-239 — лучшее ядерное топливо и ядерная взрывчатка. Это поняли довольно быстро — всего через два года после открытия деления.

В то лето 1939 г., когда на восточном побережье США Ферми искал способ уменьшить поглощение нейтронов в уране-238, чтобы осуществить цепную реакцию, на западном побережье, в Калифорнии, Эдвин Макмиллан решил подробно изучить, что же происходит с ураном-238 после того, как он поглотит нейтрон. В его распоряжении был только что построенный циклотрон, который мог ускорять дейтроны до энергии 16 МэВ. Направляя их на мишень из бериллия, он вызывал ядерную реакцию с мощным потоком нейтронов: чтобы получить такой же поток с помощью стандартного радон-бериллиевого источника, нужно несколько килограммов радия, то есть больше его мировых запасов. Облучая этими нейтронами тонкую урановую мишень, Макмиллан, как и многие до него, наблюдал множество осколков деления, которые вылетали из урановой мишени с большой энергией. Сама мишень тоже становилась радиоактивной и испускала электроны с периодом полураспада 23 мин, то есть как раз с тем периодом, который наблюдали еще в 1937 г. Ган, Мейтнер и Штрассман,

К этому времени уже не было особых сомнений в том, что это распадается изотоп урана-239, который образовался при захвате нейтрона ядром урана-238.

Трансурановый элемент с атомным номером 93, образующийся при  $\beta$ -распаде урана-238, в 1946 г. назовут нептунием, но, чтобы доказать его реальность, предстояло еще выделить его в чистом виде.

В мае 1940 г. Филипп Абельсон, геохимик из Вашингтонского университета, приехал ненадолго в Беркли, чтобы на уникальном в то время циклотроне продолжить исследования с ураном, начатые Макмилланом. Вдвоем им хватило недели, чтобы отделить новый элемент от урана. При этом оказалось, что он тоже испускает электроны, но с периодом полураспада 2,3 дня. Логично было предположить, что нептуний-239 превращается при этом в новый элемент 94, который впоследствии назовут плутонием.

Тогда это была только недоказанная гипотеза, но многие сразу в нее поверили.

Через год, в марте 1941 г., четверо американских исследователей — Джозеф Кеннеди, Гленн Сиборг, Эмилио Сегре и Артур Валь — доказали, что из нептуния-239 действительно образуется плутоний-239, который в свою очередь испускает  $\alpha$ -частицы и с периодом полураспада 24 360 лет превращается в хорошо знакомый уран-235. Два месяца спустя они убедились, что плутоний-239 под действием медленных нейтронов делится, подобно урану-235, в согласии с предсказаниями теории деления Бора — Уилера — Френкеля. Еще через год, 18 августа 1942 г., Баррис Каннингем и Луис Вернер в Беркли выделили первые 0,1 мг плутония. (Девять лет спустя за открытие плутония Эдвин Маттисон Макмиллан (1907— 1989) и Гленн Теодор Сиборг (р. 1912 г.) будут удостоены Нобелевской премии, 1951 г.).

Только через семь лет после опытов Ферми по облучению урана нейтронами стал вполне понятен их смысл: он наблюдал одновременно свыше сотни осколков деления урана-235 и, кроме того, всю цепочку превращении урана-238. По существу он был прав тогда, говоря о наблюдении трансурановых элементов, хотя и не представлял всей сложности наблюдаемого явления.

Возвращаясь к событиям тех не очень далеких, но уже исторических дней, трудно удержаться от мысли, что решение Ферми прекратить исследования реакций нейтронов с ураном (которое он никогда не мог себе простить) обернулось для человечества неожиданным благом. Страшно подумать, как бы повернулась история, если бы деление урана было открыто не в 1938 г., а в 1934 г. — вскоре после прихода нацистов к власти. Трудно сомневаться в том, что идущий к войне фашизм сумел бы использовать весь научный потенциал Германии, чтобы создать и применить ядерное оружие.

Открытие плутония изменило сам подход к решению урановой проблемы. Прежде всего, стало ясно, что поглощение нейтронов в уране-238 — полезный процесс, поскольку при этом образуется «ядерное топливо» — столь же и даже более эффективное, чем уран-235. Кроме того, плутоний можно отделять от урана, из которого он образуется, химическими методами, а это несравнимо проще, чем разделять изотопы урана. Однако вся эта красивая схема могла стать реальностью лишь при условии, что цепная ядерная реакция в природном уране действительно осуществима. (Сырые поленья можно просушить только в том случае, если костер пусть плохо, но все же горит.) Пуск первого ядерного реактора в декабре 1942 г. разрешил это последнее сомнение. Отныне на пути к ядерной энергии оставались лишь инженерные и технологические трудности. Их тоже немало, и преодолеть их было не просто: достаточно вспомнить, что для выделения 1 г плутония надо переработать примерно 1 кг облученного урана, пропустив его через 30 химических реакций и более сотни операций. Но уже в августе 1944 г. в Хэнфорде были запущены огромные «урановые котлы», а весной 1945 г. они давали почти по килограмму плутония в день.

В истории атомной энергии поражает контраст между простотой конечного результата (урановые стержни в баке с водой) и изощренностью физических идей, необходимых для понимания процессов, происходящих в этом баке. Для решения проблемы ядерной энергии были использованы все главные достижения науки XX века: теория относительности и квантовая механика, атомная и ядерная физика, учение о радиоактивности и техника ускорителей. Пожалуй, никогда прежде повседневная жизнь людей не зависела так явно от успехов самого абстрактного знания.



## АТОМНАЯ ПРОБЛЕМА

Со времени открытия радиоактивности, выяснения ее природы и запасов энергии, с ней связанных, ученые всегда опасались, что, влекомые инстинктом познания, они невольно уподобятся злополучной Тандоре.

В 1903 г. Резерфорд как-то заметил: «Может статься, что какой-нибудь идиот в лаборатории взорвет ненароком весь мир».

В том же году Пьер Кюри с беспокойством говорил в своей нобелевской речи: «Можно думать, что в преступных руках радий станет очень опасным, и здесь уместно задать вопрос, заинтересовано ли человечество в дальнейшем раскрытии секретов природы, достаточно ли оно созрело для того, чтобы с пользой применить полученные знания, не могут ли они повлиять отрицательно на будущее человечества?»

В 1936 г., незадолго до открытия деления урана, Фрэнсис Астон возвращается к той же мысли: «...доступные источники внутриатомной энергии, безусловно, имеются повсюду вокруг нас, и настанет день, когда человек высвободит и поставит под контроль ее почти бесконечную силу. Мы не сможем помешать ему сделать это и лишь надеемся, что он не будет использовать ее исключительно для того, чтобы взорвать своего ближайшего соседа».



Ощущение этой изначальной антиномии между логикой познания и нравственным императивом не покидало ученых даже в моменты их наивысшего торжества: «Все мы теперь сукины дети», — сказал Кеннет Бейнбридж Роберту Оппенгеймеру, глядя на зловещий атомный гриб в пустыне Аламогордо. (Он мог воочию удостовериться в справедливости формулы Эйнштейна  $E = mc^2$  которую он сам же подтвердил количественно в 1933 г.) «Мы делали дело дьявола», — скажет Роберт Оппенгеймер десять лет спустя.

При виде атомного зарева ученые не только испытали гордость за мощь человеческого разума, но сразу же почувствовали и свое бессилие воспрепятствовать преступным применениям открытых ими сил. Осознание этого бессилия стало источником многих личных трагедий. «Страшно подумать, — писал Фредерик Содди в 1949 г., — в какие неподготовленные руки наука столь преждевременно вложила силы, немногим более четырех лет назад казавшиеся недоступными...» А мягкий, кроткий и доброжелательный Отто Ган после Хиросимы и Нагасаки был близок к самоубийству.

Не все ученые восприняли новую ситуацию столь трагично. «Быть может, жизнь станет теперь менее счастливой, но она не прекратится. У нас нет пока такой силы, которая могла бы уничтожить нашу планету», — писал Ферми после испытания водородной бомбы. Эйнштейн соглашался с ним: «Открытие деления урана угрожает цивилизации и людям не более, чем изобретение спички. Дальнейшее развитие человечества зависит от его моральных устоев, а не от уровня технических достижений». А Роберт Оппенгеймер в конце жизни сравнивал страх перед атомной бомбой с ужасом древнего человека перед молнией и бушующим океаном. Современному человеку эти стихии также неподвластны, но он изобрел громоотвод и построил корабли, под защитой которых чувствует себя в безопасности. Точно так же трудно поверить в то, что когда-либо удастся укротить стихию человеческих страстей, но можно надеяться, что со временем человек найдет способ защиты от их губительных последствий. Как это ни парадоксально, но именно после изобретения атомной бомбы Европа вот уже сорок лет не знает войн — такое за всю ее историю случилось только однажды. С 1945 г. на Земле прошло свыше ста больших и малых войн, но ни одна из них не коснулась территории ядерных держав.

Человек впервые узнал огонь благодаря лесным пожарам. В отличие от животных, он сумел преодолеть ужас перед ним и научился им управлять. Точно так же страх перед атомной бомбой не должен заслонять нам пути в будущее, парализовать волю к жизни и веру в нашу способность предотвратить самоуничтожение. Храм Артемиды и сейчас беззащитен против геростратов, но отсюда еще не следует, что строить его не стоило. И, наконец, «человек мудрый ни о чем так мало не думает, как о смерти».