

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

621.039.6:620.4

НЕОБХОДИМОСТЬ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ *)

Г. Бете

Если Соединенным Штатам необходимо иметь другие источники энергии, кроме органического ископаемого топлива, то единственным источником, способным внести основной вклад в энергетику до конца нашего столетия, является деление ядер.

Повышение вчетверо цен на нефть осенью 1973 г. явилось внезапным, но, может быть, благотворным ударом для западного мира. Оно привлекло внимание к тому факту, что запасы нефти на исходе и что человечество либо должно обратиться к другим видам горючего или ввести ограничения на потребление энергии, либо прибегнуть к обоим средствам сразу.

Возрастание цены не было полностью необъяснимым. С 1950 по 1973 г. цена на нефть, измеряемая в неизменных долларах, неуклонно уменьшалась. Более того, было подсчитано, что если мировая добыча нефти будет возрастать с той же скоростью, что и в прошлые два десятилетия, то тенденция роста могла бы просуществовать только до 1995 г.; затем поставки нефти должны были бы резко сократиться (рис. 1). В соответствии с этим нефтепроизводящие страны должны заботиться о своем собственном экономическом развитии, пока их нефтяные запасы

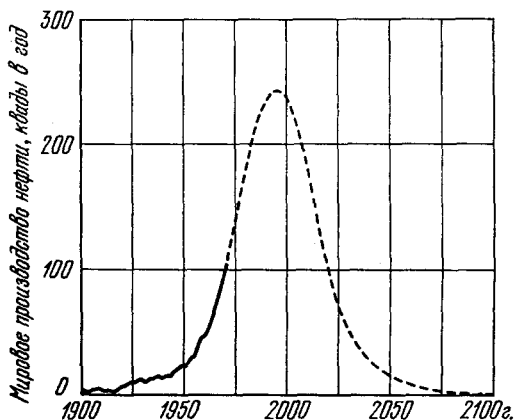


Рис. 1. Форма показанной кривой, представляющей мировое производство нефти в течение двух столетий, связана с конечными запасами нефти.

Прогноз основан на работе М. Хьюберта из Геологического управления США, который оценивает, что если мировое производство нефти будет возрастать с той же скоростью, что и за последние два десятилетия, максимум будет достигнут к 1995 г., а затем последует резкий спад. Калорийность разных видов топлива, обсуждаемых в данной статье, выражена в ккалах (1 квадрильон) = 10^{18} британских тепловых единиц (б. т. е.) **).

*) Н. А. Бете, The Necessity of Fission Power, Scientific American 234 (1), 21 (1976). Перевод Е. Г. Гамалия.

Ганс А. Бете — лауреат Нобелевской премии по физике 1967 г. за открытие ядерных реакций, являющихся источником энергии для звезд.

**) Британская тепловая единица (б. т. е.) — British thermal unit (B.t.u.): B.t.u._{cp} = 1055, 8 дж, B.t.u. — 6061 = 1054,5 дж. (Прим. перев.)

не исчерпаны, с тем чтобы они могли рассчитывать на другие источники дохода в будущем. В то же время остальной мир должен принять меры, чтобы стать менее зависимым от нефти, — в особенности от ввозимой нефти, — пока еще есть время.

Что может означать для Соединенных Штатов, которые постоянно получают более 15% своей энергии в виде импортируемой нефти, стать энергетически независимыми? В

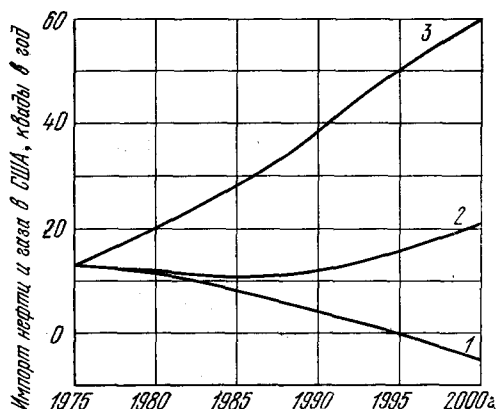


Рис. 2. Три прогноза степени зависимости США от импортируемой нефти и газа для оставшейся части нашего столетия были сделаны в 1975 г. в докладе Администрации по исследованию и разработке источников энергии (АИРЭ).

Кривая 1 показывает, что зависимость США от импортируемого топлива может закончиться к 1995 г.; при этом предполагается, что все рекомендации Национального плана АИРЭ по достижению энергетической независимости будут осуществлены. Кривая 2 демонстрирует действие промежуточного подхода, связанного с контролем за потреблением энергии. Кривая 3 отражает ожидаемые тенденции в импорте нефти при отсутствии новых подходов. Все три кривые построены в предположении, что эффективность (к. п. д.) автомобилей будет улучшена до 40% за следующие 5 лет как результат перехода к меньшим автомобилям и что количество угольных и ядерных электростанций будет возрастать в соответствии с возрастающими потребностями в электричестве. Любое замедление ввода ядерных электростанций резко сдвинет все три кривые вверх.

стать от 12 квад в наше время до более чем 60 в 2000 г. При теперешних ценах импорт столь большого количества нефти обошелся бы в 120 млрд. долларов по сравнению с 28 млрд. в 1974 г., т. е. привел бы к возрастанию затрат на 95 млрд. долларов.

Сейчас 95 млрд. долларов не выглядят, возможно, слишком большой суммой, когда планируемый дефицит федерального бюджета составляет 70 млрд. Экономика международной торговли, однако, совсем другое дело. Даже торговый дефицит в 10 млрд. долларов оказывает влияние на стабильность свободно конвертируемой валюты. Почти невозможно представить себе экспорт, который мог бы принести добавочный дефицит в 95 млрд. Кроме того, если имеющиеся тенденции сохранятся, США потребуются около 30% максимального мирового производства нефти. Ясно, что США не могут следовать столь опасным путем.

Если такая ситуация является критической для США, то для Японии и стран Западной Европы это вопрос жизни и смерти. В конце концов США имеют значительные запасы нефти и газа и изобилие угля.

энергетически независимыми? В отчете, выпущенном в июне прошлого года Агентством по исследованию и развитию источников энергии (АИРЭ) намечены планы, как США могут достигнуть этой цели. Прогнозы АИРЭ выражены в квадах, или кватрильонах (10^{15}) британских тепловых единиц (б. т. е.). Согласно АИРЭ достижение энергетической независимости требует двустороннего подхода. Во-первых, США должны быть технологически оснащены не только для расширения эксплуатации существующих главных источников энергии (нефть, уголь, газ и уран), но также для развития нескольких новых источников энергии. Во-вторых, главные усилия по контролю за потреблением энергии должны вестись в двух направлениях: уменьшить общее потребление энергии и переместить потребление с нефти и на другие источники энергии. Если успешно будут применены оба средства, то энергетическая независимость может быть достигнута только к 1995 г. (рис. 2). Без каких-либо новых подходов необходимость в импорте нефти будет постоянно возра-

Япония и Италия не имеют собственных запасов ни одного из перечисленных видов горючего. В то время как Англия и Норвегия будут иметь ограниченную национальную добычу нефти в течение нескольких лет, другие страны Западной Европы не имеют собственных запасов натуральной нефти, у них есть лишь ограниченные залежи угля. Нефти не хватает, и если США будут стремиться к получению большего количества нефти на мировом рынке, то это может привести только к дальнейшему повышению цен и экономическому упадку стран Западной Европы и Японии. Их экономическая несостоятельность в свою очередь сделает невозможным для США экспорт в эти страны и, следовательно, платежи за собственный импорт.

□

В последующие пять лет только на одном пути США может добиться заметного успеха в достижении энергетической независимости, и этот путь — контроль и ограничение потребления энергии. Существуют два способа сохранения энергии. Один подход связан со снижением жизненного уровня страны в некоторых отношениях, например замена больших автомобилей на меньшие. Эта мера широко применялась (вероятно, ценой некоторого снижения безопасности). Для большинства американцев, однако, представляется нежелательным двигаться слишком далеко в этом направлении.

Другой подход к сохранению энергии заключается в увеличении эффективности ее использования. Уже было выдвинуто много полезных предложений, таких, как улучшение теплоизоляции жилищ, увеличение эффективности систем для отопления помещений и нагрева воды, усовершенствование способа получения пара в промышленности и модификация других производственных процессов. Изменения указанного типа требуют значительного финансирования, и их экономическая эффективность пока неясна. Потребуется много усилий со стороны руководителей и системы образования, а, возможно, и возникновение иных побудительных мотивов, чтобы понять возможности повышения эффективности. Если все это будет сделано, то общее потребление энергии в США в 2000 г. может быть снижено с 166 до 120 квад.

АИРЭ предсказывает, что в случае, если производство электроэнергии электростанциями, работающими на угле и ядерном горючем, будет возрастать в соответствии со спросом, то США могут прийти к промежуточной тенденции в импорте нефти: удовлетворительное снижение в первые 10 лет и последующий подъем такой, что к 2000 г. импорт нефти превысит теперешний уровень. Следуя этим курсом, нельзя достичь энергетической независимости.

Во всех трех проектах АИРЭ предполагается, что США будут постепенно переходить от жидкого топлива (нефть и газ) к твердому (уголь и уран). Например, в послании президента Форда Конгрессу в январе 1975 г. действительный вклад различных видов топлива в наш энергетический бюджет в 1973 г. сравнивался с планами президента на 1985 г. и ожидаемым положением в 1985 г., если никаких шагов не будет предпринято (рис. 3). В последнем случае потребуется импорт 36 квад нефти в хорошем согласии с предсказанием АИРЭ о потребности в 28 квад.

Согласно проекту Форда общее потребление горючего в США составит 103 квада в 1985 г., т. е. возрастет на 28 квад по сравнению с 1973 г. Так как большая часть добавочной энергии будет переработана в электрическую с тепловой эффективностью от 33 до 40%, то потребляемая энергия

возрастет только на 17 квад, или на 26 %. Принимая во внимание тот факт, что ожидаемый прирост рабочей силы за этот период должен составить 22 %, легко видеть, что потребляемая энергия в расчете на одного работающего должна примерно сохраниться.

В послании Форда планируется, что национальная добыча нефти возрастет на 7 квад к 1985 г., а производство естественного газа только на 2 квада, несмотря на то, что производство нефти в США падало за последние два года, а

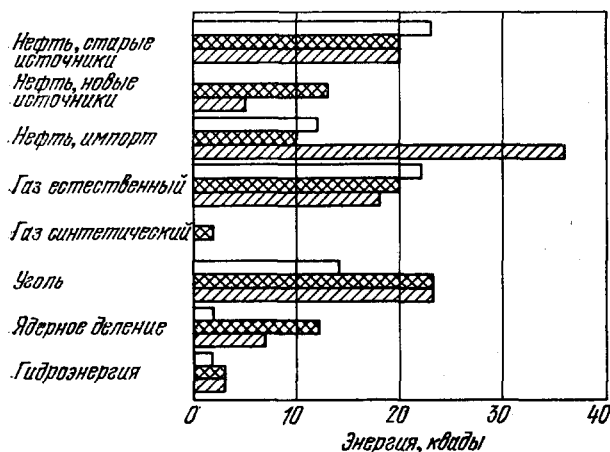


Рис. 3. Представлены две оценки вклада различных видов топлива в энергетический бюджет США в 1985 г. наряду с действительным энергетическим бюджетом 1973 г. (светлые полосы).

Диаграмма основана на послании президента Форда Конгрессу США в 1975 г., в котором он сравнивал ожидаемый вклад, согласно энергетической программе его администрации (двойная штриховка), с предсказываемой ситуацией, если никаких действий не будет предпринято (одинарная штриховка). Общее потребление энергии в США в 1973 г. составило 75 квад; к 1985 г. при отсутствии новых программ оно составит 112 квад, включая около 38 квад импортируемой нефти; программа Форда, которая предусматривает в основном усилия по контролю за потреблением энергии, направленные на экономию около девяти квад в год, предсказывает общее потребление энергии в США 103 квада в 1985 г.

игру. Только уголь и уран имеются в США в изобилии. Поэтому президент Форд призывает к резкому увеличению добычи угля от 600 млн. тонн в 1973 г. до 1 млрд. тонн в 1985 г. Тем временем энергетическая программа АИРЭ призывает к строительству 200 ядерных реакторов деления с энергетическим выходом, эквивалентным 10 квадам.

Уголь мог бы заменить нефть и газ в предприятиях общественного пользования и других видах промышленности, где это возможно. Преобразование угля в искусственные нефть и газ весьма существенно, поэтому экспериментальным заводам для этих процессов и обеспечению экономической рентабельности должно быть оказано предпочтение в первую очередь. То же самое относится и к производству нефти из сланца.

Уголь не может, однако, заменить все, в особенности если он интенсивно используется для производства синтетического топлива. США нуждаются в другом источнике энергии, желательно не ископаемого органического происхождения. Единственным источником, который к настоящему времени достаточно разработан для того, чтобы играть сколько-нибудь существенную роль, является ядерное деление. Мыслящие люди выдвигали

разведанные запасы газа возросли на величину, несколько меньшую половины потребления за последние восемь лет. Стимулирование национального производства нефти и газа в США может привести к общему производству около 53 квад. В этом выводы отчета АИРЭ и послания президента Форда согласуются, однако АИРЭ указывает количество газа несколько большее, а нефти меньшее.

Конечно, страна должна будет быстрее истощать свои ресурсы и платить за это тем, что после 1985 г. она будет иметь меньшие национальные запасы нефти и газа. Предложенное стимулирование национальной добычи нефти и газа, однако, приведет к тому, что другие виды энергии смогут «вдохнуть свободно» и вступить в

много возражений против ядерных реакторов деления; я буду обсуждать эти возражения позже. Но сначала позвольте мне обсудить предложенные альтернативные источники энергии.

□

Ядерный синтез является энергетическим источником, который прочно завладел воображением ученых. Пока полностью неизвестно, однако, можно ли когда-либо получить полезную энергию в процессе синтеза. Известно, что звезды и водородные бомбы черпают свою энергию из слияния легких атомных ядер, но может ли быть такая энергия высвобождена на Земле контролируемым образом? Требования для достижения поставленной цели грандиозны: смесь газов тяжелого водорода нужно нагреть до температуры в 100 млн. градусов Цельсия и удержать в этом состоянии достаточно долго, чтобы реакция между водородными ядрами происходила со скоростью, достаточной для выделения энергии большей, чем затрачено на нагревание смеси.

Наиболее очевидный путь для выполнения этих условий — магнитное удержание. При 100 млн. °С водород полностью ионизован, поэтому положительно заряженные ядра и отрицательно заряженные электроны можно направлять магнитными полями. С начала 50-х годов физиками многих стран было сконструировано много сложных конфигураций с магнитными полями, но ни на одной из них не удалось выполнить условия breakeven'a *). Большие надежды сменялись полным разочарованием. В настоящее время перспективы представляются лучшими, чем когда-либо прежде; несколько лет назад русские экспериментаторы изобрели установку, названную «Токамак», которая работала по меньшей мере в грубом согласии с теоретическими ожиданиями. Эта установка сравнительно успешно была воспроизведена в США. Более 200 млн. долларов выделено АИРЭ на строительство гораздо большей установки типа «Токамак» в Принстонском университете; если эта машина также подтвердит теоретические ожидания, то мы, возможно, узнаем в начале 80-х годов, может ли быть получена полезная энергия от реакций синтеза на пути «Токамака».

Однако было уже слишком много разочарований, чтобы позволить себе уверенные предсказания. Работа над установками типа «Токамак» также достаточно продвинута во многих лабораториях США, СССР и нескольких странах Западной Европы. Если проблема может быть решена, то она, вероятно, будет решена. Деньги не являются ограничивающим фактором: ежегодное финансирование этой проблемы в США превышает 100 млн. долларов и постоянно возрастает. Прогресс ограничен скорее наличием специалистов высокого класса; время от времени необходимо строить большие машины, а затем ставить важные опыты. Тем временем появилось несколько альтернативных магнитному удержанию схем. Вдобавок имеются полностью отличные от магнитного удержания подходы лазерного синтеза и нагрева электронными пучками. По моему мнению, эти схемы будут реализованы в более далеком будущем, чем «Токамаки».

Предположим, что одна из этих схем будет успешно доказана в начале 80-х годов. Где мы окажемся тогда? Проблема заключается в том, что строительство больших сложных промышленных предприятий занимает долгое время даже тогда, когда основные части проекта хорошо известны.

*) Breakeven — условие, когда энергия, выделившаяся в термоядерных реакциях, сравнивается с энергией, затраченной на создание, нагревание и удержание плазмы. (Прим. перев.)

Хотя предварительные проекты электростанции на энергии синтеза уже разрабатываются, однако разумно надеяться, что прототип коммерческого реактора синтеза войдет в строй действующих около 2000 г. и что энергия синтеза сможет составить несколько процентов энергетического бюджета страны к 2020 г.

Совсем другое дело — солнечная энергия. Нет сомнения в возможности технической осуществимости проектов использования солнечной энергии, однако экономически выгодные проекты — иная проблема. Легко можно различить два способа использования солнечной энергии: отопление жилищ и производство электроэнергии в больших масштабах. Широкое распространение может получить солнечная энергия для частичного обогрева зданий; возможно ее использование также для кондиционирования воздуха. АИРЭ поддерживает разработку моделей зданий с солнечным обогревом. Оценки стоимости системы солнечного обогрева для стандартного дома в 1200 кв. футов ($\sim 100 \text{ м}^2$) лежат между 5 и 10 тыс. долларов при массовом производстве по сравнению с 1 тыс. долларов для традиционных обогревательных систем. С такой установкой можно обеспечить около 50 % потребности в отоплении жилищ (большая часть на Юге, меньше на Севере, особенно в районах с большой облачностью). В любом случае дополнительная отопительная система, использующая газ, нефть или электричество, должна быть установлена; иначе стоимость солнечного отопления станет непомерной.

АИРЭ оценивает, что 32 млн. новых домовладений появится между 1972 и 2000 г. и что они составят примерно треть всех жилищ. Если новые дома будут снабжены системами солнечного отопления, то это потребует частных вложений на сумму от 150 до 300 млрд. долларов. Потребности в отоплении для всех жилых помещений в 1973 г. составили около 10 % полного потребления энергии в стране, и кажется, что эта доля останется и сейчас такой же. Некоторые из новых домов не будут использовать солнечную энергию, но давайте сделаем оптимистическое предположение, что равная часть старых зданий будет переведена на солнечное отопление. В этом случае треть всех зданий будет получать в среднем около половины необходимого тепла от Солнца, которое таким образом обеспечит несколько менее 2 % энергетических потребностей страны. Этот вклад будет полезным, но отнюдь не решающим.

В использовании солнечного тепла для производства энергии в больших масштабах есть и другие проблемы (здесь я имею в виду производство электроэнергии), но положение не будет существенно отличаться, если энергия будет запасаться в виде топлива (например, водорода). Из многих проектов, высказанных ранее, наиболее практичным, по моему мнению, является предложение покрыть большую площадь (со стороны, примерно, в милю) зеркалами, отражающими солнечный свет на помещенный в центре котел. Зеркала должны двигаться при помощи механизмов, управляемых компьютером; котел должен вырабатывать электроэнергию по традиционной схеме. По меньшей мере три отдельных группы, поддерживаемых АИРЭ, работают над этим проектом. Наилучшие оценки, которые мне известны, дают стоимость установленного киловатта (мощность, усредненная за 24-часовой день) в 2500 долларов, исключая проценты с капитала и инфляцию во время строительства. Аналогичные оценки для ядерного реактора деления дают стоимость установленного киловатта в 500 долларов, так что солнечная энергия оказывается в пять раз дороже ядерной.

Эта оценка стоимости может показаться завышенной, но небольшое рассуждение показывает, что это не так. Во-первых, Солнце светит только часть дня. В солнечный зимний день на юге США одна квадратная миля

сфокусированных зеркал достаточна для производства в среднем за день 100 *Мвт* электрической мощности стоимостью в 250 млн. долларов. Чтобы достичь такой цифры, необходимо использовать солнечное тепло за весь световой день. В полдень такая система должна генерировать около 400 *Мвт*, при восходе и закате соответственно меньше, ночью она вообще не будет работать. Чтобы получить в среднем 100 *Мвт*, нужно иметь установку, способную генерировать 400 *Мвт*, так что энергетическое оборудование (котлы, турбины и т. п.) должно стоить в четыре раза больше по сравнению с электростанциями на ядерном или органическом горючем. К этим общим затратам должны быть прибавлены затраты на хранение энергии, которая потребуется в ночное время и облачные дни. (Способы хранения энергии являются практически не решенной проблемой.)

Предположим, что половина затрат приходится на зеркала и управляющие ими механизмы с электронным управлением; это составит 125 млн. долларов для электростанции с площадью зеркал в одну квадратную милю или менее 5 долларов за квадратный фут. Трудно представить себе, что зеркала и управление ими могут стоить так дешево даже при массовом производстве, когда в современном доме стоимость площади составляет 30 долларов за квадратный фут. Отсюда я заключаю, что стоимость солнечной электростанции в любом варианте исключительно высока.

Ясно, что солнечная энергия никогда не будет иметь практического значения для стран Западной Европы и Японии, но страны, испытывающие более острую потребность в энергии (это относится к некоторым развивающимся странам), могли бы решить эту проблему, требующую капитальных вложений. Многие из этих стран имеют большие пустынные районы, умеренные потребности в энергии и изобилие дешевой рабочей силы, которая необходима для создания солнечной энергетической установки.

В дополнение к указанным выше альтернативным источникам энергии было предложено большое количество иных схем, таких, как использование ветра и приливов, сжигание пищевых и сельскохозяйственных отходов, перевод быстро растущих заводов на такое топливо, как метан, или эксплуатация геотермальных источников. Каждый из этих подходов имеет собственные специфические трудности и в лучшем случае может внести лишь незначительный вклад в решение энергетической проблемы.

Я не хочу сказать, что работа над альтернативными источниками энергии бесполезна. Напротив, я уверен, что исследования во многих направлениях должны быть продолжены, и в действительности АИРЭ ускоряет эти работы. Я хочу подчеркнуть, однако, что проходит большое время от высказывания идеи до доказательства ее значимости в лаборатории; много большее время необходимо для инженерных разработок, которые сделают возможным использование процесса на промышленном предприятии, и еще большее время, прежде чем будет создана значительная промышленная отрасль. С полной определенностью можно сказать, что в следующие 10 лет (а вероятно, и в следующие 25 лет) США не могут ожидать существенного вклада ни от одного из предложенных альтернативных источников энергии.

□

По этим причинам я верю, что ядерное деление является единственным главным источником энергии неорганического происхождения, на который США могут рассчитывать до конца этого столетия и, вероятно, на некоторое время после начала следующего. Давайте рассмотрим возражения, которые выдвигаются против этого источника энергии.

Некоторые опасения выражались относительно того факта, что при обычной работе ядерные реакторы сбрасывают радиоактивность вместе со сточными водами. Согласно стандартам, первоначально установленным Комиссией по атомной энергии и сейчас проводимым в жизнь Комиссией по ядерному контролю, выходы радиоактивности «должны быть низкими, насколько это возможно», и при любых обстоятельствах добавочное облучение лица, живущего постоянно вблизи ограды электростанции, не должно быть более 5 миллirem *) в год. Радиоактивность, наводимая большинством современных ядерных электростанций, много ниже этого предела. Для сравнения укажем, что житель США в среднем получает в год 100 миллirem радиации естественного фона (от космических лучей, радиоактивности Земли, зданий и радиоактивных веществ в собственном теле) и около 70 миллirem от рентгеновских лучей при медицинской диагностике в больницах. Подсчитано, что в 2000 г. житель США добавочно получит в среднем десятую часть миллirem в год от ядерных реакторов, если их будет введено в строй 1000 штук. Химические заводы для переработки ядерного горючего могут добавить две десятых миллirem, но Комиссия по ядерному контролю ужесточает ограничения и дальше. При таких небольших количествах спор о выходе радиоактивности в процессе работы реактора, который был в 60-х годах в разгаре, постепенно заглох.

Наиболее распространено в настоящее время опасение, что несчастный случай с реактором может привести к выбросу огромного количества радиоактивных продуктов. Здесь нужно сказать прежде всего, что реактор — не бомба. В частности, реакторы на легкой воде, составляющие основную часть реакторов США, в настоящее время используют ядерное топливо, содержащее хорошо делящийся U^{235} в количестве всего лишь 3%. Такой материал, в каких бы больших количествах его ни взять, не может взорваться ни при каких обстоятельствах. (Для реакторов на быстрых нейтронах — бридеров, которые могут войти в строй не ранее чем через 20 лет, аргументация становится несколько сложнее).

Можно вообразить, однако, что реактор может потерять охлаждающую воду, расплавиться и выбросить радиоактивные продукты деления. Такое событие является маловероятным и никогда не происходило. Есть по меньшей мере три препятствия для такого выброса. Продукты радиоактивного деления заключены в шариках горючего и шарики расплавляются прежде, чем радиоактивность выйдет наружу. Никакого плавления не случалось почти за 2000 реакторо-лет действия коммерческих и военных легко-водных реакторов в США. Более того, даже если бы плавление произошло, радиоактивность была бы задержана в прочных стенах реакторной камеры, толщина которых составляет от 6 до 12 дюймов. В конце концов, даже если бы расплавилась реакторная камера, то радиоактивный материал остался бы внутри здания, в котором помещается реактор, оборудованного многими устройствами для улавливания летучих радиоактивных элементов (в основной йода, цезия и стронция). Эти устройства предотвратили бы выход продуктов наружу. Только высокие давления, возникающие внутри реакторного здания, могли бы разрушить его и позволить выйти основной части радиоактивности наружу. Вероятность такого события исключительно мала, даже если произойдет плавление.

Могут тем не менее спросить: какова в точности вероятность такой аварии? Очевидно, очень трудно оценить вероятность события, которое никогда не происходило. К счастью, большинство мыслимых неполадок в реакторе не ведет к аварии. Реакторы конструируются таким образом,

*) 1 рем $\equiv$ 1 бар (биол. эквивалент рентгена) $= K^{-1} \cdot 100$ эрг/г (коэффициент качества излучения для реактора $K \leq 10$). Прим. перев.)

что в случае любого одиночного происшествия даже в главной части реактора он может быть безопасным образом выключен. Только в случае, когда два или более существенных элемента реактора выйдут из строя одновременно, может произойти авария. Это делает возможным вероятностный подход: делается оценка вероятности повреждения одного важного элемента реактора, затем предполагается, что поломки двух различных элементов независимы. Тогда вероятность одновременного выхода из строя двух элементов одновременно есть произведение индивидуальных вероятностей. Это, однако, не всегда справедливо. Могут быть неполадки, связанные между собой, когда одно событие приводит к выходу из строя одного или двух существенных элементов реактора; в этом случае вероятность будет та же, что и у инициирующего цепочку события, поэтому нельзя перемножать малые вероятности. Вероятность цепочки неполадок, конечно, наиболее трудно оценить.

Работающая на основе изложенных выше принципов Комиссия по изучению безопасности реакторов, образованная КАЭ три года назад, оценила вероятности разного вида аварий реактора. Предварительные результаты были опубликованы в августе 1974 г. в документе, который стал известен как отчет Расмуссена. Он был так назван по имени руководителя исследовательской группы Н. Расмуссена из Массачусетского технологического института. Окончательный отчет был опубликован в октябре прошлого года.

Методы, использованные в отчете Расмуссена, применялись в течение нескольких лет в Англии для предсказания вероятности несчастных случаев в промышленности. Опыт показал, что предсказания обычно дают количество аварий несколько выше, чем в действительности. Несколько групп, включая Агентство по охране окружающей среды и Комитет, образованный Американским Физическим обществом, изучали различные аспекты проблемы и пришли к несколько различающимся результатам. Эти различия были учтены в окончательном отчете Расмуссена; наиболее важные из них будут обсуждаться здесь.

Основное предсказание в отчете Расмуссена состоит в том, что выход значительного количества радиоактивности возможен раз за 100 000 реакторо-лет. (Цепочка аварий, вызывающих одна другую, дают сравнительно малый вклад в общую вероятность.) Такая авария может заключаться в выходе около половины летучих продуктов деления, содержащихся в реакторе. Выходу такого масштаба должно предшествовать плавление горючего в реакторе — событие, которое может случиться, согласно отчету, раз за 17 000 реакторо-лет. И, наконец, отчет предсказывает, что охлаждающая вода может вытечь из реактора раз за 2000 реакторо-лет, но в большинстве случаев плавление будет предотвращено экстренными средствами безопасности в охлаждающей системе.

Имеется по меньшей мере несколько отклонений этих оценок от реального опыта. Во-первых, никогда не происходило утечки хладагента за 300 реакторо-лет коммерческой эксплуатации реакторов на легкой воде. Далее, еще никогда не происходило плавление горючего почти за 2000 реакторо-лет эксплуатации промышленных и военно-морских легководных реакторов. Если оценки Расмуссена завышены примерно в 20 раз (другими словами, вероятность плавления составляет одно событие за 850 реакторо-лет), по крайней мере одно плавление должно было бы случиться до настоящего времени.

Каковы будут последствия исключительно маловероятного события — большого выхода радиоактивности? Непосредственное воздействие зависит в первую очередь от плотности населения вблизи реактора, направления ветра и других погодных условий.

Для достаточно серьезной аварии (которая может произойти раз за миллион реакторо-лет) Расмуссен предсказывает менее одной ранней смерти и около 300 случаев радиационных заболеваний. Он также предсказывает, что в дальнейшем последует около 170 смертей в год от скрытых раковых заболеваний и такая смертность может удерживаться в течение 30 лет, что приведет к 5000 смертей от рака. Вдобавок возможно появление около 25 генетических изменений в год; подсчитывая действие этих изменений на последующие поколения, получим, что в целом может последовать около 3000 генетических отклонений.

Число летальных исходов от скрытого рака в окончательной версии отчета Расмуссена примерно в 10 раз больше, чем в предварительном отчете. Это изменение в значительной мере вызвано как исследованиями Американского физического общества, так и очень тщательным изучением вопроса группой Расмуссена. Большой выход радиоактивности при средних погодных условиях и плотности населения (вероятность — одно событие за 100 000 реакторо-лет) может привести к 1000 смертей от скрытого рака, но они не будут следствием раннего радиационного заболевания.

Очевидно, что 5000 смертей от рака будут трагической данью. Но чтобы представить себе картину в целом, нужно вспомнить, что в США ежегодно умирает более 300 000 человек от рака, возникшего по другим причинам. Авария реактора не будет концом света, как многие противники ядерной энергетики пытаются изобразить ее. Это менее серьезно, чем малые войны, которые, к несчастью, слишком часты. Некоторые промышленные аварии могут быть более опасны, например взрывы и пожары на больших хранилищах горючего или химические взрывы. Опасность от прорыва дамб, вероятно, даже еще больше.

Вероятность серьезного реакторного происшествия составляет, согласно предсказанию Расмуссена, одно событие за 10 000 лет, когда работает 100 реакторов. Такое количество реакторов, как ожидается, будет в США к 1980 г. Что произойдет, если число реакторов к 2000 или 2010 г. возрастет до 1000, как предсказывают многие? Ответ состоит в том, что изучение безопасности реакторов является не законченной, а развивающейся дисциплиной. В США сейчас тратят около 70 млн. долларов в год для работ по безопасности реакторов и ряд лучших ученых в национальных лабораториях привлечен к решению этой задачи. Я уверен, что через 10 лет эти усилия приведут как к продвижению проблемы безопасности реакторов, так и к уверенности, что мы сможем обеспечить такую безопасность. Я думаю, что к 2000 г. вероятность значительного выхода радиоактивности будет самое большое — одно событие за 10 млн. реакторо-лет, так что даже если к тому времени будет 1000 реакторов, такая авария сможет случиться не более одного раза за 10 000 лет.

Принимая во внимание все типы реакторных аварий, средний риск для всего населения США составляет только две смерти от скрытого рака и одно генетическое изменение в год. По сравнению с другими опасностями, которые наше общество принимает, риск, связанный с эксплуатацией ядерных реакторов, очень мал (рис. 4).

Особенностью возможных реакторных аварий является то, что большая часть заболеваний раком проявится через годы после происшествия. Немедленных смертей и болезней будет мало по сравнению с оцененными выше 5000 летальных исходов от последующего рака в предыдущем примере. Проблема в том, что куда больше людей, чем 5000 жертв, будут думать, что получили рак из-за радиационного воздействия, и невозможно установить, была ли радиация настоящей причиной. Средняя вероятность того, что облученные люди смогут получить смертельное раковое заболе-

вание от выпавшей радиоактивности, составляет 1% по сравнению с 15%-ной вероятностью для среднего американца умереть от рака, возникшего по другой причине. Смогут ли пострадавшие в результате аварии реактора люди быть достаточно разумными, чтобы принять во внимание этот расчет? Или авария, если она произойдет, будет иметь психологический эффект, гораздо более опустошающий, чем реальное явление?

□

Одна из проблем ядерной энергетики, которая весьма серьезно рассматривается многими критиками, — захоронение ядерных отходов. Будут ли эти отходы отравлять атмосферу и землю в будущем, после того как они были запечатаны? Действительно, уровень радиоактивности в стандартном 1000-мегаваттном реакторе очень высок: около 10^{10} кюри через полчаса после выключения реактора. Радиоактивность, так же как и температура, спадает затем очень быстро.

После выгрузки из реактора отработавшее ядерное топливо проходит через ряд этапов. Сначала высоко радиоактивный материал пока еще в своем первоначальном виде опускают в бак с водой, где он остается на период от нескольких месяцев до более года. Вода поглощает тепло от радиоактивного распада и в то же самое время экранирует окружающую среду от излучения.

После периода охлаждения топливо в будущем будут погружать в специально оборудованные грузовики или рельсовые тележки и вывозить на химические перерабатывающие заводы. (Таких заводов пока не существует, но большой завод уже строится в Южной Каролине и должен войти в действие в следующем году). На химических заводах топливные стержни будут разрезать пока еще под водой, а топливные таблетки растворять. Затем уран и плутоний отделяются друг от друга и от радиоактивных продуктов деления. Уран и плутоний могут быть вновь использованы в качестве реакторного топлива и, следовательно, должны быть снова изготовлены в виде топливных элементов. Оставшиеся продукты деления являются отходами. Эти вещества сначала хранятся в водных растворах еще некоторое время, чтобы дать радиоактивности уменьшиться. Специальные сосуды с двойными стенками используются сейчас для этой цели, чтобы гарантировать отсутствие утечки раствора.

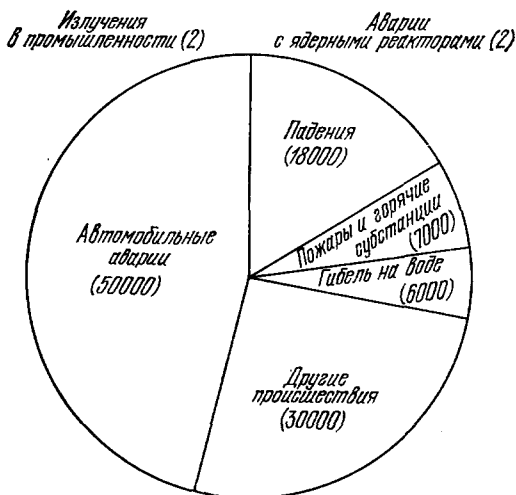


Рис. 4. Вероятность несчастных случаев, оцененная для всего населения США, в результате работы 100 атомных электростанций сравнивается с вероятностью, вызываемой другими причинами, дающими основной вклад в полное количество несчастных случаев, в единицах количества смертей в год вследствие каждой причины (средняя величина для последних категорий округлена до ближайшей 1000).

Данные для вероятности смерти от ядерных аварий основаны на предположении, что имеется вероятность одного большого выхода радиоактивности в США каждые 1000 лет, приводящего к 1000 смертей от рака, и одной в 10 000 лет более серьезной аварии, приводящей к 5000 жертв. Средняя вероятность несчастного случая от ядерных реакторов является, очевидно, исключительно малой по сравнению с другими опасностями, с которыми наше общество мирится. Следует, однако, заметить, что риск, связанный с ядерной энергетикой, может быть только лишь предсказан, в то время как вероятность других несчастных случаев получена из статистической обработки действительных событий.

После пяти лет отходы превращают в твердые продукты, и по прошествии еще пяти лет будут помещаться в национальное хранилище. Были разработаны три различных метода для превращения отходов в твердые вещества; один метод сейчас используется практически на станции испытания реакторов АИРЭ в Айдахо для перевода в твердую фазу отходов от реактора, принадлежащего правительству США. Твердые отходы можно затем сплавить вместе с боросиликатным стеклом и изготовить в виде твердых стержней, например, 10 футов длиной и один фут в диаметре. (Примерно десять таких стержней будет производить типовой 1000-Мвт реактор в год.) Стержни затем заключают в прочные стальные цилиндры, закрытые с двух концов. Трудно представить себе, как любой из радиоактивных материалов может попасть в окружающую среду после обработки, проведенной так, что материал соответствующим образом охлажден, чтобы избежать плавления.

Имеются две возможности для создания национального хранилища. Первая — создание временного склада на поверхности земли в пустынном районе. Стальные цилиндры будут помещены в прочную бетонную камеру, чтобы защитить внешний мир от радиации. Охлаждение может осуществляться воздухом, проходящим снизу камеры вверх через пространство между стальными цилиндрами и бетонной стенкой и выходящим через верх после того, как он нагреется на 20 °С. Естественная циркуляция воздуха оказывается достаточной, никаких вентиляторов не потребуется. Предложение о таком национальном хранилище было изучено и одобрено комитетом Национальной Академии наук США.

Площадь, необходимая для такого временного хранилища, невелика. Типовой реактор производит около двух кубометров твердых отходов в год. Комитет Национальной Академии наук оценил, что все отходы, произведенные реакторами США к 2010 г., могут быть размещены на площади в 100 акров. Стоимость хранилища оценивается в 1,5 млрд. долларов — малая часть вероятных затрат на реакторы.

Вторая возможность для национального хранилища — постоянный склад глубоко под землей. Предлагаемая среда для устройства такого склада — пласты соли — имеет несколько преимуществ перед другими. Во-первых, существование соляного пласта показывает, что вода не проникала в эту область долгое время, иначе соль растворилась бы. Просачивание воды через область хранения, растворение отходов и вынос их на поверхность будут исключены, хотя этот процесс является исключительно медленным. Во-вторых, соляные пласты представляют собой в геологическом смысле очень спокойные районы. Они не были потревожены многие миллионы лет; это дает уверенность в том, что они будут оставаться в покое так долго, как потребуется. В-третьих, соль пластически течет под давлением, так что любые трещины, возникшие в результате механических или термических напряжений, автоматически закроются снова.

Первая попытка, предпринятая КАЭ, устроить захоронение в соляной шахте Канзаса была, к несчастью, предпринята в спешке без достаточных исследований. (Скважины, пробуренные по соседству, допускают наличие воды, способной проникнуть в соляной пласт и в отходы.) Сейчас АИРЭ тщательно исследует другие районы. Обещающая область была найдена на юго-востоке штата Нью-Мексико. В США имеется примерно 50 000 кв. миль соляных пластов, всего только три кв. мили нужно для размещения всех планируемых отходов до 2010 г.

Метод захоронения отходов следующий: в стенках горизонтального туннеля заново пройденной в соляном пласте шахты будут просверлены отверстия, достаточно большие для размещения стального цилиндра, содержащего отходы. Подсчитано, что цилиндры могут быть заложены

в соль через 10 лет после выемки отходов из реактора. Остаточное тепловыделение в отходах, пять киловатт на один цилиндр, достаточно мало для того, чтобы соль не трескалась. (Здесь помогает большая теплопроводность соли.) Если расчеты подтвердятся экспериментами в реальных шахтах, отходы можно будет прямо направлять с химического завода на постоянные хранилища и временные не потребуются. В противном случае отходы нужно будет размещать на несколько лет во временные хранилища, а затем перевозить на постоянные склады под землю.

Мне кажется вполне определенным, что подходящее место для постоянного захоронения будет найдено. К сожалению, АИРЭ замедляет принятие решения и обнародование его, но после трудностей с участием в Канзасе понятно, что АИРЭ хочет на этот раз сделать правильный выбор.

Большая часть продуктов деления имеет короткие времена полураспада — от нескольких секунд до нескольких лет. Наиболее долгоживущими является цезий-137 и стронций-90 с периодом полураспада около 30 лет. Основная проблема в том, что отходы содержат также актиниды — элементы тяжелее урана. При современной химической технологии 0,5% плутония и большая часть других актинидов уходят в отходы. Плутоний-239 имеет период полураспада около 25 000 лет, и потребуется время, равное 10 периодам, для того, чтобы снизить радиоактивность в 1000 раз. Итак, захороненные отходы должны не попадать в биосферу около 250 000 лет.

Ученые из Национальной лаборатории в Ок-Ридже изучали возможные естественные причины, которые могли бы разрушить радиоактивные захоронения, и не нашли таковых. Почти невозможно представить себе человеческое вмешательство, умышленное или случайное, которое смогло бы принести сколько-нибудь заметное количество радиоактивности обратно на поверхность.

И, наконец, существует возможность, что отходы могут продиффундировать на поверхность. Скорость диффузии в твердых телах заведомо мала и эксперименты в Ок-Ридже показали, что такого же скорости диффузии большинства продуктов деления в соли. Окончательно это обстоятельство должно быть подтверждено в районе постоянного хранилища путем помещения малых количеств продуктов деления и наблюдения за их миграцией.

Тем временем каждый может извлечь дальнейшие аргументы из прекрасного «опыта», поставленного самой Землей. Открыли, что в части Африки (сейчас Республика Габон) около 1,8 млрд. лет назад существовал естественный ядерный реактор. Металлические руды в этом районе исключительно богаты ураном с содержанием последнего от 10 до 60%. В то время как концентрация урана-235 в естественном уране в настоящее время составляет 0,72%, 1,8 млрд. лет назад концентрация была примерно та же, что и в современных реакторах на легкой воде (3%). Руда также содержала около 15% воды. Поэтому условия были подобны условиям в легководном реакторе (за исключением охлаждающей системы). В природном ядерном реакторе образовывался плутоний-239, который затем распадался испуская α -частицы и превращался в уран-235. Интересно, что плутоний не сместился даже на миллиметр в течение 25 000 лет распада. Более того, продукты деления, кроме летучих, оставались вблизи урана в течение последующих почти двух миллиардов лет.

Учитывая, что плутоний производится в значительных количествах, его нужно сделать недоступным для каждого, кто может использовать его с целью разрушения. Вопреки распространенным страхам, опасность того, что плутоний может быть украден из работающего ядерного реак-

тора, невелика. Реакторное топливо является исключительно радиоактивным, и даже если неизвестному лицу удастся выгрузить несколько топливных элементов (трудная и длительная операция), он не сможет увезти их, так как умрет при попытке сделать это. То же произойдет при попытке кражи топлива в процессе охлаждения в баках. Местами, из которых плутоний может быть в принципе украден, являются химический перерабатывающий завод (после того как радиоактивные продукты деления будут удалены), завод по производству топлива или транспортная система между заводами и реактором, где переработанные топливные элементы должны быть установлены.

Перевозки, кажется, будут наиболее уязвимым звеном. Поэтому представляется желательным построить заводы по химической переработке и изготовлению топливных элементов недалеко друг от друга, так что останется только одна проблема — транспортировка к реактору. В действительности проблема надежной и безопасной перевозки полностью решена, по крайней мере в США. Опытная охрана, связанная сейчас с ядерным оружием, может быть использована при транспортировке ядерных материалов. Охрана заводов от воров также разрабатывается; по-видимому, она не представляет непреодолимую проблему. Например, люди, покидающие завод, включая работающих, должны быть проверены на наличие плутония даже в малых количествах посредством автоматических детекторов без личного обыска. Эти прямые меры по охране плутония не могут быть заменены простыми методами учета, которые были бы слишком неточны. Убедившись, что никакого плутония (или способного к делению урана) не вывезено с заводов США, можно быть по-настоящему уверенным, что ни один террорист в этой стране не сможет сделать атомную бомбу (что, между прочим, не так просто, как это изображают некоторые книги и телевизионные программы).

Утверждалось, что предложенные меры по охране плутония и аналогичные меры для охраны ядерных электростанций от диверсий явятся покушением на всеобщие гражданские свободы. Я не думаю, что это так. Рабочие ядерных заводов, охрана, водители грузовиков, перевозящих ядерные материалы и некоторые другие, будут подвергаться проверке с целью обеспечения безопасности (точно так же, как сейчас это делается с людьми, работающими над ядерным оружием). Я оцениваю их число менее чем 20 000, или менее 1% количества людей в наших теперешних вооруженных силах. Остальные 200 миллионов американцев не пострадают от ограничения гражданских свобод.

Плутоний называют наиболее токсичным из всех известных веществ. Термин «токсичность» может ввести в заблуждение в этом контексте потому, что он означает обычно опасность, состоящую в некоторых химических действиях плутония. Эксперименты с животными показали, что эта опасность связана с уровнем радиоактивности плутония, а не с количеством вещества, попавшего в организм при дыхании, как в случае химического яда. Тем не менее радиоактивная опасность является действительно большой в том случае, когда плутоний поглощается телом: 0,6 мкг плутония-239 признаны медицинскими авторитетами максимально допустимой дозой за всю жизнь, а количество, в 500 раз большее, ведет к летальному раковому заболеванию.

Плутоний может эффективно поглощаться в теле в том случае, когда микроскопические частицы его попадают в организм при дыхании. Около 15% частиц задерживаются в легких, где они могут вызвать рак. К счастью, опасность меньше, если плутоний проглатывают с пищей или питьем; в этом случае он проходит без изменений пищеварительный тракт и только одна тридцатитысячная доля попадает в кровь. Поэтому эффективное плу-

трониевое отравление питьевых водоемов и сельскохозяйственных земель фактически невозможно.

Некоторые противники ядерной энергетики утверждают, что из-за очень низкой максимально допустимой дозы даже малые количества плутония в руках террористов могут представлять большую опасность. Эта точка зрения высказывалась Б. Коэном, который теоретически исследовал действие преднамеренно рассеянной в воздухе над городом окиси плутония. Он находит, что в среднем может быть одна смерть от рака на каждые рассеянные 15 г плутония, потому что только малая часть окиси плутония попадет в человеческие легкие. Другие, растворимые, соединения плутония будут менее эффективны в этом смысле, чем нерастворимая окись. Террорист, которому удастся украсть шесть или более килограммов плутония, представил бы гораздо большую опасность, если бы он изготовил примитивную бомбу, чем если бы он рассеял плутоний в воздухе над городом.

□

Может ли широкое распространение реакторов способствовать распространению ядерного оружия? Это, по моему мнению, единственное в действительности серьезное возражение против ядерной энергетики. Доступность делительных материалов является, очевидно, необходимым условием для изготовления ядерного оружия. Но даже в том случае, когда материал доступен, изготовление ядерной бомбы является пока солидным предприятием: в каждой из шести стран, проводящих ядерные взрывы, тысячи ученых и инженеров работали над разработкой оружия. Тем не менее некоторое количество других стран было бы способно предпринять эти усилия, если бы они захотели это сделать, и имели бы необходимые материалы.

Многие страны, нуждающиеся в ядерной энергетике, вскоре будут готовы купить ядерные электростанции у любой страны, желающей продать их. Ядерные электростанции, проданные в международных сделках, находятся под контролем Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) для того, чтобы быть уверенным, что ядерные материалы не будут изъяты для военных целей. МАГАТЭ нуждается в усилении и в большем финансировании для улучшения ее функций как инспектирующего органа.

Важной дополнительной мерой должно быть предотвращение увеличения количества ядерных химико-перерабатывающих заводов, так как именно с заводов легче, чем из реакторов, могут быть вывезены делящиеся материалы. Хорошим является предложение о сосредоточении химической переработки на заводах, обслуживающих ряд стран, в противовес возможности каждой стране иметь свои заводы. Другой подход мог бы заключаться в том, что страна, поставляющая реактор, сдает в аренду топливо стране-заказчику с условием, чтобы использованное топливо было возвращено.

Первоначальным топливом для реактора на легкой воде является, как правило, уран-238, обогащенный 3% хорошо делящегося урана-235. Если производить взрывчатку из этого топлива, то потребуются разделить два изотопа при помощи процесса, требующего для своего осуществления высокого уровня технологии. Использованное топливо содержит, кроме того, плутоний, который может быть отделен от урана химическим путем, — задача менее трудная, чем предыдущая. Полученный плутоний имеет высокую концентрацию плутония-240 (по отношению к плутонию-239), который может быть использован для изготовления примитивных бомб

страной, стоящей на пороге технологии производства ядерного оружия. Реакторы-размножители (бридеры) производят больше плутония на единицу мощности с меньшим содержанием плутония-240. Поэтому я лично не рекомендовал бы продавать бридеры на международном рынке.

Распространение не может быть предотвращено, если США остановят строительство ядерных реакторов для внутренних целей или прекратят продажу их за границу. Западная Европа и Япония не только нуждаются в ядерной энергетике больше, чем США, но и располагают технологией, способной развить ее. Более того, им необходима иностранная валюта, чтобы платить за импорт нефти, так что они сами захотят продавать свои ядерные реакторы за границу. Участие США в торговле реакторами позволит нам установить стандартные меры безопасности, например такие, как частые инспекции МАГАТЭ, что будет труднее сделать, если мы полностью предоставим торговлю другим.

Утверждалось, что ядерная энергетика является ненадежной. Наилучшей мерой надежности является доля времени, когда электростанция способна производить необходимую энергию. Этот «фактор годности» регулярно приводится для ядерных электростанций и составляет в среднем около 70%.

Имеется меньше хороших данных о «годности» больших электростанций на угле, но там, где эти данные имеются, они примерно те же, что и для ядерных электростанций.

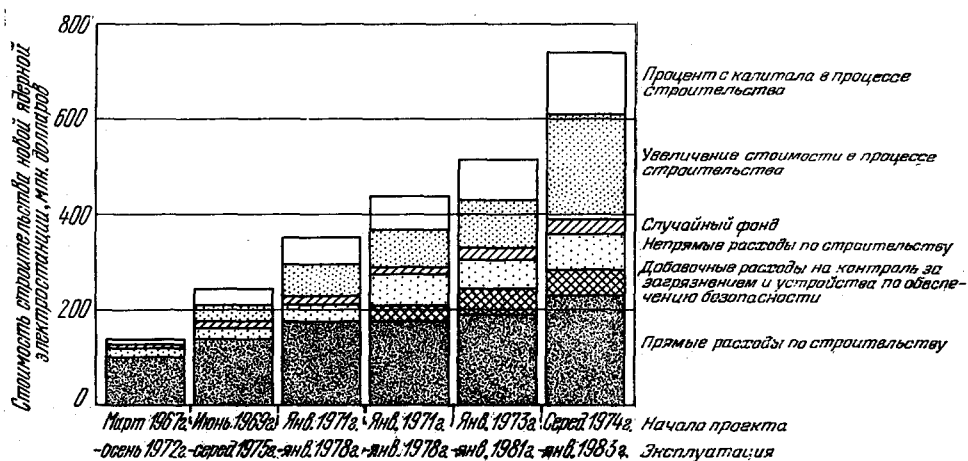


Рис. 5. Стоимость строительства 1000 Мвт-ной ядерной электростанции с реактором на легкой воде существенно повысилась для станций, которые, как ожидается, будут запущены между 1972 и 1983 г., по сравнению со станциями, запланированными в период с 1967 по 1974 г.

Как показывает эта диаграмма АИРЭ, большая часть возрастания стоимости связана с инфляцией и ростом процента с капитала в процессе строительства. Стоимость строительства угольной электростанции возрастала примерно с той же скоростью в течение этого периода. (Столбец, относящийся к ядерным электростанциям, начатым строиться в 1971 г., был увеличен по данным 1973 г.)

«Фактор емкости» есть отношение производимой энергии к количеству, которое могло бы быть произведено, если бы электростанция постоянно работала на полную мощность. Этот фактор обычно ниже фактора годности по двум причинам: 1) некоторые ядерные электростанции из соображений безопасности работают ниже максимального уровня; 2) потребности флуктуируют в течение каждых 24 часов. Второй фактор уменьшается из-за того, что ядерные реакторы работают как электростанции при основной нагрузке (так называют электростанции, работающие по возможности

большее время), так как капиталовложения очень велики, а стоимость топлива низка. Приемлемое среднее значение фактора емкости для ядерных электростанций составляет 60%. Оценка эффективности показывает, что при факторе емкости 40% ядерная и угольная электростанции, производящие одинаковое количество энергии, будут стоить примерно одинаково; работа при 60% дает ядерной электростанции существенное преимущество.

Но не является ли строительство ядерных электростанций слишком дорогим? Изучение стоимости строительства таких электростанций за период с 1967 до 1974 г. и тех, которые, как ожидается, войдут в строй за период с 1972 по 1983 г., показывает, что стоимость электростанции мощностью 1000 Мвт с реактором на легкой воде возросла со 135 до 730 млн. долларов за этот период (рис. 5). Более подробное исследование показывает,

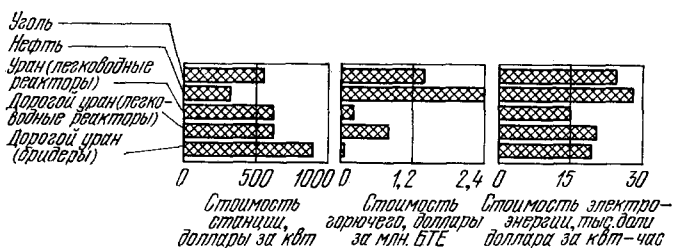


Рис. 6. Оценки стоимости, приведенные в этой диаграмме, были сделаны в конце 1973 г. «Филадельфия электрикл компани» для будущих электростанций, использующих три различных вида топлива: уголь, нефть и уран.

Первые три в каждом наборе полос построены в предположении, что строительство станции начнется в 1974 г. (полосы, представляющие стоимости угля и нефти, соответствуют ценам 1975 г.). Два нижних входа относятся к неопределенному будущему, когда, как ожидается, уран станет гораздо дороже. Согласно этому исследованию электричество из ядерного топлива будет оставаться существенно более дешевым, чем получаемое из органического ископаемого топлива.

однако, что большая часть увеличения стоимости связана с инфляцией и с ростом процента с капитала в процессе строительства. Если не учитывать эти факторы, то в 1974 г. стоимость киловатта генерируемой мощности составляла 385 долларов. Эти цифры показывают большее возрастание стоимости, чем связанное с общей инфляцией с 1967 по 1974 г. Главную причину нужно искать в резком росте определенных видов строительных затрат, в частности стоимости рабочей силы, которые росли примерно на 15% в год или на 270% за семь лет.

Стоимость строительства электростанций, работающих на угле, возрастала со сравнимой скоростью. Главным фактором здесь была необходимость установки газоуловителей, чтобы задержать большую часть окислов серы, которые обычно получаются при сгорании угля. Строительство угольных электростанций, оборудованных газоуловителями, обходится пока на 15% дешевле, чем ядерных. Любое расширенное увеличение производства угля потребовало бы однако существенных капиталовложений не только на открытие и оборудование новых шахт, но и на поставки добавочного количества железнодорожных вагонов, а возможно, и создания новых путей, особенно для Западных шахт. Если включить эти «скрытые» капиталовложения, то капитальные затраты на угольные электростанции не будут слишком отличаться от затрат на ядерные. Даже если не учитывать этот фактор, полная стоимость производства электричества из ядерного топлива является уже сейчас много меньшей, чем из ископаемого органического топлива, и последние исследования указывают, что разрыв

в стоимости будет возрастать в дальнейшем в пользу ядерной энергетики (рис. 6, 7).

Есть доля правды в обвинении, что «ядерная энергия не оправдывает затраченные на нее средства», так как правительство истратило несколько миллиардов долларов на исследования ядерной энергии и еще больше миллиардов, несомненно, будет истрачено в будущем. С другой стороны, правительство также тратит около миллиарда долларов ежегодно, выплачивая компенсацию шахтерам, получившим легочные заболевания.

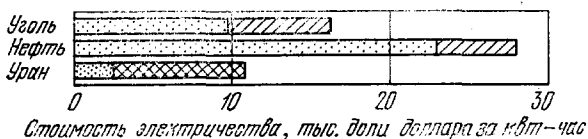


Рис. 7. Реальные цены на электроэнергию для первой четверти 1975 г. были получены усреднением общих затрат, включая топливо (полосы, покрытые точками) для 22 станций, включающих как атомные реакторы, так и другие электростанции.

Эти данные, собранные Атомным промышленным форумом, находятся в согласии с данными рис. 6 (Капитальные вложения в эти действующие сейчас станции были, конечно, много ниже, чем оцененные для будущих станций в этом примере.)

работы реакторов, то тогда всех запасов урановой руды в США хватило бы только для того, чтобы запустить 600 реакторов, — количество, которое может быть достигнуто к 2000 г. После этой даты

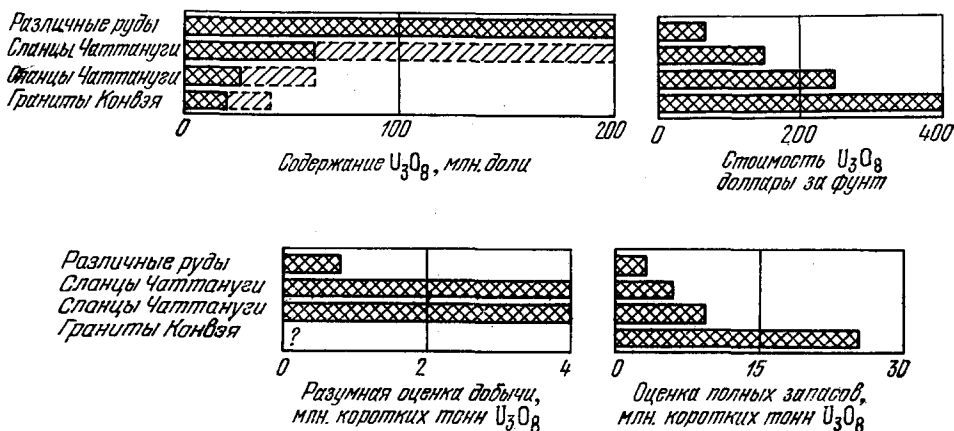


Рис. 8. На этих диаграммах представлены запасы урана в США на основе оценок АИРЭ.

Верхний ряд полос относится к богатым урановым рудам. Цены всюду приводятся в долларах 1975 г. и включают восстановление земель в случае бедных руд (нижние три ряда полос). Другие оценки общих запасов, измеренные в миллионах «коротких» тонн *) окиси урана (U_3O_8), превышают в максимуме в три раза приведенные выше.

будет необходимо строить реакторы, которые используют уран более эффективно. Наиболее удовлетворительной альтернативой для выхода из этого положения, является реактор-размножитель (бридер), который

*) «Короткая» тонна (short ton) = 2000 англ. фунтов = 907,2 кг. (Прим. перев.)

возможно, будет пригоден для промышленного применения к 1990 г. Бридер практически извлекает энергию не только из редкого изотопа урана-235, но также из других изотопов урана, эффективно увеличивая таким образом запасы урана примерно в 60 раз. Что более важно, с бридерами добыча обедненных урановых руд может быть оправданной как экономически, так и с точки зрения эксплуатационной. С этими дополнительными ресурсами в США достаточно урана для обеспечения работы 1000 реакторов в течение 40 000 лет (рис. 8, 9).

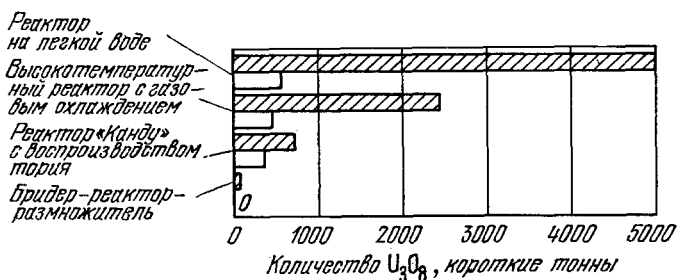


Рис. 9. Уран, необходимый для первоначальной загрузки (светлые полосы) и 40-летней эксплуатации (заштрихованные полосы) 1000 Мвт-ной ядерной электростанции (снова в миллионах «коротких» тонн U_3O_8) для четырех главных типов реакторных систем.

Плутоний, необходимый для первоначальной загрузки бридера, как ожидают, будет получен как рабочий продукт из работавших ранее реакторов на легкой воде. «Канду» — канадское название для тяжеловодного реактора на естественном уране, который может быть модифицирован для превращения тория в уран-233.

Как временная альтернатива, привлекательны два других типа реактора: высокотемпературный реактор с газовым охлаждением и графитовым замедлителем и канадский реактор на естественном уране («Канду»), в котором замедление и охлаждение производится тяжелой водой. «Канду»-реактор может быть модифицирован для преобразования тория путем захвата нейтрона в делящийся изотоп уран-233.

□

Оценивая суммарную опасность для здоровья, которую представляют ядерные реакторы, удобно сравнивать ядерные электростанции с электростанциями на угле. Последние данные показывают, что даже если газоуловители или иные технологические приемы смогут уменьшить по оценкам воздействие на здоровье от сжигания угля примерно в 10 раз (что кажется едва ли достижимо в настоящем), опасность, связанная с углем, будет превосходить опасность от ядерного горючего на порядок величины (рис. 10). Это сравнение не нужно понимать как аргумент против угля. США, несомненно, нуждаются в сжигании большого количества угля на электростанциях, и даже с углем опасности невелики. Сравнение указывает, однако, на относительную безопасность ядерных реакторов.

Подводя итог, можно сказать, что ядерная энергетика несет определенный риск, в заметной степени это — риск реакторной аварии и опасность облегченного распространения ядерного оружия. Последняя проблема находится лишь под ограниченным контролем США. Остальные

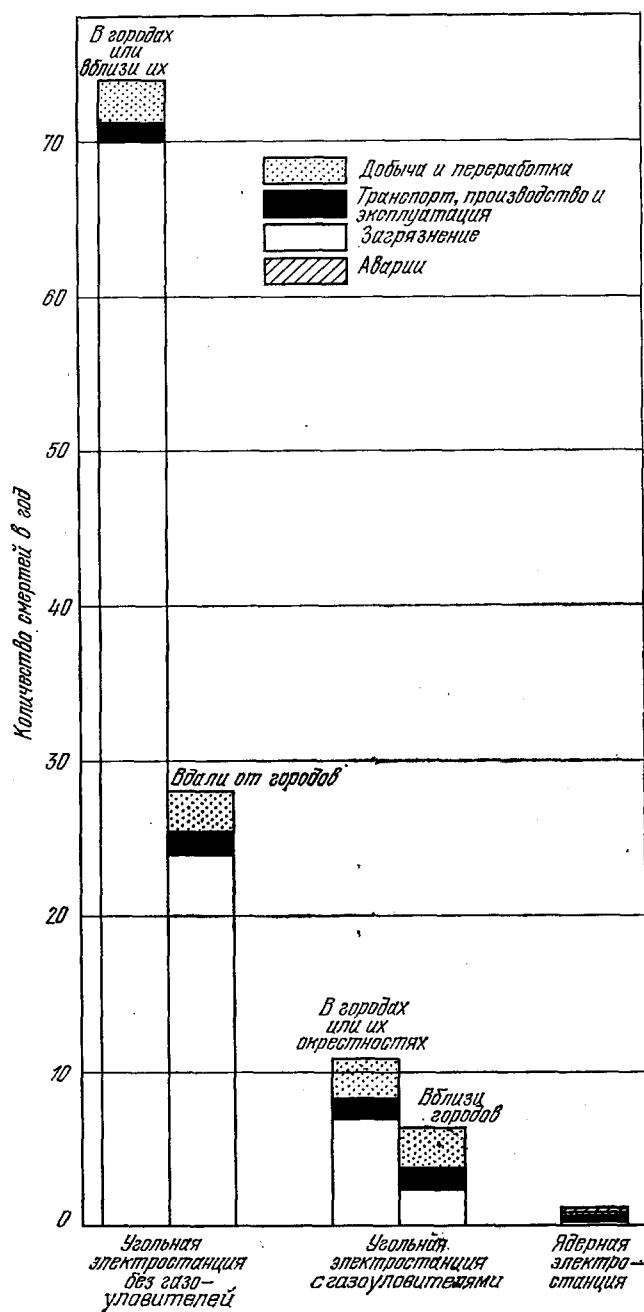


Рис. 10. Интегральная угроза здоровью, которую представляют атомная и угольная электростанции электрической мощностью 1000 Мвт, сравниваются в числах оцененного количества смертей, последующих в результате одного года работы (травмы и другие заболевания переводятся в число эквивалентных смертных случаев соответствующей формулой).

Эти данные были впервые собраны К. Комаром из Энергетического института и Л. Саганом из Стэнфордского университета. Данные по добыче угля относятся к подземной добыче; открытые разработки гораздо менее опасны. Учет загрязнения среды от угольных электростанций включает только двуокиси серы. Как показывает второй набор столбцов, даже в том случае, если уловители двуокиси серы приведут к снижению загрязнения от сжигания угля в 10 раз, вредное действие на здоровье от угольных электростанций будет все еще много больше, чем от атомных.

опасности, связанные с ядерной энергетикой, статистически малы по сравнению с теми, которые наше общество допускает. Важно не рассматривать ядерную энергетику изолированно. Возражения могут быть выдвинуты против любого приемлемого источника энергии. Стране необходима энергия, чтобы поддержать развитие экономики. Недостаток энергии означает безработицу и упадок, если не что-либо еще хуже.

Примечание редактора при корректуре. Статья Г. Бете вызвала оживленную дискуссию на страницах журнала «Scientific American». В частности, в апрельском и августовском номерах этого журнала за 1976 г. (v. 234, No. 4; v. 235, No. 2) были опубликованы письма Дж. Коды (G. D. Cody), Р. Кацманна (R. Kazmann) и Д. Селбина (J. Selbin), Б. Чалмерса (B. Chalmers), ответ Г. Бете их авторам (pp. 8, 10, 15, 16, 20, 21) и письмо У. Кеннета Дэвиса (W. Kenneth Davis) (pp. 9, 10 — соответственно второго номера журнала).

ЛИТЕРАТУРА

- R. F. L a p p, The Nuclear Controversy, Fact Systems/Reddy Kilowatt, 1974.
Project Independence Report. Federal Energy Administration, U. S. Government Printing Office, 1974. Wash-1400. Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risk, in: U. S. Commercial Nuclear Power Plant. U.S. Atomic Energy Commission, U. S. Government Printing Office, 1975.
ERDA-48. Energy Research and Development Agency, U. S. Government Printing Office, 1975.
R. E. L a p p, America's Energy Future, Fact Systems/Reddy Kilowatt (в печати).
B. C o h e n, Rev. Mod. Phys. (в печати).