

ПИСЬМА ЧИТАТЕЛЕЙ

БЫСТРЫЕ РЕАКТОРЫ КАК ОСНОВА КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

По поводу статьи Ф.М. Митенкова «Перспективы развития
быстрых реакторов-размножителей»*

Статья Ф.М. Митенкова, одного из участников и руководителей создания первых АЭС с быстрыми реакторами, ставшего после кончины И.И. Африкантова их главным конструктором, отражает его взгляды на их роль в ядерной энергетике и перспективы. В статье обсуждаются пути совершенствования конструкции традиционных быстрых реакторов, их сравнение с новой концепцией БРЕСТА, в особенности теплоносителей натрия и свинца, критикуется БРЕСТ.

Как видно из статьи и прежних обсуждений, наши взгляды по многим принципиальным, да и техническим вопросам расходятся. Для нас самих, как и для общего дела, в котором мы, похоже, остались за старших, едва ли полезен спор, разрешаемый лишь силой, большинством голосов или самой жизнью, т.е. в нашем случае потомками. Полезно же перейти (как учил Гегель) от тезисов и антитезисов к синтезу, т.е. полноценной научной дискуссии в целях приближения к истине. Разногласия имеют свою историю и причины, с которых стоит начать.

С И.И. Африкантовым, Ф.М. Митенковым и возглавлявшимся ими ОКБМ меня, с конца 1950-х годов заместителя научного руководителя ФЭИ и проблемы быстрых реакторов А.И. Лейпунского, связывает многолетнее тесное сотрудничество. Конструктор и физик-теоретик — люди разных профессий и склада мысли видят проблему с разных сторон, но без взаимопонимания физиков и инженеров и доверия друг к другу не было бы ни быстрых реакторов, ни других выдающихся достижений ядерной техники.

В 1970-е годы ядерная энергетика стала техникой и промышленностью, выступающей на энергетическом рынке, где главные фигуры — конструктор, инженер, менеджер. Начавшие дело физики с широким взглядом на проблему ушли, а их ученики в основном занялись вместе с другими исследователями важной, но более узкой задачей обеспечения проектов расчетами и экспериментом. Теперь видно, что ядерная энергетика не решила, как тогда казалось, своих главных проблем, поэтому не заняла своего места в энергетике и ее превращение в рутинную технику преждевременно.

Четверть века назад, когда была налажена стабильная работа БН-350, завершалось сооружение БН-600 и началась работа по проекту БН-800 для серийного строительства на ПО «Маяк» и Белоярской АЭС, наши пути разошлись. Я хорошо помню и разделяю слова, сказанные мне в конце 1960-х годов Ф.М. Митенковым, ставшим главным конструктором: проекты реакторов — дело конструкторов с привлечением физиков, а главное дело физиков — искать новые пути и освещать нам дорогу. События 1970-х годов не раз заставляли меня вспомнить эти слова.

В конце 1960-х годов было обнаружено увеличение $\alpha = \sigma_c / \sigma_f$ для плутония, а также радиационное распухание и ползучесть стали. Стало ясно, что на оксидном топливе не удастся достичь ни считавшихся тогда главными целями высоких коэффициентов воспроизводства (КВ) и темпов размножения плутония, ни действительно важнейшего качества таких реакторов — равновесного топливного режима ($K_{\text{ВА}} \approx 1$), рассмотренного тогда нами. К началу 1970-х годов на реакторе БР-5 была испытана активная зона на основе карбидного топлива (позднее две загрузки на основе нитрида). Я сожалею, что, инициировав и будучи научным руководителем проекта БН-800, из оказавшихся ошибочными представлениях о сроках не настоял на использовании в нем плотного топлива, что сделало бы БН-800 серьезным шагом вперед. БН-800 так и не построен, и 30 лет спустя мы с трудом пытаемся исправить эту ошибку.

*Митенков Ф.М. Перспективы развития быстрых реакторов-размножителей. — Атомная энергия, 2002, т. 92, вып. 6, с. 423—432.

Технический проект БН-600 уже в конце 1960-х годов показал в 1,5 раза более высокую стоимость 1 кВт, чем ВВЭР-440, которая затем еще выросла при переходе на модульный парогенератор*. В возможности столь сильного снижения стоимости АЭС за счет обычной для всех реакторов оптимизации конструкции (о чем и идет речь в статье) я вправе сомневаться, не видя такого примера в реакторной практике. Нас не может радовать и сближение стоимости при удорожании ВВЭР в случае повышения их безопасности. ВВЭР (LWR) подошли при этом к границе конкурентоспособности или даже перешли ее, сделав невыгодным строительство новых АЭС в США и других странах. Между тем превосходя ВВЭР по топливной и энергетической эффективности, быстрый реактор и проще по конструкции и управлению и мог бы быть дешевле, если бы не необходимость предотвращения контакта натрия с воздухом и водой и его опасных последствий. Оптимизации для этого недостаточно, нужно искать новые пути.

С течами парогенераторов мы столкнулись в первые годы работы БН-350, и эта проблема была решена их заменой и снижением мощности, а в БН-600 — дорогими модульными парогенераторами, которые, вероятно, останутся и в следующих проектах. Но жизнь научила нас осторожности в перенесении ограниченного опыта на массовую энергетику, требующую перехода от паллиативов к радикальным решениям принципиальных проблем.

Слова Федора Михайловича я вспомнил и во 2-й половине 1970-х годов, когда еще до больших аварий на АЭС начался спад интереса к ядерной энергетике в США, развивших наиболее крупномасштабную энергетику на LWR. А. Вейнберг предсказал 30-летний «мораторий» в США на строительство АЭС, а затем и «вторую ядерную эру» на принципах внутренне присущей безопасности. Спад вскоре перешел в стагнацию, перекинувшуюся и в Европу. Интерес к ядерной энергетике сохранился в странах Азии, приступивших к ней позже на основе опыта и технологии Запада, в том числе России.

Большие аварии не вызвали, как следует из статьи, а усугубили стагнацию вследствие удорожания АЭС при повышении их безопасности и обострения антиядерных настроений в обществе. Неблагоприятной для ядерной энергетике оказалась и стабилизация мирового топливного рынка на приемлемом для богатых стран (и для экспортеров) уровне цен.

Озабоченность общества в 1970-е годы экологией коснулась и ядерной энергетике: накопление отработавшего ядерного топлива, при замыкании топливного цикла — высокоактивных отходов. Тревогу вызвал и риск расползания ядерного оружия при распространении в мире ядерной энергетике, особенно быстрых реакторов с замкнутым топливным циклом с выделением плутония. Эти проблемы и до сих пор не нашли удовлетворительного решения.

Стагнация распространилась на рынок урана, стабильно низкая цена на который благоприятна для экономики тепловых реакторов, но не стимулирует строительство дорогих быстрых реакторов, и они не получили распространения в энергетике. В США, затем и в Европе их серьезные разработки свернуты, страны Азии лишь осваивают опыт России и Франции. Несмотря на освоенность быстрых реакторов в России (БОР-60, БН-350, -600), БН-800 и цех 300 на комбинате «Маяк» так и не построены. Без быстрых реакторов ядерная энергетика лишается серьезной перспективы, и в этом одна из глубоких причин снижения интереса к ней.

В конце 1960-х годов развитие ядерной энергетике к концу XX века оценивалось оптимистически (850—1400 ГВт в США, 600 ГВт в СССР). Но намерения с ходу, на волне успешного и быстрого создания ядерного оружия, атомных подводных лодок и первых АЭС развить уже в XX веке крупномасштабную ядерную энергетику не осуществились, хотя ядерная энергетика на основе быстрых реакторов обладает таким потенциалом. Пример Франции указывает на физическую возможность развертывания крупномасштабной ядерной энергетике за несколько десятилетий. Причин было много, но прежде всего отсутствие тогда и до сих пор острой необходимости в ней. Исходя из намерений создать крупномасштабную ядерную энергетику уже в XX веке, высоких темпов роста после войны и дефицита плутония, техническая концепция быстрых реакторов была нацелена на достижение высоких КВ и темпов размножения. Их потенциал по экономике и безопасности не был использован. Выросшие из военной техники тепловые реакторы с большим или меньшим успехом конкурируют на энергетическом рынке, но их вклад в энергетику, скорее всего, будет снижаться от достигнутого уров-

*Позднее высокая стоимость АЭС с быстрым реактором была подтверждена нашим и зарубежным опытом.

ны ~17% в мировом производстве электричества и ~6% в топливном балансе. Даже при этом потенциальных ресурсов дешевого урана (немного более 10 млн т) едва ли хватит до конца XXI века*. Такая ядерная энергетика не сможет сыграть заметной роли в сокращении потребления обычного топлива и выбросов парниковых газов, отодвигая опасные пределы, если они действительно близки, на несколько лет**.

Чтобы вернуть ядерную энергетiku из состояния стагнации и выживания (как на Западе сейчас характеризуют это состояние) к осуществлению ее исходных целей, нужны критический анализ нашего полувекового опыта, обновление в новых условиях научной постановки задачи и поиск отвечающей ей технической концепции быстрых реакторов.

Искать новые пути нам приходилось уже без А.И. Лейпунского, скончавшегося в 1972 г. незадолго до пуска БН-350. Один из первых физиков-ядерщиков нашей страны, он в 1940-е годы пришел к идее быстрых реакторов и в течение 25 лет возглавлял в СССР развитие их научных и технических основ, разработку и создание экспериментальных быстрых реакторов и первых АЭС. Вокруг него и вовлеченных им в работу крупных ученых и инженеров сложились большие коллективы физиков, инженеров, технологов, конструкторов, создавших быстрые реакторы и уже 30 лет работающих без него по их эксплуатации и совершенствованию. Потеря А.И. Лейпунского, авторитетнейшего и признанного у нас и в мире научного лидера этого направления, нанесла тяжелый урон. Он внимательно следил за всем, что делается в этой области в мире и, как это не раз бывало в трудные моменты, нашел бы верные и мужественные ответы на резкие перемены в ядерной энергетике и быстрых реакторах. Попробуйте посмотреть на них его глазами, думаю, что та же логика привела бы его к близким ответам.

Для поиска новой концепции быстрых реакторов во второй половине 1970-х годов удалось при поддержке А.П. Александрова собрать в ИАЭ им. И.В. Курчатова группу молодых тогда физиков и инженеров из ФЭИ и МИФИ. К середине 1980-х годов поиск вернул нас к быстрым реакторам с тяжелым жидким металлом, сначала с $PbBi$, примененным в реакторах атомных подводных лодок (в конце 1950-х годов в ФЭИ был пущен их опытный прототип, и к тому времени имелся уже 25-летний опыт их работы). Но стало понятным, что в быстром реакторе можно использовать свинец вместо $PbBi$ с редким и дорогим висмутом, генерирующим α -излучающий летучий ^{210}Po .

В конце 1980-х годов конструкторами и физиками НИКИЭТа при поддержке и активном участии его директора Е.О. Адамова были начаты расчетные, конструкторские, а затем вместе с ФЭИ и другими институтами и экспериментальные исследования концепции быстрого реактора с нитридным топливом и свинцовым теплоносителем (БРЕСТ). Исследования сопровождались выработкой представлений о ядерной энергетике на основе быстрых реакторов, требований к ним по топливному и радиационному балансу, безопасности, радиоактивным отходам и устойчивости к распространению. Исследования показали, что АЭС с реактором БРЕСТ в замкнутом топливном цикле может выполнить эти требования, и привели к выводу, что полувековой опыт быстрых реакторов и военной ядерной техники достаточен для создания такой АЭС в течение 20—30 лет. Необходима обширная программа НИОКР, главной частью которой является строительство опытного прототипа. Его проект выполнен, завершение НИОКР в его обоснование потребует еще несколько лет. При этом нет необходимости в создании экспериментального реактора, как это делалось в 50—60-е годы в отсутствие какого-либо опыта по реакторам совершенно новых типов (EBR, BP-5, HTGR, MSR). Но при создании как атомных

*Обсуждение возможностей использования в тепловых реакторах дорогого урана даже из морской воды исходит из его крайне низкой современной «стагнационной» цены, составляющей проценты в стоимости энергии. Но при возврате к развитию ядерной энергетики повышение спроса, затраты на разведку и освоение новых месторождений, «динамическая рента» приведут к многократному росту цены урана, как это было во время нефтяного кризиса только из ожидания роста спроса.

**Но новейшая техника (а ядерная энергетика, как она была замыслена, остается таковой) входит в жизнь не при исчерпании традиционных ресурсов, таких, как нефть и газ, теснящие уголь, и не по спросу на рынке, ничего о ней не знаящем, и не в результате эволюции традиционной техники. Она возникает, как колесо, не в результате эволюции полоза (квадрат, шестигранник и т.д.) и не по запросу рынка (индейцы, кажется, обходились без колеса, пока не узнали о нем от европейцев), а оказавшись лучше прежней и открывая новые возможности по мысли далеких от рынка людей и при поддержке мыслящих и деятельных людей в государстве или бизнесе.

подводных лодок, так и ВВЭР экспериментальные реакторы не строились, обоснование проектов велось на вне реакторных стендах и реакторных петлях. Анализ тяжелых аварий, имевших место на АЭС и у нас, и в США после выработки первых тысяч реакторо-лет, показывает, что опыт малых экспериментальных реакторов мало что дал бы для их предотвращения. Мы хотели бы уменьшить размер прототипа БРЕСТА (электрическая мощность 300 МВт), но это не позволило бы изучить и опробовать работу топлива равновесного состава, а для изучения принципиальных вопросов топлива, технологии теплоносителя, коррозии стали достаточны и более простые эксперименты вне реактора и в реакторных петлях. Полное же обоснование концепции, в том числе прототипа возможно только на нем самом*.

Исследования повлияли на выработку Минатомом РФ долговременной стратегии и послужили научной основой подготовки политической инициативы президента РФ в кратком выступлении в ООН.

Вероятно, это сыграло некоторую роль и в инициативах Министерства энергетики США NERI и GIF** и включении ядерного раздела в Национальную энергетическую политику США. Главными же были интересы США в сохранении «ядерной опции» для будущего, научного потенциала и лидерства в этой области.

В состоянии стагнации совершенно не актуален вопрос, что лучше: не очень нужный традиционный быстрый реактор или совсем не нужный новый БРЕСТ. Если мы видим серьезную перспективу быстрых реакторов, то БН-800 или несколько таких блоков станут лучшим решением актуальной задачи утилизации плутония из сокращаемых боеголовок или из отработавшего топлива, чем вредное для этой перспективы и чисто затратное его сжигание в тепловых реакторах. Разумеется, при отказе от производства плутония оружейного качества в урановом blankets, без которого быстрый реактор на оксидном топливе будет иметь $K_B < 1$, близкий к K_B ВВЭР, что лишает дорогой быстрый реактор последнего серьезного аргумента. Кто действительно заботится о сохранении линии быстрых реакторов, должен был бы занять более определенную позицию в вопросе о переводе БН-800 на нитридное топливо с $K_{BA} \approx 1$.

В возможности и необходимости совершенствования в указанных в статье и других направлениях БН-800 или последующих проектов сомнений у нас нет, так что предмет дискуссии другой. Она приобретает смысл в рамках поставленной стратегией задачи создания крупномасштабной ядерной энергетики на основе быстрых реакторов. Но в статье о стратегии напоминает только ссылка, а требования к быстрым реакторам и другие принципиальные положения, аргументированные в ней и во множестве публикаций, проигнорированы и даже не удостоены серьезных контраргументов (риторические изыски против естественной безопасности таковыми не выглядят)***.

В стратегии и публикациях доказывается, что в течение большей части XXI века даже крупномасштабное развитие ядерной энергетики не нуждается в размножении плутония ни для ввода быстрых, ни для подпитки тепловых реакторов и что роль быстрых реакторов состоит не в размножении, а

*Новых реакторов, а значит, и их опытных прототипов не создавалось в мире лет 30, и, как видно из обсуждений проекта БРЕСТА, многие наши коллеги не знают, а другие забыли, как это делается. Обосновывать опытный реактор по привычным меркам очередных проектов АЭС не на чем и незачем. Передержка же все еще юной ядерной энергетики в колыбели технических концепций середины прошлого века может быть для нее губительной.

**NERI (Nuclear Energy Research Initiative) — программа поисковых ядерно-энергетических исследований. GIF (Generation IV International Forum) — Международный форум по реакторам четвертого поколения.

***Мне трудно себе представить, чтобы конструктор не видел, что АЭС дороже обычных электростанций именно из-за высоких требований и мер обеспечения ядерной и радиационной безопасности, что «отказ от потенциально опасных решений» вовсе не «является само собой разумеющимся для конструктора», применяющего горючий натрий, воду высокого давления или запасы реактивности в десятки β_{eff} и т.п., что речь идет не о «создании систем вопреки природным законам», а о недостаточном использовании в современных реакторах внутренне присущих им и компонентам качеств и закономерностей и что именно наращивание инженерных барьеров, систем и требований сделало АЭС дорогими.

в решении благодаря избытку нейтронов более актуальных ее проблем. Статья же подчеркнуто декларирует взгляды на быстрые реакторы как на размножители, сложившиеся 40—50 лет назад в совершенно других условиях, не замечая, что в этом качестве (вскользь упоминается и выжигание долгоживущих нуклидов) их серьезная перспектива уходит на не вполне определенное будущее. Так что спор о тех или иных быстрых реакторах приобретает чисто академический характер.

Автор по каким-то невысказанным соображениям не принял принципиальных положений стратегии. Это его право, но без определенного общего взгляда на проблему сравнение техники БН и БРЕСТА, в том числе теплоносителей натрия и свинца, становится произвольным, что и наблюдается в статье, как и во множестве других критических публикаций. Поэтому нам здесь придется вернуться к этим положениям, начиная с исходной научной постановки задачи, развитием которой и явились концепция БРЕСТА и стратегия.

Ядерная энергия, в миллионы раз превосходящая химическую по концентрации и ресурсам дешевого и общедоступного топлива, «...позволит человеку строить свою жизнь, как он захочет» (В.И. Вернадский, 1920-е годы). Но «обычный» окружающий нас во Вселенной термоядерный синтез в XX веке был воспроизведен только в ядерных взрывах и физических экспериментах, и создание реактора синтеза для массового производства такого «ширпотреба», как энергия, остается задачей XXI века.

Чудом или высшим промыслом кажется существование единственного долгоживущего делящегося нуклида ^{235}U , сохранившегося в природном уране в количестве, достаточном для выделения из него по цене золота и для создания на природном уране теплового реактора. Необычайна и простота физических и технических принципов осуществления цепной реакции ядерного горения, описываемой много проще химического горения линейным уравнением Больцмана и требующей лишь критической массы делящегося вещества. Это позволило США, а за ними и СССР с привлечением лучших ученых и инженеров в беспрецедентно короткие сроки после открытия деления (1938 г.) создать первый ядерный реактор (1942 г.), ядерное оружие (1945 г.), быстрый реактор EBR I (1951 г.), где впервые было получено «ядерное электричество», первую АЭС (1954 г.) и атомную подводную лодку (1955 г.).

Даже при сжигании в тепловых реакторах менее 1% урана из богатых месторождений стоимость ядерного топлива намного ниже химического, что позволило развить на выросших из военной техники тепловых реакторах современную ядерную энергетику на LWR, GR, HWR, конкурирующую на энергетическом рынке. Но ресурсы дешевого урана, меньшие ресурсов нефти и газа, тем более угля, не позволяют ядерной энергетике на тепловых реакторах стать «новой эрой» в энергетике, как ядерное оружие в военно-политической истории XX века. Масштабы энергетики и множество противоречивых требований к ее технологии по экономике и безопасности делают энергетическую задачу намного более трудной. Обычный в технике компромисс обращает высокую потенциальную опасность ядерной техники, несмотря на ее принципиальную простоту, в ее высокую стоимость, «съедающую» выгоду от дешевого топлива.

Но физика и техника реакторов обладают внутренними ресурсами, мобилизация которых позволяет достичь высокого уровня и безопасности и экономичности в гармонии. Их главный физический ресурс — избыток нейтронов (в расчете на сгоревшее делящееся ядро) сверх 1 на поддержание цепной реакции.

Уже в ходе создания ядерного оружия в 1940-е годы, обсуждая перспективу применения реакторов и в энергетике, Э. Ферми и другие физики (в России А.И. Лейпунский) оценили уникальный избыток нейтронов в быстром реакторе теоретически ~2,3 против ~1 в тепловом реакторе (1,3 в цикле Th— ^{233}U) и на этом основании пришли к научной постановке задачи ядерной энергетики на основе быстрых реакторов (о ней теперь если и вспоминают, то разве как о «Fermi's dream»).

При быстром росте энергетики после войны, недостатке плутония и из расчета на создание крупномасштабной ядерной энергетики за обозримые полвека (ядерная энергетика на тепловых реакторах рассматривалась в качестве «разгонного участка» и источника плутония для нее) техническая концепция первых быстрых реакторов и избыток нейтронов были нацелены на достижение высоких КВ и темпов размножения (короткое время удвоения T_2): высоконапряженное топливо (в США EBR I — металл, у нас БР-5 — керамика—оксид, затем карбид и нитрид), легкий теплопроводный теплоноситель (в США — NaK, у нас — Na), урановый бланкет. Правда, по указанным причинам короткого времени удвоения достичь не удалось.

Из ограниченного опыта создания первых реакторов считалось возможным обеспечить безопасность простыми и недорогими средствами, что при высокой эффективности использования энергии и топлива позволяло рассчитывать и на экономичность быстрых реакторов. Но расчет не подтвердился, и АЭС с быстрым реактором не получили широкого применения.

Исходная постановка задачи ядерной энергетики в силу фундаментальности остается верной и теперь, но нам следует извлечь уроки из полувекowego опыта и принять во внимание резкую смену условий, определивших выбор первой технической концепции быстрых реакторов. Темпы роста мировой энергетики упали ниже 2% в год и, вероятно, снизятся в XXI веке даже с учетом быстрого роста в развивающихся странах, дешевого урана для тепловых реакторов хватит еще надолго, а накапливаемого ими плутония — для ввода тысяч ГВт быстрых реакторов умеренной энергонапряженности и с $KB \approx 1$. Размножение стало неактуальным. Избыток нейтронов и техническую концепцию быстрых реакторов следует направить на реализацию их потенциала в решении суммы проблем безопасности и связанной с ней экономики.

Концепция БРЕСТА нацелена на создание быстрых реакторов и топливного цикла, на основе которых в XXI веке может быть развита ядерная энергетика, способная удовлетворить значительную часть (масштаба половины) прогнозируемого прироста мировых потребностей в электричестве и некоторую, пока неопределенную часть потребностей в тепле. Ориентировочно АЭС с тепловым реактором на уране, но с переработкой топлива обеспечат до 1 тыс. ГВт, АЭС с быстрыми реакторами в замкнутом топливном цикле — до 3—4 тыс. ГВт. В этом случае ядерная энергетика позволит значительно снизить потребление ископаемого топлива, отравление среды продуктами горения и вместе с другими возобновляемыми источниками энергии откроет миру новые возможности развития без этих ограничений.

Ядерная энергетика развивается, в том числе и в развивающихся странах, главным образом, в секторе централизованного производства электричества на крупных АЭС (сотни—тысячи МВт), который наиболее соответствует ее экономическим и другим качествам и останется ее магистралью в обозримом будущем. Универсальная форма энергии — электричество занимает в мировом топливно-энергетическом балансе $\sim 1/3$ (в развитых странах до 40% и более) и имеет тенденцию стать к середине века преобладающей. Вероятно и расширение сферы ее использования, где это окажется выгодным: локальные потребности удаленных районов (опыт Билибинской АТЭЦ), опреснение морской воды (опыт БН-350), возможно, и производство тепла, в том числе высокотемпературного для технологических нужд — производство водорода и др.* Пока рано говорить о крупных масштабах такого применения атомной энергии, но стратегия предусматривает сооружение небольших АТЭЦ для локальных нужд, опытного высокотемпературного реактора и выполнение НИОКР. Топливный и радиационный балансы отдаленного будущего могут быть выполнены в рамках принятой в стратегии концепции даже в предположении развития этих секторов ядерной энергетики до крупных масштабов (~ тысяча ГВт)**.

Освоенность и преобладание тепловых реакторов в современной ядерной энергетике влияют и на их роль в будущем. Для долговременной стратегии более важны их фундаментальные качества. Тепловые реакторы проигрывают быстрым по избытку нейтронов, топливному балансу и др., но они обладают и принципиальными, связанными также с нейтронным балансом преимуществами перед быстрыми реакторами. Из-за малого поглощения тепловых нейтронов ^{238}U они оказались единственной возможностью производства плутония и трития на природном уране и были затем использованы в ядерной энергетике. Более важна возможность применения в тепловых реакторах большого количест-

*Из опыта стоимость 1 кВт C растет со снижением мощности блока N в грубом согласии с зависимостью $C \sim N^{-1/3}$. Давно обсуждаемые заманчивые идеи значительного снижения стоимости больших блоков при их массовом заводском изготовлении (по аналогии с мобильными телефонами и другими примерами, далекими от энергетики, тем более ядерной) так и не обрели ясных технических и экономических очертаний, как и идеи широкого атомного теплоснабжения, кроме АТЭЦ, использования водородного топлива и топливных элементов на транспорте.

**Энтузиасты вправе и должны ставить перед собой и более амбициозные цели, но для переориентации на них стратегии, задач разработки быстрых реакторов и программы НИОКР оснований не видно.

ва замедляющих и мало поглощающих нейтроны легких веществ в качестве теплоносителей и конструкционных материалов. в том числе на основе графита, как в микротопливе — выдающемся достижении ядерной технологии. Поэтому стратегия предусматривает использование тепловых реакторов и в отдаленной перспективе в «двухкомпонентной ядерной энергетике», о которой А.П. Александров говорил еще в конце 1960-х годов. При удорожании урана тепловые реакторы нужно будет перевести в предпочтительный для них цикл $\text{Th}-^{233}\text{U}$ с производством ^{233}U в ториевом бланкете, которым тогда можно снабдить быстрые реакторы без изменения топлива и принципиальной конструкции (такие НИОКР намечены стратегией). Быстрый реактор способен принять вместе с плутонием и Np , Am , Cm и др. из тепловых реакторов, не требуя еще и их специальных сжигателей.

Противники стратегии противопоставляют ей не двухкомпонентную ядерную энергетику, а лишь ее реанимированный крайний вариант с быстрым реактором в роли «плутониевой фабрики» (термин Э. Теллера) для основной части ядерной энергетики на тепловых реакторах. Его физическая и экономическая несостоятельность была понята уже в 80-е годы*.

Быстрый реактор может стать основой развития в XXI веке крупномасштабной ядерной энергетики в соответствии с целями, поставленными стратегией, если будет отвечать совокупности критериев по экономике и аспектам безопасности:

равновесный режим работы ($\text{KB} = \text{KBA} \approx 1$) — нитридное топливо умеренной энергонапряженности (удельная нагрузка делящегося плутония ~ 5 т/ГВт). Исключение уранового бланкета, но в будущем, когда рост цены урана сделает это выгодным, снабжение ториевым бланкетом для производства ^{233}U и перевода тепловых реакторов в цикл $\text{Th}-^{233}\text{U}$. $\text{KBA} \approx 1$ открывает, кроме прочего, важную во многих аспектах возможность перехода в будущем к квазинепрерывному режиму перегрузки топлива быстрых реакторов;

детерминистическое исключение (т.е. заведомо пренебрежимо малая вероятность) плавления топлива и других тяжелых аварий на АЭС, требующих эвакуации населения, при любых ошибках персонала, отказах оборудования и реализуемых внешних воздействиях (кроме, возможно, некоторых экстремальных) за счет присущих реакторам и компонентам качеств и закономерностей (не путать с детерминистическим описанием аварийных процессов).

Замечания к этому критерию, в том числе в статье, требуют пояснений.

Современные правила обеспечения и обоснования безопасности, в том числе МАГАТЭ основываются на опыте современных АЭС ($\sim 10^4$ реакторо-лет), их выполнение позволяет рассчитывать на безопасность развития ядерной энергетики не слишком далеко от ее нынешнего уровня. Наша же задача — обосновать безопасность ядерной энергетики на порядок большего уровня, которая за век или немного больше выработает $\sim 10^6$ реакторо-лет, что требует нового подхода. Это означает не «отказ от вероятностного анализа безопасности», а лишь признание его условности и недостаточности для поставленной задачи. К тому же для снижения расчетных вероятностей тяжелых аварий в 100 раз при современных подходах пришлось бы значительно усложнить АЭС с соответствующим ростом их стоимости.

Требуемый уровень безопасности достигается большими запасами до критической температуры и т.д., перекрывающими неопределенность как исходных событий, так и расчетов аварийных процессов, не выдвигая чрезмерных требований к их точности. Отдельный вопрос — запас реактивности $\sim \beta_{\text{эф}}$, где мы надеемся не столько на точность расчетов, сколько на опыт прототипа (где приняты необходимые запасы), который может быть перенесен методами теории возмущений на коммерческий реактор, близкий при $\text{KBA} \approx 1$ по составу топлива и спектру нейтронов.

*Избыток нейтронов в быстрых реакторах недостаточен, чтобы «прокормить» несколько тепловых реакторов с приличным выгоранием. При высоком KB (в ущерб другим качествам) можно достичь соотношения около 1:1, но при этом дорогой быстрый реактор будет производить и слишком дорогой плутоний, так что выгоднее будет использовать в тепловом реакторе и в несколько раз более дорогой уран. Если же быстрый реактор не дорог, то незачем ограничивать его роль. «Плутониевой фабрикой» может служить более богатый нейтронами гибридный реактор синтеза — деления или ускорительный. Но в 1980-е годы стало ясно, что в обозримом будущем он не потребуются. Лучше подумать, как снизить стоимость быстрого реактора. Противопоставляемый стратегии вариант двух- или трехкомпонентной ядерной энергетики годится для модных теперь компьютерных игр в виртуальные сценарии. Для научной постановки задачи они служат лишь фоном или иллюстрацией.

Постулирование расплавления топлива для современных реакторов, в которых оно не исключено, оправдано, учитывая условность и неопределенность расчетов его малой вероятности. Рассматривая для реактора БРЕСТ маловероятные исходные события и их наложение, мы не нашли таких, которые приводили бы к температуре, приближающейся к плавлению с учетом расчетных неопределенностей. Мы предлагали всем желающим проверить, повторить расчеты или предложить более опасные сценарии аварий, которые обязуемся изучить, и пока этого не произошло, считаем себя вправе не постулировать расплавление топлива, как это предусмотрено и правилами для случая, когда его исключение доказано*.

Подобный же подход приводит и к другим критериям безопасности, более строгим, чем принято для современной ядерной энергетики:

обеспечение долговременного баланса радиоактивности между захораниваемыми отходами и извлекаемым из земли ураном: сжигание долгоживущих Np , Am , Cm и продуктов деления в быстрых реакторах, малые потери актиноидов при переработке топлива, стойкие композиции отходов, соизвлечение долгоживущих продуктов распада урана (Th , Ra , Pa) при его добыче. Сначала должен быть достигнут глобальный баланс с упрощением технологии захоронения за счет снижения радиоактивности отходов и с уменьшением остаточной радиоактивности в районах добычи урана. С освоением технологии захоронения отходов в радиоактивных формациях при их реабилитации после добычи урана — обеспечение локального баланса;

заккрытие легальных каналов производства оружейных материалов путем исключения из ядерной энергетики производств с извлечением плутония при переработке топлива быстрых реакторов, а со временем и производств изотопного обогащения урана: использование в быстрых реакторах топлива равновесного состава, переработка отработавшего топлива тепловых реакторов и изготовление первых загрузок быстрых реакторов в центрах, в том числе под международной юрисдикцией, перевод в будущем тепловых реакторов в цикл $Th-^{233}U$ с производством в ториевых бланкетах ^{233}U с необходимой для тепловых реакторов концентрацией**. В этом случае можно рассчитывать на эффективность мер контроля и физической защиты, а при пресечении нелегальной ядерной деятельности — на достижение цели всеобщего и полного запрещения и ликвидации ядерного оружия.

Принятие концепции в реакторе БРЕСТ вслед за концепцией IFR (Аргоннская национальная лаборатория, США, 1980-е годы) размещения производства замкнутого топливного цикла при АЭС без извлечения плутония повышает устойчивость ядерной энергетики к распространению, резко снижая к тому же опасные и дорогие перевозки большой массы радиоактивных и делящихся веществ. Как было показано Аргоннской лабораторией, при сухой переработке экономически приемлемы и небольшие радиохимические заводы.

Наконец, переход к неисчерпаемым ресурсам дешевого природного топлива с сохранением намного более низких в сравнении с обычной энергетикой затрат на топливо, обеспечение высокого уровня безопасности АЭС при снижении стоимости их сооружения и обслуживания по сравнению с современными АЭС с ВВЭР позволяют рассчитывать и на достижение экономической цели ядерной энергетики, надежную конкурентоспособность ядерной энергетики уже в современных условиях топливного и энергетического рынка, которая будет лишь расти с удорожанием обычного топлива или при введении квот и штрафов за выбросы продуктов горения.

Экономические выгоды, открываемые миру новые возможности вместе с убедительным решением проблем безопасности, радиоактивных отходов и нераспространения повернут общественное мнение в сторону ядерной энергетики лучше самых изощренных пропаганды и рекламы.

Определив позиции, обсудим остающиеся моменты сравнения традиционных быстрых реакторов и БРЕСТа.

*Тем не менее в МИФИ и ТРИНИТИ были выполнены расчеты теплогидронейтронной модели конвекции свинца с диспергированными в нем топливными таблетками близкой плотности при гипотетическом расплавлении оболочек. Они указали на возможность исключения не только быстрого коллапса активной зоны (как в натрии), но и медленного скопления топлива в разогреваемую до высокой температуры или критическую массу. В усложнении конструкции быстрого реактора в расчете на чисто гипотетические аварии и в проведении дорогих экспериментов необходимости не видно.

*Полное решение задачи возможно для теплового реактора с $KB \approx 1$, т.е. MSR с циркулирующим топливом $Th-^{233}U$.

Ключевым (и сильнейшим в статье) доводом против БРЕСТа, как и любой серьезной инновации (а по этой логике и против самой ядерной энергетики), являются затраты 12 млрд дол. вместе с утверждением, что «совершенно (?) новое реакторное направление» потребует «существенно больших финансовых затрат». Учитывая скромный практический результат полувековой работы и неопределенность перспектив, эта цифра, будь она верна, говорила бы, скорее, о крайней расточительности и неэффективности нашей работы. Не останавливаясь на обсуждении этой завышенной (вероятно, вдвое) цифры и сомнительного (после опыта быстрых реакторов и атомных подводных лодок) утверждения, замечу лишь, что охвативший большую часть реакторщиков «здоровый консерватизм» (здоровый лишь, когда он в меру), ставящий проблемы технологии впереди принципиальных, становится главным тормозом для ядерной энергетики и не находит оправдания в ее истории. Все современные реакторные концепции исходили из принципиальной постановки задачи и всегда находили адекватные технологические решения, изученные и освоенные в реакторах в 1950—1960-е годы при умеренных затратах: газ, вода, столь же коррозионно активные PbBi, солевой расплав, столь же экзотический натрий и др. (кроме органики, термо- и радиационная нестойкость которой создает принципиальные препятствия для ее применения).

Несмотря на различия между реакторами атомных подводных лодок с PbBi и БРЕСТом со свинцом, не пришлось «заново разрабатывать систему поддержания качества» свинца, так как близость физико-химических свойств в близком температурном интервале позволила строить ее на тех же принципах и на опыте свинцовых контуров ФЭИ и ЦНИИКМ. Эксперименты продолжительностью до 13 тыс. ч не обнаружили чрезмерного коррозионного повреждения стали и позволили выбрать оптимальный диапазон кислородного режима ($\sim 10^{-6}$), средства контроля и поддержания. При их отладке испытания (пока 5 тыс. ч) указывают на удовлетворительную стойкость выбранной стали, в том числе при максимальной температуре ($T_{об}^{макс}$). 3 тыс. ч отработал и свинцовый канал-петля с твэлами БРЕСТа на БОР-60. Опыты указали и на допустимость кратковременных (сотни или тысячи часов) отклонений от штатного режима более чем на порядок вверх или вниз. Необходимый для опытного реактора объем обоснований может быть выполнен в течение примерно 3 лет*.

Без необходимого для быстрого реактора промежуточного контура все другие АЭС обходятся. Чтобы считать его «обязательной составляющей частью быстрого реактора» вообще, недостаточно напоминания о хорошо известных проблемах двухконтурных реакторов, которым в проекте БРЕСТа уделено большое внимание. В нынешнем его состоянии имеет смысл лишь конкретное обсуждение принятых мер на случай множественного разрыва труб парогенераторов для предотвращения опасного роста давления в первом контуре, схемы циркуляции, исключающей попадание заметного количества пара в активную зону, результатов исследований, выполненных в этой связи.

Вопреки утверждению автора о «потребительских качествах» быстрых реакторов естественной безопасности — стоимости и безопасности его сторонники постоянно информируют всех заинтересованных в расчете на серьезную оценку своей работы.

Отказ от высоких темпов размножения позволил снизить энергонапряженность реактора, слабо влияющую на экономику, но сильно на безопасность АЭС, с увеличением загрузки плутония (что лишь ускорит освобождение хранилищ**). Это позволило использовать свинец, малое замедление нейтронов которым оказывается намного более важным качеством, чем поглощение нейтронов, малое для свинца и натрия, и даже чем теплопроводность. Переход к свободной решетке твэлов с уменьше-

*Исследования ФЭИ, НИИЭФА, РНЦ «Курчатовский ин-т», МИФИ указывают пути последующего совершенствования технологии — пучковое или плазменное легирование поверхности оболочек, оптимизация теплоносителя на основе свинца. В МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФЭИ, МИФИ изучается концепция БРЕСТа большой мощности в газотурбинном цикле без парогенератора.

**Финансовому механизму такой ядерной энергетики еще предстоит сложиться. Теоретически же, а сейчас и практически рыночная стоимость плутония неопределенна, но близка к нулевой: его избыток, невыгодность для тепловых реакторов, накопление ими средств для отложенной переработки топлива за счет небольшой добавки к тарифу на заключительный этап топливного цикла, циркуляция плутония в топливном цикле быстрых реакторов.

нием перепада давления и мощности на прокачку и вместе с тем подогрева свинца и максимальной температуры оболочек в сравнении с традиционным быстрым реактором и, наконец, к бесчехловой сборке с исключением аварии блокировки расхода через нее естествен для свинца и проблематичен для натрия.

Отсутствие «системного подхода», в том числе ранжировки по важности данных таблицы (с. 427) привело автора (как и цитируемую статью [5]) к неверным выводам: «по теплофизическим и нейтронно-физическим параметрам реактор со свинцовым теплоносителем всегда будет уступать реактору с натриевым теплоносителем» и «при одинаковой $T_{об}^{макс} - T_{вых}$ для свинца будет на 40—50 °С ниже, чем

для натрия». Разность $T_{об}^{макс} - T_{вых}$ определяется факторами перегрева и в БРЕСТе оказывается меньшей из-за меньшего подогрева свинца и стабильности мощности сборок при КВА ≈ 1 (что возможно и в традиционном быстром при переходе на нитридное топливо). Польза кипения в некоторых авариях известна так же, как и его опасность во многих других случаях (неустойчивость и быстрая остановка расхода, разгон и др.). Формальное сравнение плавления оболочек в случае натрия и свинца (с. 429) некорректно, так как для натрия оно возможно как раз вследствие кипения, а расчеты тяжелых аварий для БРЕСТа показывают, что температура плавления оболочки в них не достигается, причем с запасом в сотни градусов.

Формальный перечень систем безопасности БРЕСТа, разумеется, близок традиционным быстрым, хотя химическая пассивность свинца позволяет создать реактор действительно бассейнового типа без металлических основного и страховочного корпусов и с отводом остаточного тепла воздухом непосредственно от первого контура. Но для экономики АЭС важен не столько формальный перечень систем безопасности, сколько их функции и требования к ним, значительно облегченные в БРЕСТе.

Об аварии с расплавлением активной зоны было уже сказано, но рассуждения об образовании вторичной критической массы (с. 431) содержат существенную неточность: концентрация делящегося плутония в ^{238}U в реакторе БРЕСТ в 1,5—2 раза ниже, чем в современных быстрых, так что эта опасность не усугубляется, а снижается. Для топлива БРЕСТа используется ферритно-мартенситная сталь, созданная для атомной подводной лодки. В силу радиационной стойкости она представляет все больший интерес и для традиционных быстрых, так что и в этом интересы БРЕСТа и традиционных быстрых сходятся, как и в освоении нитридного топлива. Последнее мелкое замечание к с. 431: пожароопасные экспериментальные натриевые стенды, вероятно, дороже свинцовых стендов с немного более высокой температурой.

На сложившихся в середине века реакторных концепциях ядерная энергетика стала важным сектором энергетики некоторых стран и продолжает эволюцию в ограниченных масштабах. Но не найдя за полвека удовлетворительного решения своих главных проблем, она находится на перепутье в ожидании подходов и идей, которые открыли бы ей путь из полувекковой «предыстории» в «ядерную эру». Ждать их следует не от «мирового сообщества», а только от людей, владеющих проблемой и всерьез ее изучающих.

Заинтересованная в ядерной энергетике сейчас и в будущем (в том числе чтобы не остаться только поставщиком сырья) Россия, давно лидирующая в создании быстрых реакторов, выступила с долговременной стратегией создания крупномасштабной ядерной энергетике на основе быстрых реакторов и с концепцией реактора БРЕСТ.

США и другие развитые страны Запада, пока не испытывающие острой нужды в ядерной энергетике, осознали необходимость инноваций, но, оказавшись не готовыми к постановке задачи и выбору, ограничились поиском концепции АЭС следующего поколения.

Каждый из нас вправе выбрать для себя: участие в осуществлении целей стратегии или не менее достойное ремесло — техническое совершенствование традиционных АЭС. Третий выбор — имитация научной активности — думаю, не для нас.

В ядерной энергетике пока хватает дела и тем, и другим, и в наших интересах понять и поддерживать друг друга — хотя бы конструктивной научной критикой.