



## ПЕРСПЕКТИВЫ НА РАСПЛАВАХ СОЛЕЙ

Текст: Ольга ГАНЖУР

Российские ученые разработали концепцию быстрого жидкосолевого реактора с уран-плутониевым топливом, в которой основные проблемы ядерной энергетики, связанные с РАО и конечностью ресурсов, могут найти решение. Однако эти работы пока не получили поддержки ни на отраслевом, ни на государственном уровне, и авторы разработки опасаются, что без финансирования проект так и останется на уровне идеи.

Концепция жидкосолевого реактора (ЖСР, реактора на расплавах солей) и традиционные тепловые ядерные энергетические установки возникли почти одновременно. Причем первая во многом была более привлекательна. Активную зону ЖСР формирует гомогенная расплавленная смесь из фторидов солей и фторида урана, плутония или тория. Эта же топливная композиция служит теплоносителем первого контура. Ее температура ~ 700 °С, но давление в контуре отсутствует, что повышает безопасность реактора. Поскольку реактор работает на жидком ядерном топливе, автоматически снимается проблема изготовления и переработки твердотопливных элементов.

ЖСР обладает свойством «естественной безопасности»: температурный и пустотный коэффициенты в нем отрицательны, что исключает тяжелые аварии типа чернобыльской. «В твердотопливном реакторе при

потере теплоносителя реактор „идет вразнос“ — это следствие положительного пустотного эффекта. В жидкосолевом реакторе такого быть не может — при повышении температуры он просто заглохнет», — поясняет один из ведущих российских специалистов по ЖСР, главный эксперт ВНИИИМа, член-корреспондент Российской академии наук Леонид Пономарев.

Но в 1950-х годах разработать тепловой реактор было проще и дешевле, используя готовые наработки военной программы создания атомной бомбы, и мир пошел по этому пути. Ведь для создания ЖСР нужно было решить множество дополнительных проблем: обеспечить безопасность реактора в отсутствие оболочек твэлов — первый барьер для защиты от радиоактивности; защитить от коррозии корпус реактора в потоке нейтронов, при высокой температуре и в присутствии продуктов деления — примерно трети элементов из таблицы Менделеева. Кроме того, нужно было научиться очищать топливную композицию тут же, рядом с реактором.

### В ПОИСКАХ СОЛИ

В 1960-х годах в США, в Окриджской национальной лаборатории, построили реактор MSRE (Molten-Salt Reactor Experiment) тепловой мощностью 7,4 МВт. Топливом служил раствор фторидов урана и тория (UF<sub>4</sub> и ThF<sub>4</sub>) в расплаве соли 2LiF-BeF<sub>2</sub>. Спектр нейтронов у MSRE был тепловой, в качестве основы для топлива использовался изотоп урана <sup>235</sup>U, которого в природе нет — его получают из <sup>232</sup>Th при облучении нейтронами.

Реактор служил верой и правдой в течение пяти лет, но затем его остановили, а программу исследований закрыли, поскольку к этому

**СПРАВКА****Из решения заседания НТС № 8 по вопросу «Жидкосолевого быстрый реактор с замкнутым топливным циклом (2013 год).**

1. Рекомендовать провести детальное обоснование места технологии ЖСР в системе ядерной энергетики, выявив ее возможные преимущества по сравнению с разрабатываемыми в настоящее время БР в условиях ЗЯТЦ.

2. Рассматриваемая концепция БЖСР может быть рекомендована для продолжения выполнения НИР и их консолидации <...>.

3. Обратить внимание на возможности финансирования тематики в рамках внеотраслевых источников

(например, РФФИ, «Сколково», гранты Минобрнауки).

4. Рекомендовать включение в международное сотрудничество с ведущими научными центрами и организациями, занимающимися аналогичными разработками, а также поиск возможного участия российских специалистов, экспериментальной базы и наработанного потенциала в зарубежных проектах, прежде всего в Китае и в Индии.

**Из результатов экспертизы в РФНФ заявки на проведение расчетного обоснования параметров быстрого жидкосолевого реактора (2014 год)**

Эксперт 1: В случае успеха проекта это открывает возможности истинно

инновационных решений в атомной энергетике... Проект безусловно следует поддержать.

Эксперт 2: Предлагаемый проект обещает дать качественно новые, важные для ядерной энергетики результаты и безусловно заслуживает поддержки.

Эксперт 3: Актуальность проекта и его значение для решения проблем современной энергетики не вызывают сомнений. Считаю, что данный проект обязательно следует поддержать.

Заключение секции экспертного совета: Секция считает, что проект относится к области инженерных наук... и не предполагает получения новых знаний в области

ядерной физики... Секция рекомендует экспертному совету отклонить данную заявку.

**Из письма председателя президиума НТС Росатома академику Н. П. Лаверову от первого заместителя ФАНО А. М. Медведева (2015 год)**

ФАНО России считает предложенные исследования БЖСР с уран-плутониевым топливом важными и перспективными и в целом их поддерживает... Однако, ввиду отсутствия у ФАНО России резервов бюджетных ассигнований, утверждение программы исследований по теме БСЖР возможно только после определения источников финансирования мероприятий по данной программе.

времени уже все поняли преимущества быстрого спектра нейтронов. Штаты выбрали программу развития ядерной энергетики на основе быстрых реакторов, которую, впрочем, тоже вскоре закрыли после ряда аварий. Совсем недавно технологию Окриджа купил Китай, и к 2020 году там планируют построить «двойника» MSRE (подробнее см. с. 27).

Чтобы реализовать все преимущества ЖСР, необходимо одновременно выполнить три условия: быстрый спектр нейтронов, жидкое топливо, уран-плутониевый цикл. «Для этого надо найти соль, которая растворяет много урана и плутония, без этого быстрый спектр невозможен, — рассказывает Л. Пономарев. — А в расплаве соли  $2\text{LiF}\cdot\text{BeF}_2$ , который использовали американцы,

растворяется менее 1% фторида плутония  $\text{PuF}_3$ ». Такую соль удалось найти ученым России в 2013 году.

**ЭВРИКА?**

В 1990-х годах группа ученых из восьми российских институтов (РФЯЦ-ВНИИТФ, НИИАР, ИЯИ РАН, ВНИИХТ, ИТЭФ, ИАТЭ, ФЭИ, НИЦ «Курчатовский институт»), которых интересовала жидкосолеватая тематика, объединились и создали некоммерческую организацию — Координационно-исследовательский центр «МЮКАТЭКС». Возглавил его Л. Пономарев, который в то время работал в Курчатовском институте. МЮКАТЭКС выполнял проекты Международного научно-технического центра, «в тени» которых проводились также исследования по ЖСР. Было и небольшое финансирование НИОКР из Росатома.

В ходе исследований фторид плутония пробовали растворять во многих солях, пока две лаборатории — НИИАР и ВНИИТФа — независимо друг от друга не доказали, что в расплаве  $\text{LiF}\cdot\text{NaF}\cdot\text{KF}$  при температуре 700 °С можно растворить не 1%, а 30%  $\text{PuF}_3$ . «Такая топливная композиция содержит по массе до 60% урана и плутония, а спектр нейтронов в таком реакторе является быстрым, и экспериментальное доказательство высокой растворимости  $\text{PuF}_3$  в  $\text{LiF}\cdot\text{NaF}\cdot\text{KF}$  открывает путь для создания быстрого жидкосолевого реактора с U-Pu топливным циклом, — подчеркивает Л. Пономарев. — Выполненные расчеты подтвердили, что такой реактор может работать в равновесном режиме, при котором он потребляет только  $^{238}\text{U}$ , а делящийся изотоп  $^{239}\text{Pu}$  нарабатывается в процессе работы

## КОММЕНТАРИЙ ЭКСПЕРТА



**НИКОЛАЙ  
ПОНОМАРЕВ-СТЕПНОЙ,**  
академик РАН:

«Я знаком с этой тематикой с 1950-х годов. В США был жидкосольевой реактор, и он

работал, и ученые получили при работе на нем интересные результаты. Направление условно перспективное — это я подтверждаю. Но уже тогда у таких реакторов обнаружилась важная проблема: радиоактивность первого контура. Как с ней работать, никто не знает, в том числе и российские ученые, которые занимаются жидкосольевыми реакторами.

На мой взгляд, они сейчас не уделяют этому вопросу должного внимания. Между тем, проблема серьезная: необходимо обосновать, что

атомная энергетика может работать без многобарьерной защиты. Поколебать основы практически.

Вопрос финансирования исследований сложный. На мой взгляд, идти в ФАНО и подобные организации смысла не имеет. Это дело госкорпорации. Но корпорация должна приносить прибыль — это следует из названия. Исследования по жидкосольевым реакторам относятся скорее к фундаментальным. Поэтому ученые должны понимать, что эта тематика не может войти в первоочередные

инвестиционные планы госкорпорации. Однако руководство Росатома прогрессивно, оно не отрицает необходимости инновационного развития. Пока ЖСР не вошли в список приоритетных инновационных разработок госкорпорации.

Думаю, ученым надо и дальше проявлять активность, продолжать инициативные работы, чтобы со временем в этот перечень попасть. Плохо, что нет согласия между научными коллективами в России, которые занимаются этим направлением».

реактора. Полученные результаты открывают совершенно новые возможности для преодоления принципиальных проблем ядерной энергетике».

В БСЖР нет ограничений по глубине выгорания топлива, потому что там отсутствуют твэлы и их оболочки; снимается также проблема минорных актинидов, поскольку в быстром спектре нейтронов америциев (который представляет наибольшую долговременную опасность) эффективно выжигается.

«Надо отделять только лантаниды — нейтронные яды, чтобы они не „ели“ нейтроны. Но в быстром реакторе, в отличие от теплового, сечение захвата лантанидов много меньше. Чистить топливную композицию от лантанидов периодически все равно придется, но делать это можно значительно реже и без остановки реактора, заменяя при этом отработанное топливо свежим», — говорит Л. Пономарев.

**Полученные результаты дают надежду на реализацию идеи БЖСР,**

**но для этого необходимо еще выполнить обширную программу исследований, и прежде всего:**

- изучить физико-химические свойства соли LiF-NaF-KF и других фторидных солей с высокой растворимостью фторидов урана, тория и плутония;
- найти материалы, устойчивые к совместному воздействию жидких солей, продуктов деления и нейтронному облучению;
- разработать схему замыкания ядерного топливного цикла БЖСР и методы утилизации радиоактивных отходов жидкосольевой топливной композиции;
- выполнить системные технико-экономические исследования концепции БЖСР и ее безопасности;
- инициировать подготовку специалистов по физике и химии жидкосольевых реакторов.

По утверждению Л. Пономарева, за три-пять лет при умеренном финансировании можно решить все эти проблемы и получить все исходные данные, необходимые для подготовки технического задания на

проектирование демонстрационного блока БЖСР.

Конечно, эти исследования не принесут прибыли немедленно (и даже в обозримом будущем), но ставки очень высоки и нужны люди, способные принимать масштабные решения с учетом длительной перспективы, констатирует Л. Пономарев.

#### СКРИПАЧ НЕ НУЖЕН

В 2013 году, по словам нашего собеседника, МЮКАТЭКС закрыли, а Росатом прекратил финансирование работ, несмотря на то что профильный НТС-8 госкорпорации рекомендовал концепцию к дальнейшей разработке.

Научные эксперты посоветовали разработчикам параллельно искать финансирование вне Росатома. «Я подавал заявку в Российский научный фонд — и вот результат: все три эксперта единогласно рекомендовали безусловно поддержать проект, но руководство РНФ заявку отклонило, — рассказывает Л. Пономарев. — Мы обращались в Академию наук, обсудить проект собрались представители

трех отделений РАН: физики, химии и энергетики — почти треть Академии. Собрание приняло решение поддержать проект и обратилось с письмом к президенту РАН, но опять все безрезультатно. Председатель президиума НТС Росатома академик Николай Лавров написал письмо поддержки в Федеральное агентство научных организаций. Из ФАНО ответили: отлично, очень интересно, найдите деньги и исследуйте».

Пока группа Пономарева ищет финансирование, ученые продолжают в инициативном порядке вести расчеты, однако экспериментальная работа стоит: нет денег даже на реактивы. «Беда в том, что за последние три года я почти потерял команду, — сетует Л. Пономарев. — Экспериментальная установка во ВНИИТФе разрушена, в НИИАРе расформирован радиохимический отдел, и работать на установке больше некому».

В этом году разработчики БЖСР под эгидой НИЯУ МИФИ подали заявку на финансирование по объявленной Росатомом программе «Инновационный старт». Ученые, претендующие на средства госкорпорации, должны доказать, что в перспективе их предложения могут принести ей существенную прибыль.

«Даже примитивные оценки показывают, что переработка жидкого топлива в разы проще и дешевле, чем переработка твэлов», — утверждает Л. Пономарев. Возможно, на «Инновационном старте» ему и его единомышленникам наконец улыбнется удача.

#### КОНКУРИРУЮЩИЙ «ЖАСМИН»

Альтернативный проект быстрого реактора на расплавах солей ведет инициативная группа в Физико-энергетическом институте им. А. И. Лейпунского при участии

ученых из НИЦ «Курчатовский институт». Рабочее название установки — «ЖАСМИН» (жидкосолевая, многофункциональная, инновационная). В качестве соли предполагается использовать предложенный группой Пономарева (в которую, кстати, входили и ученые из ФЭИ) расплав LiF-NaF-KF. В этом проекте предлагается объединить две пока не существующие технологии: электроядерную и жидкосолевою. Подкритический ЖС-бланкет управляется источником нейтронов, которые рождаются при взаимодействии ускоренных протонов с ядрами урана.

Уже сегодня в ФЭИ приступили к опытно-конструкторским проработкам комплекса (институт финансирует их сам). Реактор будет иметь модульную структуру для повышения безопасности. Планируемая мощность — 20 кВт. Теоретически, в случае успеха, можно замануться и на более высокие показатели. Но в ФЭИ главенствует идея использования реактора для сжигания минорных актиноидов, прежде всего америция, а не для производства электроэнергии, поэтому ученые считают, что тепловые мощности блоков за пределами 0,5–1 ГВт вряд ли понадобятся. Опытный образец ЖАСМИНа обещают представить в 2018 году.

Л. Пономарев считает, что игра не стоит свеч. «ФЭИ хочет делать, по сути, не реактор, а подкритическую систему. ЖАСМИН сам работать не может — он должен подпитываться от ускорителя. Думаю, это несерьезно. Просто ФЭИ нужен новый ускоритель, чтобы производить изотопы. А жидкосолевою бланкет — просто „бантик“, чтобы оправдать покупку такого ускорителя. Дело это бессмысленное, мощность 20 кВт никому не нужна, потоки нейтронов  $10^{14}$  н/с давно достигнуты в обычных реакторах», — говорит он.

Стоит отметить, что редакция предоставила руководству ФЭИ возможность ответить на эти доводы, однако в институте ею не воспользовались.

#### БОЛИВАР НЕ ВЫДЕРЖИТ ЧЕТВЕРЫХ

В блоке по управлению инновациями Росатома концепцию БЖСР признают привлекательной, но называют очень низкой степень ее проработки. Авторам потребуется не менее 10 лет работы, чтобы решить проблемы с материалами, с поведением жидких солей под облучением, с эксплуатацией реактора. «Пока, мне кажется, рассчитывать на финансовую поддержку проекта в госкорпорации странно, — сказал представитель руководства научного дивизиона. — В ближайшие много лет госкорпорации предстоит усовершенствовать технологию ВВЭР. Возможно, будет построен натриевый реактор БН-1200. Сложная задача, нужно вложить много средств, чтобы это действительно был следующий шаг в натриевой технологии, а не просто повторение БН-800 с большей мощностью. Еще одно направление — быстрые реакторы со свинцовым теплоносителем. Оно тоже требует больших вложений. Вот три направления, давайте еще четвертое запустим? Боюсь, Боливар не выдержит четверых».

«Что касается идеи реактора ЖАСМИН, она интересна. В мире существует несколько подобных проектов. Но преимущества такой установки проявляются лишь тогда, когда ее мощность мала. Как физическая установка, как источник нейтронов ЖАСМИН, мне кажется, имеет право на жизнь. Если масштабировать технологию, сделать реактор серьезной мощности, пригодной для энергетики, то преимущества будут не столь очевидны, а стоимость сооружения велика», — прокомментировал наш собеседник.