

2. К истории мирного использования атомной энергии в СССР. 1944—1951. Документы и материалы. Обнинск, 1994.
3. Жильцов В.А., Кулыгин В.М., Семашко Н.Н. и др. Применение методов плазменной сепарации элементов к обращению с ядерными материалами. — Атомная энергия, 2006, т. 101, вып. 4, с. 302—306.
4. Рачков В.И. Разработка технологий закрытого ядерного топливного цикла с быстрыми реакторами для крупномасштабной ядерной энергетики. — Известия вузов. Ядерная энергетика, 2013, № 3, с. 5—14.
5. Говердовский А.А., Калякин С.Г., Рачков В.И. Альтернативные стратегии развития ядерной энергетики в XXI в. — Теплоэнергетика, 2014, № 5, с. 3—9.
6. Рачков В.И. Научно-технические проблемы формирования крупномасштабной ядерной энергетики. — Энергосбережение и водоподготовка, 2013, № 5, с. 2—8.
7. Рачков В.И., Калякин С.Г., Кухарчук О.Ф. и др. От первой АЭС до ЯЭУ IV поколения (к 60-летию Первой АЭС). — Теплоэнергетика, 2014, № 5, с. 11—19.
8. Рачков В.И., Арнольдов М.Н., Ефанов А.Д. и др. Жидкие металлы в ядерной, термоядерной энергетике и других инновационных технологиях. — Там же, 2014, № 5, с. 20—30.
9. Говердовский А.А., Калякин С.Г., Рачков В.И. Инновационная ядерная энерготехнология — основа крупномасштабной ядерной энергетики. — Известия вузов. Ядерная энергетика, 2014, № 1, с. 5—17.
10. Кочетков Л.А., Троянов М.Ф. Реакторы на быстрых нейтронах. — В сб.: ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского — 50 лет. М., ЦНИИатоминформ, 1996, с. 149—166.
11. Тошинский Г.И. Ядерные энергетические установки с жидкометаллическим теплоносителем свинец—висмут для атомных подводных лодок и А.И. Лейпунский. — Известия вузов. Ядерная энергетика, 2003, № 4, с. 15—18.
12. Пупко В.Я. История работ по летательным аппаратам на ядерной энергии для космических и авиационных установок в ГНЦ РФ — ФЭИ. Воспоминания. Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2002.
13. Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой. Международная конференция ЛЯН'92. Обнинск, 1992, т. 1—3.
14. Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой. Международная конференция ЛЯН'94. Арзамас-16, 1994, т. 1, 2.
15. Проблемы лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы. Международная конференция ЛЯН-ИР-2002. Снежинск, 2003.
16. Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы. Международная конференция ЛЯН-ИР-2007. Обнинск, 2009, т. 1, 2.
17. Гулевич А.В., Дьяченко П.П., Зродников А.В., Кухарчук О.Ф. Связанные реакторные системы импульсного действия. М.: Энергоатомиздат, 2003.

УДК 621.039

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛИЗАЦИИ МИРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

Рачков В.И., Каграманян В.С., Усанов В.И. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск)

Существенное влияние на производство электроэнергии в мире оказывает глобализация экономики и энергетических рынков, тенденции к международному разделению труда, разукрупнение и приватизация сектора производства электроэнергии, все более жесткие требования общества к охране окружающей среды и другие факторы. Все это необходимо учитывать при разработках стратегии развития и технологий ядерной энергетики. В статье состояние и перспективы развития ядерной энергетики рассматриваются не только с позиций технологических инноваций, но и в контексте макроэкономических процессов в стране и мире.

Факторы, влияющие на темпы развития ядерной энергетики. Максимальная доля электроэнергии, производимой в мире на АЭС, 17% была достигнута в начале 1990-х годов. В настоящее время она снизилась до 12%. Обычно эту тенденцию объясняют причинами, которые

относятся к ее внутренним проблемам. Среди них:

проблемы безопасности, которые после аварий на АЭС «Три-Майл-Айленд» в США (1979), Чернобыльской АЭС в СССР (1986) и АЭС «Фукусима» в Японии (2011) привели к тяжелым экономическим, экологическим и социальным последствиям;

продолжающийся рост объема отработавшего топлива тепловых реакторов;

риск распространения чувствительных технологий и ядерных материалов;

ограниченность сырьевой базы.

Указанные проблемы наряду со снижением относительной экономической привлекательности новых АЭС сказались на замедлении темпов ввода ядерных мощностей. Однако не только эти широко обсуждаемые проблемы, но и внешние макроэкономические факторы привели к тому, что во многих промышленно развитых

странах прекращено финансирование программ развития ядерных технологий нового поколения.

До 1980-х годов идея создания крупномасштабной ядерной энергетики была популярна почти во всех странах, включая США, СССР, Францию, Великобританию, ФРГ, Италию, Швецию. Макроэкономические факторы, способствующие такому развитию ядерной энергетики, были связаны с высокими послевоенными темпами роста энергоемкой промышленности, требуемыми объемами ввода новых электромощностей и прогнозами сохранения высоких темпов развития экономики и энергетики как минимум до конца XX века. Именно в это время в нашей стране была создана новая отрасль энергетики — ядерная. Однако благоприятные макроэкономические условия для развития сохранялись недолго. Энергетический кризис 1973 г. привел к осознанию необходимости энергосбережения, которое в 1980—1990-е годы привело к реструктуризации экономики и значительному снижению темпов роста потребления электроэнергии. В 1985—1996 гг. снизился ввод не только АЭС, но и всех других новых электростанций. Возникающие в некоторые периоды потребности в дополнительной электроэнергии стало экономически выгодно покрывать за счет быстрого строительства (2—3 года) станций малой мощности на природном газе или возобновляемых источниках энергии. Инерционная и капиталоемкая ядерная энергетика, которая сыграла важную роль в энергообеспечении многих крупных стран Запада на этапе их быстрого развития, в новых экономических условиях стала терять свою привлекательность.

Однако такое положение дел не являлось общим для всех стран мира. В странах, где продолжалось интенсивное развитие экономики, в первую очередь, в Азии АЭС продолжали интенсивно строить даже после аварии на Чернобыльской АЭС. Политика многих развивающихся государств сегодня направлена на существенное повышение ВВП и потребления электроэнергии на душу населения до уровней, сопоставимых с соответствующими показателями в промышленно развитых странах. Значительное развитие ядерная энергетика может получить в Азии, население которой к 2050 г. по прогнозам приблизится к 5 млрд. В этом регионе наблюдается интенсивный рост промышленности, темп роста потребности в элект-

роэнергии до 2030 г. оценивается 10—15%, строятся новые АЭС и планируется широкое развитие ядерной энергетики. Как ожидается, рост установленных мощностей электростанций в странах Азии составит к 2050 г. более 9 тыс. ГВт, АЭС — 500 ГВт [1].

В СССР макроэкономический фактор также сказался на темпах и направлениях развития ядерной энергетики. Послевоенное возрождение экономики, ее быстрый рост и оптимистический взгляд в будущее вызывали необходимость надежного энергообеспечения. К концу 1970-х годов была создана ядерная энергетика с тепловыми реакторами и открытым ЯТЦ. Планировалось довести установленную электрическую мощность АЭС к 2000 г. до 100—300 ГВт. Успешно выполнялась программа по быстрым реакторам и замкнутому ЯТЦ, направленная на создание крупномасштабной ядерной энергетики, не ограниченной в своем развитии сырьевыми проблемами.

Глубокий политический и социально-экономический кризис на рубеже 1990-х годов, радикальные экономические реформы привели к снижению до нуля потребности в строительстве новых электростанций, в том числе атомных и замораживанию финансирования работ по новым ядерно-энергетическим технологиям. С выходом экономики страны из кризиса в конце 1990-х годов вновь возникли благоприятные внешние условия для дальнейшего развития ядерной энергетики. В 2000 г. принята стратегия крупномасштабного развития ядерной энергетики на период до 2050 г. [2], в первые годы XXI века принимаются решения о финансировании сооружения новых АЭС, в том числе о возобновлении строительства БН-800 на Белоярской АЭС.

Архитектура глобальной ядерно-энергетической системы и направления усиления конкурентных позиций на мировом рынке ядерно-энергетических технологий. В 2000 г. по инициативе России и под эгидой МАГАТЭ был организован международный проект ИНПРО по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам [3]. За прошедшее время достигнуты значимые результаты. По существу, проект стал программой работы МАГАТЭ в области инновационных ядерно-энергетических технологий. В совместном исследовании 15 стран и Европейской комиссии «Глобальная

архитектура инновационной ядерной энергетики» GAINS, осуществленном в рамках ИНПРО, участвовали страны как обладающие и развивающие ядерно-энергетические технологии, так и заинтересованные только в их коммерческом использовании [4]. Исследование показало, что большая часть внутренних проблем мировой ядерной энергетики связана с заключительной стадией ЯТЦ. Использование единой методологии (методологии ИНПРО), согласованных граничных условий и одних и тех же расчетных инструментов подтвердило представление о том, что переход к ядерно-энергетической системе с инновационными тепловыми и быстрыми реакторами и замкнутым топливным циклом позволяет кардинально решить основные проблемы заключительной стадии ЯТЦ. Вместе с тем был сделан вывод, что разработка инновационных ядерно-энергетических технологий и создание основанной на этих технологиях инфраструктуры не могут быть универсальным рецептом для всех стран, ориентированных на использование атомной энергии.

Расходы на НИОКР, демонстрацию и внедрение новых ядерно-энергетических технологий могут быть очень значительными. По данным МАГАТЭ затраты на развитие быстрых реакторов к середине 1990-х годов для нескольких стран, разрабатывавших эту технологию, составили около 50 млрд дол., затраты отдельных стран превысили 12 млрд дол. [5]. Очевидно, что это не окончательные оценки, поскольку до настоящего времени коммерческий вариант замкнутого ЯТЦ с быстрыми реакторами не продемонстрирован. Как показали расчеты, выполненные при стоимости НИОКР и создании инфраструктуры ЯТЦ от 10 до 40 млрд дол., возврат средств в приемлемые сроки (20—40 лет) может быть обеспечен в системе с установленной электрической мощностью реакторов более 30—40 ГВт [4]. По прогнозу [6] только 6—7 стран могут превысить этот рубеж к 2060 г. В проекте GAINS указан путь, который позволяет получить преимущества инновационной ядерно-энергетической системы без непосильных финансовых затрат на ее создание, — это сотрудничество обладателей и пользователей ядерно-энергетических технологий.

Желание пользователей минимизировать финансовые риски, связанные с большими ин-

вестициями в сооружение АЭС, длительным сроком их строительства, возможными колебаниями общественного мнения в отношении к ядерной энергетике, и другие факторы заставляют предположить, что в ближайшие десятилетия основную долю экспорта будут составлять тепловые реакторы, наиболее дешевые в расчете на единицу мощности. На возможность решения проблем обращения с топливом для пользователей, стремящихся минимизировать затраты на ЯТЦ, указывают результаты [4]. Так, проблема накопления отработавшего топлива и делящихся материалов может быть решена за счет его отправки в страны, в которых оно перерабатывается, а выделенные плутоний и ^{235}U используются в рециклируемом топливе. Переход к замкнутому ЯТЦ в странах с наиболее развитой ядерной инфраструктурой в сочетании с международным сотрудничеством может обеспечить тот же эффект экономии природного урана, что и повсеместное внедрение замкнутого ЯТЦ.

В целом результаты проекта GAINS и других исследований показывают, что международное сотрудничество на заключительной стадии ЯТЦ может существенно улучшить характеристики национальных ядерно-энергетических систем по критериям устойчивого развития и поэтому к нему будут обращаться многие страны мира. В свое время опережение в разработке и создании технологий открытого ЯТЦ позволило нашей стране занять достойное место на мировом рынке услуг по начальной стадии ЯТЦ и продаже тепловых реакторов. В настоящее время Госкорпорация «Росатом» активно и успешно работает на внешнем рынке. Выход на мировые рынки происходит в условиях жесткой конкуренции. Некоторые зарубежные энергетические компании, например, EdF (Франция) показывают более высокую долю международного бизнеса в выручке по сравнению с отечественными компаниями. По мнению экспертов, интегрированное маркетинговое предложение услуг на заключительной стадии ЯТЦ при продаже отечественных реакторов может существенно усилить позиции бизнеса.

Отечественное законодательство в части услуг на заключительной стадии ЯТЦ является наиболее гибким и эффективным среди стран-экспортеров. Наша страна показала возможность возврата топлива отечественного произ-

водства, что привлекательно для многих потенциальных партнеров. Но предоставление этой услуги может стать на твердую почву только при условии создания инфраструктуры переработки отработавшего топлива и использования выделенных из него делящихся материалов. Для этого созданы необходимые предпосылки.

Поэтапное решение системных проблем ядерной энергетики. С необходимостью перехода к замкнутому ЯТЦ для решения внутренних системных проблем ядерной энергетики, в том числе обращения с отработавшим ядерным топливом на заключительной стадии ЯТЦ согласно большинство специалистов как в нашей стране, так и за рубежом. Однако в отношении сроков и конкретных путей такого перехода согласия нет. В рамках концепции естественной безопасности решение проблем современной ядерной энергетики связывается с освоением и последующей коммерциализацией инновационных быстрых реакторов и замкнутого ЯТЦ, удовлетворяющих жестким требованиям [7]. Данная концепция отражает распространенный подход к развитию отрасли, заключающийся в формировании представления о ядерной энергетике отдаленного будущего, определении требований к ее характеристикам, обосновании финансирования и развития только тех инновационных технологий, которые отвечают этим требованиям.

Альтернативная концепция, развиваемая в рамках того же общего подхода, исходит из иного представления о ядерно-энергетической системе будущего [8]. Формально в этой концепции декларируется поэтапность, но уже на первом этапе до 2030 г. предлагается к внедрению широкий спектр ядерных установок Поколения IV. В качестве ближайшей целевой задачи ставится создание не только усовершенствованного ВВЭР-ТОИ, но и одновременно СуперВВЭР для работы в замкнутом топливном цикле. В задачи первого этапа входят также создание серийного реактора-размножителя с высоким коэффициентом воспроизводства, развитие АЭС малой и средней мощности, внедрение атомных мощностей в энергоемкие отрасли промышленности. Эта развернутая программа вряд ли может быть осуществлена с учетом имеющихся ресурсов ранее середины века. Вследствие разницы взглядов на развитие ядерной энергетики принципиально отличаются и

задачи, к решению которых следует приступить в ближайшее время.

Требования, опирающиеся на представления об идеальной ядерной энергетике будущего, а не на необходимость и выполнимость, могут быть основой для перспективных направлений НИОКР, но не для бизнес-планов. Опыт развития быстрых реакторов и замкнутого ЯТЦ свидетельствует о реальности рисков, связанных с представлениями о будущем. Например, высокие требования к времени удвоения в быстрых реакторах в 1960—1970-е годы выдвигались, исходя из существовавших ожиданий высоких темпов развития экономики, которые на самом деле не оправдались.

Для того чтобы инновации в ядерной энергетике как можно быстрее внесли свой вклад в глубокую всестороннюю модернизацию и способствовали значительному расширению внешнего рынка услуг ЯТЦ, необходимо отдать приоритет решению задач отрасли на ближний период. Разрабатываемые варианты бизнес-плана Концерна «Росэнергоатом», направленные на решение наиболее острых проблем с использованием имеющихся технологий и технологий, освоенных на опытно-промышленном уровне, представляют собой хорошую основу для создания отраслевой программы сроком на 15—20 лет [9]. В этот период будут постепенно повышаться требования к безопасности АЭС и установок ЯТЦ, однако радикальные решения могут быть показаны за пределами этого периода при выполнении глубоких НИР и ОКР и внедрении инновационных установок новой технологической платформы [7].

В отличие от безопасности проблема обращения с отработавшим ядерным топливом может быть в значительной степени решена в течение 15—20 лет в основном за счет средств промышленности и федеральных программ, реализуемых в настоящее время. Главное, что ожидает Концерн «Росэнергоатом» от реализации первой фазы замыкания ЯТЦ, — это снижение расходов на обращение с отработавшим топливом [9]. Решение этого важного вопроса может составить одну из центральных задач первого этапа замыкания ЯТЦ. Вместе с тем создание инфраструктуры переработки и изготовления топлива из рециклированных материалов откроет путь к решению таких фундаментальных проблем, как неограниченная сырьевая

обеспеченность, управление накоплением делящихся материалов, экологическая безопасность, обоснованность возврата отработавшего топлива в страну-производитель.

Возможности реализации первого этапа замыкания ЯТЦ. В настоящее время приняты два варианта решения проблемы накопления отработавшего ядерного топлива тепловых реакторов: геологическая изоляция (Швеция, Финляндия) и переработка с выделением урана и плутония для однократного рецикла в виде смешанного топлива в действующих тепловых реакторах и с остекловыванием высокоактивных отходов для последующего захоронения (Франция). Оба варианта не подходят для условий нашей страны, поскольку существенно затруднят реализацию возможных вариантов крупномасштабного развития ядерной энергетики после 2030 г. Геологическая изоляция отработавшего топлива вместе с плутонием фактически исключает возможность построения в будущем двухкомпонентной системы тепловых и быстрых реакторов с существенной долей производства в энергетическом секторе страны. Согласно второму варианту текущие объемы накапливаемого отработавшего топлива сокращаются в 6—7 раз, но при этом масса плутония в нем уменьшается в 2 раза, содержание ^{241}Am значительно увеличивается.

В нашей стране созданы условия для реализации более перспективного варианта решения проблем обращения с отработавшим топливом на основе технологий водо-водяных и быстрых реакторов, смешанного оксидного уран-плутониевого топлива и гидрометаллургической переработки отработавшего топлива, что не исключает в будущем переход к другим технологиям [10]. До 2030 г. при условии сооружения первой очереди завода РТ-2 мощностью ~800 т/год для переработки отработавшего уранового топлива ВВЭР и цеха по изготовлению смешанного оксидного уран-плутониевого топлива производительностью ~70 т/год функцию утилизации накопленного отработавшего топлива ВВЭР могут выполнить быстрые реакторы с натриевым теплоносителем путем однократного рецикла плутония. С учетом потребности в плутонии для начальной загрузки таких реакторов их соотношение по мощности с ВВЭР составит примерно 9:1, три—пять БН-1200 обеспечат ежегодную утилизацию нарабатываемого в ВВЭР плутония.

Предложенная схема позволит удовлетворить потребности в энергии, производимой на АЭС, в разных вариантах экономического и технологического развития после 2030 г. В оптимистическом сценарии можно предположить, что макроэкономические перспективы для строительства новых АЭС будут хорошими, работоспособность и эффективность ядерных энерготехнологий нового поколения, разрабатываемых в рамках федеральной целевой программы [7], будет доказана. Тогда накопленное отработавшее топливо можно будет перерабатывать в замкнутом ЯТЦ, создаваемом для реализации крупномасштабного развития ядерной энергетики, а плутоний, выделяемый из отработавшего топлива, использовать для изготовления стартовых загрузок инновационных быстрых реакторов.

В сценарии с высокими темпами развития и благоприятными макроэкономическими условиями для строительства АЭС после 2030 г., но с задержкой промышленной демонстрации энерготехнологий нового поколения, например, до 2040—2050 гг. система ВВЭР-быстрые реакторы может получить дальнейшее развитие. Накопленное при работе быстрых реакторов-утилизаторов смешанное оксидное уран-плутониевое топливо может перерабатываться, извлекаемый плутоний использоваться для изготовления стартовых загрузок усовершенствованных быстрых реакторов с тем же топливом, удовлетворяющих возросшим к этому времени требованиям по безопасности и экономической эффективности и работающих в режиме полного замкнутого топливного цикла. В этом случае в период после 2030 г. потребуются дальнейшее развитие топливной инфраструктуры, а именно создание производств усовершенствованной гидрометаллургической переработки отработавшего смешанного оксидного топлива быстрых реакторов и изготовления топлива того же типа на основе выделенного плутония.

В пессимистическом сценарии можно предположить, что после 2030 г. темпы экономического развития будут низкие, потребности в строительстве новых АЭС также будут низкие или вовсе отсутствовать. В этом случае может быть реализован многократный рецикл плутония в виде смешанного уран-плутониевого оксидного топлива в быстрых реакторах и ВВЭР, модифицированных для использования этого топлива. Потребуется развить созданную до

2030 г. топливную инфраструктуру посредством добавления к ней стадий гидрометаллургической переработки отработавшего смешанного оксидного топлива, а также изготовления смешанного оксидного топлива для быстрых реакторов и ВВЭР. Предварительные оценки показывают, что определенное соотношение быстрых реакторов со смешанным топливом и ВВЭР с урановым и смешанным может позволить организовать многократный рецикл плутония и стабилизацию его количества в ядерной энергетике. В такой системе ВВЭР на смешанном уран-плутониевом оксидном топливе с $K_B = 0,5$ эффективно сжигают излишки плутония, накапливаемого в ВВЭР с урановым топливом, быстрые реакторы с $K_B = 1,05$ повышают содержание делящихся изотопов в рециклируемом топливе для обеспечения возможности его использования в ВВЭР.

Заключение. Таким образом, не столько внутренние проблемы, сколько макроэкономическая ситуация оказывает решающее воздействие на ядерную энергетику в разных странах. Многие государства с развивающейся экономикой имеют большие планы роста ядерных мощностей и стремятся к расширению международного сотрудничества для обеспечения устойчивого развития ядерной энергетики. Решение ключевых системных проблем устойчивого развития ядерно-энергетической системы нашей страны существенно усилит позиции отечественного бизнеса на мировых энергетических рынках и позволит не менее чем в 2 раза увеличить масштабы внутреннего производства.

Поиск ответов на глобальные вызовы времени при условии минимизации финансовых и технологических рисков определяет необходимость поэтапного подхода к дальнейшему развитию ядерно-энергетического комплекса страны. Накопленный потенциал в области быстрых

реакторов и смешанного оксидного уран-плутониевого топлива должен быть использован в ближайшее время для решения конкретных задач, таких, как снижение расходов на обращение с отработавшим топливом ВВЭР, повышение эффективности топливоиспользования, предоставление пакета услуг ЯТЦ при продаже отечественных реакторов. Имеются все предпосылки для создания в течение 15—20 лет инфраструктуры, достаточной для решения этих задач: завода по переработке отработавшего топлива ВВЭР, производства смешанного оксидного уран-плутониевого топлива и 3—5 быстрых реакторов на смешанном топливе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Energy**, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050. Vienna: IAEA, 2013.
2. **Стратегия** развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. М., ЦНИИатоминформ, 2001.
3. **International Project on Innovative Reactors and Fuel Cycles (INPRO)**. 2012 Progress Report. Vienna: IAEA, 2013.
4. **Андреева-Андриевская Л.Н., Каграманян В.С., Усанов В.И.** Глобальная архитектура инновационной ядерной энергетики. — Безопасность ядерных технологий и окружающей среды, 2011, вып. 24, № 4, с. 62—67.
5. **Liquid Metal Cooled Reactors: Experience in Design and Operation**. IAEA-TECDOC-1569. Vienna: IAEA, 2007.
6. **World Nuclear Association Nuclear Century Outlook**. London, 2008.
7. **Рачков В.И.** Разработка технологий закрытого ядерного топливного цикла с быстрыми реакторами для крупномасштабной ядерной энергетики. — Известия вузов. Ядерная энергетика, 2013, № 3, с. 5—14.
8. **О стратегии** ядерной энергетики России до 2050 года. М., НИЦ «Курчатовский ин-т», 2012.
9. **Сараев О.М.** БН-1200: главный элемент. — Бюл. Росэнергоатома, 2013, № 1, с. 3.
10. **Жильцов В.А., Кульгин В.М., Семашко Н.Н. и др.** Применение методов плазменной сепарации элементов к обращению с ядерными материалами. — Атомная энергия, 2006, т. 101, вып. 4, с. 302—306.

УДК 621.039.58

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЯ НА ОСНОВЕ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА

Сорокин А.П., Калякин С.Г., Козлов Ф.А., Алексеев В.В., Богословская Г.П., Иванов А.П., Коновалов М.А., Морозов А.В., Орлова Е.А., Стогов В.Ю. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейтунского, г. Обнинск)

Наиболее важной проблемой, определяющей в будущем развитие экологически чистой энергетики, является вовлечение в топливный

цикл водорода. Водород является привлекательным элементом для замены ископаемого топлива (нефти, газа), хотя и является не источником,