

# УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

### ФОРУМ "USPEKHI-2021": ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И ПРОБЛЕМЫ ГЛОБАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

(Объединённая научная сессия Отделения физических наук, Отделения химии и наук о материалах, Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления и Отделения наук о Земле Российской академии наук, 19 января 2021 г.)

## Восток снова встречается с Западом, чтобы справиться с глобальным энергетическим кризисом

Т. Таджима, А. Некас, Т. Массар, С. Гейлс

На форуме "Uspekhi-2021" обсуждались современные проблемы, возникшие под влиянием человеческой деятельности, такие как изменение климата, вызванное увеличением выбросов CO<sub>2</sub> после промышленной революции, а также возможные подходы к решению этих проблем. Обсуждалось использование ядерных технологий, основанных как на делении ядра, так и на управляемом термоядерном синтезе, как одно из возможных решений для исправления ситуации. Одной из проблем при использовании ядерного деления являются отработанные радиоактивные отходы, которые могут накапливаться на сроки, превосходящие длительность существования цивилизации. Первое сближение Востока и Запада в 1955 году произошло благодаря желанию избежать развивающейся ядерной конфронтации между Востоком и Западом. Теперь Восток и Запад снова встречаются, уже для совместного поиска путей выхода из глобальных кризисов, таких как изменение климата, и решения других экологических проблем Земли, тесно связанных с глобальными проблемами энергетики. Встреча в 1955 году положила начало мирному использованию энергии ядерного синтеза, а сейчас, на данном форуме "Uspekhi-2021", мы стали свидетелями кульминации исследований в этом направлении — предложенного Норманом Ростокером безнейтронного синтеза, основанного на инжекции пучка. На прошлой встрече Векслер также предложил коллективное ускорение с использованием плазмы, чтобы сделать ускорители более компактными. Мы рады, что продемонстрировали плоды его идеи в лазерном ускорителе на основе кильватерной волны, где нейтроны компактно и эффективно ускоряются для сжигания трансурановых радиоактивных ядерных отходов. Эти исследования открывают пути перехода к углеродно-нейтральной и даже углеродно-отрицательной энергетике.

**Ключевые слова:** углеродно-нейтральная энергия, безнейтронный термоядерный синтез, пучковый термоядерный синтез, коллективное ускорение, электроны лазерного кильватерного поля, трансмутация трансуранов, углеродно-отрицательный подход

PACS numbers: 28.52. – s, 28.65. + a, 89.30. – g, 89.60. – k, 92.70. – j, 92.70.Mn DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.07.039052>

## Содержание

1. Коротко о форуме "Uspekhi-2021" (1280).
2. Энергетика: прямая и обратная задачи (1281).
3. Схема трансмутации отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и метод генерации нейтронов (1282).

- 3.1. Ядерная лестница трансурановых элементов. 3.2. Эффективное производство нейтронов электронами лазерного кильватерного ускорителя. 3.3. Трансмутатор на солевом расплаве с обратной связью.

4. Биоподобная углеродно-отрицательная стенка (1287).

5. Принимаем вызов и делаем выводы (1289).

Список литературы (1290).

Т. Таджима<sup>(1,а)</sup>, А. Некас<sup>(2)</sup>, Т. Массар<sup>(3,б)</sup>, С. Гейлс<sup>(4,с)</sup>

<sup>(1)</sup> University of California at Irvine, Irvine, CA 92697 949-824-5011 USA

<sup>(2)</sup> TAE Technologies, Inc., Foothill Ranch, California, USA

<sup>(3)</sup> Stanford University, Stanford, California, USA

<sup>(4)</sup> IJCLab IN2P3/CNRS and University Paris-Saclay, France

E-mail: <sup>(а)</sup> ttajima@uci.edu, <sup>(б)</sup> massard.thierry@gmail.com,

<sup>(с)</sup> gales@ipno.in2p3.fr

Статья поступила 21 мая 2021 г.

## 1. Коротко о форуме "Uspekhi-2021"

Мир в очередной раз оказался на пороге глобального кризиса, не менее или даже более значительного, чем тот, с которым мы столкнулись в 1955 г., когда возникло серьёзное ядерное противостояние двух великих держав Востока и Запада. В 1955 г. учёные Востока и Запада встретились в Женеве (Международная конференция по использованию атомной энергии в мирных целях, извест-

ная как Женевская конференция), чтобы обсудить этот кризис и найти пути для сотрудничества между сторонами для некоторой стабилизации и будущего взаимодействия. Мы упомянем только два близких нам события, которые произошли на той встрече:

1) рассекречивание в то время засекреченных исследований в области термоядерной энергии (что положило начало новому глобальному международному сотрудничеству в области термоядерных исследований и, в частности, привело к созданию Международного агентства по атомной энергии, МАГАТЭ) [1];

2) предложение использовать плазму в качестве новой коллективной ускоряющей среды, помимо обычных ускорителей [2].

На этот раз в центре внимания находится реакция природы на деятельность человека, а не человеческое противостояние между Востоком и Западом, т.е. созданная человеком глобальная проблема изменения климата и связанные с ней глобальные энергетические проблемы. Мы готовы рассматривать указанные проблемы, изучать их и снова действовать сообща в глобальном масштабе ради их решения, поскольку человеческое воздействие на природу экспоненциально усиливается, становится всепроникающим, глубоким и глобальным. Оно простирается не только от Востока до Запада, но и от Арктики до Антарктики, как мы видели и обсуждали на данном форуме [3–6]. В 1955 году учёные-ядерщики Востока и Запада собрались, чтобы заняться тогдашней проблемой, а теперь учёные Востока и Запада собрались снова, чтобы заняться нынешней проблемой на форуме *Uspekhi-2021* по изменению климата и проблемам глобальной энергетики. Сегодня, примерно 65 лет спустя, мы можем сказать, что Мать-Природа становится всё более несчастной и разгневанной.

Видеозапись работы нашего Форума "*Uspekhi-2021*" (состоялся 19 января 2021 г.) хранится на сайте *УФН* [www.ufn.ru](http://www.ufn.ru), и их можно просмотреть здесь: <https://ufn.ru/ru/articles/2021/1/a/>.

Со времён промышленной революции человеческое общество научилось использовать ископаемые источники энергии и наслаждалось их удобством. Далее, после квантовой ядерной революции XX века человеческое общество начало пользоваться мощностью и удобством ядерной энергии. Однако человечество забыло или отложило на будущее переработку отходов ядерной энергетики (очистку "туалета" из отработанных радиоактивных ядерных отходов). Потребление же ископаемого топлива приводит к опасному накоплению  $\text{CO}_2$  в атмосфере Земли. Из многих докладов на этом форуме мы сделали вывод, что климатические изменения происходят и ускоряются.

## 2. Энергетика: прямая и обратная задачи

Общая тенденция состоит в том, что существуют рыночные цены на различные виды топлива (и получаемую с их помощью энергию, прямая задача энергетики), однако цена (пока ещё) не привязана к усилиям, требуемым для удаления  $\text{CO}_2$  из окружающей среды (обратная задача). Снижение выброса  $\text{CO}_2$  при производстве энергии приветствуется, но не отражается на рыночных ценах, которые побуждают людей разрабатывать или добывать топливо и производить энергию ("кухонная наука"), в то время как экономический стимул для сокращения

выброса  $\text{CO}_2$  или его конверсии очень слаб (если существует стимул социальный или научный) ("туалетная наука"). Мы отмечаем аналогичную социально-экономическую ситуацию в ядерной энергетике. Если мы производим энергию с помощью ядерных установок, то к ней привязана цена, чтобы люди могли покупать и использовать её. Однако в настоящий момент нет ни рыночных, ни социальных стимулов для разработки технологий переработки отходов, возникающих в результате производства ядерной энергии (таких как повышение глубины вторичного использования).

Хотя производство ядерной энергии в принципе (или прямо, если не косвенно) изолировано от производства  $\text{CO}_2$ , человечество пока не достигло необходимых успехов в переработке связанных с производством ядерной энергии радиоактивных отходов, которые могут продолжать радиоактивное воздействие на окружающую среду в течение миллионов лет. Отметим, что существует серьёзное различие между ископаемой энергией и ядерной энергией, помимо источников топлива. Различие существует на энергетическом уровне и видно из сравнения физики химических процессов с ядерной физикой: первая работает в диапазоне электронвольт (эВ), а вторая — мегаэлектронвольт (МэВ). Мы осознаём следствия, вытекающие из этого фундаментального различия, и коснёмся их хотя бы вкратце, чтобы увидеть, как мы можем воспользоваться преимуществами данного различия и попытаться избежать трудностей в максимально возможной степени. Сказанное означает, что если для ископаемых источников "туалетная наука" имеет дело с энергией, выражаемой в эВ, "туалетная наука" для ядерной энергии должна работать с энергиями в МэВ.

Гениальная и деятельная инновационная натура профессора Нормана Ростокера честно, искренне и живо откликнулась на вопросы, поднятые на Женевской конференции, и они стали основными направлениями его поисков и исследований. Это и безопасный ядерный синтез, и коллективные плазменные ускорители, о которых говорилось на конференции. Он рано и в полной мере осознал как силу, так и опасность ядерной энергии, а именно МэВ-диапазон энергии, выделяющейся в ядерных реакциях. Такая энергия в основном переносится нейтронами, а с МэВ энергией нейтронов справиться не легко, и она может быть опасна. Поэтому ему пришла в голову идея безнейтронного ядерного синтеза. Таким способом неявно (или явно) почти полностью решается обратная энергетическая задача. Ещё одним способом достижения энергии в МэВ, по мнению Ростокера, является использование ускорителей для увеличения энергии частиц, что приводит к ускорительному термоядерному синтезу [7]. Если нейтроны с энергиями порядка МэВ отсутствуют, то нужно работать с заряженными частицами и фотонами с энергией порядка МэВ, имеющими гораздо большее сечение взаимодействия с заряженными частицами вещества при обработке и меньшую радиотоксичность, за счёт которой индуцируются долгоживущие радиоактивные элементы. Однако такой безнейтронный подход ставит задачу научиться управлять заряженными частицами и фотонами с энергиями порядка МэВ. Поэтому крайне важно обратиться к новой концепции первой стенки реактора, призванной разрешить проблемы физики и химии МэВ-частиц. Тогда мы бы наконец пришли к согласию с идеалом Нормана или осуществили его. Что касается второго пункта, а именно

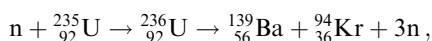
идей Векслера, то он также был одним из первых, кто начал поиск более компактных коллективных ускорителей с использованием плазмы. В настоящей статье мы развиваем наши концепции, используя стимулируемый ускорителем безнейтронный ядерный синтез Ростокера [8–10] (и производство нейтронов на основе термоядерного реактора [11]), а также коллективные плазменные ускорители, обеспечивающие ускоряемым термоядерным нейтронам возможность эффективно сжигать радиоактивные ядерные отходы. Некоторые детали мы покажем в данной статье. Нам не нужно слишком углубляться в эту тему, так как ей посвящена работа [7]. Методы производства нейтронов, способствующие трансмутации, обсуждаются более подробно, и в данной статье мы остановимся на конкретном методе.

### 3. Схема трансмутации отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и метод генерации нейтронов

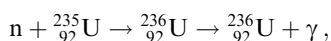
Рассмотрим здесь пример демонстрации обратной стороны ядерной энергетики, а именно, трансмутацию отработавшего ядерного топлива с последующим сжиганием вредных и радиоактивных трансуранов, и предлагаемый нами подход к этой задаче.

#### 3.1. Ядерная лестница трансурановых элементов

Антропогенное воздействие приводит к образованию не только парниковых газов, но и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), которое является побочным продуктом ядерных электростанций, основанных на принципе деления. ОЯТ образуется в результате двух процессов: 1) деления расщепляемых изотопов (например  $^{235}\text{U}$ ); 2) радиационного захвата нейтронов с образованием более тяжёлого ядра. Процесс деления может быть проиллюстрирован следующей реакцией:



где  $^{139}_{56}\text{Ba}$  и  $^{94}_{36}\text{Kr}$  являются продуктами деления. Радиационный захват нейтрона можно проиллюстрировать на следующем примере:



где более тяжёлый изотоп урана остаётся в качестве побочного продукта в процессе генерации гамма-кванта высокой энергии. Для теплового нейтрона с энергией 0,025 эВ коэффициент ветвления составляет 85 % для деления против 15 % для радиационного захвата. Цепочка истощения актиноидов очень сложна, как показано на рис. 1. Начиная с расположенного в нижнем левом углу  $^{235}\text{U}$  может происходить либо деление, указанное стрелкой вверх, либо радиационный захват, как показано стрелкой направо. Для каждого следующего ядра существует конкуренция между делением, радиационным захватом и распадом, а также процессами с более низкой вероятностью ( $n, \alpha n$ ), причём сечение каждого процесса зависит от энергии. Процесс распада характеризуется периодом полураспада, например,  $^{239}\text{Np}$  имеет период полураспада 2,4 дня, а  $^{241}\text{Am}$  — 432 г.

В результате эксплуатации атомных электростанций (АЭС) накоплено большое количество ОЯТ, содержащего продукты деления и актиноиды. Суммарно в мире на-

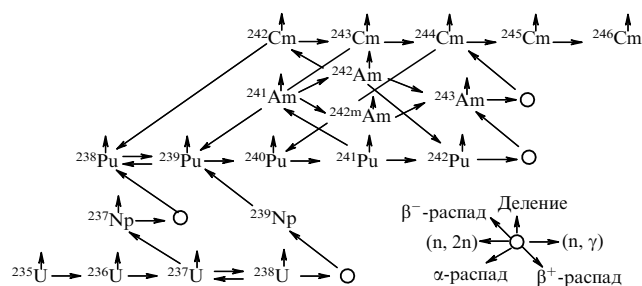


Рис. 1. Цепочка истощения актиноидов при нейтронном взаимодействии через два основных процесса: поглощения нейтронов и деления. Формируются ядерные лестницы, которые поднимаются вверх с нейтронными взаимодействиями, и все продукты трансмутируют и преобразуются.

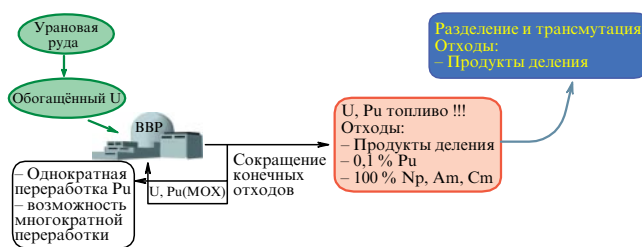
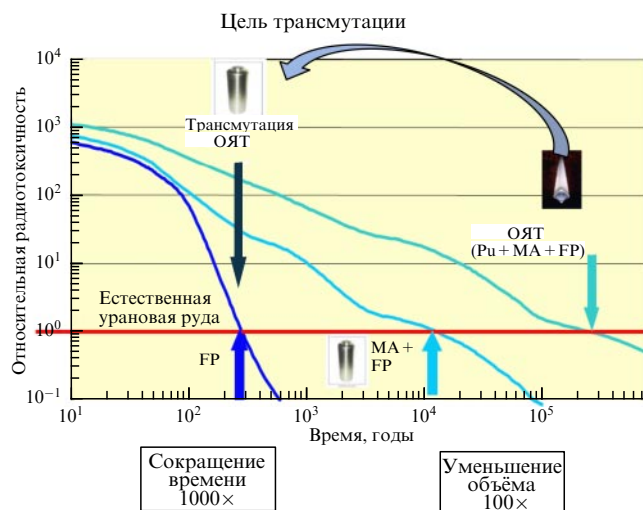


Рис. 2. Реакторы ядерного деления и типичные топливные циклы. Процесс разделения и трансмутации. ВВР — водо-водяной реактор, MOX — топливо, содержащее смесь оксидов. (Примеч. перев.)

считывается более 400000 метрических тонн ОЯТ, и ведутся активные исследования по борьбе с этим явлением. Совокупность процессов, происходящих с топливом для АЭС, от добычи, переработки и обогащения до непосредственного использования на АЭС, дальнейшей переработки и хранения называется топливным циклом. Существуют два топливных цикла, определяемых конечной переработкой и хранением: открытый топливный цикл и замкнутый топливный цикл. Открытый топливный цикл или так называемый прямоточный процесс не является циклом как таковым. Топливо используется только один раз, после отработки охлаждается в бассейне выдержки ОЯТ в течение 10–20 лет, после чего упаковывается и отправляется в хранилище. Замкнутый топливный цикл проиллюстрирован на рис. 2.

Соображения в пользу разделения и трансмутации ОЯТ иллюстрирует рис. 3. Степень опасности компонентов ОЯТ определяется их токсичностью и в особенности радиотоксичностью, которая обусловлена их радиоактивной природой, а не химической формой. За эталон принимается радиотоксичность сырья, необходимого для производства 1 тонны обогащённого урана, включая не только изотопы урана, но также все их радиоактивные дочерние продукты. Радиотоксичность продуктов деления доминирует над общей радиотоксичностью в течение первых 100 лет. В долгосрочной перспективе в радиотоксичности преобладают только актиноиды, в основном изотопы плутония и америция.

Эталонный уровень радиотоксичности ОЯТ достигается по прошествии более 100000 лет. Если говорить более подробно, то радиотоксичность продуктов деления доминирует в первые 100 лет после выделения и снижается до естественного стандартного уровня примерно через 300 лет. Однако в долгосрочной перспективе в ра-



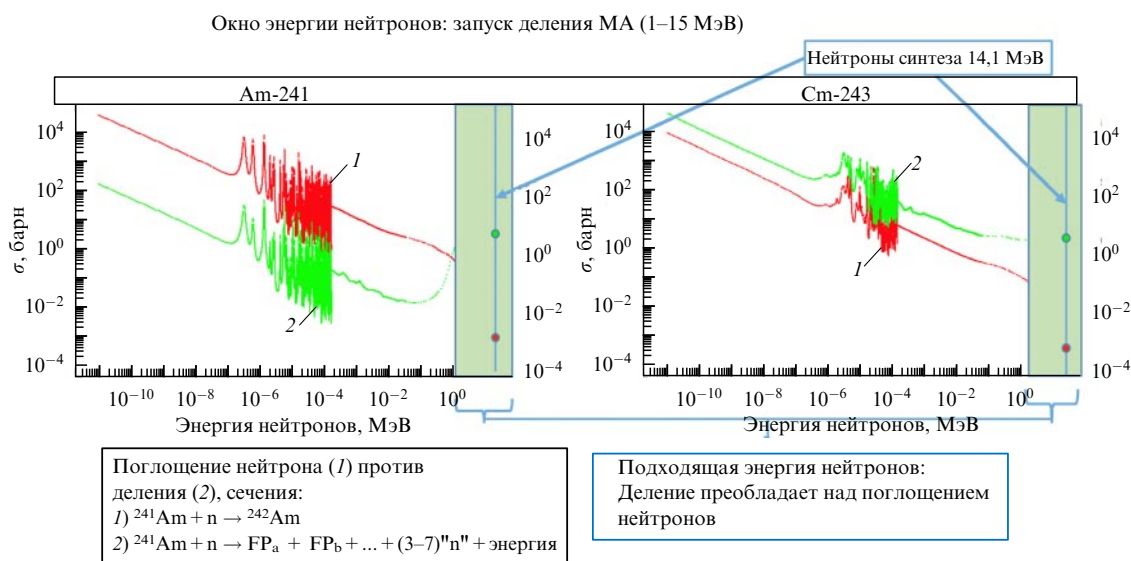
**Рис. 3.** (В цвете онлайн.) Радиотоксичность различных компонентов отработавшего ядерного топлива, извлечённого из ядерных реакторов деления. Снижение радиотоксичности на два-три порядка. FP — продукты распада, МА — минорные актиниды.

диотоксичности в основном преобладают трансураниевые соединения, особенно изотопы плутония и продукты распада Pu-241. Примерно через 100 – 1000 лет после отработки топлива в радиотоксичности преобладает Am-241, радиоактивный дочерний элемент Pu-241, с уровнем радиоактивности примерно  $3 \times 10^7$  Зв т<sup>-1</sup> У, что примерно в 300 раз превышает естественный эталонный уровень. По прошествии от 1000 до 10000 лет в радиотоксичности преобладает Pu-240 со значением радиоактивности около  $4 \times 10^6$  Зв т<sup>-1</sup> У. После этого основным источником радиотоксичности является Pu-239 с радиоактивностью  $2 \times 10^6$  Зв т<sup>-1</sup> У. По прошествии 100000 лет общая радиотоксичность снижается до уровня  $10^5$  Зв т<sup>-1</sup> У. Затем основными источниками радиотоксичности становятся продукты распада Am-241.

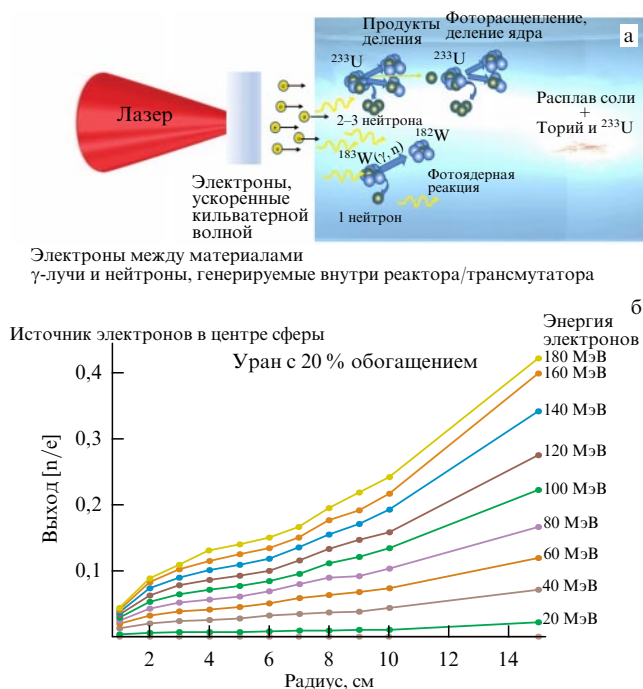
Цель стратегии использования разделения и трансмутации — искусственно снизить долговременную радиотоксичность путём облучения трансуранов в нейтронном поле. Она достигается путём преобразования долгоживущих трансуранов в короткоживущие продукты деления, сокращая таким образом необходимые сроки хранения со 100000 до 100 лет. Кроме того, резко сокращается также объём хранилища из-за уменьшения общего объёма ОЯТ, а также из-за уменьшения количества выделяемого им тепла.

### 3.2. Эффективное производство нейтронов электронами лазерного кильватерного ускорителя

Все трансураниевые элементы, по определению, радиоактивны. Кроме того, как показано на рис. 4, в процессе деления они демонстрируют тенденцию к большей вероятности деления по сравнению с возможным поглощением нейтронов, если энергия нейтронов превышает 1 МэВ [12, 13]. Было предложено несколько подходов, включая трансмутацию, управляемую ускорителем [14–17] и трансмутацию, управляемую ядерным синтезом [11]. Одним из подходов может быть использование нейтронов расщепления, вызываемого пучками высоких энергий [14]. Другой подход заключается в использовании процесса термоядерного синтеза (такого как DT-синтез), который производит нейтроны с энергией в МэВ диапазоне [11]. Синтез может быть запущен пучком частиц с высокой энергией. В этом случае энергии частиц пучка могут быть порядка 100 кэВ, в то время как энергия нейтронов от DT-синтеза имеет порядок 10 МэВ. Есть смысл управлять процессами трансмутации трансураниевых элементов именно нейтронами от термоядерного синтеза, поскольку они изначально находятся в МэВ диапазоне энергий. Из-за такой зависимости трансмутации от энергии нейтронов подход, заключающийся в увеличении последней до МэВ диапазона, представляется логичным. Ионы дейтерия можно ускорить с помощью небольшого компактного коллективного ускорителя. Покажем типичный для такого подхода случай [13], когда используется когерентное ускорение ионов лазе-



**Рис. 4.** (В цвете онлайн.) Для трансурановых элементов сечение деления обычно становится больше сечения поглощения нейтронов при энергии нейтронов больше МэВ. Преимущество нейтронов с энергией порядка МэВ для трансмутации [13].



**Рис. 5.** (В цвете онлайн.) Трансмутация при посредстве гамма-кванта. (а) Предложенная нами схема. Электроны ускоряются полем лазерной кильватерной волны высокой плотности при прохождении мишени, удалённой от жидкого солевого расплава. При попадании в расплав и взаимодействии с тяжёлыми атомами эти электронные пучки порождают гамма-кванты, способные тут же на месте продуцировать нейтроны, которые, в свою очередь, служат для трансмутации трансурановых ядер. (б) Типичная зависимость отношения числа образованных при фотоядерных процессах нейтронов к числу инициирующих электронов от радиуса сферической урановой мишени при различных энергиях электронов.

ром (Coherent Acceleration of Ions by Laser, CAIL) [13, 18]. Соответствующие импульсные лазеры, пригодные для управления таким процессом, были недавно разработаны в различных лазерных лабораториях, таких как Инфраструктура экстремального света (Extreme Light Infrastructure, ELI) [19, 20].

Здесь предлагается новый подход, предполагающий использование коллективного ускорения электронов с помощью лазера, а именно, использование электронных пучков, ускоренных лазерным кильватерным полем [21, 22], применительно к трансмутации. Большое количество экспериментов показало, что импульсный лазер может эффективно и компактно ускорять электроны [23–26]. Совсем недавно режим высокой плотности при ускорении лазерным кильватерным полем показал возможность высокоэффективного ускорения электронов до умеренных энергий, соответствующих возбуждению фотоядерных реакций [27]. Понятно, что при торможении в материалах с высоким атомным номером электроны с умеренными энергиями в сотни МэВ могут испускать гамма-кванты с энергией в десятки МэВ. Посредством эффективного процесса фоторасщепления эти гамма-кванты, в свою очередь, могут индуцировать нейтроны с энергией в несколько МэВ [28–30]. Эта концепция проиллюстрирована на рис. 5. Нейтроны, которые продуцируются лазерно-плазменным ускорителем в результате фотоядерного процесса, запускаемого гамма-излучением от торможения ускоренных электронов, должны

вызывать трансмутацию трансурановых соединений, растворённых в расплаве соли, для образования подкритической активной зоны. Последовательные процессы, описанные выше, могут выполняться одновременно. Такой одношаговый подход может реализоваться при непосредственном облучении расплава соли, содержащего растворённые трансурановые элементы, электронным пучком умеренной энергии в диапазоне  $\sim 200$  МэВ (в режиме умеренно высокой плотности), предварительно ускоренным лазерным кильватерным полем. Из-за очень высокого атомного номера трансурановых элементов и высокого содержания нейтронов, легко высвобождаемых гамма-квантами высокой энергии (10–30 МэВ) за счёт огромных сечений фоторасщепления ( $\gamma$ ,  $n$ ) в области гигантского дипольного резонанса, можно получить удобную рабочую область для ядерной трансмутации долгоживущих трансурановых компонентов ОЯТ.

Трансурановые ядра богаты нейтронами и радиотоксичны. Облучение трансурановых элементов нейтронами, управляющее трансмутацией, имеет два основных результата: деление ядра или захват нейтронов (см. рис. 4). Деление обычно происходит для нечётных изотопов актинидов, примером его является реакция  $^{241}\text{Am} + n \rightarrow ^{134}\text{Cs}(2\text{ г}) + ^{105}\text{Ru}(36\text{ ч}) + 2n + 200\text{ МэВ}$ , а примером захвата нейтронов — реакция  $^{241}\text{Am}(433\text{ г}) + n \rightarrow ^{242}\text{Am}(16\text{ ч})$ , где в скобках указан период полураспада. Мгновенное значение числа нейтронов внутри трансмутатора определяется потерями нейтронов (захват и уход) и продуцированием нейтронов (в основном при делении), что даёт три сценария работы трансмутатора: 1) сверхкритический: образование нейтронов превышает потерю нейтронов, 2) критический: образование нейтронов равняется потерям нейтронов (примером этого является стационарный режим работы легководного реактора), 3) субкритический: потеря нейтронов превышает образование нейтронов. В результате деления нейтроны получаются в двух разных временных масштабах: 1) мгновенные нейтроны возникают сразу после события деления; 2) запаздывающие нейтроны появляются с задержкой после произошедшего деления, составляющей от миллисекунд до минут. Именно наличие запаздывающих нейтронов обеспечивает управляемость работы легководного реактора в критическом режиме, так как их задержанное появление позволяет успевать механически удерживать поток нейтронов в стационарном состоянии и управлять им. Однако доля запаздывающих нейтронов зависит от изотопа топлива; деление  $^{235}\text{U}$  или  $^{239}\text{Pu}$  даёт 0,7 % и 0,2 % запаздывающих нейтронов соответственно, при этом у минорных актинидов запаздывающие нейтроны составляют  $< 0,1$  %. Следовательно, критический реактор, использующий минорные актиниды в качестве топлива, страдает от недостатка запаздывающих нейтронов, что затрудняет поддержание стабильности. Как следствие, для сжигания больших количеств минорных актинидов желательно использовать субкритический режим, а для компенсации потерь вводить нейтроны извне. Деление — это прямое сжигание трансурановых элементов. Однако захват нейтронов может сократить период полураспада долгоживущего актинида за счёт создания изотопа с более коротким периодом полураспада. Отметим, что данный метод позволяет в конечном итоге сжигать все трансурановые элементы, потому что чем выше атомный номер, тем выше вероят-

ность спонтанного деления. Мы назвали это восхождением по трансурановой лестнице [31].

Как уже указывалось при обсуждении рис. 4, деление преобладает ( $\sigma_{\text{деление}} \gg \sigma_{\text{захват}}$ ) при высоких энергиях нейтронов ( $> 1$  МэВ). В трансмутаторе первое поколение нейтронов (от лазерного источника) не замедляется до энергий порядка 1 МэВ; по той же причине невозможно трансмутировать актиниды в тепловом реакторе, где энергия нейтронов является тепловой или надтепловой. Чтобы облегчить перенос незамедленных нейтронов, берётся расплав соли — среда с долгой историей исследований [32, 33]. Расплав соли помогает работе трансмутатора в нескольких аспектах, включая безопасность, распределённый характер и изменчивость параметров (например, возможность обратной связи и т.д.). В сочетании с уменьшением энергии пучка для индуцирования нейтронов это даёт большую гибкость в использовании настоящей концепции. Источники нейтронов компактны и могут быть распределены по активной зоне трансмутатора, представленной расплавом соли, а не сосредоточены в одном источнике. Мы упоминали, что каждый источник нейтронов приводится в действие высокоэффективной распределённой волоконной лазерной системой "Сеть когерентного усиления" (Coherent Amplification Network, CAN) [34], состоящей из пучка волокон, благодаря чему каждый источник электронов делается миниатюрным, а каждое поколение нейтронов рождается в нужной точке расплава соли, как обсуждалось выше. Мониторинг в реальном времени обеспечивает гибкую и оптимизированную работу. Вместо того чтобы отправлять солевой расплав трансмутатора (с растворёнными трансурановыми элементами и продуктами деления) в теплообменник, в активную зону по трубопроводу подаётся охлаждающая жидкость или подходящий расплав соли.

### 3.3. Трансмутатор на солевом расплаве с обратной связью

В нашем преобразователе используется жидкое топливо, состоящее из трансуранов, растворённых в подходящем расплаве соли (например, смесь фторида лития (LiF) и фторида бериллия (BeF<sub>2</sub>) — FLiBe). Метод генерации нейтронов *in situ* в расплавленной соли с растворёнными трансуранами представляет собой элегантный и простой подход к получению генерируемых электронами гамма-фотонов, которые, в свою очередь, генерируют нейтроны, являющиеся инструментом для трансмутации. Кроме простоты и цельности процесса генерации нейтронов, это позволяет использовать пассивный и активный мониторинг в реальном времени [31] с помощью спектроскопии и последующего управления заправкой и переработкой трансуранов с обратной связью, в сочетании с мониторингом распределённых источников нейтронов (рис. 6). Активная спектроскопия может быть обеспечена за счёт прохождения лазерного импульса и его взаимодействия с жидкостью и её составляющими, что даёт ценную спектроскопическую информацию. Мы пытаемся выйти за рамки существующей технологии с твердотопливными стержнями, физическое и химическое состояние которых трудно контролировать во время эксплуатации. Пассивная спектроскопия основана на регистрации гамма-квантов, испускаемых при распаде радиоизотопов. Спектроскопия и мониторинг возможны в режиме реального времени *in situ* или в режиме

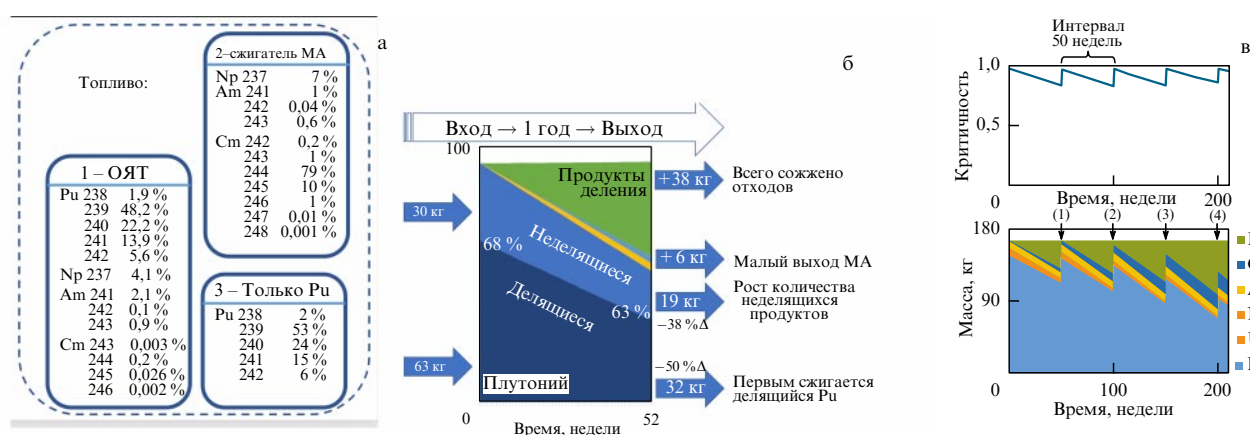


Рис. 6. (В цвете онлайн.) Возможность управления с обратной связью при использовании жидкого расплава соли. Для обратной связи важно, что иерархия времён в трансмутаторе с жидким расплавом соли не содержит несравнимых масштабов, как в твердотельном случае (ядерный тип взаимодействий против гидродинамических взаимодействий).

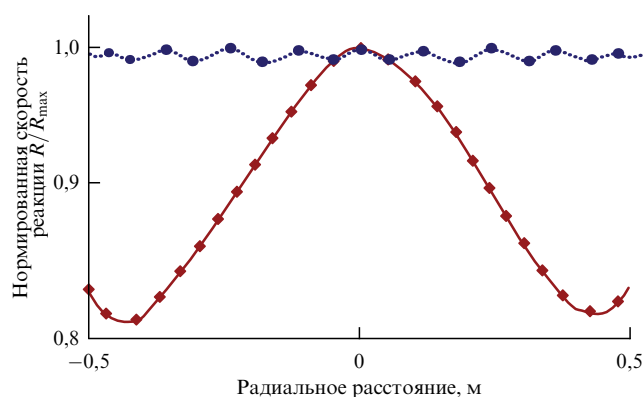
пакетной обработки при пассивной гамма-спектроскопии. Кроме того, для сбора данных об изотопном составе может применяться активная гамма-спектроскопия, основанная на ядерной резонансной флуоресценции (ЯРФ), которая, например, является хорошо известным методом обнаружения <sup>240</sup>Pu [35]. Пассивная гамма-спектроскопия использовалась для контроля содержания отработавшего ядерного топлива [36]. Между тем, индуцированная лазером флуоресценция может дать информацию об элементном составе путём возбуждения атомов. Индуцированная лазером флуоресценция применяется для анализа актинидов и лантанидов в ядерном топливном цикле [37]. Для этого можно использовать либо широкополосный, либо сканирующий лазер. Информация от гамма- и лазерного мониторинга, а также термпар, нейтронных детекторов и др. может передаваться искусственному интеллекту (ИИ) для регулировки концентрации топлива и солевого расплава, мощности лазера и др. и поддержания работы в реальном времени [31]. Спектроскопический мониторинг и обратная связь являются частью активной безопасности. Некоторые из расчётных нейтронных процессов трансмутации в рамках настоящей концепции показаны на рис. 7.

Пассивные элементы безопасности на основе расплава соли являются важным компонентом проектирования трансмутатора (как и ядерного реактора). Для иллюстрации покажем пример пассивной коррекции плотности с помощью нейтронного кода [31] (рис. 8). Систему пассивной безопасности образуют расплавленная активная зона трансмутатора вместе с замороженной пробкой на его дне. В случае нежелательного повышения температуры активной зоны замёрзшая пробка может расплавиться и выбросить содержимое трансмутатора в резервуар, содержащий поглотитель нейтронов, например, бор. Одновременно с этим содержимое активной зоны трансмутатора замораживается и заключается в оболочку, уменьшая распространение радиотоксичных материалов.

Ещё одна важная черта безопасности проекта трансмутатора с жидкой фазой — работа при атмосферном давлении. Расплавленная активная зона остаётся жидкой при высоких температурах до 1400 °C и при низком давлении (около 1 атм по сравнению с 10<sup>2</sup> атм в водяном реакторе высокого давления). Поэтому в случае ката-



**Рис. 7.** (В цвете онлайн.) Для демонстрации возможностей обратной связи в гидродинамических процессах был введён генетический алгоритм (ГА). Пример трансмутации трансуранов в расплавленных солях с помощью МэВ-нейтронов с обратной связью, управляемой искусственным интеллектом. (а) Примеры отработавшего топлива; (б) их нейтронное сжигание; (в) повторение химических и гидродинамических процессов, таких как инъекция топлива и удаление продуктов деления.



**Рис. 8.** К управляемости пассивной обратной связи за счёт трансмутации в жидкой фазе. Путём нейтронно-физических расчётов мы показываем, что генерируемая радиальная плотность может самокорректироваться, если она превышает среднюю, поскольку область с более высокой плотностью более реактивна и, следовательно, нагревается, что заставляет жидкую среду этого трансмутатора релаксировать к более однородной плотности. Относительная скорость реакции зависит от расстояния до центра цилиндрической активной зоны с отражающей стенкой. Использование одного источника нейтронов по сравнению с несколькими также способствует повышению пассивной безопасности в рамках этой концепции [31].

строфического расширения вероятность взрыва и разброса продуктов уменьшается.

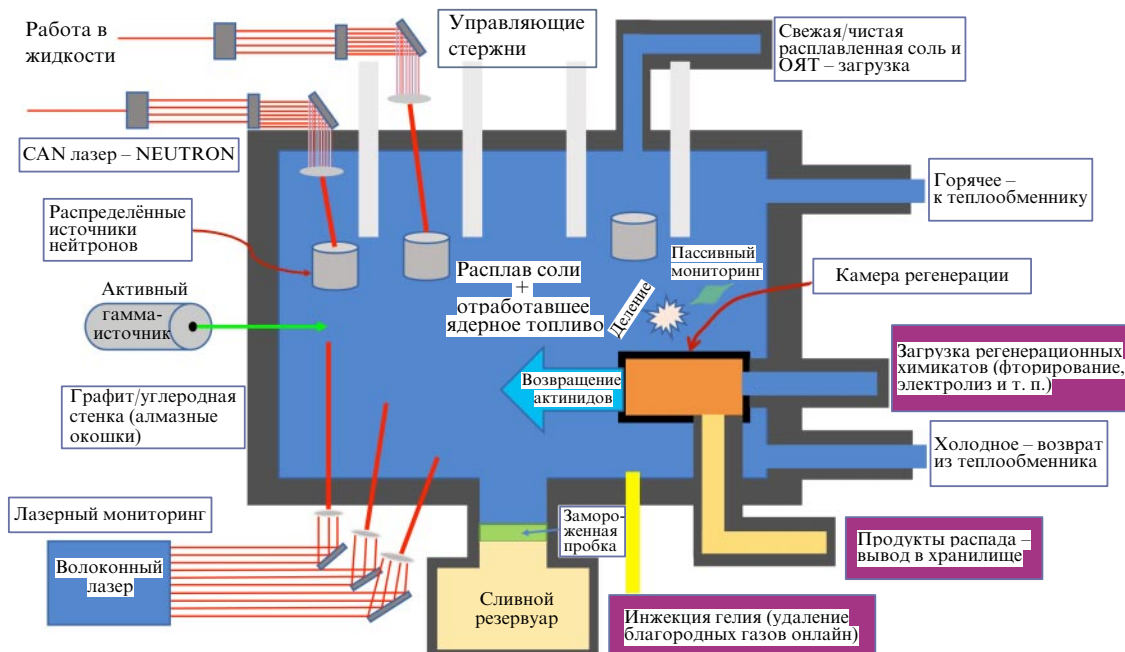
Ещё одна особенность жидкостного трансмутатора — удаление продуктов деления с одновременной дозаправки расплава соли и трансурановых элементов может осуществляться в виде смесей или по отдельности, тогда трансурановое топливо может вводиться в виде гранул (брикетов). Удаление продуктов деления зависит от их химического состава. Благородные газы (например, ксенон, криптон) и продукты деления благородных металлов могут быть удалены *in situ* с помощью метода инъекции гелия [38], основанного на законе парциальных давлений. Остающийся солевой расплав, состоящий из продуктов деления и актинидов, может быть направлен по трубопроводу на пирохимическую или водную переработку, выполняемую автономно. Затем, после удаления продуктов деле-

ния, актиниды и солевой расплав возвращаются по трубопроводу для дальнейшей трансмутации.

Для извлечения энергии из солевого расплава мы предлагаем прокачивать через активную зону трансмутатора охладитель (например,  $\text{CO}_2$  или не щелочную жидкость), вместо того чтобы откачивать смесь расплавленной соли, трансуранов и продуктов деления во внешний теплообменник. Это позволяет свести к минимуму присутствие расплавленной соли и ядерного топлива во внешней цепи (см. наши схемы на рис. 9).

Мы представили обоснование данного подхода и набор новых операций и технологий, которые его сопровождают. Отметим, что предпринимаются усилия по исследованиям и разработкам трансмутации на основе сжигания трансурановых элементов в реакторе-размножителе на быстрых нейтронах следующего поколения [39], в рамках проекта MOSART [40, 41] или в ускорительной системе, состоящей из протонного сверхпроводящего линейного ускорителя класса сотен МэВ (например, 600 МэВ, 2–4 мА), подключённого к реактору с подкритической активной зоной, который использует трансураны как топливо [14, 42]. Другие подходы используют гибридную технологию синтеза-деления [43]. Эти исследования должны расширить ценные знания в критических областях.

Из сказанного выше видно, что описанный трансмутатор служит средством удаления (или его конечного этапа) наиболее токсичной части радиоактивных ядерных отходов из типичного ядерного реактора с тысячекратным снижением их количества. Здесь используются три основных механизма: 1) электроны, ускоренные лазерным кильватерным полем (с энергией  $\sim 200$  МэВ), пропускаются через тонкий фильтр из материала с низким  $Z$  в соляной расплав; 2) в расплаве соли с растворёнными трансуранами с высоким  $Z$  эти электроны генерируют гамма-кванты (с энергией много десятков МэВ); 3) образовавшиеся гамма-кванты в том же расплаве соли посредством фотоядерных процессов производят нейтроны (с энергией порядка МэВ); 4) МэВ-нейтроны имеют достаточно большое сечение, чтобы вызвать трансмутацию трансурановых элементов. Комбинация этих четырёх процессов запускает трансмутацию (ранее иногда



**Рис. 9.** (В цвете онлайн.) Рабочая схема примера трансмутатора. Работа с жидкой фазой облегчает текущие операции различных уровней *in situ* при трансмутации. Как показано на рис. 7, переработка (регенерация) поступающего необработанного ОЯТ сочетается с выработыванием однократных трансмутированных материалов (в основном, продуктов деления). Согласно рис. 8, локальные колебания плотности топлив, например, могут быть скорректированы с использованием пассивной обратной связи солевого расплава. Кроме того, прозрачность жидкости обеспечивает определенный класс "видимости" при лазерных и других измерениях. Введены также системы трубок охлаждения и преобразователя энергии. Последняя система обсуждается в следующем разделе в связи с проблемой углеродно-отрицательной энергии.

использовался вызванный пучком ядерный синтез) [42]. Мы снова видим, что значительная часть зародышевых идей обязана своим возникновением объединённым усилиям исследователей-пионеров Востока и Запада (Векслер, 1956).

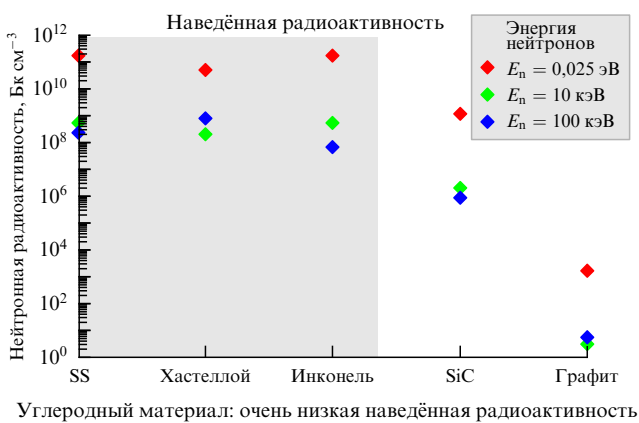
#### 4. Биоподобная углеродно-отрицательная стенка

Для процессов ядерной энергетики (синтез, деление или рассмотренная выше трансмутация) характерна высокая концентрация мощности и связанное с ней интенсивное излучение ("температура" или "энергия" порядка МэВ, а не эВ и менее, как в случае ископаемых источников или "зелёной" энергии). Осваивая высокий уровень энергии, который становится доступным в ядерных подходах (синтез или деление на уровне МэВ), и контролируя его, мы приобретаем уникальный инструмент для ввода в действие дополнительных возможностей, таких как пути конверсии концентрированной энергии. Следовательно, с одной стороны, необходима первая стенка, которая сможет выдерживать агрессивные физические и химические условия, несравнимые ни с какими другими, кроме ядерных. С другой стороны, можно воспользоваться преимуществом такого высокого уровня энергии в различных формах, включая конверсию в химическую энергию дополнительно к конверсии в тепловую и электрическую энергию. Известно несколько химических путей преобразования энергии из  $\text{CO}_2$  в химический потенциал, таких как процессы Габера и Сабатье при нагревании, а также более прямые фотоэлектрические процессы. Поскольку носителями исходной энергии порядка МэВ являются нейтроны, гамма-кванты высокой энергии, рентгеновские лучи, низкоэнергетические фото-

ны (оптические, инфракрасные, соответствующие электрическому напряжению), тепло и т.д., нам оказывается доступен гораздо больший выбор путей преобразования генерируемой энергии в химическую и электрическую, включая конверсию  $\text{CO}_2$ . Возможно, здесь следует учиться у деревьев, которые умеют превращать  $\text{CO}_2$  в топливо, и реализовать "искусственное дерево" в процессе утилизации ядерной энергии. Вспомним, что биология уже вдохновила нас на создание искусственного интеллекта, обучающегося по примеру человеческого мозга.

Чтобы справиться с высокой энергией (во много раз больше эВ), в ядерных реакторах (термоядерных или иных) необходимо использовать стратегию "разделяй и властвуй". То есть первая стенка, которая принимает на себя все излучения с наивысшей энергией, должна выживать благодаря комбинации двух факторов: 1) нужно использовать материалы, самые стойкие против агрессивных излучений (такие как углерод, физически, для различных условий; см. рис. 10 и таблицу); 2) нужно сделать толщину стенки настолько малой, чтобы почти все излучения могли проходить через вторичные стенки, а с другой стороны, действовать так, чтобы обрабатывать излучения, которые либо ослаблены при прохождении предыдущих стенок и материалов (в резервуарах и т.п.), либо пропускаются другими частями. Таким образом, каждая стенка "специализируется" на определённом излучении (или определённом диапазоне энергии) для достижения конкретной цели.

В рамках этого подхода рассмотрим первую стенку. Построим её из структур углерода нанометровой толщины. Выбор углерода является надёжным в силу свойств данного элемента (см. таблицу). С другой стороны, сделав стенку достаточно тонкой, мы добиваемся того, что-



**Рис. 10.** (В цвете онлайн.) Радиоактивация нейтронным облучением. Очень низкая наведённая радиоактивность у материалов на основе углерода по сравнению с обычными металлами при нейтронном облучении материалов стенок. Такие свойства приводят к выбору углеродной стратегии проектирования стеновых материалов.

бы большая часть излучения проходила через неё, при этом поглощается только самая низкоэнергетическая часть излучения, такая как инфракрасные или оптические фотоны. Каждая из последующих стенок также может пропускать определённую часть энергии излучения, а поглощение энергии может создать температуру или длину волны излучения, достаточную для взаимодействия, в результате чего можно преобразовать конкретное поглощённое излучение в химическую энергию конверсии CO<sub>2</sub> (воды и т.п.). Если поместить такую схему в резервуар, где имеется достаточное количество энергии (или тепла), можно преобразовать энергию определённого типа излучений в химическую энергию посредством диссоциации CO<sub>2</sub>. Иными словами, на пути прохождения излучения от центра реактора (начиная с МэВ) наружу (к комнатной температуре) имеет место комбинация радиационных условий, некоторые из которых могут действовать параллельно.

**Таблица.** Сравнение физико-химических свойств материалов в агрессивной радиационной среде реакторов. Мы сравниваем первые три металлических варианта с последними тремя на основе углерода

| Материал              | Нейтронное повреждение<br>(дра год <sup>-1</sup> )                                      | Наведённая нейтронами<br>радиоактивность (Бк см <sup>-3</sup> )                                   | Коррозия                                        | Физические свойства                                              |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Нержавеющая сталь 304 | 1                                                                                       | $2,0124 \times 10^{11}$                                                                           | 53 мкм год <sup>-1</sup>                        | Твёрдость = 140 кг мм <sup>-2</sup><br>Точка плавления = 1400 °C |
| Inconel 601           | 0,9                                                                                     | $5,2081 \times 10^{10}$                                                                           | > 34 мкм год <sup>-1</sup>                      | 77 кг мм <sup>-2</sup><br>1400 °C                                |
| Hastelloy N           | 1,2                                                                                     | $1,6824 \times 10^{11}$                                                                           | 8 мкм год <sup>-1</sup><br>Коррозия поражает Cr | 50 кг мм <sup>-2</sup><br>1320 °C                                |
| Углеродные композиты  | 0,12<br>Поддержание структурной целостности до 32 лет                                   | $1,1959 \times 10^9$                                                                              | Предельно низкая —<br>нм год <sup>-1</sup>      | 2600 кг мм <sup>-2</sup><br>2700 °C                              |
| Графит                | 0,0013                                                                                  | $1,6358 \times 10^3$                                                                              | Не подвержен действию соли<br>2,5 года работы   | Низкая, < 40 кг мм <sup>-2</sup><br>3600 °C                      |
| Алмаз                 | Очень низкое<br>(для детекторов).<br>Для стенок данных нет,<br>но должно быть ещё лучше | Только быстрые<br>нейтроны, в реакции<br>$n + {}^{12}\text{C} \rightarrow \alpha + {}^9\text{Be}$ | Химически<br>предельно инертен                  | См. алмазный слайд                                               |

дра = displacement per atom — смещение на один атом. (Примеч. перев.)  
Алмаз: химическая стабильность, низкая наведённая нейтронами радиоактивность, устойчивость к повреждению нейтронами.  
Графит: много хороших свойств.

Обсудим, в частности, случай первой стенки термоядерного реактора как некоторую симуляцию "искусственного дерева". Показанное на рис. 11 высокое дерево секвойи может закачивать воду (и другие питательные вещества) по стволу на высоту многих десятков метров. Это происходит потому, что нановолокна и нанотрубки жилок деревьев поддерживают капиллярные эффекты поверхностного натяжения, которое втягивает воду. Вдохновившись примером дерева, идём дальше. Как указано на рис. 10 и в таблице, материалы на основе углерода во многих аспектах намного более стойки к физическим и химическим повреждениям в агрессивных условиях ядерных реакторов [45, 46]. Волокна нашего "искусственного дерева" могут состоять из углеродных нанотрубок (УНТ) [47–52]. Углерод мало восприимчив к ядерным процессам трансмутации, которые наиболее сильны у первой стенки термоядерных реакторов или трансмутаторов (рис. 10). УНТ обладают более высокой теплопроводностью и электропроводностью по сравнению с лучшими металлами. Прочность УНТ на разрыв также выше, чем у металлов, хотя они легко гнутся. Стенка трубки может иметь толщину порядка ангстрем (монослой углерода со структурой бензола, т.е. слой графена) [48, 49, 53–57]. Используя сочетание исключительной прочности на разрыв с гибкостью УНТ (или графена), можно повысить общую прочность конструкции, если комбинировать эти материалы с более жёсткими каркасными элементами. Коррозию первой стенки от солевого расплава можно уменьшить, используя графеновое покрытие. Большая площадь поверхности и высокая скорость осаждения достигаются при использовании графена, диспергированного в воде [58]. Технологию таких функционализированных графеновых слоёв, предназначенных для защиты от коррозии, осваивает, например, компания Carbon Waters в Бордо [59].

Сказанное выше позволяет максимально использовать излучение, проникающее через волокна УНТ первой стенки, решая при этом ещё одну важную задачу — выпуск "лишней энергии" через первую стенку. Из-за тон-



**Рис. 11.** (В цвете онлайн.) Дерево секвойя — биологический объект, вдохновляющий на создание структуры "искусственного дерева". Из углеродных материалов с низкой наведённой радиоактивностью (рис. 10), благодаря их химическим и физическим свойствам, можно изготавливать наноструктуры, такие как углеродные нанотрубки, углеродные волокна и т.д. Мы используем нанотрубки и нановолокна, например, для охлаждения первой стенки, конверсии  $\text{CO}_2$  и т.д. Наноматериалы, инспирированные концепцией "искусственного дерева", обладают такими свойствами, как тонкость слоя, позволяющая пропускать большую часть жёсткого излучения с задержкой только низкоэнергетических фотонов, способность к перекачке и циркуляции жидкости (воды) без внешних насосов и др.

кости слоя УНТ и крошечного диаметра трубки отношение поверхности к объёму у системы пучков УНТ первой стенки очень велико [60–63]. Это позволяет пропускать излучение большей энергии и уменьшить количество задержанного излучения, чему способствует также пористость некоторых углеродных материалов. Таким образом подкрепляется выполнение одного из наших требований к первой стенке — поглощать наименьшее количество энергии и максимально рассеивать поглощённую энергию (и тепло), чтобы стенка не расплавилась. Как говорилось выше, у стенки есть собственная система охлаждения без внешней системы прокачки, роль которой играют капиллярные силы [64, 65]. Благодаря тонкости стенок низкоэнергетические фотоны могут проникать

внутри углеродных нанотрубок, где может осуществляться прямая фотоэлектрическая конверсия  $\text{CO}_2$  в другое химическое соединение или химическая конверсия  $\text{CO}_2$  при нагреве [66–68]. Таким образом, первая стенка не только выполняет своё непосредственное назначение — удерживать вакуум, но и функционирует как "искусственное дерево", которое может рассеивать ядерную энергию и частично преобразовывать её в химические потенциалы (в дополнение к тепловой и электрической энергии). В отличие от настоящих древесных волокон, волокна из УНТ обладают исключительной теплопроводностью (и электропроводностью), поэтому локализация тепла может быть ещё уменьшена [69, 70].

Энергетические реакторы, основанные на ядерном синтезе [7] и делении [71], а также, как обсуждалось в разделе 2, трансмутаторы [13], должны иметь ряд стенок, заключающих в себе центральную камеру (или несколько камер), где производится высокая энергия и излучение. Отчасти эти стенки могут действовать как система охлаждения реактора. Традиционно для охлаждения стенок используются трубки с охлаждающей жидкостью, циркулирующей благодаря действию насосной системы. Такая система отбирает тепло и транспортирует его за пределы центральной части. При неисправности насосной системы (например, из-за отсутствия электричества) отвод тепла прекращается. При использовании капилляров реализуется улучшенная конструкция стенки с отводом тепла без необходимости во внешнем источнике питания.

## 5. Принимаем вызов и делаем выводы

Мы положили начало рассмотрению различных инновационных идей, их реализации и возникающих проблем, связанных с обратной стороной производства энергии. Сосредоточив усилия на сокращении выбросов углерода и новых путях его реализации, мы сможем широко применить описанный метод, чтобы увидеть его последствия. В качестве ещё сырого, но, по нашему мнению, интересного варианта можно применить нашу концепцию "искусственного дерева" к будущим реакторам, а возможно, и к существующим ядерным реакторам или даже реакторам на ископаемом топливе. Часть вырабатываемой ими энергии можно было бы использовать для конверсии  $\text{CO}_2$  в топливо, чтобы сделать энергетический цикл углеродно-отрицательным. Ниже мы сделаем соответствующую предварительную оценку.

Рассмотрим, как "искусственное дерево" в типичном реакторе на основе ядерного синтеза (в будущем) или деления (в настоящем) можно использовать для конверсии  $\text{CO}_2$  за счёт тепла и фотонов, создаваемых в этих реакторах. Пусть один блок такого реактора производит электроэнергию с мощностью 100 МВт. Предположим, что мы отбираем 10 % его энергии, которая в противном случае добавилась бы к произведённой электроэнергии (или просто оставалась бы в тепловом резервуаре реактора), т.е. реактор мощностью 100 МВт мог бы выделять 10 % своей тепловой или фотонной энергии на конверсию  $\text{CO}_2$  с помощью "искусственного дерева". В сутки это даёт  $10^{12}$  Дж, что соответствует конверсии  $10^3$  тонн  $\text{CO}_2$ . Такое количество является лишь грубой предположительной оценкой, однако интересно, что Илон Маск учредил приз X-Prize за подходы к решению углеродной проблемы, приняв в качестве начальной масштабируемой модели 1 тонну удаления углерода в сутки (Musk 2021).

Восток и Запад встретились вновь (после встречи 1955 г.), на этот раз в поисках совместных действий по выходу из глобального климатического кризиса и решению других экологических проблем Земли, тесно связанных с глобальными проблемами энергетики. Один из извлечённых нами уроков заключается в том, что наша цивилизация должна быть не только заинтересована в производстве энергии, но и обращать внимание на обратную сторону этой задачи. Среди обсуждений и выводов этого форума мы рады выделить использование лазерного ускорителя кильватерного поля для создания компактного и эффективного источника нейтронов с целью сжигания трансурановых радиоактивных ядерных отходов. В заключение форума, последнего выступления на нём (и последней обзорной статьи, отражающей все обсуждённые на форуме вопросы), а также в конце данной работы отметим, что мы были одновременно вдохновлены и глубоко обеспокоены результатами последних климатических наблюдений. Благодаря приложенным усилиям по отслеживанию климатических изменений можно сделать вывод, что они наиболее вероятно вызваны чрезмерным присутствием  $\text{CO}_2$ . Руководствуясь этими научными данными, некоторые из выступавших предложили способы для решения возникшей проблемы. Мы очень довольны этими результатами, и данная обзорная статья является одним из них. Мы также несколько обобщили проблему сокращения выбросов  $\text{CO}_2$ , заменив её на более глобальную обратную ("туалетную") задачу энергетики. Теперь она включает также образование и переработку отходов отработавшего ядерного топлива при использовании ядерной энергии деления. Часть тепла (или запасённой энергии) в существующих (или будущих) устройствах энергетики можно было бы потратить на достижение углеродной отрицательности энергетики через конверсию  $\text{CO}_2$  в топливо, пользуясь "искусственным деревом". Вероятно, нам будут полезны все эти усилия, поскольку мы все ещё стоим на самом пороге решения обратной энергетической проблемы.

**Благодарности.** Идея данной статьи возникла во время службы одного из авторов (ТТ) в Инспекционной комиссии Верховного комиссара Франции по атомной и альтернативным видам энергии (СЕА) профессора Ива Бреше. Одно из собраний Инспекционной комиссии имело целью изучить обратную сторону ядерной энергетики. После посещения ряда крупных лабораторий СЕА ТТ получил возможность лично увидеться и пообщаться с проф. Бреше. Обсуждался вопрос, как можно очистить ядерные отходы, и ТТ спросил: "Нужно ли проводить разделение трансурановых изотопов радиоактивного отработавшего ядерного топлива?" Ответ Бреше был неожиданным для ТТ и весьма инновационным: "Нет, Тоши, поскольку все трансураны радиоактивны и в конечном итоге распадаются, в разделение изотопов нет необходимости". С тех пор наши идеи и исследования шли семимильными шагами. Здесь мы благодарим доктора Бреше за его проницательность и подсказку. Кроме того, мы благодарим профессора Жерара Муру: именно он предложил ТТ работу в Инспекционной комиссии СЕА, а также организовал эпохальную встречу с доктором Бреше после того, как закончилось упомянутое собрание Инспекционной комиссии.

Помимо этого, мы благодарим следующих экспертов и коллег за советы, сотрудничество и поддержку: А. Ser-

geev, M. Leroy, G. Szabo, L. Palkovics, K. Osvay, A. Weeks, J. Wheeler, P. Taborek, M. Binderbauer, M. Meekins, A.J. Shaka, G. Miller, K. Mackay, E. Rignot, S. David, F. Carre, A. Krasznahorkay, J. Tanner, S. Nicks, J. Biot, S. Iijima, K. Novoselov, A. Chesneau, G. Kulcinski, M. Navarro. Мы также чрезвычайно благодарны всем участникам Форума за вдохновение и новые идеи.

Перевод с английского: А.Б. Соколова

Научный консультант и редактор перевода: В.Л. Дербов

## Список литературы

1. "Geneva Summit (1955)", Wikipedia. Accessed March 5, 2021, [https://en.wikipedia.org/wiki/Geneva\\_Summit\\_\(1955\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Geneva_Summit_(1955))
2. Veksler V I "Coherent principle of acceleration of charged particles", in *Proc. of the CERN Symp. Accelerators and Pion Physics* Vol. 1 (Geneva: CERN, 1956) p. 80, <http://dx.doi.org/10.5170/CERN-1956-025.80>
3. Semiletoy I, in *Forum "USPEKHI-2021": Climate Change and Global Energy Problems*; <https://youtu.be/pdkPTU6Lt-Y>
4. Риньо Э *УФН* **192** 1203 (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.11.039106>; Rignot E *Phys. Usp.* **65** (11) (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.11.039106>
5. Дробински Ф, Танте А *УФН* **192** 1191 (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.07.039080>; Drobinski P, Tantet A *Phys. Usp.* **65** (11) (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.07.039080>
6. Steinbach J, Holmstrand H, Shcherbakova K, Kosmach D, Brüchert V, Shakhova N, Salyuk A, Sapart C J, Chernykh D, Semiletoy I, Gustafsson Ö "Source apportionment of methane escaping the subsea permafrost system in the outer Eurasian Arctic Shelf" *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **118** e2019672118 (2021)
7. Binderbauer, in *Forum "USPEKHI-2021": Climate Change and Global Energy Problems*; <https://youtu.be/pdkPTU6Lt-Y>
8. Rostoker N, Maglich B C "Self-colliding systems for aneutronic fusion" *Comments Plasma Phys. Controlled Fusion* **15** (2) 105–120 (1992)
9. Binderbauer M W, Tajima T, Steinhauer L C, Garate E, Tuszewski M, Schmitz L, Guo H Y et al. "high performance field-reversed configuration" *Phys. Plasmas* **22** 056110 (2015)
10. Tajima T, Binderbauer M "Preface: Norman Rostoker Memorial Symposium" *AIP Conf. Proc.* **1721** 010001 (2016)
11. Parish T A, Davidson J W "Reduction in the Toxicity of Fission Product Wastes through Transmutation with Deuterium-Tritium Fusion Neutrons" *Nucl. Technol.* **47** (2) 324–342 (1980)
12. Gales S "Nuclear Energy and Waste Transmutation with High Power Accelerator and Laser Systems" (2018), [https://indico.cern.ch/event/617648/contributions/2517094/attachments/1442136/2220662/18\\_GALES\\_IJEST-Talk-Nuclear-Transmutation-040417.pdf](https://indico.cern.ch/event/617648/contributions/2517094/attachments/1442136/2220662/18_GALES_IJEST-Talk-Nuclear-Transmutation-040417.pdf)
13. Tajima T, Necas A, Mourou G, Gales S, Leroy M "Spent Nuclear Fuel Incineration by Fusion-Driven Liquid Transmutator Operated in Real Time by Laser" *Fusion Sci. Technol.* **77** 251–265 (2021)
14. Rubbia C, Rubio J A, Buono S, Carminati F, Fiétier N, Gálvez J, Gelès C et al. "Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier", CERN-AT-95-44-ET (Geneva: CERN, 1995) pp. 187–312; Rubbia C, Roche C, Rubio J A, Carminati F, Kadi Y, Mandrillon P, Revol J P C et al. "Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier" (1995)
15. Abderrahim H A, Kupschus P, Malambu E, Benoit Ph, Van Tichelen K, Arien B, Vermeersch F et al. "MYRRHA: A Multipurpose Accelerator Driven System for Research and Development" *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **463** (3) 487–494 (2001)
16. Nifenecker H, Meplan O, David S *Accelerator Driven Subcritical Reactors* (Boca Raton, FL: CRC Press, 2003)

17. Doligez X, Heuer D, Merle-Lucotte E, Allibert M, Ghetta V "Coupled study of the Molten Salt Fast Reactor core physics and its associated reprocessing unit" *Ann. Nucl. Energy* **64** 430–440 (2014)
18. Yan X Q, Tajima T, Hegelich M, Yin L, Habs D "Theory of laser ion acceleration from a foil target of nanometer thickness" *Appl. Phys. B* **98** (4) 711–721 (2010)
19. Weeks A, in *Forum "USPEKHI-2021": Climate Change and Global Energy Problems*; <https://youtu.be/pdkPTU6Lt-Y>
20. Ли Н У Ф Н **192** 1231 (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.08.039082>; Li N *Phys. Usp.* **65** (11) (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.08.039082>
21. Tajima T, Dawson J M "Laser Electron Accelerator" *Phys. Rev. Lett.* **43** 267 (1979)
22. Tajima T, Yan X Q, Ebisuzaki T "Wakefield acceleration" *Rev. Mod. Plasma Phys.* **4** 7 (2020)
23. Nakajima K, Kawakubo T, Nakanishi H, Ogata A, Kato Y, Kitagawa Y, Kodama R et al. "A proof-of-principle experiment of laser wakefield acceleration" *Phys. Scr.* **1994** (T52) 61 (1994)
24. Wang X, Zgadzaj R, Fazel N, Li Z, Yi S A, Zhang X, Watson H et al. "Quasi-monoenergetic laser-plasma acceleration of electrons to 2 GeV" *Nat. Commun.* **4** 1988 (2013)
25. Leemans W, Gonsalves A J, Mao H-S, Nakamura K, Benedetti C, Schroeder C B, Cs Tóth P et al. "Multi-GeV Electron Beams from Capillary-Discharge-Guided Subpetawatt Laser Pulses in the Self-Trapping Regime" *Phys. Rev. Lett.* **113** 245002 (2014)
26. Downer M C, Zgadzaj R, Debus A, Schramm U, Kaluza M C "Diagnostics for plasma-based electron accelerators" *Rev. Mod. Phys.* **90** 035002 (2018)
27. Nicks B S, Tajima T, Roa D, Nečas A, Mourou G "Laser-wakefield application to oncology" *Int. J. Mod. Phys. A* **34** (34) 1943016 (2019)
28. Ibrahim F, Obert J, Bajeat O, Buhour J M, Carminati S et al. "Photofission for the production of radioactive beams: Experimental data from an on-line measurement" *Eur. Phys. J. A* **15** 357–360 (2002)
29. Gales S, Tanaka K A, Balabanski D L, Negoita F, Stutman D, Tesileanu O, Ur C A et al. "The extreme light infrastructure-nuclear physics (ELI-NP) facility: new horizons in physics with 10 PW ultra-intense lasers and 20 MeV brilliant gamma beams" *Rep. Prog. Phys.* **81** 094301 (2018)
30. Necas A, Gales S, Private communication (2020)
31. Tanner J, Necas A, Gales S, Tajima T "Study of Neutronic Transmutation of Transuramics in a Molten Salt" *Ann. Nucl. Energy*, submitted
32. Robertson R C "Msre Design and Operations Report. Pt. I. Description of Reactor Design" (1965)
33. Kloosterman J L "MSR Concepts", in *Proc. TU Delft* (Delft: TUDelft, 2017)
34. Mourou G, Brocklesby B, Tajima T, Limpert J "The future is fibre accelerators" *Nat. Photon.* **7** (4) 258–261 (2013)
35. Quiter B, Laplace T, Ludewigt B A, Ambers S D, Goldblum B L, Korbly S, Hicks C, Wilson C "Nuclear resonance fluorescence in  $^{240}\text{Pu}$ " *Phys. Rev. C* **86** 034307 (2012)
36. Gauld I, Francis M "Investigation of Passive Gamma Spectroscopy to Verify Spent Nuclear Fuel Content", in *51st Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management*
37. Moulin C, Decambox P, Mauchien P "Analytical Applications of Time-Resolved Laser-Induced Fluorescence in the Nuclear Fuel Cycle" *J. Physique IV* **1** (C7) C7–677 (1991)
38. Kloosterman J L, in *Molten Salt Reactors and Thorium Energy* (Ed. T J Dolan) (Amsterdam: Elsevier, 2017) p. 565
39. Chetal S C, Balasubramanian V, Chellapandi P, Mohanakrishnan P, Puthiyavinayagam P, Pillai C P, Raghupathy S, Shanmugham T K, Sivathanu Pillai C "The design of the Prototype Fast Breeder Reactor" *Nucl. Eng. Design* **236** 852 (2006)
40. Sheu R J, Chang C H, Chao C C, Liu Y-W H "Depletion Analysis on Long-Term Operation of the Conceptual Molten Salt Actinide Recycler Transmuter (MOSART) by Using a Special Sequence Based on SCALE6/TRITON" *Ann. Nucl. Energy* **53** 1 (2013)
41. Zhang D, Liu L, Liu M, Xu R, Gong C, Qiu S "Neutronics/Thermal-hydraulics Coupling Analysis for the Liquid-Fuel MOSART Concept" *Energy Procedia* **127** 343 (2017)
42. Gulik V, Tkaczyk A H "Cost optimization of ADS design: Comparative study of externally driven heterogeneous and homogeneous two-zone subcritical reactor systems" *Nucl. Eng. Design* **270** 133 (2014)
43. Anikeev A V "Optimisation of the neutron source based on gas dynamic trap for transmutation of radioactive wastes" *AIP Conf. Proc.* **1442** 153 (2012)
44. Rostoker N, Private communication (2002)
45. Pascal Y (Ed.) *Structural Materials for Generation IV Nuclear Reactors* (Waltham, MA: Woodhead Publ., 2016)
46. Cress C D, Schauerman C M, Landi B J, Messenger S R, Raffaele R P, Walters R J "Radiation effects in single-walled carbon nanotube papers" *J. Appl. Phys.* **107** 014316 (2010)
47. Iijima S "Helical microtubules of graphitic carbon" *Nature* **354** 56–58 (1991)
48. Thostenson E T, ZRen Z, Chou T-W "Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review" *Compos. Sci. Technol.* **61** 1899–1912 (2001)
49. Iijima S "Carbon nanotubes: past, present, and future" *Physica B* **323** (1–4) 1–5 (2002)
50. Lazarowich R J, Taborek P, Yoo B-Y, Myung N V "Fabrication of porous alumina on quartz crystal microbalances" *J. Appl. Phys.* **101** 104909 (2007)
51. Myung N V, Lim J, Fleurial J-P, Yun M, West W, Choi D "Alumina nanotemplate fabrication on silicon substrate" *Nanotechnology* **15** 833 (2004)
52. Navarro M, Private communication (2019)
53. Shokrieh M M, Rafiee R "A review of the mechanical properties of isolated carbon nanotubes and carbon nanotube composites" *Mech. Compos. Mater.* **46** 155 (2010)
54. Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Dubonos S V, Zhang Y, Jiang D "Room-temperature electric field effect and carrier-type inversion in graphene films", cond-mat/0410631
55. Mertens R *The Graphene Handbook* 2019 ed. (Morrisville, NC: Lulu Press, 2020); <https://books.google.com/books?id=GJGDDwAAQBAJ>
56. Smalley R E "Discovering the fullerenes" *Rev. Mod. Phys.* **69** 723 (1997)
57. Klimchitskaya G L, Mostepanenko V M "Conductivity of pure graphene: Theoretical approach using the polarization tensor" *Phys. Rev. B* **93** 245419 (2016)
58. Pénicaud A "Graphene for a Sustainable World" (2018)
59. Chesneau A, Private communication (2021)
60. Johnson R W, Hultqvist A, Bent S F "A brief review of atomic layer deposition: from fundamentals to applications" *Mater. Today* **17** (5) 236 (2014)
61. Sobel N, Hess C, Lukas M, Spende A, Stühn B, Toimil-Molares M E, Trautmann C "Conformal SiO<sub>2</sub> coating of sub-100 nm diameter channels of polycarbonate etched ion-track channels by atomic layer deposition" *Beilstein J. Nanotechnol.* **6** 472 (2015)
62. Musfeldt J, Yoshihiro I, Reshef T "Nanotubes from layered transition metal dichalcogenides" *Phys. Today* **73** (8) 42–48 (2020)
63. Sackmann E, Bruinsma R "Cell Adhesion as Wetting Transition?", in *Physics of Bio-Molecules and Cells, Les Houches Session LXXXV, 2–27 July 2001* (Les Houches - Ecole d'Ete de Physique Theorique, Vol. 75, Eds F Flyvbjerg) (Berlin: Springer, 2002) pp. 285–309, [https://doi.org/10.1007/3-540-45701-1\\_8](https://doi.org/10.1007/3-540-45701-1_8)
64. Li X, Xue Y, Huiling H "Electrocapillary Rise in Nanoporous Media" *Procedia IUTAM* **21** 71–77 (2017)
65. Nair R R, Wu H A, Jayaram P N, Grigorieva I V, Geim A K "Unimpeded Permeation of Water through Helium-Leak-Tight Graphene-Based Membranes" *Science* **335** 442 (2012)

66. Kumaravel V, Bartlett J, Pillai S C "Photoelectrochemical Conversion of Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) into Fuels and Value-Added Products" *ACS Energy Lett.* **5** (2) 486–519 (2020)
67. Udorn J, Hatta A, Furuta H "Carbon Nanotube (CNT) Honeycomb Cell Area-Dependent Optical Reflectance" *Nano-materials* **6** (11) 202 (2016)
68. Fujikawa S, Selyanchyn R, Kunitake T "A new strategy for membrane-based direct air capture" *Polymer J.* **53** 111–119 (2021)
69. Hone J "Carbon Nanotubes: Thermal Properties", in *Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology* Vol. 3 (Eds J A Schwarz, C I Contescu, K Putyera) (New York: M. Dekker, 2004) p. 603
70. Liu F, Wagterveld R M, Gebben B, Otto M J, Biesheuvel P M, Hamelers H V M "Carbon nanotube yarns as strong flexible conductive capacitive electrodes" *Colloid Interface Sci. Commun.* **3** 9–12 (2014)
71. Haubenreich P N, Engel J R "Experience with the Molten-Salt Reactor Experiment" *Nucl. Appl. Technol.* **8** (2) 118 (1970)

### East meets West again in order to tackle the global energy crisis

T. Tajima<sup>(1,a)</sup>, A. Necas<sup>(2)</sup>, T. Massard<sup>(3,b)</sup>, S. Gales<sup>(4,c)</sup>

<sup>(1)</sup> *University of California at Irvine, Irvine, CA 92697 949-824-5011 USA*

<sup>(2)</sup> *TAE Technologies, Inc., Foothill Ranch, California, USA*

<sup>(3)</sup> *Stanford University, Stanford, California, USA*

<sup>(4)</sup> *IJCLab IN2P3/CNRS and University Paris-Saclay, France*

E-mail: <sup>(a)</sup> ttajima@uci.edu, <sup>(b)</sup> massard.thierry@gmail.com, <sup>(c)</sup> gales@ipno.in2p3.fr

The contemporary challenges of the impacts of human activities such as climate change induced by the increase in CO<sub>2</sub> emissions since the Industrial Revolution have been discussed throughout this Forum "Uspekhi-2021", as have possible approaches to address these issues. Some have discussed nuclear approaches to remedy this situation, both fission-based and fusion-based. One of the challenges of the fission nuclear path is its radioactive spent nuclear waste, which can accumulate for a period longer than civilization has existed. If we recall, the first rapprochement between the East and West in 1955 was due to the desire to avoid nuclear confrontation between the East and West. East and West meet again, this time to find collaborative solutions to the global crises of climate change and other global environmental issues tightly related to worldwide energy issues. The meeting in 1955 launched the peaceful use of nuclear fusion energy, and since then we have witnessed, for example at this Forum "Uspekhi-2021", the culmination of research in this area, like Norman Rostoker's aneutronic fusion approach driven by beam injection. In a previous meeting, Veksler also introduced collective acceleration using plasma to compactify accelerators. We are glad that we can show some of its fruits in the laser wakefield accelerator driving neutrons compactly and efficiently for the purpose of incinerating radioactive nuclear waste of transuraniums. These energy research efforts have also produced a path to follow in order to become carbon neutral or even carbon negative.

**Keywords:** carbon neutral energies, neutronic fusion, beam-driven fusion, collective acceleration, laser wakefield electrons, transmutation of transuraniums, carbon negative approach

PACS numbers: **28.52. – s**, **28.65. + a**, **89.30. – g**, **89.60. – k**, **92.70. – j**, 92.70.Mn

Bibliography — 71 references

Received 21 May 2021

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **192** (11) 1280–1292 (2022)

*Physics – Uspekhi* **65** (11) (2022)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.07.039052>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.07.039052>