

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

ФОРУМ "USPEKHI-2021":

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И ПРОБЛЕМЫ ГЛОБАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

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

Решение научных задач атомной энергетики как зелёного источника энергии

С.Н. Калмыков

Предотвращение негативных глобальных климатических изменений в значительной степени заключается в изменении способа производства энергии, как одного из основных источников парниковых газов. Важнейшей экономической задачей является формирование баланса различных источников энергии в зависимости от социально-экономического уклада того или иного региона. Невозможно развитие крупных промышленных регионов без высококонцентрированных источников энергии, среди которых атомная энергия является фактически единственным "зелёным" источником. Однако развитие атомной энергетики, увеличение её доли в выработке энергии как в России, так и в мире в целом зависит от решения сложных научно-технологических задач по безопасному обращению с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами. На повестке дня создание атомной энергетики нового поколения, которая должна основываться на комбинации реакторов как на тепловых, так и быстрых нейтронах, рециклировании делящихся нуклидов, глубоком фракционировании радиоактивных отходов с "дожигом" долгоживущих радионуклидов и минимизации глубинного захоронения в геологических формациях.

Ключевые слова: атомная энергетика, рециклирование делящихся радионуклидов, сбалансированный ядерный топливный цикл, фракционирование радиоактивных отходов

PACS numbers: 28.41.Kw, 28.41.Vx, 92.70.Mn

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2022.10.039256>

Содержание

1. Введение (1275).
 2. Современная ядерная энергетика и проблема радиоактивных отходов (1276).
 3. Стратегия замыкания ядерного топливного цикла (1277).
 4. Методы разделения Am(III) и Cm(III) (1278).
 5. Заключение (1279).
- Список литературы (1279).

С.Н. Калмыков

Президиум Российской академии наук,
Ленинский просп. 14, 119991 Москва, Российская Федерация
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы 1, 119991 Москва, Российская Федерация
E-mail: stepan_5@hotmail.com

Статья поступила 4 октября 2022 г.

1. Введение

Важнейшая задача развития науки и техники заключается в создании новых, экономичных и экологически чистых источников энергии, которые в сочетании с традиционными источниками обеспечат гармоничное развитие отдельных регионов и стран. Ранее глобальные проблемы человечества, увеличивающийся спрос на материальные блага и ограниченность ресурсов, в том числе энергетических, обсуждались на страницах *УФН* [1–3]. Традиционные источники энергии, основанные на сжигании ископаемого топлива, прежде всего угля, на долю которого в мире приходится около 38 % [4] от общей энерговыработки в мире, не удовлетворяют ужесточающимся требованиям по защите от загрязнения окружающей среды и эмиссии парниковых газов (прежде всего, CO₂ при сжигании). Однако экономическое развитие невозможно без использования высококонцентрированных источников энергии. Ядерная энергетика является подобным высококонцентрированным источником получения энергии, не вызывающим значи-

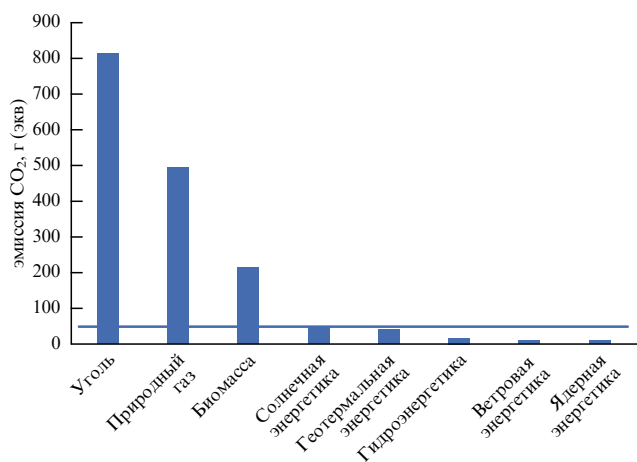


Рис. 1. Эмиссия CO₂ в г(экв) при производстве 1 кВт ч электроэнергии от различных источников энергии.

мой эмиссии парниковых газов и не влияющим на климат. Организация по экономическому сотрудничеству и развитию (ОЭСР) [5] декларирует желаемый показатель в 50 г CO₂ экв. эмиссии при выработке 1 кВт ч электроэнергии. На рисунке 1 приведены величины эмиссии CO₂ в г(экв) на 1 кВт ч от основных источников электроэнергии (с учётом полного жизненного цикла объектов). Важно, что помимо эмиссии CO₂ сжигание ископаемого топлива приводит к эмиссии других опасных веществ, в том числе диоксида серы, оксидов азота, частиц сажи [6].

Важнейшим заблуждением является утверждение, что атомные электростанции негативно влияют на дозовые нагрузки населения, проживающего вблизи их. Ряд исследований [7, 8] показывает, что при штатной работе дозовые нагрузки населения, проживающего вблизи угольных электростанций, значительно выше, чем у населения, проживающего вблизи АЭС. Так, эквивалентная доза от внешнего облучения, эффективная доза для кожи и для внутренних органов от газообразных выбросов атомной электростанции составляли $2,93 \times 10^{-4}$ мЗв год⁻¹, $2,90 \times 10^{-3}$ мЗв год⁻¹ и $1,78 \times 10^{-2}$ мЗв год⁻¹ соответственно против значений $1,13 \times 10^{-2}$ мЗв год⁻¹, $5,33 \times 10^{-2}$ мЗв год⁻¹ и $1,17 \times 10^{-1}$ мЗв год⁻¹ соответственно для выбросов угольной электростанции. Эти значительные различия определяются эмиссией в воздух природных радионуклидов, в том числе короткоживущих продуктов распада радия-226, при сжигании ископаемых топлив, чего не происходит при работе АЭС. Было показано, что природные радионуклиды, например уран, при неполном сгорании угля могут быть инкапсулированы в углеродные фуллереноподобные наноструктуры в виде оксидных наночастиц состава UO_{2+x} [9] (рис. 2).

2. Современная ядерная энергетика и проблема радиоактивных отходов

Очевидно, что в будущем атомная энергетика может занять значительную долю в мировом энергобалансе, однако это возможно реализовать при условии решения научных и технологических задач полноценного замыкания ядерного топливного цикла (ЯТЦ), минимизации образующихся радиоактивных отходов (РАО) и мульти-

рециклирования делящихся изотопов. Это позволит решить как экологическую, так и экономическую задачу — уход или сокращение до минимума глубинного захоронения долгоживущих радионуклидов и переход к их "дожигу" (трансмутации) с последующим приповерхностным захоронением только короткоживущих радионуклидов.

Промышленное освоение ядерной энергии началось с момента пуска в 1954 г. в СССР первой атомной электростанции мощностью 5 МВт (эл.). К концу 2021 г., по данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), в мире функционировало 437 ядерных энергоблоков, которые вырабатывали около 10 % мирового производства электроэнергии, что соответствует 28 % вкладу во все низкоуглеродные источники энергии. Согласно прогнозам того же Агентства, к 2030 году рост в секторе ядерной энергетики составит от 17 % (по пессимистичному сценарию) до 94 % (по оптимистическому сценарию) [10].

Существуют две принципиально различающиеся стратегии по обращению с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) — открытый и замкнутый ядерный топливный цикл (ЯТЦ). Согласно первой из них (она принята в США, Швеции, Финляндии, Швейцарии и др. странах), ОЯТ не перерабатывают, а хранят с возможностью переработки или окончательного геологического захоронения в будущем (отложенное решение). В мире накоплено уже более 300 тыс. тонн отработавшего ядерного топлива, и хотя в настоящее время на планете нет ни одного лицензированного глубинного геологического хранилища ОЯТ, оно хранится до принятия окончательного решения о его судьбе, при этом объём ОЯТ ежегодно увеличивается примерно на 8–10 тыс. тонн [11].

В ряде стран с развитой ядерной энергетикой (Франция, Великобритания, Россия и др. странах) ОЯТ (весь объём или часть) подвергают переработке с экстракционным выделением урана и плутония в пурекс-процессе и последующим отверждением жидких РАО. Глубинное геологическое захоронение РАО в отверждённом виде осуществляется на заключительной стадии замкнутого ядерного топливного цикла. Высокорадиоактивные отходы (ВАО) после переработки ОЯТ, как правило, представляют собой растворы и пульпы, содержащие продукты деления — изотопы Cs, Sr, Zr, Tc, Mo, Ru, I, редкоземельных элементов, а также продукты коррозии (изотопы Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zr), минорные актиниды (Np, Am, Cm) и остаточные количества U и Pu.

Как и в случае ОЯТ, в мире нет ни одного лицензированного глубинного хранилища ВАО. Причина — необходимость обоснования безопасности таких хранилищ на период до 1 млн лет. Расчётные данные об уменьшении потенциального долгосрочного воздействия на окружающую среду при захоронении, с одной стороны, ОЯТ, с другой стороны, РАО, образующихся в ходе замкнутого ядерного топливного цикла с выделением делящихся актинидов (²³⁹Pu и ²³⁵U) для повторного использования в ядерной энергетике и минорных актинидов (²³⁷Np, ²⁴¹Am, ²⁴⁴Cm) с целью их трансмутации в реакторах на быстрых нейтронах, приведены на рис. 3 [12]. Так, радиотоксичность РАО во времени после выделения из ОЯТ долгоживущих актинидов уменьшается на много порядков по сравнению с радиотоксичностью исходного ОЯТ. Таким образом, замыкание ЯТЦ с мультирецикли-

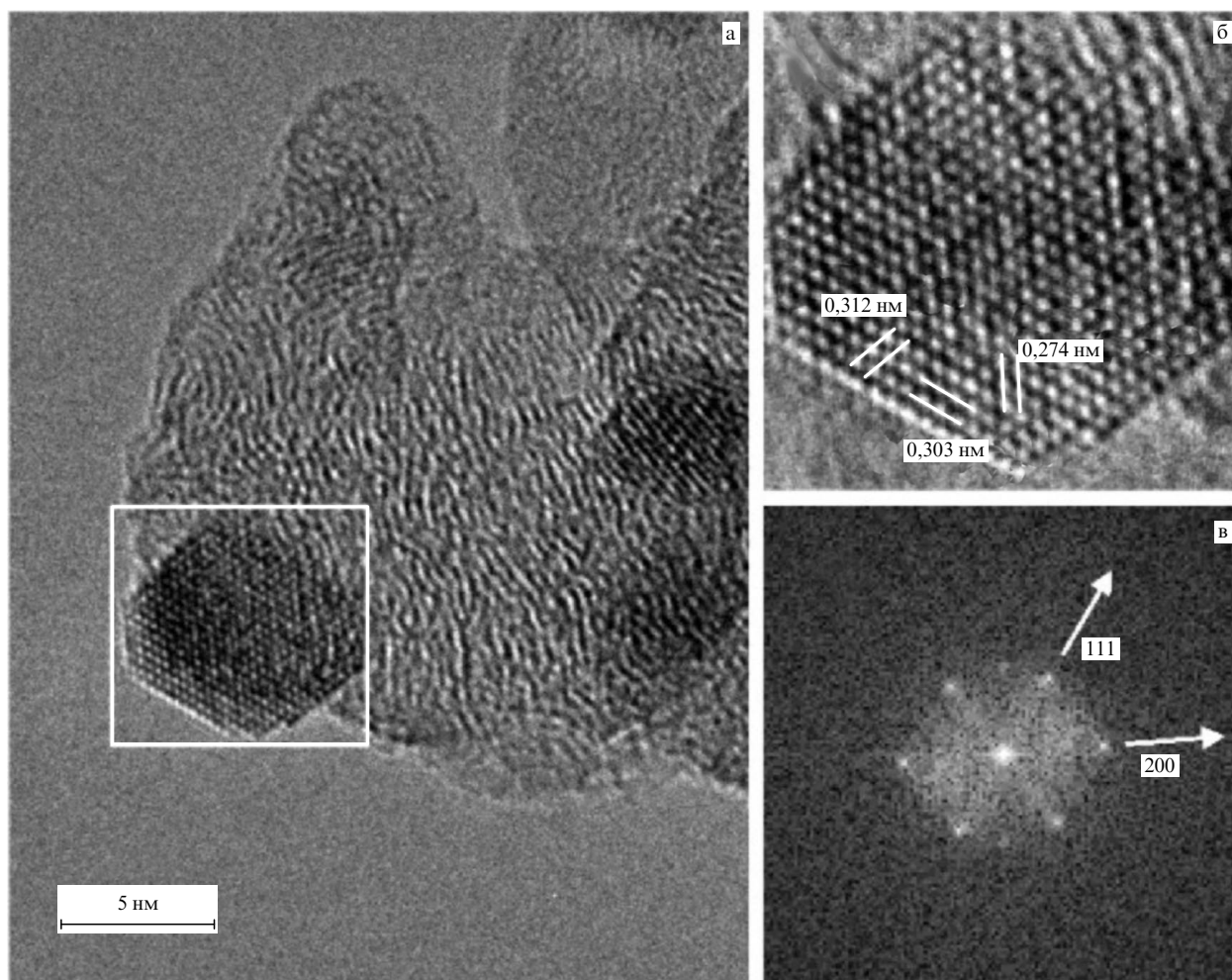


Рис. 2. Наночастицы UO_{2+x} , инкапсулированные в углеродные луковичные структуры, которые были обнаружены в дымовых выбросах угольной электростанции.

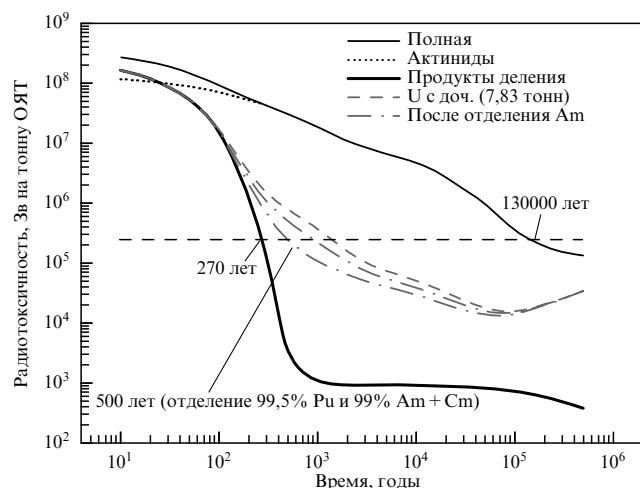


Рис. 3. Изменение радиотоксичности ОЯТ, актинидной фракции ОЯТ, фракции продуктов деления, ОЯТ после отделения 99,5 % плутония, америция и кюрия.

рованием делящихся компонентов, фракционированием радиоактивных отходов для выделения наиболее экологически опасных долгоживущих изотопов (таких как америций) для последующей их трансмутации и суще-

ственное уменьшение объёма РАО — стратегическая научно-технологическая задача, стоящая перед атомной отраслью страны.

3. Стратегия замыкания ядерного топливного цикла

Замыкание ЯТЦ в двухкомпонентной ядерной энергетической системе с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах предполагает рециклирование делящихся материалов, минимизацию или полный отказ от глубинного захоронения ВАО путём выделения актинид-лантанидной фракции с последующим разделением америция и кюрия для трансмутации америция и хранения кюрия до распада, фракционирование РАО с целью выделения короткоживущей фракции (Cs, Sr), металлов платиновой группы, а также технеция и других элементов, минимизацию объёмов РАО. Таким образом, реализация данной концепции [13–16] позволит:

- решить отложенные проблемы обращения с ОЯТ и РАО, последовательно сократить объёмы накопленного ОЯТ и предотвратить дальнейшее его накопление;
- вовлечь в ЯТЦ плутоний как продукт переработки ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах (ВВЭР) для

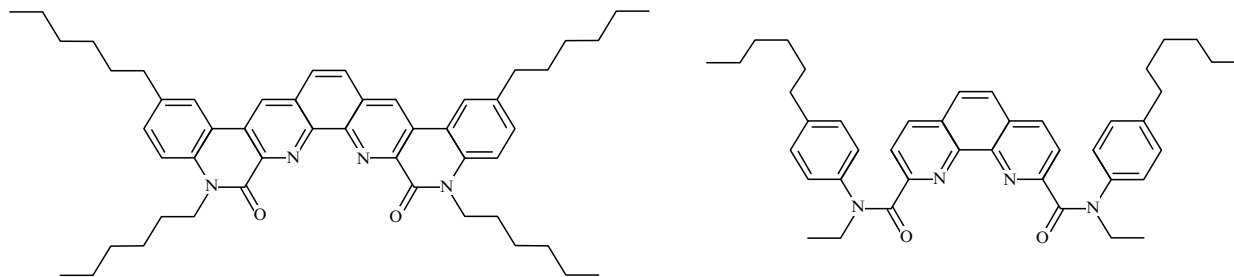


Рис. 4. Базовые структуры диамидов фенантралиндикарбоновых кислот, исследованные для разделения РЗЭ и минорных актинидов, а также америция и кюрия.

изготовления топлива для реакторов на быстрых нейтронах и полного использования энергетического потенциала природного урана (^{238}U) путём многократного рецикла топливных материалов;

- фракционировать радиоактивные отходы, извлекать долгоживущие минорные актиниды для дожигания или трансмутации в ядерных реакторах, что, в совокупности с многократным рециклом плутония, позволит значительно снизить экологическую опасность РАО;

- технологически поддержать режим нераспространения делящихся материалов за счёт поэтапного исключения обращения обогащённого урана и выделения чистого плутония.

Одним из существенных оснований для перехода к замкнутому ЯТЦ с использованием "быстрых" реакторов служит успешная и не имеющая зарубежных аналогов эксплуатация промышленного "быстрого" реактора БН-600 на Белоярской АЭС. В 2016 г. введён в эксплуатацию 4-й энергоблок с БН-800, изначально ориентированный на отработку технологий замыкания ЯТЦ [17, 18].

Если экстракционные системы для выделения и разделения таких элементов, как уран, плутоний, и многих других, которые меняют свою степень окисления, разработаны и в целом успешно внедрены, то остаётся острой задача разделения очень близких по химическим свойствам трёхвалентных редкоземельных элементов (РЗЭ) и минорных актинидов (Am и Cm).

4. Методы разделения Am(III) и Cm(III)

Содержание минорных актинидов по массе не превышает 0,1 % от ВАО, но именно они (прежде всего америций) при дальнейшем геологическом захоронении представляют наибольшую опасность, поскольку обладают значительными периодами полураспада и большим тепловыделением ($T_{1/2}^{241}\text{Am} = 432$ года, $T_{1/2}^{243}\text{Am} = 7370$ лет). Кюрий (прежде всего ^{244}Cm с периодом полураспада 18 лет) с вероятностью $1,4 \times 10^{-6}$ % претерпевает спонтанное деление и способен испускать $1,08 \times 10^7$ нейтронов $(\text{с г})^{-1}$, что почти на 9 порядков больше, чем для ^{239}Pu ($2,18 \times 10^{-2}$ нейтронов $(\text{с г})^{-1}$) [19]. Среди основных нейтронных ядов наибольшее значение, помимо ^{135}Xe , имеют изотопы (в том числе стабильные) РЗЭ, прежде всего Sm, Gd, Pm, Eu. Радиоактивный ^{152}Eu ($T_{1/2} = 13,5$ лет) образуется с высоким выходом при делении, равном около 5 %. Таким образом, в рамках ЯТЦ нового поколения долгоживущие изотопы америция могут быть подвержены "дожигу" в реакторах на быстрых нейтронах, ^{152}Eu — захоронен в геологических формациях, а ^{244}Cm либо

отправлен на хранение для накопления ^{240}Pu , либо также захоронен. Для подобного "дожигу" рассматриваются варианты как гетерогенного твёрдотопливного реактора, так и гомогенного жидкосолевого реактора. Впервые гомогенный реактор был предложен Я.Б. Зельдовичем и Ю.Б. Харитоном в 1939 году [20]. Следовательно, эффективное разделение Eu, Am и Cm — важная научная и практическая задача.

В последние годы исследованы различные высокоселективные экстракционные системы для разделения как редкоземельных элементов и минорактинидов, так и америция и кюрия. По результатам суперкомпьютерного моделирования и проведённых затем исследований выявлены экстрагенты (диамида фенантралиндикарбоновой кислоты (рис. 4)), которые, по данным теоретического прогноза, должны обладать высокой селективностью в процессах экстракционного разделения трёхвалентных f-элементов.

Был разработан и осуществлён синтез большой серии соединений этих типов, получены значения факторов селективности при разделении стандартной пары америций/европий $\text{SFAm/Eu} \geq 150$ и при разделении пары америций/кюрий $\text{SFAm/Cm} \geq 7$, которые являются рекордно высокими значениями, достигнутыми на сегодняшний день в мире. Разработан и успешно испытан новый подход к созданию экстракционных систем для разделения актинидов и лантанидов, основанный на применении гидрофильного и гидрофобного лигандов в водной и органической фазах соответственно (стратегия гидрофильно-гидрофобной пары), позволяющий существенно улучшить селективность разделения целевых металлов.

Важно, что предложенные лиганды обладают высокой радиационной и гидролитической устойчивостью, не теряют своих экстракционных свойств при γ -облучении до доз 500 кГр и при α -облучении до доз порядка 200–300 кГр, процесс экстракции быстрый и полностью обратимый. Кроме того, разработанная экстракционная система пожаровзрывобезопасна.

При испытаниях на экстракторах центробежного типа (Радиевый институт им. В.Г. Хлопина) из азотнокислых растворов, содержащих смесь америция и кюрия (суммарная концентрация $0,11 \text{ г л}^{-1}$), удалось выделить в отдельную фракцию не менее 99 % америция с чистотой не менее 99,9 % (по кюрию). Более того, исходный раствор содержал такие мешающие компоненты, как нитрат аммония (570 г л^{-1}), диэтилентриаминпентауксусную кислоту (10 г л^{-1}), аминоксусную кислоту (5 г л^{-1}) и примесь плутония. Это не помешало разделению целевых компонентов.

5. Заключение

Ядерная энергетика — единственный высококонцентрированный "зелёный" источник электроэнергии, доля которого в мировой выработке, по всей видимости, будет увеличиваться. Согласно сценарию декарбонизации (производство не более 50 г CO₂ на кВт выработанной электроэнергии), к 2040 г. долю ядерной энергетики предполагается увеличить на 55 % — до 4320 ТВт ч вырабатываемой электроэнергии. Однако реализация ядерного топливного цикла нового поколения должна включать решение проблем накапливающихся радиоактивных отходов, их минимизацию при максимальном использовании потенциала делящихся материалов путём их мультирециклирования. Эта стратегия базируется на двухкомпонентной ядерной энергетике — тепловые реакторы с низким коэффициентом воспроизводства производят дешёвое электричество, а реакторы на быстрых нейтронах с коэффициентом воспроизводства больше 1 обеспечивают топливную базу всей системы и утилизируют ОЯТ тепловых реакторов.

Список литературы

- Капица П Л "Глобальные проблемы и энергия" *УФН* **122** 327 (1977); Kapitza P L "Global problems and energy" *Sov. Phys. Usp.* **20** 547 (1977)
- Завойский Е К, Кадомцев Б Б, Окунь Л Б, Смирнов Б М "Человек и окружающая среда — проблемы будущего" *УФН* **122** 337 (1977); Zavoiskii E K, Kadomtsev B B, Okun' L B, Smirnov B M "Man and environment — problems of the future" *Sov. Phys. Usp.* **20** 553 (1977)
- Фортов В Е, Макаров А А "Направления инновационного развития энергетики мира и России" *УФН* **179** 1337 (2009); Fortov V E, Makarov A A "Avenues for the innovative development of energetics in the world and in Russia" *Phys. Usp.* **52** 1249 (2009)
- Coal and Electricity, World Coal Association, London, UK, 2015, <https://www.worldcoal.org/coal/uses-coal/coal-electricity>
- "The costs of decarbonisation: system costs with high shares of nuclear and renewables", NEA No. 7299 (Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2019)
- Du X, Jin X, Zucker N, Kennedy R, Urpelainen J "Transboundary air pollution from coal-fired power generation" *J. Environmental Management* **270** 110862 (2020)
- McBride J P, Moore R E, Witherspoon J P, Blanco R E "Radiological Impact of Airborne Effluents of Coal-Fired and Nuclear Power Plants", ORNL-5315 (Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, 1977)
- Purevsuren B, Kim J *Sci. Technol. Nucl. Install.* **2021** 6685385 (2021)
- Utsunomiya S, Jensen K A, Keeler G J, Ewing R C *Environ. Sci. Technol.* **36** 4943 (2002)
- Myasoedov B F, Kalmykov S N "Nuclear power industry and the environment" *Mendelev Commun.* **25** (5) 319 (2015)
- Ceyhan M, Lee J S, in *Proc. of the Intern. Conf. on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors, IAEA, Vienna, Austria, 19–22 June, 2006* (IAEA-CN-144) (Vienna: International Atomic Energy Agency, OECD Nuclear Energy Agency, 2006)
- "Implications of Partitioning and Transmutation in Radioactive Waste Management", Technical Reports Series No. 435 (Vienna: International Atomic Energy Agency, 2004)
- Khapersaya A V, Krut'kov O V, Ivanov K V "Spent nuclear fuel management in Russia: Status and future development", in *Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Learning from the Past, Enabling the Future, Proc. of the Intern. Conf., Vienna, Austria, 24–28 June 2019* (IAEA-CN-272/53) (Vienna: International Atomic Energy Agency, 2020) p. 93–98, Paper ID #25
- Fedorov Yu S, Baryshnikov M V, Bibichev B A et al. "Multiple recycle of REMIX-fuel based on reprocessed uranium and plutonium mixture in thermal reactors", in *Proc. of GLOBAL 2013: Intern. Nuclear Fuel Cycle Conf., Nuclear Energy at a Crossroads, Salt Lake City, UT, September 29 – October 3, 2013*
- Sheremet'ev A, Koulupaev D "Experience and prospects of spent nuclear fuel reprocessing at Mayak. Management of spent fuel. From nuclear power reactors. Learning from the past, enabling the future", in *Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Learning from the Past, Enabling the Future, Proc. of the Intern. Conf., Vienna, Austria, 24–28 June 2019* (IAEA-CN-272/53) (Vienna: International Atomic Energy Agency, 2020) p. 161–166, Paper ID #53
- Пономарев-Степной Н Н "Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с замкнутым ядерным топливным циклом на основе БН и ВВЭР" *Атомная энергия* **120** (4) 183 (2016); Ponomarev-Stepnoi N N "Two-Component Nuclear Power System with a Closed Nuclear Fuel Cycle Based on BN and VVER Reactors" *Atom. Energy* **120** 233 (2016)
- Адамов Е О, Джалавьян А В, Лопаткин А В и др. "Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г." *Атомная энергия* **112** (6) 319 (2012); Adamov E O, Dzhalyan A V, Lopatkin A V et al. "Conceptual framework of a strategy for the development of nuclear power in Russia to 2100" *Atom. Energy* **112** 391 (2012)
- Адамов Е О и др. *Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами* (Под общ. ред. Е О Адамова) (М.: НИКИЭТ, 2020)
- Stewart J E, Eccleston G W, Ensslin N, Cremers T L, Foster L A, Menlove H O, Rinard P M "Neutron-Based Measurements for Nondestructive Assay of Minor Actinides Produced in Nuclear Power Reactors", LA-UR-96-3690 (Los Alamos, NM: Los Alamos National Lab., 1996)
- Пономарёв Л И "Я.Б. Зельдович и ядерная энергетика" *УФН* **184** 227 (2014); Ponomarev L I "Ya.B. Zeldovich and nuclear power" *Phys. Usp.* **57** 215 (2014)

Solving scientific problems of nuclear power engineering as a source of 'green' energy

S.N. Kalmykov

Presidium of the Russian Academy of Sciences, Leninskii prosp. 14, 119991 Moscow, Russian Federation
Lomonosov Moscow State University, Leninskii gory 1, 119991 Moscow, Russian Federation
E-mail: stepan_5@hotmail.com

A way to prevent adverse global climatic change is to essentially alter the strategy of power generation, which is one of the major sources of greenhouse gases. A task of paramount economic importance is to ensure a balance among various energy sources, depending on the social and business structures of a particular region. Major industrial regions cannot develop without highly concentrated energy sources, among which nuclear energy is actually the only 'green' one. However, progress in the nuclear power generation industry and an increase in its share in the total power generation both in Russia and worldwide depend on solving challenging scientific and technological problems related to safe processing of spent nuclear fuel and radioactive waste. An urgent task is to develop a next-generation nuclear power generation industry based on a combination of thermal- and fast-neutron reactors, recycling of fissile nuclides, deep fractioning of radioactive waste with subsequent 'afterburning' of long-lived radionuclides, and minimizing deep burial in geological formations.

Keywords: nuclear power generation industry, recycling of fissile nuclides, balanced nuclear fuel cycle, fractioning of radioactive waste

PACS numbers: 28.41.Kw, 28.41.Vx, 92.70.Mn

Bibliography — 20 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **192** (11) 1275–1279 (2022)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2022.10.039256>

Received 4 October 2022

Physics – Uspekhi **65** (11) (2022)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2022.10.039256>