УДК 621.039.51

БИОСФЕРНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ С ЗАМКНУТЫМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВНЫМ ЦИКЛОМ

Н. В. Горин [1], В. П. Кучинов [2], В. М. Декусар [3], В. В. Шидловский [4]

[1] ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия
[2] НИЯУ МИФИ, Москва, Россия
[3]АО ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск, Россия
[4] АО «Прорыв», Москва, Россия

Вся человеческая деятельность оказывает негативное влияние на окружающую среду, наибольший вклад в которое вносит производство энергии. Основные вызовы современности, угрожающие устойчивому развитию, – глобальное потепление и парниковый эффект – возникают из-за выбросов в атмосферу углекислого газа и общего загрязнения окружающей среды. Основные современные загрязнители окружающей среды – объекты углеводородной энергетики, промышленности и транспорта – не удовлетворяют биосферной совместимости и ставят под угрозу устойчивое развитие человечества. Для устойчивого развития нужна экологически чистая энергия в количестве не менее десятка млрд т н. э./год (> 3–5·10^{20} Дж/год). Возобновляемые источники энергии, солнечная и ветровая, с этой задачей не справятся, так как у них мала плотность потока энергии. Нужна новая технология, производящая на единицу массы сырья на несколько порядков больше энергии и меньше отходов. Атомная энергетика с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым ЯТЦ является технологией, обладающей лучшей биосферной совместимостью по сравнению с остальными возобновляемыми источниками энергии.

Ключевые слова: биосферная совместимость; устойчивое развитие; быстрые реакторы; замкнутый топливный цикл.

1. Введение

Понятие «биосферная совместимость», вынесенное в название статьи, подразумевает систему социально-экономических и гуманитарных механизмов комфортного взаимодействия человека, созданной им техносферы и окружающей среды [1]. Эти механизмы сложились по ходу развития человечества и были работоспособны до начала промышленной революции (начавшейся ~ 250–300 лет назад), пока численность населения с относительно небольшими запросами не превышала ~ 1 млрд чел. В результате этого развития возникали локальные проблемы, не оказывающие влияния на глобальное состояние биосферы.

В исследованиях биосферной совместимости различных аспектов деятельности человека рассматриваются вопросы развития технологий, организации их использования, а также производимых с их помощью продуктов и отходов и влияния этого комплекса на биосферу с целью определения закономерностей формирования социально-экономических и гуманитарных механизмов инновационной деятельности, а также создания теоретического фундамента биотехносферы. Хотя сегодня эти исследования в основном ориентированы на проблемы градостроительства, тем не менее представляется целесообразным взглянуть и на другие области человеческой деятельности, поскольку, как отмечают некоторые исследователи, вопрос разработки методологической основы определения принципов биосферной совместимости среды жизнедеятельности является актуальным [2].

Еще полвека назад Тур Хейердал, обеспокоенный загрязнением океана и всей планеты, отмечал, что тысячелетия назад древние люди начали преобразовывать, а

оказалось, разрушать природу для достижения собственных целей, не задумываясь о последствиях [3]. Тревожные симптомы устойчивости развития человечества были отмечены в публикациях Римского клуба [4]. Они были подтверждены спустя ~ 30 лет, было отмечено, что по некоторым критериям уже превышен предел устойчивого развития человечества [5]. Работы специалистов Римского клуба критиковали, но в целом с ними соглашались [6].

В современных публикациях отмечается, что за прошедшие тысячелетия Земля потеряла существенную часть своего лесного покрова, масштабы нарушенных наземных экосистем и загрязнений океана оказались весьма значительными, за несколько последних десятилетий резко снизилось естественное плодородие почв, загрязнилась питьевая вода, возрос объем бытовых отходов и пр. В результате к началу XXI в. уровень антропогенного воздействия на биосферу на порядок превысил допустимый предел [7]. Следует признать, что вся человеческая деятельность оказывает влияние на окружающую среду, причем наибольшее воздействие в настоящее время происходит от производства энергии за счет сжигания органических энергоносителей – угля, нефти и газа. В этой связи без экологически чистой атомной энергетики устойчивое развитие современной цивилизации не очевидно [8]. Другой способной производить не менее $3–5\cdot10^{20}$ Дж/год энергии пока нет, по крайней мере, до появления термоядерной энергетики.

В рамках настоящей статьи рассмотрена лишь одна из составляющих биосферной совместимости и устойчивого развития – технология производства энергии на основе реакторов на быстрых нейтронах (РБН) в замкнутом ядерном топливном цикле (ЯТЦ) [9–12].

2. Современная энергетика

Количество производимой энергии всех видов – представительный показатель экономического развития цивилизации. Если до первой промышленной революции в конце XVIII в. производство энергии находилось на уровне чуть выше $1{,}8\cdot10^{19}$ Дж/год, то уже в начале XX в. оно составляло около $4{,}3\cdot10^{19}$ Дж/год. При этом менялись используемые первичные источники энергии.

Основным источником энергии тысячелетия оставалась древесина. При сжигании она выделяет углекислый газ, это тот самый газ, который за несколько десятилетий до сжигания изымался из атмосферы фотосинтезом и преобразовывался в массу дерева. Запаздыванием в десятки лет при рассмотрении глобальных биосферных процессов можно пренебречь и считать, что равновесие CO_2 в природе при таком способе получения энергии не нарушалось.

Ситуация резко изменилась, когда началось массовое сжигание угля, нефти и газа для получения энергии. При этом образовывался CO_2, изъятый из атмосферы фотосинтезом за многие миллионы лет до сжигания, и его появление нарушило сложившееся естественное равновесие и запустило процесс его накопления в атмосфере. В процессе сжигания углеводородов используется кислород и происходит изъятие его из атмосферы с весьма длительной задержкой. Сегодня общее производство энергии в мире оценивается около $6\cdot10^{20}$ Дж/год, которое на ~ 90 % обеспечивается сжиганием угля, нефти, природного газа и биотоплива с соответствующим выбросом CO_2 и потреблением O_2.

Все тысячелетия человечество рассматривало природу, с одной стороны, как бесконечный источник сырья для удовлетворения своих непрерывно возрастающих потребностей, с другой – как неограниченный объем для утилизации отходов. Планета Земля велика, но все-таки конечна, а в конечной системе ничего бесконечного и неограниченного быть не может. Поэтому источники сырья и место утилизации отходов только казались неограниченными, пока на планете было не более 1 млрд чел. с ограниченными запросами, т. е. в доиндустриальный период развития. За последние 250–300 лет население увеличилось на порядок, еще сильнее возросли его потребности, соответственно, пропорционально возросла нагрузка на окружающую

среду и обострились проблемы обеспечения сырьем и утилизации отходов. Радикально изменить парадигму существования человечества невозможно, так как добывать сырье и утилизировать отходы приходится сегодня только на Земле, поэтому необходимо ее скорректировать, например, путем новой технологии получения энергии, при которой на единицу массы сырья будет производиться на несколько порядков больше энергии и меньше отходов.

Для получения заметного эффекта снижения давления на природу при производстве энергии, производимой в настоящее время, главным образом за счет сжигания углеводородов, долю экологически чистых энергоисточников, как представляется, необходимо увеличить до 50–70 %. При этом возобновляемые источники энергии, солнечная и ветровая, с этой задачей не справятся, так как у них мала плотность потока энергии [13].

3. Биосферно-совместимое производство энергии

Современная энергетика является одним из основных элементов среды жизнедеятельности человека, которая формирует техносферу, состоящую из элементов биосферы, претерпевших антропогенные изменения либо созданных в результате сознательной деятельности человека. Это приводит к так называемой биотехносфере с глобальными экологическими проблемами, включая также возможное исчерпание в будущем природных ресурсов. Строго говоря, современную энергетику, основу которой составляет углеводородная энергетика, вряд ли можно признать совместимой с биосферой, прежде всего из-за выбросов парниковых и других вредных газов, а также загрязняющих веществ в виде золы и сточных вод. При этом объем этих сбросов и выбросов по некоторым веществам становится близким к объему природных выбросов в результате вулканической деятельности, выхода газов из разломов горных пород, болот, а иногда и превосходит их.

Другим аспектом является сброс тепла в атмосферу, возникающего при работе тепловых и атомных электростанций, для рассеивания которого требуются большие площади водоемов или градирни. При этом в самих водоемах под воздействием этого тепла происходят такие процессы, как уменьшение растворенного в воде кислорода, изменение экосистем, прежде всего, флоры и фауны.

Возобновляемые источники энергии также не свободны от воздействий на биосферу, особенно если рассматривать их полный жизненный цикл. С ним связаны и выбросы парниковых газов, шумы и вибрации, а также потери больших площадей земли либо в результате создания водохранилищ для гидроэлектростанций, либо из-за низкой плотности потока энергии для солнечных и ветровых электрогенераторов. Таким образом, говоря о биосферной совместимости производства энергии, необходимо провести комплексный анализ воздействия источника энергии на окружающую среду.

За тысячелетнюю историю человек при сжигании углеводородов израсходовал около 275 млрд т атмосферного кислорода, 80 % из которых израсходовано в последние 50 лет [14]. Масса атмосферы $5 \cdot 10^{15}$ т, в ее составе ~ 21 % кислорода, и его интегральное потребление за всю историческую эпоху невелико. Сегодня ежегодное мировое продуцирование кислорода составляет около 200 млрд т, при этом его потребление для сжигания углеводородов уже составляет около 20 млрд т. Следует отметить, что сокращение лесных массивов в результате их вырубки ведет к дальнейшему снижению годового производства кислорода.

За весь XX в. от всех видов хозяйственной деятельности в атмосферу поступило около 360 млрд т CO_2, и его концентрация в атмосфере возросла. Ежегодно выбрасывается в атмосферу ~ 30 млрд т CO_2, ~ 230 млн т CO, ~ 150 млн т SO_2. В биосферу поступает ~ 120 млн т золы и ~ 250 млн т мелкодисперсных аэрозолей. Мировой океан и растительность суши не успевают поглощать техногенный углекислый газ, в результате чего его содержание в атмосфере постоянно

увеличивается. Так, доля CO_2 в атмосфере в 1900 г. составляла 0,0003, что в пересчете эквивалентно ~ 1 500 млрд т CO_2, в настоящее же время эта доля равна ~ 0,0004 и ~ 2 000 млрд т, соответственно.

Конечно, все эти антропогенные загрязнения поступают в биосферу не только в результате производства энергии, однако на долю тепловых электростанций, использующих в качестве топлива углеводороды, приходится около 43 %.

К антропогенным загрязнениям от производства энергии можно также отнести шумы и вибрации, которые особенно характерны для ветрогенерации электроэнергии.

Если же говорить о ресурсных проблемах современной энергетики, то в настоящее время достаточно точно известны запасы угля, нефти и газа, известна интенсивность их использования и, следовательно, просто вычисляется срок исчерпания этого первичного энергетического ресурса, поскольку обнаружение новых месторождений углеводородного сырья маловероятно. Хотя совершенствование технологий сможет незначительно отодвинуть срок их исчерпания, однако не изменит общую картину – в течение нескольких ближайших поколений запасы нефти и газа в основном будут исчерпаны [10].

В табл. 1 представлены оценки сроков исчерпания запасов современных углеводородных энергоисточников. Погрешности оценок ~ 50–70 лет соизмеримы со временем жизни одного-двух поколений людей.

Таблица 1. «Шагреневая кожа» современных энергоисточников

	Мир			Россия		
Энергоноситель	Запасы	Потребление в год	Срок исчерпания, лет	Запасы	Потребление в год	Срок исчерпания, лет
Нефть, млрд т	232	4,85	~ 50	13	0,5	25–30
Газ, трлн $м^3$	187	3,7	~ 50	40–50	0,6–0,7	60–70
Уголь, млрд т	~ 1 000	8	~ 120	150–170	0,35	~ 450
РТН с открытым ЯТЦ, тыс. ГВт(э)·год*)	~ 60	0,45	130	~ 6	0,045	130
РБН с замкнутым ЯТЦ, тыс. ГВт(э)·год*)	~ 10 000	~ 10	> 1 000	~ 1 000	~ 1	> 1 000

*) Для 10 млн т U. Запасы урана в мире оценены в количестве 8 млн т со стоимостью извлечения < 130 $/кг (в России 0,635 млн т) и 10 млн т со стоимостью извлечения < 260 $/кг.

4. Биосферная совместимость атомной энергетики

Современная ядерная энергетика, основу которой составляют энергоблоки на тепловых нейтронах в открытом топливном цикле, также не в полной мере отвечает параметрам биосферной совместимости, хотя и не выбрасывает в атмосферу CO_2, SO_2 и NO_X. Для нее присущи многие из вышеперечисленных факторов, главными из которых являются ресурсные ограничения, которыми она в виде ^{235}U обеспечена примерно на столетие, и проблемы отработанного ядерного топлива (ОЯТ), масса которого в течение последних трех десятилетий увеличилась примерно в четыре раза, а масса переработанного только в два [15].

Известно мнение о развитии атомной энергии Э. Ферми, человека с мировой известностью и авторитетом. Основные требования к атомной энергетике были сформулированы им еще в 1947 г. и до сих пор сохранили свою актуальность.

В научной среде они известны как «Мечта Ферми» (Fermi's Dream): безопасность, экономичность, решение проблем радиоактивных отходов и нераспространения ядерного оружия [16]. В существующей атомной энергетике с реакторами на тепловых нейтронах и открытым ядерным топливным циклом (ЯТЦ) эти четыре условия одновременно никогда не выполнялись. Действительно, на реакторах были аварии, требовавшие эвакуации населения, количество отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и связанные с ним проблемы накапливались и продолжают накапливаться, а их решение откладывалось на неопределенное будущее.

В то же время для РБН в составе двухкомпонентной ядерной энергетической системы с тепловыми реакторами в замкнутом ЯТЦ могут быть выполнены все четыре требования Э. Ферми:

– **Безопасность**. РБН – реакторы с внутренне присущей безопасностью, не имеющие запаса реактивности, который мог бы реализоваться при запроектной аварийной ситуации, поэтому исключается необходимость отселения населения, т. е. последствия аварии не выходят за пределы промышленной площадки.

– **Экономичность**. Это требование стало одной из причин, по которой атомная энергетика в СССР не достигла прогнозируемых уровней развития, поскольку ей приходилось соревноваться с большим количеством дешевого углеводородного топлива в стране. При разработке РБН выдвинуто требование конкурентоспособности не только по отношению к ВВЭР, но и к тепловым станциям и возобновляемым источникам. По мере удорожания углеводородов за счет сокращения запасов конкурентоспособность будет только увеличиваться. Если в ближайшем будущем законодательно будет ограничено использование углеводородного сырья, например угля из-за загрязнения окружающей среды, то иной энерготехнологии, кроме РБН с замыканием ЯТЦ, для масштабного производства энергии в мире не останется, по крайней мере, до появления термоядерной технологии.

– **Нераспространение**. В настоящее время мир уже обладает огромным потенциалом ядерного распространения, который возникает из взаимосвязи растущих и все более распространяемых знаний о ядерном оружии, расширения и совершенствования промышленных технологий в целом и накопления в огромных количествах ядерных материалов. Каждый из почти 400 полноразмерных легководных ядерных реакторов, работающих сегодня в мире, нарабатывает ~ 0,2 т плутония в год. Вместе с тем в мире уже сегодня функционирует международный режим ядерного нераспространения, основой которого является Договор о нераспространении ядерного оружия. Вместе с этими существующими институциональными мерами для РБН с замкнутым ЯТЦ предложены эффективные технологические внутренние барьеры, препятствующие нарушениям режима ядерного нераспространения [17,18]. Важнейшим из таких барьеров является исключение из топливного цикла разделительного производства – наиболее уязвимого элемента с точки зрения распространения.

– **Решение проблем высокоактивных отходов**. Технологии замкнутого ЯТЦ решают проблемы как образующегося ОЯТ, так и переработки уже накопленного. В настоящее время предложен ряд решений по хранению и захоронению РАО и развивается единая государственная система обращения с РАО.

Текущие годовые эффективные дозы облучения от выбросов БН-600 и БН-800 ($1{,}58 \cdot 10^{-7}$ Зв/год) сопоставимы с облучением населения от выбросов АЭС ВВЭР и на 1–2 порядка ниже, чем от выбросов АЭС РБМК [19], выводы об образовании РАО на РБН пока преждевременны, так как мал объем накопленной информации. Пока РБН формируют ~ 3 % жидких и ~ 1,4 % твердых радиоактивных отходов от всех АЭС РФ [20].

Таким образом, выполняя требования Э. Ферми, энергетическая система на основе РБН с замкнутым ЯТЦ позволит существенно увеличить долю экологически чистой атомной энергетики в энергетическом балансе и тем самым решить проблемы биосферной совместимости ядерной энергетики. Генеральный директор

Госкорпорации «Росатом» отмечал в своем выступлении в 2017 г. на конференции МАГАТЭ «Ядерная энергетика в 21-м веке»: «Замыкание топливного цикла позволит мирному атому стать экологически безопасным источником энергии с практически неисчерпаемым на многие тысячелетия ресурсом». Биосферная совместимость РБН с замкнутым ЯТЦ с окружающей средой позволит устойчиво их эксплуатировать в России и столь же успешно экспортировать в государства, которые решат развивать свои энергетические системы на основе таких реакторов [21].

5. Формирование общественного мнения и взаимодействие с населением

Практическое продвижение энергетических систем на основе РБН с замыканием ЯТЦ сегодня остро нуждается в общественной поддержке. В ряде публикаций отмечается, что нейтрального отношения или молчаливой поддержки уже недостаточно, необходимо формировать востребованное отношение [20–25]. Для этого следует использовать простые и понятные аргументы, из которых гражданин, далекий от рассматриваемых в настоящей работе проблем, запомнит один или два [26]. При разъяснении требований Э. Ферми необходимо подчеркивать, что решены проблемы ядерной и радиационной безопасности [27] быстрых реакторов с замкнутым ЯТЦ: в частности, обеспечена надежность и безопасность транспортировок при любых аварийных ситуациях [28], нормальная радиологическая обстановка в регионах расположения предприятий ГК «Росатом», которая в разы или даже на порядки меньше допустимых нормативных величин [29], доступность систематизированной информации для информирования населения [30]. В соответствии с действующим российским законодательством и рекомендациями МАГАТЭ следует обязательно информировать население о развитии атомной энергетики и строительстве тех или иных объектов использования атомной энергии [31].

6. Заключение

Рассмотрение биосферной совместимости быстрых реакторов с замкнутым ЯТЦ показывает, что они могут служить основой для устойчивого и безопасного развития биотехносферы на основе снабжения человечества экологически чистой энергией с топливообеспечением на многие столетия. Замыкание ЯТЦ с захоронением радиоактивных отходов в радиационно-эквивалентном и онко-эквивалентном состоянии по отношению к добываемому урановому сырью обеспечивает экологическую совместимость с окружающей средой.

Безопасность быстрых реакторов основана на физических принципах внутренне присущих этому типу реакторов, поскольку у них нет запаса реактивности, который мог бы реализоваться при запроектной аварийной ситуации и поэтому исключается необходимость отселения населения, т. е. последствия не выходят за пределы промышленной площадки. Выбросы в атмосферу не превышают соответствующих параметров ВВЭР.

Для формирования общественной поддержки развития атомной энергетики необходима целенаправленная информационная работа с разными группами населения, а самое главное – обучение школьников и молодежи с целью воспитания экологически грамотного населения, не подверженного беспричинной радиофобии.

7. Список литературы

1. *Розанцева, Л.* К вопросу о биосферно-совместимых городах / Л. Розанцева. – 2015. – URL: https://proza.ru/2015/12/15/626/ (дата обращения: 01.04.2023)
2. *Казаков, П. Н.* Принципы биосферной совместимости среды жизнедеятельности. Методологические основы / П. Н. Казаков // Сетевое издание «Бюллетень Экокульт», 2013. – URL: http://omskmark.moy.su/publ/bulletin_ecocult/ecoprom_novelty/2013_kazakov_p_n_principles_of _ecological_compatibility_of_the_living _environment/61-1-0-746 (дата обращения: 15.03.2023)

3. *Хейердал, Т.* Уязвимое море / Т. Хейердал. – Л. : Гидрометеоиздат, 1973. – С. 14.
4. Пределы роста / Д. Х. Медоуз, Д. Медоуз, Й. Рандерс, В. Беренс. – М. : МГУ, 1991.
5. Пределы роста. 30 лет спустя / Д. Х. Медоуз, Й. Рандерс, Д. Медоуз. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2007.
6. Мировая энергетика – 2050 (Белая книга) / В. В. Бушуев, А. М. Мастепанов, Н. К. Куричев [и др.]. – М. : Издательский дом «Энергия», 2011.
7. *Данилов-Данильян, В. И.* Устойчивое развитие и нескончаемые дискуссии о нем / В. И. Данилов-Данильян // Экологический ежегодник. – 2008. – № 2. – С.6–13.
8. *Пономарев, Л. И.* Без ядерной энергетики у нынешней цивилизации нет будущего / Л. И. Пономарев // Атомный эксперт. – 2018. – № 3–4. – С.70–75.
9. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле / под ред. Н. Н. Пономарева-Степного. – М. : Техносфера, 2016. – 139 с. – URL: http://elib.biblioatom.ru/text/dvuhkomponentnaya-yadernaya-systema_2016/ (дата обращения: 02.04.2023)
10. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами / под общ. ред. проф. Е. О. Адамова. – М. : Изд-во АО «НИКИЭТ», 2020. – 502 с.
11. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система как переход к новой технологической платформе ядерной энергетики / В. В. Шидловский, Н. В. Горин, Е. В. Кузнецов [и др.] // ВАНТ. Серия «Ядерно-реакторные константы». – 2022. – Вып. 3. – С. 62—68.
12. Paving the Way to Green Status for Nuclear Power / V. Pershukov, V. Artisyuk, A. Kashirsky // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – No. 15. – DOI: 10.3390/su14159339.
13. *Капица, П. Л.* Энергия и физика: Доклад на научной сессии, посвященной 250-летию Академии наук СССР, Москва, 8 октября 1975 г. / П. Л. Капица // Вестник АН СССР. –1976. – № 1. – С. 34–43. – URL: http://vivovoco.astronet.ru/VV/PAPERS/KAPITZA/KAP_10.HTM (дата обращения: 13.01.2021).
14. *Тетельман, В. В.* Физические основы традиционной и альтернативной энергетики / В. В. Тетельман, В. А. Язев. – Долгопрудный : Издательский дом «Интеллект», 2014.
15. Стратегия фракционирования ВАО от переработки ОЯТ / В. А. Кащеев, М. В. Логунов, А. Ю. Шадрин [и др.] // Радиоактивные отходы. – 2022. – № 2 (19). – С. 6–16. – DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-6-16.
16. *Водолага, Б. К.* Лев Феоктистов: Вспоминая прошлое, думал о будущем / Б. К. Водолага, В. Н. Кузнецов. – Екатеринбург : Банк культурной информации, 2022.
17. Барьеры на путях ядерного распространения при экспорте российских быстрых реакторов с замкнутым ЯТЦ (на примере БРЕСТ ОД-300) / Н. В. Горин, Е. В. Кузнецов, В. П. Кучинов [и др.] // Вестник НЯЦ. – 2021. – Вып. 4(88). – С. 16–21.
18. Обнаружение признаков нарушений обязательств по ядерному нераспространению государством-импортером быстрого реактора с установками замкнутого ЯТЦ / Н. В. Горин, А. Л. Карманов, В. Н. Первиненко [и др.] // Атомная энергия. – 2021. – Т.131. – Вып. 4. – С. 227–232.
19. Определение радионуклидного состава и оценка доз облучения населения за счет атмосферных выбросов российских АЭС / А. А. Екидин, М. Е. Васянович, А. В. Васильев [и др.] // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2022. – № 2(2). – С. 53–63. – DOI 10.56564/27825264_2022_2_53. – EDN YYWYPO
20. *Екидин А. А.* Применение удельного показателя для оценки объемов образования РАО при нормальной эксплуатации АЭС России / А. А. Екидин, К. Л. Антонов // Радиоактивные отходы. 2020. № 2 (11). С. 66—74. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-66-74.
21. (2022) Export prospects of fast reactors desined in Russia with closed nuclear fuel cycle facilities / N. V. Gorin, V. P. Kuchinov, A. V. Krivtsov [et al.] // Nuclear Energy and Technology 8(3): 153–159. – URL: https://doi.org/10.3897/nucet.8.80757 (дата обращения: 01.03.2023)
22. *Харви, Ш.* Стимулирование интереса молодежи к ядерной энергетике / Ш. Харви // Бюллетень МАГАТЭ. – Март. 2021. – С. 20–21.
23. Как заставить мир посмотреть на ядерную отрасль под другим углом / С. Бильбао-и-Леон // Бюллетень МАГАТЭ. – Март. 2021. – С. 28–29.
24. Н. В. Горин, А. А. Екидин, В. П. Кучинов [и др.] / Формирование общественного мнения в интересах развития и признания атомной энергетики экологически чистым источником энергии // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2022. – № 1 (1). – С. 102–111.

25. Воспитание у населения востребованного отношения к атомной энергетике / Н. В. Горин, Н. Л. Абрамова, С. В. Нечаева, О. С. Головихина // Государственное управление. Электронный вестник. – 2021. – № 87. – С. 7–18. DOI: 10.24412/2070-1381-2021-87-7-18.
26. Аргументы для разных категорий населения в интересах формирования поддержки развития атомной энергетики / Н. В. Горин, Е. В. Кузнецов, Б. К. Водолага [и др.] // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2023 по направлению «Инновационные ядерные технологии»: сб. науч. тр. всерос. науч.-практ. конф. 31 января – 2 февраля 2023 г. – М. : НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2023. – 149 с. – С. 24–28. – URL: https://www.sphti.ru/wp-content/uploads/2023/04/%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%8B_2023.pdf (дата обращения: 01.03.2023).
27. *Горин, Н. В.* Обоснование ядерной и радиационной безопасности контейнера для отработавших ТВС реакторов АМБ Белоярской АЭС / Н. В. Горин, Я. З. Кандиев, Ю. И. Чернухин // Атомная энергия. – 2006. – Т. 100. – Вып.6. – С. 423–428.
28. *Анфалова, О. В.* Вывоз ОЯТ реакторов АМБ-100 и АМБ-200 Белоярской АЭС на ПО «Маяк» / О. В. Анфалова, Н. В. Горин, В. С. Краев // Вопросы радиационной безопасности. – 2019. – № 2. – С. 47–52.
29. *Панченко, С. В.* Радиологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома / С. В. Панченко, И. И. Линге, К. В. Сахаров. – М. : «САМ полиграфист», 2015.
30. Систематизация информации для работы с населением в интересах атомной энергетики / О. С. Головихина, Н. В. Брехова, Н. В. Горин, Д. В. Шмаков // Вестник ЧГПУ. – 2018. – № 1. – С. 58–66.
31. Привлечение заинтересованных сторон к решению ядерных вопросов. INSAG-20 // Доклад Международной группы по ядерной безопасности. – Вена : МАГАТЭ, 2015. – 21 с.

Сведения об авторах:

Горин Николай Владимирович, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина», к.ф.-м.н., в.н.с.; 456770, Челябинская обл., г. Снежинск, ул. Васильева, 13. Эл. почта: vkuchinov@bk.ru n.gorin@vniitf.ru

Кучинов Владимир Петрович, НИЯУ МИФИ, доцент; 115409, Москва, Каширское ш., 31.

Декусар Виктор Михайловия, АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»; 249033, г. Обнинск, Калужская обл., пл. Бондаренко, 1.

Шидловский Владимир Владиславович, АО «Прорыв», к. т. н, нач. управления; 107140, Москва, ул. Малая Красносельская 2/8, корп. 4.

BIOSPHERE COMPATIBILITY OF FAST REACTORS WITH A CLOSED NUCLEAR FUEL CYCLE

N. V. Gorin [1], V. P. Kuchinov [2], V. M. Dekusar [3], V. V. Shidlovsky [4]

[1] FSUE "RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin", Snezhinsk, Chelyabinsk Reg., Russia
[2] National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia
[3] A.I. Leypunsky Institute for Physics and Power Engineering, Obninsk
[4] JSC "Proryv", Moscow, Russia

Any human activity has a negative impact on the environment, the greatest contribution to which is made by energy production. The main challenges of our time that threaten sustainable development – global warming, the greenhouse effect arise from emissions of carbon dioxide into the atmosphere and general environmental pollution. It is shown that the main modern environmental pollutants – objects of hydrocarbon energy, industry and transport do not satisfy biosphere compatibility and threaten the sustainable development of mankind. Sustainable development requires environmentally friendly energy in the amount of at least ten billion tons per year (>3-5·10^{20} J/year). Renewable energy sources (solar, wind, etc.) will not cope with this task, since they have a low energy flow density. We need a new technology that produces several orders of magnitude more energy and less waste per unit mass of raw materials. It is shown that nuclear power engineering with fast neutron reactors and closed NFC is a technology with better biosphere compatibility compared to other renewable energy sources.

Key words: biosphere compatibility; sustainable development; fast reactors; closed fuel cycle.

References

1. *Rozantseva, L.* K voprosu o biosferno-sovmestimykh gorodakh [On the Issue of Biosphere-Compatible Cities] / L. Rozantseva. – 2015. – URL: https://proza.ru/2015/12/15/626/ (in Russian) (accessed: 01.04.2023).
2. *Kazakov, P. N.* Printsipy biosfernoi sovmestimosti sredy zhiznedeyatelnosti. Metodologicheskie osnovy [Principles of Ecological Compatibility of the Living Environment] / P. N. Kazakov // Setevoe izdanie «Byulleten Ekokult» [Web publishing "Bulletin Ecocult"], 2013. – URL: http://omskmark.moy.su/publ/bulletin_ecocult/ecoprom_novelty/2013_kazakov_p_n_principles_of_ecological_compatibility_of_the_living_environment/61-1-0-746 (in Russian) (accessed: 15.03.2023).
3. *Hejerdal, T.* Uiazvimoe more [Vulnerable Sea] / T. Hejerdal – L.: Gidrometeoizdat [Meteorological Publisher], 1973. – P. 14 (in Russian).
4. The Limits to Growth / D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, W. Behrens. – New York: University Books, 1972.
5. The Limits to Growth. The 30-Year Update / D. H. Meadows, J. Randers, D. L. Meadows. – Vermont: Chelsea Green Publishing, 2004.
6. Mirovaia energetika – 2050 (Belaia kniga) [World Power – 2050 (White Book)] / V. V. Bushuev, A. M. Mastepanov, N. K. Kurichev [et al.]. – Moscow: Izdatelskiy dom «Energiya» [Publishing house «Energy»], 2011 (in Russian).
7. *Danilov-Danilyan, V. I.* Ustoichivoye razvitiie i neskonchaiemyie diskussii o nem [Sustainable Development and Never-ending Discussions about It] / V. I. Danilov-Danilyan // Ekologicheskii ezhegodnik [Ecological Annual]. – 2008. – No. 2. – pp. 6–13 (in Russian).
8. *Ponomarev, L. I.* Modern Civilization Doesn't Have Future without Nuclear Energy / L. I. Ponomarev // Nuclear Expert. – 2018. – No. 3–4. – pp. 70–75 (in Russian).

9. Dvuhkomponentnaia iadernaia energeticheskaia sistema s teplovymi i bystrymi reaktorami v zamknutom iadernom toplivnom tsikle [Two-component Nuclear Power System with Thermal and Fast Reactors in a Closed Nuclear Fuel Cycle] / N. N. Ponomarev-Stepnoy (Eds.). – M.: Tekhnosfera [Moscow: Technospere], 2016, p. 139. – URL: http://elib.biblioatom.ru/text/dvuhkomponentnaya-yadernaya-systema_2016/ (in Russian). (accessed: 02.04.2023)
10. Belaia kniga iadernoi energetiki. Zamknutyi IaTTs s bystrymi reaktorami [White Book of Nuclear Energy. Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors] / Adamov E. O. (Ed.). – M: Izdatelstvo AO «NIKIET» [Publisher JSC “NIKIET”], 2020 (in Russian) – 502 p.
11. Two-Component Nuclear Power System as a Transition Towards a New Technological Platform for Nuclear Power / V. V. Shidlovsky, N. V. Gorin, E. V. Kuznetsov [et al.] // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants. – 2022. – No. 3. – pp. 62–68. – URL: https://vant.ippe.ru/en/year2022/3/radiation-technologies/2223-6.html (accessed: 16.11.2022)
12. Paving the Way to Green Status for Nuclear Power / V. Pershukov, V. Artisyuk, A. Kashirsky // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – Is. 15. – DOI: 10.3390/su14159339.
13. *Kapica, P. L.* Energy and Physics. Report to the scientific session on the 250-th Anniversary of the USSR Academy of Sciences. 08.10.75 / P. L. Kapica // Vestnik AN USSR. – 1976. – No 1. – pp. 34–43. – Moscow. – URL: http://vivovoco.astronet.ru/VV/PAPERS/KAPITZA/KAP_10.HTM (accessed: 13.01.2021)
14. *Tetelman, V. V.* Fizicheskie osnovy traditsionnoi i alternativnoi energetiki, [Physical Foundations of Traditional and Alternative Energy] / V. V. Tetelman, V. A. Yazev. – Dolgoprudny: Izdatelskij dom «Intelekt» [Publisher: Intellect], 2014 (in Russian).
15. Strategy for the Fractionation of HLW from SNF Reprocessing / V. A. Kashcheev, M. V. Logunov, A. Yu. Shadrin [et al.] // Radioactive Waste. – 2022. – No. 2 (19). – pp. 6–16. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-6-16 (in Russian).
16. *Vodolaga, B. K.* Lev Feoktistov: Vspominaya proshloe, dumal o budushchem [Lev Feoktistov: Remembering the Past, Thought about the Future] / B. K. Vodolaga, V. N. Kuznetsov. – Yekaterinburg: Bank kul’turnoy informatsii [The Bank of Cultural Information], 2022 (in Russian).
17. Bariery na putyakh iadernogo rasprostraneniia pri eksporte rossiiskikh bystrykh reaktorov s zamknutym IaTTs (na primere BREST OD-300) [Barriers on Ways of Nuclear Distribution at Export of the Russian Fast Reactors with Closed Nuclear Fuel Cycle (on an example Brest ОД-300)] / N. V. Gorin, E. V. Kuznetsov, V. P. Kuchinov [et al.] // Vestnik NIaTs [The Herald of the National Nuclear Center]. – 2021. – No. 4(88). – pp. 16–21, doi.org/10.52676/1729-7885-2021-4-16-21 (in Russian).
18. Detection the Violations of Nuclear Non-proliferation Obligations by the State Importing Fast Reactor with Closed Nuclear Fuel Cycle / N. V. Gorin, A. L. Karmanov, V. N. Pervinenko [et al.] // Atomic Energy. – 2021. – Vol. 131. – No. 4. – pp. 227–232.
19. Determination of the Radionuclide Composition and Assessment of Dose of Population Exposure Due to Atmosphere Emission from Russian NPPS / A. A. Ekidin, M. E. Vasyanovich, A. V. Vasilyev [et al.] // Research Trajectory – Human, Nature, Technology (In Russian). – 2022. – No. 2 (2). – pp. 53–63. – DOI 10.56564/27825264_2022_2_53. – EDN YYWYPO.
20. *Ekidin, A. A.* Application of a Specific Indicator for the Estimation of Radioactive Wastes Generation Volumes During Normal Operation of Nuclear Power Plants in Russia / A. A. Ekidin, K. L. Antonov // Radioactive Waste. – 2020. – No. 2 (11). – pp. 66–74. (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-66-74.
21. Gorin N. V., Kuchinov V. P., Krivtsov A. V., Orlov A. I., Shidlovskiy V. V., Matveeva D. B. Export Prospects of Fast Reactors Designed in Russia with Closed Nuclear Fuel Cycle Facilities. Nuclear Energy and Technology, 2022, no. 8(3), pp. 153–159, https://doi.org/10.3897/nucet.8.80757
22. *Harvey, S*. Spurring Youth Interest in Nuclear / S. Harvey // IAEA Bulletin. – 2021. – pp. 20–21.
23. Finding a New Voice for Nuclear / Sama Bilbao y León // IAEA Bulletin. – 2021. – pp. 28–29.
24. Forming of public opinion in the interests of the development and recognition of nuclear power as an environmentally friendly source of energy / N. V. Gorin, A. A. Ekidin, V. P. Kuchinov [et al.] // Research Trajectory – Human, Nature, Technology (In Russian). – 2022. – No. 1 (1). – pp. 102–111.
25. Fostering Respectful Attitude towards Nuclear Industry / N. V. Gorin, N. L. Abramova, S. V. Nechaeva, O. S. Golovikhina // Public Administration. E-journal. – 2021. – No. 87. – pp. 6–24. – DOI: 10.24412/2070-1381-2021-87-7-18.

26. Arguments for Different Categories of the Population in the Interests of Support Formation of the Development of Nuclear Energy / N. V. Gorin, E. V. Kuznetsov, B. K. Vodolaga [et al.] // Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference, 2023. – pp. 24-28, https://www.sphti.ru/wp-content/uploads/2023/04/%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%8B_2023.pdf.
27. *Gorin, N. V.* Validation of Nuclear and Radiation Safety of a Container for Spent AMB Reactor Fuel Assemblies at the Beloyarskaia Nuclear Power Plant / N. V. Gorin, Ya. Z. Kandiev, Yu. I. Chernukhin // Atomnaia energiia [Nuclear Energy]. – 2006. – Vol. 100. – No. 6. – pp. 423–428.
28. *Anfalova, O. V.* Transport of the AMB-100 and AMB-200 Reactors SNF from Beloyarsk NPP to PA «Mayak» / O. V. Anfalova, N. V. Gorin, V. S. Kraev // Radiation Safety Problems. – 2019. – No. 2. – pp. 47–52.
29. *Panchenko, S. V.* Radiologic Environment in the Regions with Rosatom Enterprises / S. V. Panchenko, I. I. Linge, K. V Sakharov [et al.]. – M.: «Sam poligrafist» [Self Print], 2015.
30. Customizing Information for the Work with Population to the Benefit of Nuclear Power Engineering / O. S. Golovikhina, N. V. Brehova, N. V. Gorin, D. V. Shmakov // the Herald of Chelyabinsk State Pedagogical University. – 2018. – No. 1. – pp. 58–66.
31. Stakeholder Involvement Throughout the Life Cycle of Nuclear Facilities, IAEA, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1520_web.pdf.