

КРУПНОМАСШТАБНАЯ ЧИСТАЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЯ БУДУЩЕГОН. В. Горин ¹, В. П. Кучинов ², В. В. Шидловский ³, А. В. Моисеев ⁴¹ ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск, Россия² НИЯУ МИФИ, Москва, Россия³ АО «Прорыв», Москва, Россия⁴ АО «НИКИЭТ им. Н. А. Доллежала», Москва, Россия

Отмечается, что любая технология, преобразующая энергию первичных источников в тепло, механическое движение или электричество, за время своего жизненного цикла неизбежно производит отходы и загрязняет окружающую среду. В течение ближайшего столетия неизбежно придется изменять существующую структуру энергетики, уменьшать долю действующих углеводородных энерготехнологий и увеличивать долю чистых. Условия, которым они должны удовлетворять, просты и соответствуют общечеловеческим ценностям, но пока ни одна из существующих энерготехнологий полностью им не удовлетворяет. Ожидается, что всем условиям удовлетворит крупномасштабная атомная энергетика на основе реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым ядерным топливным циклом, которые пока находятся в стадии отработки. Для такого перехода потребуются политическая воля, инвестиции и поддержка населения. Отмечается, что атомная энергетика пока не пользуется поддержкой населения, сложившиеся фобии и стереотипы возникают быстро, живут долго, изменяются медленно, население продолжает связывать с атомной энергетикой возможности аварий с радиоактивным загрязнением. Для изменения такого отношения предлагается проводить непрерывную информационно-разъяснительную работу с разными группами населения, а для воспитания молодого поколения с новым отношением к атомной энергетике ввести специализированный курс в школьные и вузовские учебные программы. Предлагается привлечь к решению проблемы перехода к крупномасштабной атомной энергетике энергетические корпорации, которые могут начать финансирование работ, прогнозируя возможные предпочтения в средне- и долгосрочной перспективе. Сделан вывод, что атомная энергетика, производящая на единицу массы сырья на несколько порядков больше энергии и меньше отходов относительно традиционной углеводородной, будет крупномасштабной чистой энерготехнологией будущего, но ее широкое использование потребует воли политиков, инвестиций и поддержки населения.

Ключевые слова: крупномасштабная энерготехнология; стереотипы и фобии; реакторы на быстрых нейтронах; замкнутый ядерный топливный цикл; объемы потребляемого сырья; объемы образующихся отходов.

1. Введение

Любая технология, преобразующая энергию первичных источников в тепло, механическое движение или электричество, в течение своего жизненного цикла неизбежно производит отходы и загрязняет окружающую среду. Абсолютно чистых энерготехнологий, не влияющих на окружающую среду и условия жизни населения, не существует. Словосочетания «чистая энерготехнология» в названии статьи и «биосферно совместимая энерготехнология» в тексте подразумевают лучшую из существующих технологий, которая способна стать основой крупномасштабной энергетики будущего, одной или в сочетании с другими [1].

Современные энергетические технологии основаны в большинстве своем на сжигании угля, нефти и газа. Методы утилизации образующихся отходов всегда были традиционны – газообразные выбрасывались в атмосферу, жидкие сливались в водоемы в расчете на то, что они распределятся в больших объемах воздуха или

воды, их концентрации существенно уменьшатся и не окажут влияния на окружающую среду. Методы были приемлемы и работоспособны до тех пор, пока население планеты не превышало 1 млрд чел., выброс CO_2 в атмосферу был малым и природа справлялась с его утилизацией.

В настоящее время объем отходов от техногенной деятельности существенно увеличился и начал приходить в противоречия с возможностью среды по их утилизации, что обуславливает основные вызовы современности – загрязнение окружающей среды и, возможно, глобальное потепление. Противоречия нарастают быстро, запас времени у цивилизации, скорее всего, ограничен временем жизни двух-трех поколений людей, промедление в их решении может иметь достаточно серьезные последствия, показанные полвека назад в работах Римского клуба [2, 3].

Прогнозируемые запасы углеводородного сырья (нефти и газа) даже при их текущем потреблении будут в основном исчерпаны в течение ближайшего столетия [4]. Запасы угля существенно больше, но его применение в масштабах, компенсирующих исчерпание нефти и газа, может привести к экологической катастрофе, что недопустимо. Поэтому в течение ближайшего столетия неизбежно придется менять существующую структуру энергетики, уменьшать долю действующих углеводородных энерготехнологий и увеличивать долю чистых. В противном случае становится сомнительным не только устойчивое развитие цивилизации, но и ее существование с численностью ~8–10 млрд чел.

2. Роль парниковых газов в глобальном потеплении

Технология выброса газообразных отходов в атмосферу, а никакой другой у цивилизации пока нет, привела к тому, что по мере роста численности населения и опережающего роста производства энергии и материальных благ нарастал совокупный выброс CO_2 в атмосферу. Так, с 1850 по 2019 г. выброс составил $2\,400 \pm 240$ Гт, из которых более половины (58 %) произошло с 1850 по 1989 г., а около 42 % – в период с 1990 по 2019 г. [5]. Самое тревожное то, что ограничений и снижений выбросов пока не ожидается.

Масса атмосферы $5 \cdot 10^6$ Гт, при концентрации CO_2 300 ppm его исходное количество в атмосфере 1 500 Гт. Таким образом, за последние 170 лет, а это незначительный срок в глобальных процессах планеты, произошел залповый выброс CO_2 , количество которого в 1,5 раза превышало его содержание в атмосфере, причем 42 % выброса реализовалось за последние 30 лет. За последние ~60 лет суша и океан поглотили около половины выброшенного газа (~56 % в год). Непоглощенный газ увеличил свою концентрацию в атмосфере, начиная от 290 ppm (1850 г.) до 410 ppm (2019 г.), т. е. возможности природы по утилизации отходов оказались ограничены. Происходит накопление парниковых газов в атмосфере, на рис. 1 показана экспериментальная зависимость глобальной приземной температуры от кумулятивных выбросов углекислого газа с экстраполяцией по разным сценариям (заимствовано из [6] с минимальным редактированием).

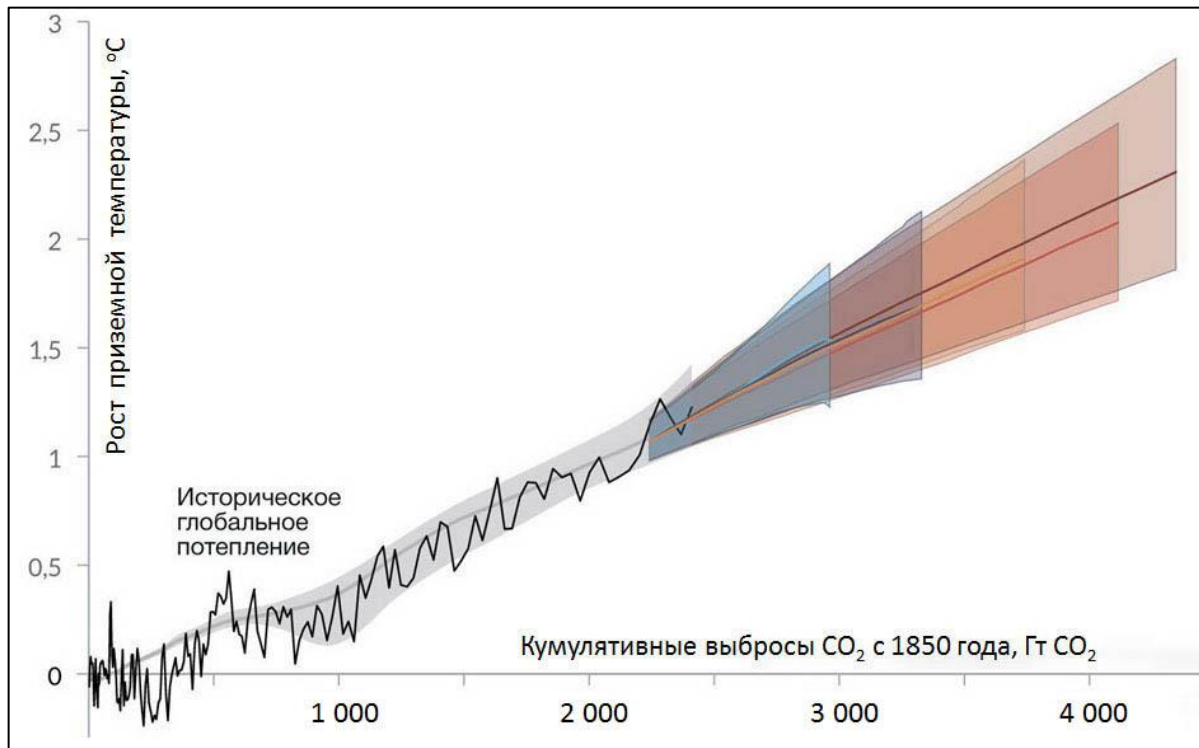


Рис. 1. Рост приземной температуры в зависимости от кумулятивных выбросов CO_2

Зависимость линейна, и можно прогнозировать, что при сохранении сложившейся интенсивности выбросов к 2050...2070 гг. рост глобальной приземной температуры достигнет двух градусов с соответствующими неблагоприятными климатическими изменениями. Возможность замедления ее роста будет зависеть от загрязнения атмосферы основными загрязнителями – объектами углеводородной энергетики, т. е. решение проблем с выбросами CO_2 становится весьма актуальным [7].

Объем отходов от производства энергии дополняется отходами от добычи углеводородных энергоносителей. Так, в 2017 г. на территории Российской Федерации, по данным Росприроднадзора, образовалось 6 220,6 млн т отходов [8]. Наибольшее количество отходов в 2017 г. отмечено в Сибирском федеральном округе – 4 417,6 млн т, или 71 % от общего количества по стране. Столь значительные объемы связаны с добычей угля в Кемеровской области, основном угледобывающем регионе Российской Федерации, и образованием большого количества вскрышных пород, которые являются отходом V класса опасности.

3. Энергоноситель

Современная структура мировой энергетики основывается на сжигании углеводородного сырья, за счет чего производится ~80 % энергии, но его запасы ограничены (рис. 2).

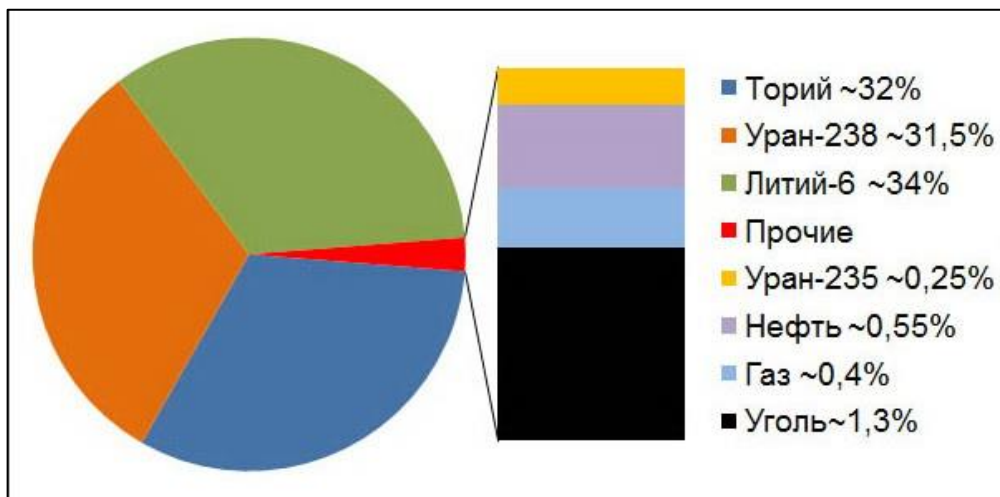


Рис. 2. Мировое распределение энергетических ресурсов [9]

В разных литературных источниках имеется большой разброс данных по запасам/ресурсам тория и лития, но тем не менее доля углеводородов и относительно дешевого урана-235 в энергетическом балансе мала и не превышает единиц процентов, поэтому снижение доли углеводородов придется компенсировать ядерным энергоносителем, т. е. переходить на атомную энергетику. Это позволит на единицу массы сырья на несколько порядков увеличить производство энергии и уменьшить массу отходов. Действительно, в единичном акте получения энергии при сгорании углеводородного топлива происходит химическая реакция $C+O_2 \rightarrow CO_2+4,2 \text{ эВ}$. В реакторе происходит ядерная реакция $U, Pu + n \rightarrow 2 \text{ осколка} + 200 \text{ МэВ}$ и выделяется на 7 порядков больше энергии.

Заманчиво было бы вообще отказаться от энергоносителей (в привычном смысле этого слова) и использовать возобновляемые источники энергии, которыми человек веками пользовался, – солнечным теплом, силой ветра и воды. Однако ресурсы гидроэнергетики уже практически исчерпаны, а П. Л. Капица полвека назад показал, что солнечная и ветровая энергетика не сможет решить крупномасштабные энергетические проблемы из-за малой плотности потока энергии [10]. Однако для решения бытовых вопросов, требующих меньших масштабов энергии, их использование оправдано.

4. Требования к крупномасштабной чистой энерготехнологии

Основные требования к крупномасштабной чистой энерготехнологии – ее безопасность, конкурентоспособность и, естественно, биосферная совместимость, причем термин «безопасность» подразумевает ресурсную, эксплуатационную и утилизационную безопасность [11].

В этот перечень можно было бы подключить и «энергетическую безопасность», которую много обсуждают в последнее время. При этом ее обеспечение видят в диверсификации энергоносителей, забывая при этом о надежности производства энергии самими энергосистемами.

Как известно, сегодня при обсуждении вопроса перехода на чистую энергетику основной упор делается на расширение использования солнечной и ветровой энергетики, которая весьма зависима от наличия ветра и солнца. Также предполагается продолжение использования углеводородной энергетики с использованием систем улавливания и хранения углерода. В отношении же более широкого использования атомной энергетики, зарекомендовавшей себя в качестве надежного источника энергии, можно наблюдать весьма широкий разброс мнений – от полного ее отрицания до использования в качестве поддержки ветровой и

солнечной энергетики с использованием реакторов средней и малой мощности [12–14].

В то же время те преобразования в энергетическом секторе, которые необходимо будет осуществить для перехода к крупномасштабной чистой энергетике, носят фундаментальный характер и потребуют от руководителей государств, политиков и населения не только понимания, но непосредственного осуществления преобразований.

В этой связи важно понимать условия, которым такая энергетика должна удовлетворять. Они достаточно просты, соответствуют общечеловеческим проблемам, если не замыкаться на национальных интересах какой-либо одной страны.

Крупномасштабная чистая энергетика должна:

1. Обладать лучшей биосферной совместимостью из доступных энерготехнологий и оказывать минимальное влияние на условия жизни населения в процессе производства энергии. Неизбежные радиоактивные отходы атомной энергетики будут представлять потенциальную опасность для населения, но они надежно изолируются. Отходы угольной, нефтяной и газовой промышленности опасны для окружающей среды и населения, но не изолируются.

2. Производить не менее $\sim 3\text{--}5 \cdot 10^{20}$ Дж/год. В настоящее время современная энергетика производит 14,3 млрд т. н. э. энергии ($6 \cdot 10^{20}$ Дж/год) [15].

3. Последствия любой техногенной аварии, неизбежной на любом производстве, не должны выходить за пределы производственной площадки.

4. Процесс получения энергии не должен сопровождаться выбросами вредных веществ или, по крайней мере, их должно быть мало, или они должны быть надежно локализованы как при штатной работе, так и при аварийных ситуациях.

5. Локализуемые отходы не должны быть физически и химически более активны, чем исходное топливное сырье.

6. Не зависеть от неопределенностей с обеспечением топливным сырьем как минимум на ближайшие сотни лет.

Ни одна из существующих энерготехнологий полностью этим требованиям пока не удовлетворяет. Первому из перечисленных требований удовлетворяет атомная энергетика и технологии на возобновляемых источниках – солнечная, ветровая, гидроэнергетика, приливная, геотермальная. Однако выработкой электроэнергии солнечными и ветровыми технологиями и передачей ее в сеть трудно управлять. Второму условию удовлетворяет только существующая атомная энергетика с тепловыми реакторами и открытым топливным циклом, а остальным – сможет удовлетворить создаваемая технология с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым топливным циклом.

5. Особенности перехода к крупномасштабной атомной энергетике

Реализация полного перехода к новой крупномасштабной энергетике с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым ядерным топливным циклом в течение текущего столетия представляется сложной задачей. В настоящее время производимая в мире энергия с помощью атомной энерготехнологии составляет $\sim 5\%$, а в производстве электроэнергии $\sim 10\%$. Для решения экологических проблем ее необходимо будет кратно увеличить, например, до $\sim 50\text{--}70\%$, понимая, что остальные потребности в энергии будут обеспечиваться гидроэнергетикой, солнечной и ветровой и за счет экологически безопасного сжигания биотоплива.

Для такого перехода потребуются концентрации значительных финансовых ресурсов и производительных сил, которые есть в распоряжении современной цивилизации [16]. Действительно, мировые инвестиции в развитие возобновляемых источников энергии измеряются сотнями миллиардов долларов, а в атомную – менее десяти. Однако надеяться на возобновляемые источники энергии довольно рискованно, что подтвердилось энергетической ситуацией в Европе в 2022 г. Тем не

менее развитие возобновляемых источников энергии следует продолжать, они будут использоваться там, где не требуются большие базовые мощности. Основой же новой энергетики должна стать крупномасштабная атомная энергетика с использованием реакторов на быстрых нейтронах с замыканием ядерного топливного цикла.

Потребность в значительных инвестициях и трудности на пути перехода к такой энергетической технологии не должны смущать политиков в достижении поставленной цели. Так, в прошлом веке Франция запускала ежегодно по 6–8 реакторов, в настоящее время примерно столько же строит Китай. Страны с наибольшей долей электроэнергии, производимой на АЭС, – Франция (69 %), Словакия (52 %), Бельгия (47 %). В настоящее время Белорусская АЭС производит ~30 % электроэнергии в стране, а с вводом второго энергоблока эта доля удвоится. Российские АЭС производят 19,9 % электроэнергии в стране.

6. Поддержка атомной энергетики обществом

Кроме инвестиций, существует еще одна проблема – отношение населения к атомной энергетике со сложившимися у него фобиями и стереотипами, с опасениями аварий типа чернобыльской или Фукусимы, с опасениями радиоактивного загрязнения местности, влиянием на здоровье и пр. Население активно не протестует, но и не поддерживает развитие ядерных технологий, у него нет востребованного отношения к развитию атомной энергетики [17, 18]. Изменить это отношение можно непрерывной информационно-разъяснительной работой с разными группами населения, понимая, что это достаточно долгий процесс. Более эффективно и быстро результат может быть достигнут при введении соответствующих учебных дисциплин в школьные и вузовские программы, в результате чего через 5–10 лет в жизнь вступит полноправное молодое поколение с новым отношением к атомной энергетике [19–21].

Одновременно, как представляется, целесообразно привлекать к решению проблемы перехода к крупномасштабной атомной энергетике энергетические корпорации, которые могут начать финансирование работ в интересах предстоящих выгод в средне- и долгосрочной перспективе. Такая работа за рубежом активно проводится. Как правило, руководство таких корпораций полностью владеет основной информацией, убеждено в безопасности атомных энерготехнологий и соблюдении режима ядерного нераспространения [22–24]. Они могут прогнозировать появление законодательно принятых преференций, а возможно, смогут инициировать их сами для крупномасштабных чистых энерготехнологий, включая атомную энергетiku. Преференции могут быть значительными, т. к. от чистой энерготехнологии будет зависеть не только устойчивое развитие цивилизации, но даже ее существование, и в этой связи можно предположить, что крупные энергетические корпорации могут начать финансирование работ, не дожидаясь поддержки и востребованного отношения населения.

7. Заключение

1. В настоящее время окружающая среда уже не справляется с утилизацией отходов, образующихся от техногенной деятельности современной цивилизации, насчитывающей около 8 млрд человек. Так, в частности, в атмосфере накапливаются газообразные отходы от сжигания углеводородных энергоносителей и, возможно, тем самым они инициируют глобальное потепление.

2. Необходима замена традиционной углеводородной энергетики, основанной на сжигании угля, нефти и газа, на чистую, способную на единицу сырья производить на несколько порядков больше энергии и меньше отходов. Такой крупномасштабной энергетикой может быть атомная с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым ядерным топливным циклом.

3. Для перехода на новую энергетическую платформу необходимо решение политиков, а также инвестиции и формирование у населения востребованного отношения к атомной энергетике. Наиболее эффективно это может быть достигнуто при введении специализированных учебных дисциплин в школьные и вузовские программы.

4. Представляется целесообразным привлекать к решению проблемы перехода к крупномасштабной атомной энергетике крупные энергетические корпорации, которые могут начать финансирование работ в интересах предстоящих выгод в средне- и долгосрочной перспективе.

8. Список литературы

1. Биосферная совместимость быстрых реакторов с замкнутым ядерным топливным циклом / Н. В. Горин, В. П. Кучинов, В. М. Декусар, В. В. Шидловский // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2023. – Вып. 2(6). – С. 28–38.
2. Пределы роста / Д. Медоуз, Д. Медоуз, Й. Рандерс, В. Беренс III. – М. : МГУ, 1991.
3. Медоуз, Д. Пределы роста. 30 лет спустя / Д. Медоуз, Й. Рандерс, Д. Медоуз. – М. : ТКЦ Академкнига, 2007. – 496 с.
4. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами / под общей ред. проф. Е. О. Адамова. – М. : НИКИЭТ, 2020.
5. МГЭИК, 2023 г.: Резюме для политиков. Изменение климата 2023: Обобщающий отчет. Доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Вклад рабочих групп I, II и III в Шестой оценочный отчет Межправительственной группы экспертов по изменению климата [Основная группа авторов, Х. Ли и Дж. Ромеро (ред.)] // МГЭИК, Женева, Швейцария, 36 с.
6. Изменение климата, 2021 год. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Резюме для политиков // МГЭИК. 2021. Швейцария.
7. 2022 Intergovernmental Panel on Climate Change. Electronic copies of this Summary for Policymakers are available from the IPCC website www.ipcc.ch
8. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». – М. : Минприроды России; НПП «Кадастр», 2018. – 888 с.
9. Быстрый реактор с высокой избыточной наработкой делящихся нуклидов в двухкомпонентной ядерной энергетике с U-Pu и Th-U-Pu топливным циклом / П. Н. Алексеев, Е. А. Андрианова, В. Ю. Бландинский [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2020. – вып. 5. – С. 53–65.
10. Капица, П. Л. Энергия и физика: Доклад на научной сессии, посвященной 250-летию Академии наук СССР, Москва, 8 октября 1975 г. // Вестник АН СССР. – 1976. – № 1. – С. 34–43. – URL: http://vivovoco.astronet.ru/VV/PAPERS/KAPITZA/KAP_10.HTM (дата обращения: 13.01.2021).
11. Белая книга ядерной энергетики / Е. О. Адамов, Л. А. Большов, И. Х. Ганев [и др.] М. : ГУП НИКИЭТ, 2001.
12. Nuclear energy – The solution to climate change? / N. Muellner, N. Arnold, K. Gufler [et al.] // Energy Policy. 155 (2021), 1–10.
13. Kaplienko, A. 2023. Renewable energy sources: is it a panacea for global electricity generation or not? / A. Kaplienko, B. Gabaraev // Obozrevatel/Observer. 3 (2023). – 27–36.
14. Pershukov, V. Paving the Way to Green Status for Nuclear Power / V. Pershukov, V. Artisyuk, A. Kashirsky // Sustainability. – 2022. – 14. – 9339. – URL: <https://doi.org/10.3390/su14159339>. [Электронный ресурс]: <file:///C:/Users/User/Downloads/sustainability-14-09339-v2-2.pdf> (дата обращения: 21.05.23).
15. Global Energy and CO₂ Status Report 2018 // International Energy Agency [Электронный ресурс]. – URL: https://www.eenews.net/assets/2019/03/26/document_cw_01.pdf (дата обращения: 05.02.2021).
16. Харитонов, В. В. Сценарии развития мировой ядерной энергетики / В. В. Харитонов // Атомный эксперт. – 2019. – № 1. С. 47–53.
17. Харви, Ш. Стимулирование интереса молодежи к ядерной энергетике / Ш. Харви // Бюллетень МАГАТЭ. – Март. – 2021. – С. 20–21.

18. Бильбао-и-Леон, С. Как заставить мир посмотреть на ядерную отрасль под другим углом / С. Бильбао-и-Леон // Бюллетень МАГАТЭ. – Март. – 2021. – С. 28–29.
19. Горин, Н. В. Аргументы для разных категорий населения в интересах формирования поддержки развития атомной энергетики / Н. В. Горин, Е. В. Кузнецов, Б. К. Водолага // 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: 21.05.23).
20. 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
21. Атомная энергетика как основа устойчивого развития / Н. В. Горин, Б. К. Водолага, В. П. Кучинов, В. В. Шидловский // Государственное управление. Электронный вестник. – 2022. – № 95. – С. 7–19. – DOI: 10.24412/2070-1381-2022-95-7-19.
22. Обнаружение признаков нарушений обязательств по ядерному нераспространению государством-импортёром 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.
23. 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. – URL: <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-4-16-21> (дата обращения: ...).
24. Обеспечение режима ядерного нераспространения при экспорте реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом / Н. В. Горин, Н. П. Волошин, Ю. И. Чуриков [и др.] // Атомная энергия. – 2021. – Т.130. – Вып. 1. – С. 48–51.

Сведения об авторах:

Горин Николай Владимирович, к. ф.-м. н., в. н. с. ФГУП «РФЯЦ–ВНИИТФ имени академика Е. И. Забабахина», г. Снежинск, Россия. Эл. почта: n.gorin@vniitf.ru

Кучинов Владимир Петрович, доцент НИЯУ МИФИ, Москва, Россия.

Шидловский Владимир Владиславович, к. т. н., руководитель управления АО «Прорыв», Москва, Россия.

Моисеев Андрей Владимирович, к. ф.-м. н., научный руководитель проекта БРЕСТ-ОД-300, научный руководитель проекта БРЕСТ-ОД-300, Москва, Россия.

FUTURE LARGE-SCALE “CLEAN” ENERGY TECHNOLOGY

N. V. Gorin ¹, V. P. Kuchinov ², V. V. Shidlovsky ³, A. V. Moiseev ⁴

¹FSUE RFNC - VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin, 13 Vasilyev Str., 456770 Snezhinsk, Chelyabinsk Reg., Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, 31, Kashirskoe shosse, 115409, Moscow

³JSC «Proryv», 2/8 Malaya Krasnoselskaya Str., 107140 Moscow, Russia

⁴NIKIET JSC, 2/8 Malaya Krasnoselskaya Str., 107140 Moscow, Russia

It is emphasized that any technology transforming primary source energy into heat, mechanical motion or electricity inevitably results in waste production and contamination of the environment during its lifecycle. In the next century the current energetic structure will inevitably have to be changed in terms of decreasing the fraction of the present fossil fuel energy technologies and increasing the fraction of the “clean” ones. These technologies must fulfil conditions that are simple and consistent with universal human values but so far none of the present energy technologies fully satisfies them. Large-scale nuclear power based on the closed-cycle fast neutrons reactors under development would satisfy all of these conditions. Political willpower, investments, and public approval are needed to make such transition. It is noted that nuclear power is not yet supported by people; engrained phobias and stereotypes arise quickly, live long and change slowly so in the people’s mind nuclear power industry is still associated with radioactive contamination accidents. Sustained public awareness efforts with different groups of people are proposed in terms of changing this attitude; a special course is suggested to be included in the school and academic programs to educate young generation with new attitude to the nuclear power industry. The problem of transition to the large-scale nuclear power industry is proposed to be solved with participation of the energy corporations that can start to finance activities and predict potential preferences in the mid- and long-term periods. Therefore, it may be concluded that the nuclear power industry producing several orders of magnitude more energy/less waste per unit mass of material as compared with the traditional fossil fuel industries will be a large-scale “clean” energy technology. However, without political willpower, investments, and public approval its wide usage is almost unrealistic.

Key words: large-scale energy technology; phobias and stereotypes; fast-neutron reactors; closed fuel cycle; volumes of consumed raw materials; volumes of produced waste.

References

1. Biosphere compatibility of fast reactors with a closed nuclear fuel cycle / N. V. Gorin, V. P. Kuchinov, V. M. Dekusar, V. V. Shidlovsky // Research Trajectory – Human, Nature, Technology. – 2023. – № 2 (6). – pp. 28–38.
2. Meadows, D. Limits to Growth / D. Meadows, D. Meadows, J. Randers, B. Bererns III. – M: MSU, 1991.
3. Limits to Growth. The 30-Year Update / D. Meadows, J. Randers, D. Meadows – M : Akademkniga Publ., 2007.
4. Adamov, E. O. General Editor: Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors: White Book of Russian Nuclear Power (Handbook of Russian Nuclear Power). August 7, 2022 / Academic Press <https://www.amazon.com/Closed-Nuclear-Fuel-Cycle-Reactors/dp/0323993087?asin=0323993087&revisionId=&format=4&depth=1> (accessed 21.05.2023).
5. IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 36 pages.
6. Climate Change 2020: Synthesis Report. Summary for Policymakers. 2021. IPCC, Geneva,

- Switzerland.
7. 2022 Intergovernmental Panel on Climate Change. Electronic copies of this Summary for Policymakers are available from the IPCC website www.ipcc.ch
 8. State report "On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2017". Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; NPP "Cadastre", 2018. 888 p.
 9. Fast Reactor with High Excess Production of Fissile Nuclides in Two-Component Nuclear Power Engineering with U-PU and TH-U-PU Fuel Cycle / Alekseev P.N., Andrianova E.A., Blandinsky V.YU. [et al.] // Problems of Nuclear Science and Engineering. Series: Physics of Nuclear Reactors". 2020. issue 5. P. 53-65.
 10. Kapica, P. L. Energy and Physics. // Report to the scientific session on the 250-th Anniversary of the USSR Academy of Sciences. Moscow. 08.10.75.
 11. Adamov E.O. et al. White Book of Nuclear energy // «NIKIET» Publ., 2001.
 12. Nuclear energy - The solution to climate change? Nikolaus Muellner, Nikolaus Arnold, Klaus Gufler [et al], 2021. Energy Policy 155 (2021), 1-10.
 13. Kaplienko, A. 2023. Renewable energy sources: is it a panacea for global electricity generation or not? / Kaplienko A., Gabaraev B. // Russian Journal "Obozrevatel/Observer" 3 (2023), 27-36.
 14. Pershukov, V. Paving the Way to Green Status for Nuclear Power / V. Pershukov, V. Artisyuk, A. Kashirsky // Sustainability. Sustainability 2022, 14, 9339. <https://doi.org/10.3390/su14159339>. URL: file:///C:/Users/User/Downloads/sustainability-14-09339-v2-2.pdf (accessed 21.05.23)
 15. Global Energy and CO2 Status Report 2018 // International Energy Agency. URL: https://www.eenews.net/assets/2019/03/26/document_cw_01.pdf (accessed 05.02.2021).
 16. Kharitonov, V. V. / V.V. Kharitonov // Scenarii razvitiya mirovoj yadernoj en-ergetiki [Development of the world nuclear energy scenarios] // 2019. Atomnyj ekspert. № 1, S. 47-53. (in Russian)
 17. Harvey, S. Spurring youth interest in nuclear // IAEA Bulletin. 2021. P. 20-21
 18. Bilbao y León, S. Finding a new voice for nuclear // IAEA Bulletin. 2021. P. 28-29
 19. Gorin, N. V. 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 f. (accessed 21.05.23).
 20. Fostering Respectful Attitude towards Nuclear Industry N.V. Gorin, N.L. Abramova, S.V. Nechaeva, O.S. Golovikhina // Public Administration E-journal. 2021. № 87. P. 6-24. DOI: 10.24412/2070-1381-2021-87-7-18
 21. Nuclear Energy as a Basis for Sustainable Development / N.V.Gorin; B.K.Vodolaga; V.P.Kuchinov; V.V.Shidlovskiy // Public Administration E-journal. 2022. № 95. P. 7-19. DOI: 10.24412/2070-1381-2022-95-7-19.
 22. Detection of Indications of Nuclear Non-Proliferation Breaches by States Importing Fast Reactors with Closed NFC Installations Atomic Energy Gorin N.V., Karmanov A.L., Pervinenko V.N., Vlasov V.V., Teplykh N.A., Kuchinov V.P., Chebeskov A.N., Shidlovsky V.V. 2022. vol. 131. no 4. pp. 229-233.
 23. Barriers on Ways of Nuclear Distribution at Export of the Russian Fast Reactors with Closed Nuclear Fuel Cycle (on an example Brest ОД-300) / Gorin N.V., Kuznetsov E.V., Kuchinov V.P., Chebeskov A.N., Moiseev A.V., Shidlovskiy V.V., Krivtsov A.V., Vestnik NYAC. 2021. №. 4 (88), P. 16-21. doi.org/10.52676/1729-7885-2021-4-16-21
 24. Nuclear Non-Proliferation Security on Exportation of fast Reactors with a Closed Fuel Cycle / Gorin N.V., Voloshin N.P., Churikov YU.I., Chebeskov A.N., Kuchinov V.P., Vasilyev A.P., Moiseev A.V., Shepelev S.F., Skvortsov D.A., Zhurin S.I., Shidlovskiy V.V., Krivtsov A.V. (2021) // Atomic energy. T. 130, v.1, C. 53-56.