

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В КОНТЕКСТЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Кудрявцева Ольга Владимировна
Д.э.н., профессор
МГУ имени М. В. Ломоносова,
Экономический факультет
(г. Москва, Россия)

Деркач Александр Сергеевич,
Манушко Семен Владимирович,
Несветов Федор Дмитриевич,
Пекарев Сергей Владимирович,
Четвертаков Владислав Сергеевич
Студенты бакалавриата
МГУ имени М.В. Ломоносова,
Экономический факультет
(г. Москва, Россия)

Аннотация

В статье рассматривается атомная энергетика в контексте устойчивого развития, а также оценивается взаимосвязь между структурой производства энергии в стране и ее экологическим состоянием. Авторы уделяют внимание технологическим и организационным аспектам атомной отрасли, которые обосновывают ее перспективность. Атомная энергетика имеет низкую долю затрат на топливо в структуре себестоимости производства по сравнению с другими источниками энергии, а также высокий коэффициент использования установленных мощностей. Инвестиционные программы развивающихся стран включают строительство новых АЭС, а многих развитых - создание новых или модернизацию существующих. Согласно созданной модели, увеличение доли атомной энергетики в структуре

Кудрявцева О.В., e-mail: olgakud@mail.ru

Деркач А.С., e-mail: alexderkach@mail.ru

Манушко С.В., e-mail: simon.manushko@mail.ru

Несветов Ф.Д., e-mail: ndfedor@yandex.ru

Пекарев С.В., e-mail: pekarevsv@mail.ru

Четвертаков В.С., e-mail: vladislav.chetvertakov@gmail.com

производства электроэнергии оказывает значимое влияние на снижение выбросов углекислого газа.

Ключевые слова: атомная энергетика, устойчивое развитие.

JEL коды: Q20, Q30, Q40, C51.

1. Устойчивое развитие и энергетика

Концепция устойчивого развития активно развивалась и подвергалась значительным изменениям с момента своего появления. В 1968 году была образована международная неправительственная организация «Римский клуб», рассматривающая, как мир будет развиваться в будущем, и какие ресурсы ему при этом будут необходимы. Данная организация привлекала внимание мировой общественности к изучению глобальных проблем устойчивого развития на основе научных исследований. Среди приоритетных вопросов, которыми она занималась, выделялись те, которые касались состояния природной среды, устойчивости социального и экономического развития, способов и последствий производства и потребления энергии, совместного решения демографических проблем, вопросов социального неравенства и других. В 1987 г. в докладе «Наше общее будущее» Международная комиссия по окружающей среде и развитию (МКОСР) дала определение понятию «устойчивое развитие», которое стало с тех пор общепризнанным⁶.

В докладе Европейской экономической комиссии и Программы развития ООН «От переходного периода к трансформации: устойчивое и всеобъемлющее развитие в Европе и Центральной Азии», Kubiš, Udovički (2012), подчеркивается особая значимость социальной размерности устойчивого развития. Три параметра положены в основу данного видения: истощение природных ресурсов; деградация окружающей среды; а также бедность и неравенство.

В августе 2015 года 193 государства – члена ООН достигли соглашения по новой повестке дня «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года», которая через месяц была одобрена главами этих государств⁷. Данный документ пришел на смену Целям развития на пороге тысячелетия (ЦРТ) (Millennium Development Goals), действовавшим с 2000 по 2015 гг.⁸. В нем отражены новые Цели устойчивого развития (ЦУР) ООН 2015 г., осуществления которых предполагается достичь совместными усилиями стран к 2030 г. Что в этой связи целесообразно сделать в России, изложено, в частности, в Докладе о человеческом развитии в Российской Федерации⁹.

Устойчивое обеспечение энергией необходимо для достижения всех указанных в повестке Целей устойчивого развития: как для экономического развития с учетом социальной справедливости, так и для обеспечения сохранения экосистем. Можно вспомнить о том, что, согласно данным Всемирного Банка, в настоящее время доступа к электроэнергии лишена

⁶ <http://www.un-documents.net/our-common-future>

⁷ <http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>

⁸ <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>

⁹ Доклад о человеческом развитии в Российской Федерации за 2016 год (2016)

восьмая часть населения планеты (в России же показатель энергообеспеченности приближается к 100%).

Перечислим Цели устойчивого развития, наиболее зависимые от энергетического обеспечения:

1. Повсеместная ликвидация нищеты;
2. Ликвидация голода, обеспечение продовольственной безопасности, содействие устойчивому развитию сельского хозяйства;
7. Обеспечение доступа к недорогостоящим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии;
8. Содействие устойчивому экономическому росту, полной занятости и достойной работе для всех;
9. Создание инфраструктуры, содействие устойчивой индустриализации и внедрению инноваций;
10. Снижение уровня неравенства;
11. Обеспечение безопасности и устойчивости городов;
12. Обеспечение рациональных моделей производства и потребления;
13. Принятие срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями;
15. Защита, восстановление экосистем суши и содействие их рациональному использованию, рациональное управление лесами, борьба с опустыниванием, прекращение деградации земель и утраты биологического разнообразия;
17. Активизация работы механизмов глобального партнерства в интересах устойчивого развития.

Для анализа динамики достижения государствами целей устойчивого развития во всем мире разработаны и разрабатываются множество специальных индикаторов (для регионов России см., в частности, Бобылев С.Н., Кудрявцева О.В., Соловьева С.В., Ситкина К.С., 2018).

Рассмотрим более подробно Цель №7 «Обеспечение доступа к недорогостоящим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии». Она включает в себя следующие задачи: энергообеспеченность, увеличение доли возобновляемых источников энергии в энергетическом балансе, повышение энергоэффективности. В настоящее время в России доля в энергобалансе возобновляемых источников энергии низка (менее 1%, если не считать крупные ГЭС). Несмотря на то, что атомная энергетика, согласно общепринятой классификации, не относится к возобновляемой, запаса сырья для нее достаточно, что имеет большое значение, учитывая все еще низкую энергоэффективность российской экономики. К условно возобновляемым источникам атомная энергетика сможет быть отнесена в будущем при условии замыкания ее топливного цикла на основе новых технологий.

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2030 года предполагает развитие данных направлений в сфере инновационной научно-технической политики в сфере

атомной энергетики¹⁰. В Проекте «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года» говорится следующее: «Атомная энергетика является одной из высокотехнологичных отраслей, в которых Российская Федерация лидирует на протяжении длительного периода времени. Дальнейшее развитие атомной энергетики важно не только с точки зрения обеспечения устойчивой и надежной работы ЕЭС, но и для сохранения технологического лидерства в данной отрасли»¹¹.

Использование атомной энергии также в значительной степени может способствовать достижению ЦУР № 13, касающейся борьбы с изменениями климата, а также выполнению условий Парижского Соглашения ООН по климату, вступившего в силу 4 ноября 2016 г.

2. Специфика и особенности атомной отрасли

2.1. Основные технологические процессы в атомной отрасли

Атомная (или ядерная) энергетика представляет собой комплекс предприятий, занимающихся производством электрической энергии за счет выделения и преобразования ядерной энергии, высвобождаемой при распаде ядра атома. В случае деления ядер элементов происходит запуск цепной реакции: выброс нейтронов при распаде ядра и их последующее столкновение с другими ядрами активирует в них точно такой же распад. Энергия, высвобождаемая при делении ядер урана, преобразуется в тепловую в активной зоне реактора, после чего с помощью теплоносителя отводится из активной зоны к парогенератору, затем механическая энергия пара направляется к турбогенератору, где она превращается в электрическую. Однако запуск и поддержание управляемой цепной ядерной реакции требуют особых условий, причем относящихся как к изготовлению ядерного топлива, так и к созданию среды, в которой данная реакция может поддерживаться.

В природе уран, необходимый для изготовления ядерного топлива, содержится в урановой руде в очень низкой концентрации: в среднем доля закиси-оксида урана U_3O_8 , основного ураносодержащего соединения, используемого на дальнейших стадиях создания ядерного топлива, составляет примерно 0,07% от природного урана (руды). В связи с этим первым этапом создания ядерного топлива является выделение данного соединения из горных пород путем дробления и выщелачивания – аффинаж урана. Следующим этапом является конверсия урана – превращение закиси-оксида урана в гексафторид урана UF_6 – единственное соединение урана с низкой температурой парообразования, что позволяет использовать его для обогащения по изотопу урана-235, причем наиболее распространенным методом является газовое центрифугирование (данный метод основывается на различии масс молекул с разными изотопами). После газового центрифугирования обогащенный гексафторид урана переводят в диоксид урана UO_2 , из которого изготавливаются урановые таблетки, которые в дальнейшем будут использованы в активной зоне ядерного реактора.

Стоит отдельно отметить важность обогащения урана. Во-первых, повышение доли необходимого урана-235 позволяет уменьшить критическую массу – необходимый объем ядерного топлива для поддержания управляемой цепной реакции – что делает реактор более

¹⁰ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2030 года (2009)

¹¹ Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. Проект.

компактным и экономичным. Во-вторых, повышение концентрации урана-235 увеличивает экономическую эффективность за счет увеличения жизненного цикла топлива, а именно продления сроков его выгорания и снижения частоты перегрузки топлива.

Активная зона реактора также имеет некоторые конструктивные особенности. Во-первых, помимо самого ядерного топлива в нем находится замедлитель нейтронов: специальная среда – жидкость (например, вода, тяжелая вода D2O) или твердый материал (графит или бериллий) – необходимые для уменьшения скорости нейтронов, выделяющихся при ядерном распаде (в противном случае нейтроны не будут сталкиваться с нераспавшимися ядрами, и реакция достаточно быстро начнет затухать). Во-вторых, активная зона ядерного реактора покрыта изнутри отражателем, необходимым для избежание рассеивания выделяемых нейтронов: это позволяет уменьшить критическую массу за счет увеличения концентрации нейтронов в активной зоне реактора.

Методика превращения ядерной энергии в электрическую различается в зависимости от типа реактора незначительно: переменными параметрами являются вещество-замедлитель, вещество-теплоноситель и количество теплообменных контуров.

2.2. Организационные аспекты атомной отрасли

В Российской Федерации, согласно Федеральному закону «О Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»» от 01.12.2007 № 317-ФЗ, функции управления использованием атомной энергии предоставлены Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом». Согласно ФЗ, ГК «Росатом» осуществляет «государственное управление при осуществлении деятельности, связанной с разработкой, изготовлением, утилизацией ядерного оружия и ядерных энергетических установок военного назначения, а также нормативно-правовое регулирование в области использования атомной энергии».

Федеральный закон 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» устанавливает правовые отношения, возникающие при использовании атомной энергии, включая полномочия:

- Органов управления использованием атомной энергии – ГК «Росатом»;
- Органов государственного регулирования в области использования атомной энергии – Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору;
- Организации, осуществляющей деятельность в области использования атомной энергии (АО «Концерн Росэнергоатом»).

Таким образом, ГК «Росатом» организационно является структурой, управляющей и интегрирующей основные активы отрасли. При этом сама отрасль включает в себя и другие организации и структуры (например, научные, промышленные), которые ведут работу в этой отрасли. Так, например, по заказу ГК «Росатом» предприятием АО «Балтийский завод», не принадлежащим ГК «Росатом», была изготовлена плавучая атомная электростанция (ПАТЭС).

2.3. Специфика атомной отрасли

На данный момент атомная энергетика является развитой технологией в промышленном масштабе и занимает определенную нишу в энергетическом, промышленном и технологическом комплексах Российской Федерации и в других странах.

Атомная энергия производится на атомных электростанциях, работающих в структуре единой энергосистемы РФ (ЕЭС РФ). Выбор площадки для АЭС определяется, во-первых, районами, в которые затруднена подача органических источников энергии и, во-вторых, потребностью в больших объемах электроэнергии и возможности ее транспортировки потребителям, поскольку в настоящее время сооружаются АЭС большой мощности.

Ранее предпринимались попытки использования атомной энергии для полноценного функционирования самолетов, космических аппаратов и военной техники (их созданием и в настоящее время занимаются страны-лидеры в области атомной энергетике).

Данная отрасль производства энергии имеет несколько принципиальных особенностей. Во-первых, существуют требования, обусловленные ее спецификой, требующей дополнительных затрат и повышенного внимания. Они связаны с вопросами безопасности, строительством, эксплуатацией, ликвидацией станций и захоронением опасных отходов. Очень большие затраты совершаются на стадии строительства станции, добычи и переработки сырья, изготовления топлива, которые, как предполагается, будут впоследствии окупаться на протяжении длительного срока. При этом КИУМ атомных станций (80-90%) значительно выше, чем, например, КИУМ ветряных станций: в течение года атомная станция стабильно работает на полную мощность и не зависит от погодных условий.

Существует ряд требований регулирующих органов (например, международная организация МАГАТЭ), которые обеспечивают контроль за безопасностью. Это приводит к росту затрат на безопасность и удорожанию АЭС. Так, например, существуют международные требования, согласно которым на этапе проектирования АЭС необходимо обосновать стратегию вывода АЭС из эксплуатации и оценить затраты на вывод из эксплуатации. Поэтому атомные электростанции откладывают дополнительно средства в резервные фонды для обеспечения процесса вывода атомной станции из эксплуатации. Все мероприятия и технические решения, обеспечивающие безопасность использования ядерной энергии, являются дорогостоящими, но они позволяют предотвратить аварии на АЭС и еще большие затраты, связанные с ними.

Доля затрат на топливо в структуре себестоимости производства электроэнергии в атомной отрасли намного меньше, чем в отраслях, связанных с органическим топливом – 20% для ядерной энергии и 60% в среднем для нефти и нефтепродуктов, газа и угля. Это связано с тем, что объем топлива (а также его стоимость) для получения одинакового количества электроэнергии от АЭС меньше, что обеспечивает экономическую эффективность АЭС на этапе эксплуатации.

3. Сфера атомной энергетики как направление получения энергии в будущем

В большинстве стран мира планируется увеличение использования атомной энергии, причем это более характерно для развивающихся стран (в развитых странах в атомной энергетике в данный момент преобладают мероприятия по модернизации отрасли). Это связано с тем, что она имеет определенный ряд преимуществ перед альтернативными источниками энергии.

Во-первых, получение энергии в процессе управляемых ядерных реакций никак не загрязняет атмосферу, не приводит к появлению парниковых газов, не ведет к обширному загрязнению воды, в том числе повышению кислотности океанов и почвы (нейтрализация данных эффектов требует много усилий и средств).

Во-вторых, эффект от использования одного килограмма обогащенного урана или плутония соизмерим с привлечением 50-100 тонн нефти. Кроме того, отношение энергии, извлекаемой из единицы топлива, к энергии, затрачиваемой на получение данной единицы топлива, в атомной энергетике является одним из самых высоких (Приложение 1). Так, для ядерного топлива обогащение с помощью газового центрифугирования (современный метод обогащения урана) данное соотношение составляет примерно 50 раз (при этом различные исследования несколько расходятся в оценках); это значит, что энергия, получаемая из одного килограмма пригодного для использования урана в 40-60 раз превосходит энергию, затрачиваемую на добычу такого объема руды, из которого будет получен один килограмм пригодного для использования урана. Для сравнения, для природного газа данное соотношение составляет около 5.5 раз, а для угля – около 20 раз. Столь высокий данный показатель имеют только гидроэлектростанции, расположение которых очень зависит от природных факторов, и ветряные электростанции (для данного источника энергии мнения исследователей сильно расходятся, значения полученных показателей лежат в диапазоне от 20 до 80 раз), производительность которых также зависит от природных условий и не является стабильной.

В-третьих, исследования показывают, что ядерное топливо по окончании использования вырабатывается не полностью, и уран может быть повторно использован после регенерации в реакторе. В дальнейшем планируется переход на почти замкнутый топливный цикл, минимизирующий количество выбрасываемых отходов.

В-четвертых, производство атомной энергии является достаточно безопасным производством, поскольку обеспечение безопасности является основным требованием к АЭС. Также оно не зависит от погодных условий и может функционировать 24 часа в сутки.

Кроме того, существует множество смежных областей, на развитие которых непосредственным образом влияют работы в сфере атомной энергетики:

- медицина (радиоизотопы, протонно-лучевая терапия опухолей);
- энергетика (низкотемпературные и высокотемпературные сверхпроводящие материалы, магнитные материалы для электродвигателей);
- промышленность (высокочистые и функциональные материалы и сплавы);

- электроника (производство кремния для полупроводников);
- экология (наноструктурированные фильтрующие материалы для воздуха и воды);
- ликвидация чрезвычайных ситуаций (детекторы веществ для борьбы с терроризмом, использование лазеров при тушении пожаров в местах газодобычи).

Таким образом, как можно видеть, развитие этой отрасли будет способствовать осуществлению многих Целей устойчивого развития, в частности, связанных с экономическим развитием, обеспечением рабочими местами, повышением уровня жизни.

Стоит отметить, что ежегодные траты на поддержание работы атомных электростанций в определенной мере фиксированы, в то время как затраты в других энергетических отраслях крайне неустойчивы в связи с колебаниями цен на соответствующие энергетические ресурсы.

Обратим далее внимание на совокупные затраты АЭС, которые состоят из четырех основных элементов:

- Капитальные затраты, понесенные во время проектирования, подготовки к строительству новой электростанции и самого строительства;
- эксплуатация и техническое обслуживание (в первую очередь, относится к управлению и содержанию электростанции, а именно оплате труда персонала, страхованию, обеспечению безопасности, плановому техническому обслуживанию, периодическим ремонтам и т.д.);
- затраты на закупку топлива для электростанции;
- затраты, связанные с резервированием средств для вывода блока АЭС из эксплуатации, обращения с отработавшим топливом и захоронения радиоактивных отходов.

Стабильность совокупных трат на АЭС объясняется тем, что в ядерной энергетике большая их часть приходится на строительство, в то время как для энергоустановок, работающих на органическом топливе, именно топливо является самым затратным компонентом. Из-за малого веса стоимости топлива стоимость производства электроэнергии в атомной энергетике является намного более устойчивой к изменению затрат на сырье в сравнении с нефтегазовым сектором. Так, двукратное увеличение цены урана приведет к изменению общей стоимости производимой энергии только на 11%, в то время как при аналогичном увеличении цены, например, на газ, расходы увеличатся на 65%.

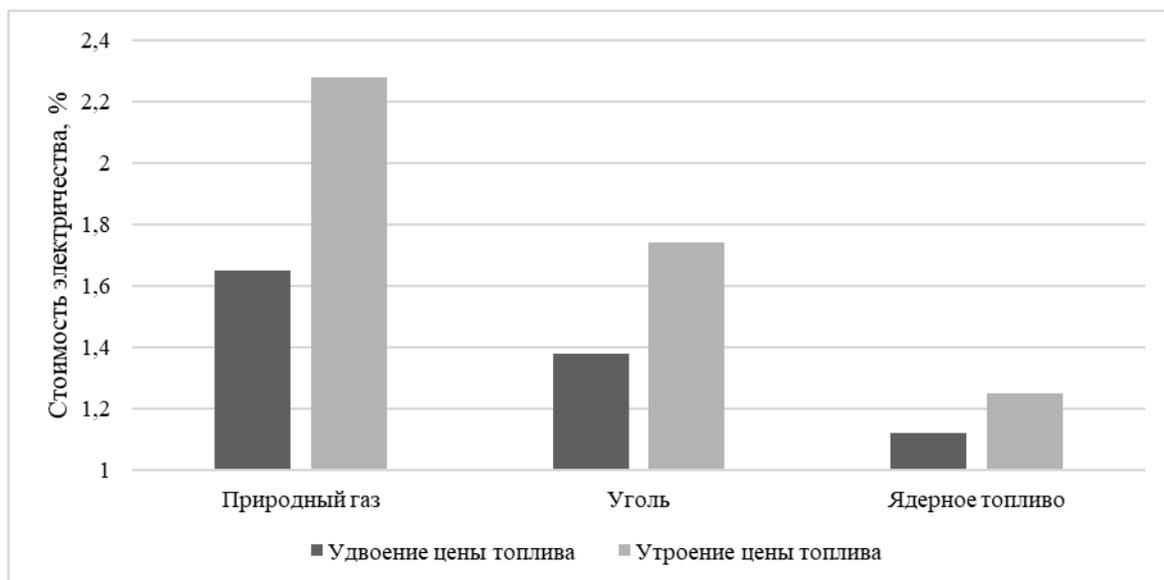


Рисунок 1. Изменение стоимости электроэнергии при повышении стоимости топлива в 2 и в 3 раза для газовой, угольной и ядерной энергетики¹²

В приложении 2 приведена статистика, демонстрирующая для разных стран долю атомной энергетики от общего производства электричества. Доля атомной энергии в производстве электричества все еще имеет перспективы к росту: даже в большинстве развитых стран она не превышает 40%. В развивающихся странах, таких как Южная Африка, Бразилия, Мексика доля атомной энергии чрезвычайно мала и имеет большой потенциал к дальнейшему росту.

4. Взгляды современных исследователей на атомную энергетику

В последнее время у большого количества стран значительно возрос интерес к ядерной энергетике. По мнению американских ученых А. Adamantiades и I. Kessides, это происходит в результате неустойчивых цен на ископаемое топливо, обеспокоенности по поводу безопасности поставок энергии и глобального изменения климата. В исследовании Adamantiades, Kessides (2012) описывается текущее состояние и будущие планы расширения ядерной энергетики, достижения в области технологии ядерных реакторов и их влияние на связанные с этим риски и эффективность ядерной энергетике. Например, в последнее время в Соединенных Штатах, где фактически строительство реакторов прекратилось еще в конце прошлого века, государство стало активнее оказывать финансовую помощь владельцам уже построенных АЭС, а также спонсировать строительство новых реакторов. В Европе тема строительства атомных электростанций является предметом постоянных политических дебатов, и в настоящее время тема строительства и поддержания АЭС часто поднимается в связи с вопросами снижения выбросов и изменения климата. Ряд правительств таких стран, как Швеция, Великобритания уже заявили о поддержке строительства и ввода новых АЭС. Кроме того, в Азии значительно начала расти доля энергии, полученной атомными электростанциями. Более 40 развивающихся стран недавно обратились к должностным лицам Организации Объединенных Наций с просьбой выразить заинтересованность в запуске у них ядерно-энергетических программ.

¹² Источник: Adamantiades, Kessides (2012)

В совместном труде европейских и североамериканских ученых (Jan V. van Egr et al., 2014) выражается следующая мысль – «человечество должно осознать реальность того, что оно не может бесконечно зависеть от сжигания угля, газа и нефти для большинства своих энергетических потребностей». Они пришли к выводу, что в долгосрочной перспективе технология ядерного деления останется единственным (или как минимум приоритетным) источником, способным поставлять огромные объемы энергии, которые потребуются для безопасного, экономичного, надежного и устойчивого функционирования современных промышленных систем и жизни общества.

Интересно в контексте нашей статьи будет привести доводы другого экономиста (Robert J. Budnitz, 2016), который в своем исследовании делает упор на необходимость развития технической инфраструктуры, в первую очередь в развивающихся странах, которые в настоящее время практически или совсем не имеют развернутой ядерной энергетики, и где может присутствовать фактор коррупции и политической нестабильности, что ставит под вопрос безопасность развёртывания там этого вида получения энергии. С точки зрения ученого, безопасность – ключевой параметр развития атомной энергетики. Он настаивает на необходимости укрепления международного режима безопасности, например, методом введения некоторых нынешних консультативных услуг МАГАТЭ («Международного Агентства по Атомной Энергии») в качестве обязательных.

Хотя крупномасштабное развёртывание ядерной энергетики может сократить выбросы парниковых газов, ее потенциал в плане снижения затрат на смягчение последствий изменения климата изучен недостаточно. Так, в своем исследовании ученые из Швеции (Mariliis Lehtveer, Fredrik Hedenus, 2015) использовали модель энергетической системы для оценки относительной экономии затрат на смягчение последствий изменения климата, обеспечиваемых ядерной энергетикой, а также их надежности. Они пришли к выводу, что расширение в настоящее время коммерчески доступных ядерных технологий приводит к 10% экономии затрат на смягчение последствий изменения климата. В случае доступности передовых ядерных технологий, таких, как FBRs (реакторы на быстрых нейтронах) и альтернативных методов добычи урана, экономия достигает 20%.

5. Описание модели и результаты

В данном исследовании мы задались целью оценить взаимосвязь между структурой производства электроэнергии в стране и ее экологическим состоянием. Для этого мы взяли данные по структуре источников энергии: отдельно доли производства электричества за счёт угля, природного газа, нефти, ГЭС, АЭС, прочие ВИЭ (кроме ГЭС), а также по некоторым ключевым экологическим индикаторам: ожидаемой продолжительности жизни, уровнем смертности из-за загрязнения воздуха, выбросам CO₂ на душу населения по 139 странам за 1970-2013 гг.

В ходе исследования мы остановились на следующей модели, наиболее качественно описывающей влияние структуры источников на воздействие окружающей среды. Модель представляет собой сбалансированную панель с фиксированными эффектами, а именно набор данных по каждой стране с 43 наблюдениями. Для учета уникальных для каждой страны эффектов в регрессию были включены фиктивные переменные государств (принимают

значение «1» для i -того государства). В качестве зависимой переменной был взят уровень выбросов CO₂ на душу населения в годовом выражении. В качестве регрессоров – доля производства электричества за счёт природного газа, нефти, ГЭС, АЭС, прочих ВИЭ (кроме ГЭС). Добыча электричества из угля как ключевого источника во многих странах была исключена из модели (то есть по сути учитывается в константе) с целью избежания совершенной мультиколлинеарности.

Данные были взяты с сайтов международного энергетического агентства (IEA) и Всемирного Банка (World Bank Open Data). Учитываются сведения только с 1970 года, так как учет экологических выбросов в большинстве стран стал достоверным только начиная с этого времени, а 2013 год – последний, за который имеются данные по всей рассматриваемой выборке стран. В рассматриваемом наборе данных в некоторых странах имеются данные о выбросах не по всем источникам, поэтому для более качественных результатов оценивания эти государства были исключены из рассмотрения. Для дальнейшего рассмотрения остались государства, в которых информация об источнике выброса в каждом из годов была известна для более, чем 80% от совокупного объема CO₂ (для большинства наблюдений данный параметр составляет 100%).

Таблица 1.

Результаты построения модели приведены ниже:

Зависимая переменная – Уровень выбросов CO₂ на душу населения, метрических тонн в год

	Коэффициент	Ст, ошибка	t-статистика	P-значение	
Константа	7,69	0,35	21,77	<0,0001	***
Доля ГЭС	-3,06	0,54	-5,647	<0,0001	***
Доля АЭС	-4,82	1,35	-3,569	0,0005	***
Доля ВИЭ	-14,9	8,13	-1,836	0,0686	*
Доля нефтепродуктов	-2,17	0,68	-3,168	0,0019	***

Наблюдения	4715
Сумма кв. остатков	43340,91
Ст. ошибка модели	3,079
LSDV R-квадрат	0,865

Константа значима на 1-%м уровне и равна 7,69, что означает, что средние выбросы CO₂ от сжигания угля равны 7,69 метрических тонн на человека в год. Использование любого другого источника для производства энергии снижает выбросы CO₂ на человека в год. В частности, увеличение доли ВИЭ на 1 процентный пункт снижает выбросы на 0,15 метрических тонны на человека в год, то есть на 2% по сравнению с производством энергии исключительно от угля. Итак, данный источник оказывает наибольшее влияние на снижение выбросов. Вторыми по влиянию оказываются как раз атомные электростанции: при увеличении доли источников атомной энергии выбросы CO₂ снижаются в среднем на 0,05 метрических тонн на человека или 0,69% по сравнению с производством энергии исключительно от угля,

что превосходит все источники энергии, кроме ВИЭ (солнечная и ветряная энергия). Гидроэлектростанции оказывают положительный эффект в еще меньшей степени (на 57% ниже по сравнению с АЭС). Наконец, самой худшей из альтернатив углю по сравнению с рассмотренными выше является производство энергии от нефтепродуктов (снижение только на 0,02 метрических тонны в год при увеличении доли на 1 п.п.).

Следует сделать еще два замечания по приведенной модели. LSDV R-квадрат (специальный критерий для данного типа моделей) составляет 0,86, что говорит о высоком уровне ее прогностической способности. Оценивать при помощи ее эффект для конкретной страны или в целом по миру можно только в окрестностях текущих значений, так как со значительными структурными сдвигами в объемах производства электроэнергии может и измениться сама технология, что повлечет за собой изменение интересующих нас коэффициентов.

Заключение

При отказе от использования угольных источников топлива в пользу других выбросы CO₂ на душу населения сокращаются. В частности, использование нефтепродуктов производит наименьший эффект, чуть больший эффект демонстрируют ГЭС. Атомные электростанции в большей степени снижают выбросы CO₂, чем вышеперечисленные источники, лишь немного уступая эффекту от использования ветрогенераторов и солнечных батарей.

Также стоит отметить, что атомные электростанции имеют ряд прочих преимуществ перед представителями других «чистых» источников энергии (ветряных и солнечных). Атомным электростанциям не нужны солнечная погода и низкая облачность для выработки энергии (в отличие от солнечных батарей), и их производительность не зависит от погодных условий (как у ветрогенераторов).

Таким образом, мы имеем возможность говорить об атомных электростанциях как о перспективном источнике энергии. Их потенциал обеспечен тем, что они гарантируют наиболее стабильную выработку энергии, их работа является достаточно безопасной, не зависит от внешних эффектов и географического расположения, поскольку при проектировании и работе АЭС предусмотрено множество мер, относящихся к вопросам безопасности, а волатильность цены топлива не влияет существенно на стоимость производства электроэнергии. Согласно результатам нашего исследования, увеличение использования атомной энергии в стране будет приводить к значительному снижению выбросов CO₂. Однако необходимо отметить, что особую важность имеет в данном случае политика обращения с отходами и переход к замкнутому циклу производства.

Таким образом, можно заключить, что атомная энергетика при соблюдении определенных условий может активно способствовать реализации многих Целей устойчивого развития, поставленных мировым сообществом и способствовать укреплению энергетической безопасности.

Публикация подготовлена в рамках поддержанного РФФИ научного проекта № 19-010-00782 А «Влияние новых технологий на глобальную конкуренцию на рынках сырьевых материалов».

Благодарность

Авторы выражают благодарность Лидии Сергеевне Смирновой, руководителю Группы экономического анализа проектов Курчатовского института за консультации по поводу качественных особенностей атомной отрасли и активное содействие данной работе.

Список литературы

Бобылев С.Н., Кудрявцева О.В., Соловьева С.В., Ситкина К.С. Индикаторы экологически устойчивого развития: региональное измерение // Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика, издательство Изд-во Моск. ун-та (М.), № 2, с. 21-33

Доклад о человеческом развитии в Российской Федерации за 2016 год / под ред. С. Н. Бобылева и Л.М. Григорьева. — М.: Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации, 2016. 298 с. Режим доступа: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/11068.pdf>

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2030 года: Распоряжение Правительства РФ № 1715-р от 13.11.2009

Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. Проект. // Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1920>

Ян Кубиш, Кори Удовички, От переходного развития к трансформации. Устойчивое развитие в Европе и Центральной Азии: Доклад. — М., 2012.

A.Adamantiadesa, I.Kessides Nuclear power for sustainable development: Current status and future prospects. Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.052>

Barry W.Brook Agustin Alonso, Daniel A.Meneley, Jozef Misak, Tom Blees, Jan B.van Erp Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy. Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2014.11.001>

"History: 1968". Club of Rome. Retrieved 29 November 2017.

Ioannis N.Kessides Nuclear power: Understanding the economic risks and uncertainties. Energy Policy. Volume 38, Issue 8, August 2010, Pages 3849-3864. Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.005>

Marielis Lehtveerm, Fredrik Hedenus How much can nuclear power reduce climate mitigation cost? — Critical parameters and sensitivity. Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2014.11.003>

Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Mode of access: <http://www.un-documents.net/our-common-future>

Robert J.Budnitz Nuclear power: Status report and future prospects. Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.011>

Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Mode of access: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>

WNA (World Nuclear Association), 2009a. World nuclear power reactors 2008–09 and uranium requirements.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>

NUCLEAR POWER IN FRAMES OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Olga V. Kudryavtseva

*Doctor of Economics, Professor
Lomonosov Moscow State University,
Faculty of Economics
(Moscow, Russia)*

Alexander S. Derkach, Simon V. Manushko,

Fyodor D. Nesvetov, Sergey V. Pekarev,

Vladislav S. Chetvertakov

Bachelor students

Lomonosov Moscow State University,

Faculty of Economics

(Moscow, Russia)

Abstract

This research examines nuclear power in the context of sustainable development and assesses the relationship between the structure of energy production in the country and its environmental status. In the article the authors consider the technological and organizational aspects of the nuclear industry, which justify the prospects of this direction. Nuclear power has a low share of fuel costs in the structure of production cost in comparison to other energy sources, as well as a high capacity factor. Investment programs of developing countries include the construction of new nuclear power plants, and investment programs of developed countries include the construction of new ones or modernization of existing ones. According to the created model, the increase in the share of nuclear power in the structure of electricity production has a significant impact on reducing carbon dioxide emissions.

Key words: nuclear energy, sustainable growth.

JEL codes: Q20, Q30, Q40, C51.

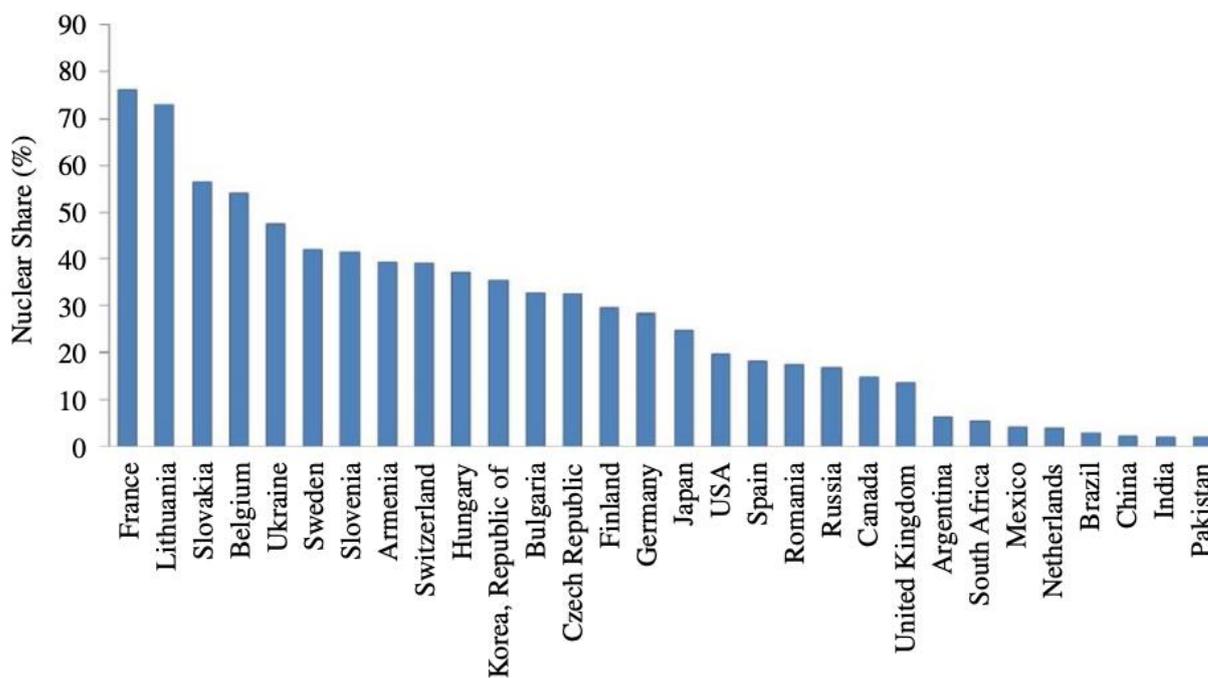
Приложение 1

Отношение получаемой энергии от единицы продукции к затрачиваемой на ее добычу и обработку

		Источник	EROI = полученная энергия/ затрачиваемая энергия	Затрачиваемая энергия/ полученная энергия в %
Гидроэнергетика		Uchiyama 1996	50	2
		Held et al 1977	43	2,3
		Gagnon et al 2002	205	0,5
Атомная энергетика (центрифужное обогащение)	ВВЭР / КВР	Kivisto 2000	59	1,7
	ВВЭР	Inst. Policy Science 1977	46	2,2
	КВР	Inst. Policy Science 1977	43	2,3
	КВР	Uchiyama et al 1991	47	2,1
Атомная энергетика (диффузионное обогащение)	ВВЭР / КВР	Held et al 1977	20	5
	ВВЭР / КВР	Kivisto 2000	17	5,8
		Uchiyama 1996	24	4,2
	ВВЭР	Oak Ridge Assoc. Univ. 1976	15,4	6,5
	КВР	Oak Ridge Assoc. Univ. 1976	16,4	6,1
	КВР	Uchiyama et al 1991	10,5	9,5
Уголь		Kivisto 2000	29	3,5
		Uchiyama 1996	17	5,9
		Uchiyama et al 1991	16,8	6
	Неочищенный	Gagnon et al 2002	7	14
		Kivisto 2000	34	2,9
Природный газ	Трубопроводный газ высокого напряжения	Kivisto 2000	26	3,8
Природный газ	Трубопроводный газ высокого напряжения	Gagnon et al 2002	5	20
	СПГ	Uchiyama et al 1991	5,6	17,9
	СПГ (57% КИУП)	Uchiyama 1996	6	16,7

		Источник	EROI = полученная энергия/ затрачиваемая энергия	Затрачиваемая энергия/ полученная энергия в %
Солнечная энергия		Held et al 1997	10,6	9,4
Солнечная энергия (PV)	На крыше	Alsema 2003	12-10	8-10
	На земле	Alsema 2003	7,5	13
	Аморфный кремний	Kivisto 2000	3,7	27
Ветряная энергия		Resource Research Inst. 1983	12	8,3
		Uchiyama 1996	6	16,7
		Kivisto 2000	34	2,9
		Gagnon et al 2002	80	1,3
		Aust Wind Energy Assn 2004	50	2
		Nalukowe et al 2006	20,24	4,9
		Vestas 2006	35,3	2,8

Приложение 2



Доля атомной энергии в структуре производства электроэнергии в разных странах, 2009 г.¹³

¹³ Источник: WNA (World Nuclear Association), 2009a. World nuclear power reactors 2008–09 and uranium requirements