



Munich Personal RePEc Archive

Drivers and brakes on the development of nuclear energy

Sergei, Chernavskii

Central Economics and Mathematics Institute of the RAS

1 May 2023

Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/119263/>
MPRA Paper No. 119263, posted 29 Nov 2023 09:17 UTC

Драйверы и тормозы развития ядерной энергетики¹

Д.э.н., к.т.н., г.н.с. ЦЭМИ РАН
С.Я. Чернавский
sergeichernavsky@mail.ru

Опубликовано:

Энергетическая политика. 2023. № 1. С.38-55.

DOI: 10.46920/2409-5516_2023_1179_38

Журнал находится в списке журналов, рекомендованных ВАКом, квартиль К1.

Аннотация

Многие страны по тем или иным причинам страдают от дефицита органического топлива, которое уже более 200 лет является основным источником первичной энергии в мире. Еще в 1960-х годах начали строиться атомные электростанции с более низкими издержками производства электроэнергии, чем у конденсационных электростанций на органическом топливе. Это сформировало широкомасштабный спрос на атомные электростанции во многих не только развитых, но и развивающихся странах. Однако распространение ядерной энергии как источника первичной энергии происходит очень неравномерно. Периоды ускоренного роста ядерной энергетики чередуются с периодами торможения и даже остановки роста. Рассматривается широкая палитра факторов, влияющих как на рост ядерной энергетики (дефицитность энергетического баланса, стремление стран к энергонезависимости и снижению издержек энергоснабжения, угроза глобального потепления климата на Земле, истощение ресурсов органического топлива, использование экономии от масштаба и др.), так и торможение ее развития (оценка приемлемости ядерной энергии как источника первичной энергии, недостаточность знаний о развитии ядерных реакций в ядерных реакторах, сложность человеко-технических систем, серьезные аварии на предприятиях ядерной энергетики, удешевление технологий использования солнечного света, ветра, и других нетрадиционных возобновляемых источников энергии и др.). Показывается, что реалистическая, объективная и всесторонняя оценка всей палитры драйверов и тормозящих факторов роста ядерной энергетики требует междисциплинарного подхода и способствует повышению качества прогнозирования развития ядерной энергетики и общества в целом.

Ключевые слова: ядерная энергетика, общественное благосостояние, спрос на энергию, издержки производства электроэнергии, первичная энергия, аварии на атомных

¹ В научной и популярной литературе широко используется также термины: атомная энергетика, атомная энергия. В данной статье используется, соответственно: ядерная энергетика, ядерная энергия, так как энергия, генерируемая в ядерном реакторе, – следствие деления ядер вещества. Однако – атомная (а не ядерная) электростанция, так как это стало устойчивым словосочетанием в русском языке.

электростанциях, приемлемость, глобальное потепление климата, возобновляемые источники энергии, истощение ресурсов органического топлива.

Введение

В конце 1930-х годов была обнаружена возможность осуществления цепной реакции деления ядер изотопа урана-235, в ходе которой выделяется энергия внутриядерных связей (далее ядерная энергия), и образуются новые вещества, одни из которых представляет собой отходы деления урана-235, а другие (например, плутоний-239) могут быть использованы как источник ядерной энергии. Количество высвобождаемой ядерной энергии было столь велико, что вначале изучалась только перспектива ее использования для создания нового оружия огромной мощности. В решение этой задачи в нескольких странах были вложены очень большие интеллектуальные, материальные и финансовые ресурсы. В результате удалось разработать несколько конструкций ядерных реакторов, в которых осуществлялись управляемые ядерные реакции с получением двух видов продуктов: (1) веществ, которые можно использовать для изготовления урановых и плутониевых атомных бомб и (2) тепла, которое можно использовать для подогрева воды и приготовления водяного пара.

Были установлены условия, необходимые для обеспечения в ядерном реакторе управляемой реакции деления урана-235, в том числе, состав и форма ядерного топлива, основу которого составляет делящийся изотоп урана. Но в природе уран-235 – редкое вещество. Так, в природном уране содержится только около 0.72% этого изотопа, а около 99.27% – это неделяющийся изотоп уран-238. Для того чтобы изготовить из природного урана ядерное топливо для АЭС, необходимо увеличить концентрацию урана-235, осуществляя для этого фазовые переходы твердого вещества в газ и газа в твердое вещество. Сложность и затратность изготовления ядерного топлива определяются не только необходимостью обогащать природного урана, но и тем, что для извлечения природного урана приходится перерабатывать огромные массы природных материалов – даже в богатой ураном горной руде содержится всего около 0.2 % природного урана (NEPSG, 1977). Так что только несколько промышленно развитых стран были способны преодолеть сложности, возникающие при изготовлении топлива для ядерных реакторов.

Идея использовать ядерную энергию для производства электроэнергии, как известно, впервые была воплощена в СССР, когда в 1954 г. в г. Обнинске

была введена в эксплуатацию АЭС электрической мощностью 5 МВт. Было ясно, что, увеличивая мощность ядерного реактора, можно добиться значительного снижения удельных издержек производства электроэнергии. В 1958 г. в США была введена в строй АЭС Шиппингпорт электрической мощностью 68 МВт. Единичная мощность сооружаемых энергоблоков АЭС быстро увеличилась до 400 – 1000 МВт. В этом диапазоне действовал эффект экономии от масштаба – с ростом единичной мощности энергоблоков АЭС снижались удельные издержки производства электроэнергии. К началу 1960-х годов во многих странах АЭС с крупными энергоблоками стали рентабельными при покрытии базовой части графика электрической нагрузки.

В использовании АЭС для производства электроэнергии оказались заинтересованы многие страны. К началу 1987 г. АЭС (на которых было установлено более 405 энергоблоков) работали в 26 странах (табл.1). В последующие 35 лет, согласно данным табл.1, к этому числу добавилось 6 стран.

Таблица 1. Распространенность АЭС в мире

Регион	Число стран, в которых работают АЭС	
	на январь 1987 г. ²	на октябрь 2022 г. ³
Европа	16	18
Северная Америка	2	3
Азия	5	8
Южная Америка	2	2
Африка	1	1
Австралия	0	0
Всего	26	32

В конце 2022 г. по данным Всемирной ядерной организации (Nuclear Power in the World Today, 2022) на АЭС с помощью 440 энергоблоков произведено 10% общего количества произведенной в мире электроэнергии. (Для сравнения: в 2019 г. за счет угля было произведено 36.7% электроэнергии, природного газа – 23.5%, гидроэнергии – 16.0%, ядерной энергии – 10.3%, нетрадиционных источников энергии (солнечного света, ветра и др.) – 8.2%, мазута – 2.8%, прочих источников – 2.6%). Это означает, что, хотя большинство стран мира с большой осторожностью открывают новые для себя

² Источник данных: (Чернавский,1988).

³ Источник данных: (Nuclear Power in the World Today, 2022).

программы строительства АЭС, в некоторых странах, где уже есть опыт работы АЭС, ввод новых АЭС продолжается. И это при том, что в 2011 г. еще одна катастрофическая авария произошла на АЭС Fukushima!

А ведь после катастрофы на Чернобыльской АЭС, произошедшей в 1986 г. и задевшей экономику нескольких стран, а также серьезной аварии с расплавлением активной зоны ядерного реактора в 1979 г. на АЭС Three Miles Island, многим людям, в том числе тем, кто влияет на формирование общественного мнения, казалось, что до тех пор, пока не будет полностью исключена возможность такого типа аварий, у ЯЭ нет перспектив роста.

Продолжение строительства новых энергоблоков с ядерными реакторами через несколько лет после катастрофической аварии на какой-нибудь АЭС – не новый феномен. Он наблюдался еще после аварии на АЭС Three Miles Island. До нее в период 1954-1978 гг. в мире в среднем вводилось в эксплуатацию 10 ядерных энергоблоков в год. В 1977 г. к электрической сети было подключено 18 энергоблоков АЭС, в 1978 г. – 20 энергоблоков, а в 1979 г., когда произошла авария на АЭС Three Miles Island, – только 8 энергоблоков. Кажется, что шок, полученный от этой очень серьезной аварии, оказался краткосрочным – в период с 1980-1985 гг. в мире вводилось в среднем по 22 ядерных энергоблоков в год. Однако «число новых заказов на строительство уменьшилось, а реализация проектов, которые были уже заказаны или даже находились в стадии строительства, была отложена или прекращена вовсе» (Чар, Шик, 1987, с.24-25). То есть даже не катастрофическая авария на АЭС (в ней радиоактивность не вышла за пределы АЭС) стала долгосрочным фактором торможения роста ЯЭ.

В результате оказалось, что рост ЯЭ стал очень неравномерным. Периоды ускоренного строительства АЭС после серьезной аварии хотя бы на одной из работающих АЭС сменяются периодами резкого замедления строительства. Однако через какое-то время инвесторы снова начинают вкладывать свои средства в проекты сооружения АЭС.

Такой неравномерный процесс развития свидетельствует о том, что развитие ЯЭ происходит под влиянием разнонаправленных факторов. Одни факторы (драйверы) поддерживают и стимулируют рост ЯЭ в мире и в отдельных странах, другие (тормозы – и это не только аварии на АЭС) притормаживают этот рост, а некоторые, возможно, способны даже обнулить его. Их выявление и анализ роли, которую они играют и могут играть в

развитии ЯЭ, – одна из важнейших задач в энергетическом секторе мировой и российской энергетики.

1. Драйверы роста ядерной энергетики

Рост спроса на первичную энергию после промышленных революций XIX и XX веков, вероятно, – основной долгосрочный драйвер роста ядерной энергетики. В течение многих столетий источником первичной энергии были возобновляемые энергетические ресурсы (ВИЭ) в виде мускульной энергии людей и животных. В конце XVIII века стали строить промышленные предприятия, которым нужна была первичная энергия в таких масштабах, которые традиционные в то время ВИЭ дать им не могли. Их стали вытеснять уголь и нефть. Новый толчок росту спроса на первичную энергию начался с развитием электроэнергетики. К производству электроэнергии подключились крупные ГЭС и природный газ.

Для ее производства стали использовать очень широкую палитру природных источников, основными из которых долгое время были месторождения угля, нефти и природного газа. Добываемые нефть и природный газ оказались настолько привлекательными для промышленности, транспорта и домашних хозяйств, что их принялись использовать не только как топливо для получения электроэнергии, горячей воды, водяного пара, функционирования двигателей внутреннего сгорания и пр., но и для изготовления различных веществ и конструкций. Это ограничивало масштабы использования традиционных источников первичной энергии (ТИЭ) как топлива.

Оценки разведанных ресурсов органического топлива на Земле показали, что их совокупности достаточно, чтобы обеспечить мировую экономику энергией в течение нескольких десятилетий и «энергетический голод человечеству не угрожает даже в отдаленном будущем» (Стырикович, 1980, с. 11).

Однако, если даже согласиться с тем, что мир в целом достаточно хорошо обеспечен ресурсами органического топлива и возобновляемой гидроэнергией, производимой мощными ГЭС, то картина обеспеченности ими по отдельным странам – очень пестрая. На территории многих стран, в том числе, промышленно развитых (Японии, Тайваня, Южной Кореи и др.), не обнаружено сколько-нибудь значимых запасов органического топлива. Нет там и больших полноводных рек, где можно было бы построить мощные ГЭС. Многие страны располагают значительными запасами угля (Китай, Индия, ЮАР, Германия,

Польша), но запасов более редких видов органического топлива – нефти и природного газа на их территориях тоже не обнаружено. В некоторых регионах мира, например, в Западной Европе, разрабатываемые месторождения нефти и газа в значительной мере истощены. Большинство стран, не имея собственных адекватных спросу запасов нефти и газа, вынуждены импортировать углеводороды, чтобы в стремлении повысить качество и уровень жизни населения своих стран обеспечить нормальное функционирование таких отраслей, как транспорт, химическая промышленность, электроэнергетика, производство тепла для отопления и горячего водоснабжения, (в том числе домашних хозяйств), производство строительных материалов и пр.

Эта политика хорошо мотивирована и могла бы стать очень эффективной даже для стран, у которых запасов собственных энергоресурсов, если бы отношения между странами ограничивались экономическими интересами. Но история международных отношений показывает, что с развитием цивилизации межстрановые конфликты, доминировавшие в прошлом, не исчезают, и порой становятся ожесточенными. В XX веке, где наряду с двумя мировыми войнами было много других кровопролитных опустошающих страны конфликтов, эта тенденция не исчезла. Поэтому, стремясь обеспечить свое устойчивое долгосрочное развитие, каждая страна – импортер энергоресурсов заинтересована в появлении таких источников первичной энергии и таких технологий ее использования, которые могли бы сделать страну более (или полностью) энергонезависимой.

Стремление к энергонезависимости особенно сильно проявило себя в начале 1950-х годов, когда после второй мировой войны начался восстановительный рост мировой экономики и, соответственно, рос спрос на первичную энергию. У многих стран возникла потребность в новых источниках первичной энергии, которые могли бы существенно снизить их зависимость от экспортеров энергоресурсов (прежде всего, нефти и природного газа).

Как можно было решить эту проблему? Казалось бы, наиболее простой и естественный путь – использовать те источники первичной энергии, которые есть в распоряжении каждой страны: прежде всего – солнечный свет и ветер. У стран, которые имеют доступ к океанам, есть дополнительная возможность: энергия приливов и отливов, а у некоторых стран, например, у Исландии, еще один легкодоступный природный источник первичной энергии – выходящие на поверхность Земли потоки горячей воды и пара. Все эти источники первичной

энергии входят в состав нетрадиционных возобновляемых источников энергии⁴ (НВИЭ).

Однако в 1950-х – 1960-х годах использовать это направление реструктуризации энергетического баланса было невозможно. Даже в промышленных развитых странах, которые импортировали в больших объемах энергоресурсы, не было рентабельных технологий использования НВИЭ (хотя, казалось бы, они были очень заинтересованы в их утилизации). Дело в том, что предельные издержки добычи и транспортировки нефти в мире были относительно небольшими (порядка 2-3 долл./барр.). К тому же в 1960-х годах в Западной Сибири и в акватории Северного моря были открыты несколько крупнейших и даже гигантских месторождений нефти и газа. Очень популярна была гипотеза, что запасы органического топлива положительно коррелированы с затратами на геологоразведку. Разработчики энергетической политики и инженеры думали, что, расширяя геологоразведку, можно было не беспокоиться об обеспеченности человечества запасами первичной энергии в традиционных природных источниках.

Казалось, что ВИЭ уже никогда не смогут вернуть себе то доминирующее влияние, которое они имели еще несколько столетий назад. Прогнозы весьма компетентных и влиятельных ученых поддерживали это отношение, что видно из оценки, данной в 1980-е годы крупнейшим российским энергетиком М.А. Стыриковичем: «Можно согласиться с тем, что ВИЭ вряд ли могут составить заметную часть в энергобалансе мира даже в весьма отдаленном будущем» (Стырикович, 1980, с.22). Какой еще природный источник первичной энергии смогут использовать будущие люди после истощения ресурсов органического топлива?

⁴ Источник энергии квалифицируется как возобновляемый, если скорость его использования не превышает скорости его возобновления. Следует иметь в виду, что некоторые виды НВИЭ – ресурсы двойного-тройного назначения. Например, древесина – это не только дрова, но и сырье для изготовления домов, мебели, бумаги и пр., а также поглотитель самого распространенного парникового газа – CO₂. Скорость расходования древесины в мире по этим направлениям ее утилизации уже давно выше скорости ее восстановления в лесах. Постепенно площадь, занимаемая лесами, сокращается, то есть сокращается также сырьевая база целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности. Снижается значимость древесины как инструмента смягчения угрозы глобального потепления. Это ограничивает масштаб использования древесины как НВИЭ. Тем не менее, для человечества в целом древесина сегодня – невозобновляемый ресурс, поскольку из-за антропогенной деятельности на Земле снижается площадь территории, на которой растет лес. Солнечная энергия – также энергоресурс двойного назначения, так как она может быть преобразована как в тепло, так и в электроэнергию.

В середине 1950 г. в качестве многообещающего источника первичной энергии предстал природный уран. АЭС, использующие в качестве ядерного топлива обогащенный уран, почти одновременно появились в СССР, США, Англии и Франции в результате реализации государственных программ создания атомной и водородной бомб. В созданных с помощью масштабного государственного финансирования ядерных кластерах были построены предприятия по переработке урановой руды в топливо для ядерных энергетических реакторов.

У стран, дефицитных по запасам органического топлива, появилась надежда, что рост их экономики в недалеком будущем будет обеспечен системой предприятий, в которых осуществляются управляемые цепные ядерные реакции, а выделяющаяся при этом энергия преобразуется в электроэнергию и тепло для домашних хозяйств и промышленности. Эта надежда также стала одним из существенных драйверов развития ЯЭ.

Спрос на АЭС стал формироваться не только в тех странах, в которых были созданы кластеры ЯЭ, но и в развивающихся странах, в которых таких кластеров (например, предприятий по изготовлению ядерного топлива или долгосрочному захоронению отработавшего ядерного топлива) не было.

Почему такие страны предъявляли спрос на сооружение на своих территориях АЭС – ведь у них не было надлежащих систем топливоснабжения ядерных реакторов? Дело в том, что энергоемкость ядерного топлива намного выше энергоемкости органического топлива, поэтому масса подвозимого топлива для АЭС на порядки меньше тех масс органического топлива, которые надо подвозить к тепловой электрической станции (ТЭС) (той же мощности, что и АЭС), сжигающей органическое топливо. К тому же ядерное топливо надо подвозить к АЭС довольно редко, а не непрерывно, как к ТЭС. Это был привлекательный стимул для строительства АЭС.

Конечно, в то время, когда месторождения органического топлива в мире истощатся, а ВИЭ (кроме уже построенных крупных ГЭС) не появятся, ЯЭ может оказаться единственным поставщиком электроэнергии и тепла, но это время наступит только через много десятков лет. Поэтому актуален вопрос, а чем может быть полезна ЯЭ сегодня, когда все еще в различных странах существует широкомасштабная добыча различных видов органического топлива?

До истощения ресурсов органического топлива АЭС приходится конкурировать, прежде всего, с ТЭС. Для того, чтобы АЭС смогли потеснить

ТЭС, например, в структуре производителей электроэнергии или даже вытеснить их, необходимо, чтобы удельные издержки производства электроэнергии были ниже удельных издержек ТЭС. Для снижения издержек производства электроэнергии проектировщики активно использовали уже упоминавшийся эффект экономии издержек от масштаба производства. Большинство зарубежных и отечественных экспертов пришли к выводу, что на АЭС можно производить более дешевую электроэнергию, чем на ТЭС.

Для СССР развитие ядерной энергетики было очень многообещающим направлением. Вытеснение из структуры первичной энергии органического топлива позволило бы увеличить экспорт нефти и природного газа на рынки с намного бóльшим объемом извлекаемой ренты, чем при продаже на внутренних рынках. А это имело исключительно важное значение, так как в СССР в 1970-х годах появились признаки истощения внутренних источников роста экономики.

Поэтому в 1970-х годах в СССР планировался и разрабатывался технологический прорыв — ускоренный долгосрочный рост ЯЭ⁵. По мнению руководства страны, без него нельзя было ожидать, что электроэнергетика (а с нею и вся экономика) сможет расти в соответствии с траекторией «опережающего развития» — стратегии, принятой в СССР (в качестве нормативной) вскоре после принятия (в 1921 г.) плана ГОЭЛРО. Приведенные ниже высказывания иллюстрируют характер ожиданий роста доли ЯЭ в экономике страны: «К 1990 г. <...> за счет АЭС будет вырабатываться около 40 % всей электроэнергии» (Александров, 1978, с.221). «Намечалось (в 1960-х годах — СЧ), что за 50 лет электроснабжение СССР будет полностью переведено на ядерно-топливную основу» (Корякин, 2002, с.53).

Более того, по мнению многих авторитетных экспертов, «среди различных отраслей энергетики, основанных на применении ископаемого топлива, атомная энергетика не имеет себе равных по минимальному уровню вредного воздействия на обслуживающий персонал, население и окружающую среду, а также по оснащенности средствами защиты против возможного загрязнения окружающей среды и <...> широкое развитие атомной энергетики <...> до 1000 ГВт в СССР (прогноз на 2000–2010 гг.) позволяет обеспечить сохранение

⁵ В «Основных направлениях развития народного хозяйства СССР на 1976–1980 годы» было записано «Предусмотреть опережающее развитие атомной энергетики в Европейской части СССР. Ускорить строительство и освоение реакторов на быстрых нейтронах. Приступить к подготовительным работам по использованию атомной энергии для целей теплофикации». (Александров, 1978, с.195.)

достаточной чистоты внешней среды» (Экспертная оценка-1975, 2013, с.111). В этом прогнозе, а также в большинстве других прогнозов образ такого «будущего» был логическим следствием наблюдаемых феноменов «прошлого» и «настоящего» ЯЭ, а также господствовавших тогда представлений о свойствах ЯЭ.

По прогнозам многих российских экспертов, к концу XX века в европейской части страны АЭС должны были вытеснить из сферы производства электроэнергии электростанции на органическом топливе (ТЭС), а с помощью атомных ТЭЦ (АТЭЦ) и атомных станций теплоснабжения (АСТ) потеснить ТЭЦ и котельные на органическом топливе в сфере производства тепла (см., например (Энергетический комплекс СССР, 1983). А уже в 1986–1990 гг. «в европейских районах страны практически прекращается строительство новых конденсационных тепловых электростанциях (КЭС) на органическом топливе. Будет осуществляться лишь ввод в действие мощности на ряде электростанций, сооружение которых было начато раньше, а также на некоторых ТЭЦ» (Воскресенский, 1987, с.172).

Многие весьма авторитетные ученые и инженеры были уверены в том, что благодаря интенсивному техническому развитию ядерная энергия (совместно с термоядерной) уже в начале XXI смогут полностью обеспечат людей первичной энергией, на базе которой будут удовлетворены потребности человечества во всех необходимых ему формах энергии. Эта уверенность выражена, например, в статье (Александров, 1984, с.343) в такой форме: «Решение задачи полного обеспечения всех видов энергопотребления в нашей стране за счет деления и синтеза атомных ядер – достойная задача нашей науки и техники на границе веков», или в более осторожной: «АЭС <...> выходят в абсолютные энергетические лидеры на XXI в. по экономическим <...> показателям (курсив автора – СЧ)» (Корякин, 2002, с. 223).

В такого рода оценках, однако, не принималось во внимание то, что спрос на электрическую энергию неоднороден во времени. Дизайнеры электроэнергетических систем задолго до появления АЭС учли, что среди потребителей электроэнергии есть те, у которых спрос на электрическую мощность практически не меняется в течение всего года. Это, например, металлургические заводы, предприятия, работающие непрерывно в три смены и т.д. Они формируют в данном узле электрической сети так называемую базовую зону суммарного графика электрической нагрузки. Есть предприятия, которые работают с переменной загрузкой своего оборудования, так как экономическая

активность снижается по ночам и выходные дни, во многих странах – также зимой. Они формируют полупиковую зону графика нагрузки. Наконец, в графике электрической нагрузке есть зона пиковой нагрузки, в которой мощность требуется всего 1-2 часа в рабочие сутки года.

В результате диспетчеры электрической сети, стремясь в интересах общества минимизировать суммарные издержки электроэнергетической системы, для производства пиковой электроэнергии привлекают такие энергоблоки, которые имеют минимальные удельные капиталовложения и наиболее высокие удельные переменные затраты (у ТЭС они близки к удельным затратам на топливо). Для покрытия спроса на базовую электроэнергию, напротив, привлекают, энергоблоки с наибольшими удельными капиталовложениями и минимальными переменными затратами.

Расчеты и реальная практика показали (см., например, (Стырикович и др., 1984; Chernavsky, 1985), что долгосрочные удельные издержки АЭС, работающих в зоне базовой электрической нагрузки ниже, чем у ТЭС. Что касается пиковой нагрузки и значительной части полупиковой нагрузки, то во многих странах издержки различных ТЭС и гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) ниже, чем у АЭС. Поэтому до истощения ТИЭ оптимальной структурой электростанций является, вообще говоря, композиция ТЭС, АЭС, ГЭС и ГАЭС. При этом в количественном отношении оптимальная структура электроэнергетики неоднородна по странам.

Это показывает, что важным драйвером развития ЯЭ является развитие экономико-математического моделирования электроэнергетических систем в разных странах на длительную перспективу, с помощью которых определяются количественные характеристики оптимального использования технических устройств ЯЭ. Однако механизм действия этого драйвера отличается от механизма влияния спроса на первичную энергию. В то время как спрос стимулирует развитие и рост ЯЭ, моделирование развития ЯЭ формирует граничные условия развития, определяя направление и масштаб развития.

Примерно таким же по характеру своего влияния драйвером стала ограниченность ресурсов делящегося изотопа U-235. Природный уран, в состав которого входит уран-235, весьма распространенный элемент на Земле, однако его концентрация в природных веществах очень низкая, Если в богатых урановых рудах содержание природного урана, как уже указывалось выше, около 0.2%, то в более бедных может быть на порядок меньше, в гранитах – порядка $4 \cdot 10^{-6}$, в морской воде – порядка $3.4 \cdot 10^{-6}$ (см., например,

Стырикович, Шпильрайн, 1981, с.33)). Однако издержки извлечения природного урана быстро возрастают со снижением его концентрации в исходном природном сырье. Поэтому уже на начальном этапе становления ЯЭ многие исследователи полагали, что из-за ограниченности обнаруженных в то время богатых ураносодержащих руд топливная проблема в ЯЭ в отдаленном будущем станет доминирующей и ядерное топливо, как и органическое, войдет в группу невозобновляемых энергетических ресурсов.

Реакция деления является доминирующей, если реактор спроектирован, в основном, на получение энергии. Такой реактор является «сжигателем» ядерного топлива. Если делящийся изотоп ядерного топлива U-235, то из-за ограниченности запасов природного урана ЯЭ, построенная на реакторах-сжигателях, представляет собой ограниченный и невозобновляемый источник энергии. Однако в ядерном реакторе при делении ядер выделяются нейтроны, часть которых захватываются неделящимися изотопами U-238, что приводит к образованию новых делящихся изотопов. Если число новых делящихся изотопов превышает число разделившихся изотопов, ядерного топлива становится больше, чем в исходном ядерном топливе, и такой реактор становится реактором-«размножителем» ядерного топлива, а ЯЭ, в составе которых работают реакторы-размножители оказывается источником возобновляемой первичной энергии. В результате осуществляется уникальный в энергетике процесс, в котором использование первичной энергии приводит не к уменьшению ее запасов, а к их увеличению. И здесь модели, (см., например, (Чернавский, 1980; Чернавский, 2022), в которых определяется оптимальное соотношение между АЭС-сжигателями (обычно эту роль играют АЭС с реакторами на тепловых нейтронах) и АЭС с реакторами-размножителями первичной энергии (обычно это АЭС с реакторами на быстрых нейтронах), оказываются драйверами развития ЯЭ, поскольку только, моделируя развитие ЯЭ с реакторами-сжигателями и реакторами-размножителями, можно определить их оптимальную (с точки зрения интересов общества) композицию и возможную роль АЭС с реакторами-размножителями в росте предложения первичной энергии при истощении ее традиционных источников.

Истощение месторождений органического топлива как драйвера развития ЯЭ в начале 1970-х годов получило мощного союзника. Им стал – ОПЕК. Созданный в 1960 г. этот международный картель, объединивший пять нефтедобывающих стран (к концу 1960-х годов их число возросло до 11), создал возможность манипулирования ценами нефти на мировом рынке. В течение

примерно 13 лет ОПЕК не пользовался своей рыночной властью, однако в конце 1973 г. ОПЕК «проснулся» и стал в шоковом режиме повышать цену нефти на мировом рынке, что вызвало мировые энергетические кризисы и стало сигналом конца «эпохи дешевой энергии» (Стырикович, 1980, с. 11).

Установленное ОПЕКом эмбарго на поставку нефти в страны, поддержавшие Израиль в войне, а после его отмены — шоковые цены на экспортируемую нефть, привели в 1970-х гг. к мировым энергетическим кризисам, которые убедительно продемонстрировали всему миру, что эра «дешевой» энергии закончилась и странам — импортерам энергии (в особенности тем, кто импортирует углеводороды) придется (хотя бы они этого или нет) жить в атмосфере «дорогого» энергоснабжения.

За счет дифференциала между картельной ценой на мировых рынках энергоресурсов и предельными издержками их добычи страны — экспортеры нефти стали получать большие сверхприбыли, экономический источник которых — относительно высокая эффективность развитых стран. Особенно неприятным сюрпризом новой реальности дорогой энергии для стран — импортеров нефти оказалось трудно прогнозируемое появление масштабных шоковых и неожиданных для них скачков цен нефти. Из-за их непредсказуемости и масштабности адаптация экономики к шокам цен стала обходиться значительно дороже приспособления к постепенному росту цен нефти.

В странах — импортерах нефти задача снижения импорта нефти получила высший приоритет. Как оказалось, в ее решении были заинтересованы не только страны — импортеры нефти, но и весь мир. Ведь на протяжении последних 200 лет (после первой промышленной революции) именно развитые страны — импортеры нефти (США, Япония, страны западной и северной Европы, Южная Корея, Тайвань и др.) были широкомасштабными мировыми технологическими драйверами. Значительное повышение затрат этих стран на энергоснабжение могло надолго затормозить технологический прогресс во всем мире.

В ответ на использование ОПЕКом на мировом рынке нефти своей экономической власти страны-импортеры стали разрабатывать долгосрочные энергетические программы, чтобы с их помощью можно было снижать негативное влияние на экономику роста нефтяных цен.

ЯЭ в этих новых условиях получила мощный стимул для своего развития, что отразилось в соответствующем росте, данные о котором уже были

приведены выше. По характеру своего воздействия мировой кризис 1973-1974 гг. стал точкой бифуркации, после прохождения которой надежды на ЯЭ как энергетическую палочку-выручалочку мировой энергетики резко выросли.

Еще один «союзник» в наборе драйверов ЯЭ появился даже раньше ОПЕКа. В 1960–1970-е годы были опубликованы результаты исследований, в которых был обнаружен заметный антропогенный след в наблюдаемое в XIX–XX вв. повышение концентрации парниковых газов в атмосфере Земли. Основной вклад в антропогенную эмиссию парниковых газов вносит сжигание органического топлива. Была обнаружена положительная корреляция между концентрацией парниковых газов в атмосфере и потеплением климата на Земле. Оценки показали также, что следование сложившемуся тренду антропогенной эмиссии парниковых газов приведет к существенному снижению комфортности жизни людей на Земле. Во многих местах нормальный уровень комфортной жизни окажется недостижимым. Хотя результаты были получены с помощью представительных климатических моделей, некоторые авторитетные ученые и исследовательские организации не признавали значимость влияния антропогенной эмиссии парниковых газов на потепление климата на Земле. В своих работах они «не замечали» проблемы глобального потепления или не рассматривали глобальное потепление как существенную угрозу цивилизации (см., например, (Мировая энергетика..., 1980), (Стырикович, 1980), (Воробьев, Воскресенский, Гончаров, 1987), (Аникеев, Жибоедов, 1995)).

Однако позже появились работы, опиравшиеся как на наблюдаемые климатические изменения, так и на более совершенные и трудно опровергаемые климатические модели, которые подтвердили: угроза человечеству глобального потепления климата серьезна, и значительная доля «вины» за ее появление было возложено на человеческую деятельность.

И здесь снова на авансцену выходит ЯЭ, поддерживаемая несбалансированностью энергетического сектора в большинстве стран мира, низкими издержками производства базовой электроэнергии, картельной ценовой политикой ОПЕКа на мировом рынке нефти и угрозой глобального потепления климата на Земле. Кажется, что приведенные выше картины будущего, тотального доминирования в нем ЯЭ (они уже были приведены выше) должны стать реальностью. Но этого не произошло. Почему рост ЯЭ затормозился?

2. Тормозы развития ядерной энергетики

Для многих наблюдателей ответ на поставленный выше вопрос очевиден – в торможении развития АЭС и провале ожиданий вытеснения из структуры первичной энергии органического топлива ядерным «виноваты» три аварии на АЭС. Одна из них, произошедшая в 1979 г. на АЭС Three Miles Island (TMI) была очень серьезной, а две другие (в 1986 г. на Чернобыльской АЭС и в 2011 г. на АЭС Fukushima) катастрофическими.

Такая оценка причин торможения роста ЯЭ, однако, не вполне соответствует фактам. В США и в нескольких странах Западной Европы еще в 1960-х – начале 1970-х годов, то есть до аварии на АЭС TMI, возникло движение против строительства АЭС. Какими мотивами могли руководствоваться сторонниками этого движения, когда практически было подтверждено, что во многих местах, где строились электростанции, издержки производства электроэнергии на АЭС ниже, чем на ТЭС. При этом подавляющее большинство экспертов, работающих в энергетическом секторе, были твердо уверены, что реакторам на тепловых нейтронах (а реакторы этого типа доминировали в программах строительства АЭС) присуща «внутренняя безопасность» благодаря отрицательной связи между температурой топлива и мощностью тепловыделения в реакторе (это взаимодействие проявляется так: чем выше температура топлива, тем ниже уровень энерговыделения в ядерном реакторе). Согласно этим взглядам, отрицательная обратная связь не позволит развиваться ядерным реакциям, приводящим к взрыву ядерного реактора. Такие реакции считались физически невозможными, поэтому ядерные реакторы на тепловых нейтронах рассматривались как безопасные промышленные объекты.

Безопасный объект – это объект, который никому ничем не угрожает (Ожегов, 1988, с. 37). Однако промышленная деятельность, как правило, не бывает совершенно безопасной. Происходят аварии, которые вредят окружающей среде, здоровью людей, иногда в результате аварий люди гибнут люди. Потенциальная опасность АЭС очень велика – скорость реакций с выделением больших количеств тепловой энергии в ядерном реакторе очень высокая, выделение энергии сопровождается производством радиоактивных веществ, многие из которых распадаются затем на безопасные вещества только в течение десятилетий. Так что при работе ядерного реактора в нем протекают процессы, которые безопасными не являются. Правда, с самого начала перед ЯЭ ставилась задача «не допустить выхода радиоактивности за пределы ядерного реактора или технологических помещений станции» (Сидоренко, 1988, с.28).

Еще в более жестком виде условие развития ЯЭ сформулировано в (Легасов, Новиков, 1988, с. 35): первая проблема, стоящая перед ядерной энергетикой, – это «обеспечение безопасного пути ее развития». «Безопасный» (по определению этого свойства) путь развития ЯЭ в принципе неосуществим, так что, хотя это условие вписывается в рамки общей стратегии развития экономики СССР: «догнать и перегнать», в данном случае он нереализуем, так как безопасные (в точном смысле этого слова) АЭС создать пока не представляется возможным ни в одной стране. Поскольку безопасных промышленных объектов создать не удастся, при принятии решений приходится опираться не на недостижимое свойство безопасности, а на другое свойство, которое отражает отношение людей к данному промышленному объекту. Это свойство называется приемлемостью. Применительно к ЯЭ оно было рассмотрено в (Чернавский, 1988, с.3-25).

Приемлемый объект – это такой объект, который удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям (Ожегов, 1988, с.479), его можно принять и начать работу с ним.

Понятие приемлемости можно проиллюстрировать на таком бытовом примере. Допустим, Вы хотите пойти в кинотеатр, чтобы посмотреть фильм, который привлек Ваше внимание. Чтобы попасть в кинотеатр, Вам придется купить входной билет. Только после этого Вы станете приемлемым для владельца кинотеатра зрителем и сможете посмотреть фильм. Так и в случае с ЯЭ: только после того, как объект системы ЯЭ будет признан приемлемым, начнется его работа как промышленного объекта.

О чьих требованиях может идти речь, когда объектом является ЯЭ. В агрегированном виде картина приемлемости ЯЭ представлена в табл.1. Согласно приведенным данным, сегодня ЯЭ оказалась приемлемой в 31 стране. Рассматривая отношение людей к ЯЭ более детально, можно выделить несколько заинтересованных слоев. Во-первых, это конструкторы и дизайнеры предприятий и систем ЯЭ, в задачу которых входит сооружение технически надежно работающих и экономически прибыльных объектов. В свою очередь, к этому сорту специалистов предъявляется множество технических и экономических требований со стороны органов технадзора, строителей, монтажников, эксплуатационного персонала, а также инвесторов и собственников соответствующих объектов ЯЭ. В первом приближении характер требований к людям, занимающимся деятельностью по конструированию,

сооружению и эксплуатации объектов ЯЭ, одинаков, и вариации определяются целями, поставленными перед этими людьми.

Как эти люди определяют приемлемость объекта ЯЭ? Полностью безопасный ядерно-энергетический объект соорудить невозможно, поэтому время от времени на нем будут происходить опасные события. Одни можно будет технически предотвратить (с помощью диагностических систем) или парировать (например, с помощью ремонта). Решения о приемлемости будут приниматься в результате оценивания собственниками и инвесторами. Рост капиталовложений в ЯЭ – фактор, который может притормозить развитие ЯЭ, но окончательное решение об экономической приемлемости оцениваемого объекта будет приниматься в результате сравнения экономики ядерно-энергетического объекта с альтернативными вариантами.

Но возможны события другой природы, когда активные процессы, протекающие в объекте, выходят из-под контроля персонала объекта и воздействуют не только на технические элементы объекта, но и на людей и другие части окружающей среды. Как в этом случае оценить приемлемость оцениваемого объекта? Трудность решения этой задачи состоит в том, что оцениваемый объект еще не построен.

Для решения этой задачи прежде всего нужно составить перечень таких событий, относительно которых есть предположение, что каждое из них может произойти. После этого по каждому списочному событию нужно определить состав пострадавших, вред, который был нанесен каждому пострадавшему от события, а также оценить вероятность события и дать оценку вероятности события. Сумма полученных оценок представляет собой агрегированную оценку объекта ЯЭ для сопоставления с другими проектами.

На первый взгляд – очень ясная процедура оценки, хотя ее получение и сопряжено с большими трудовыми затратами. Однако при оценивании ядерных реакторов эта ясность – иллюзия. Дело в том, что реакции деления ядер в ядерном реакторе относятся к цепным реакциям, скорость которых очень велика, а выделяющаяся при каждом делении энергия огромна. Реакции должны быть управляемыми, чтобы не допустить ни чрезмерного ускорения энерговыделения, ни остановки реактора, в то время, когда АЭС должна работать.

Согласно бытовавшим в 1950-е – 1970-е годы представлениям о работе реакторов на тепловых нейтронах, разгон реакции блокируется уже упоминавшейся обратной связью между температурой топлива и

интенсивностью энерговыделения. Это было основанием для исключения из списка возможных событий тех событий, в которых активная зона расплавляется. Чтобы подчеркнуть их нереалистичность, аварии с расплавлением активной зоны реактора, в том числе аварии «с тяжелыми последствиями, связанными с разрушением реактора и выходом радиоактивных веществ в окружающую среду» называли «запроектными» (Легасов, Новиков, 1988, с.36)». Однако в мире три таких «запроектных» аварии все-таки произошли, что говорит о том, что отрицательная обратная связь, безусловно существующая, не смогла предотвратить появление события, казалось бы, физически невозможного.

Появление «физически невозможного» события, в свою очередь, является следствием недостаточной изученности процессов и свойств реальной сконструированной человеком, то есть искусственной, системы – АЭС с ядерным реактором. Оказалось, что сложность этой системы была недооценена и причем не только в том, что эта система является симбиозом техники и людей, – сама техническая система оказалась более сложной, чем предполагали ее создатели.

Чтобы составить полный список возможных событий в искусственной человеко-технической системе, должны быть рассмотрены все события, возможные именно в данной системе, сконструированной человеком, аналога которой в природе не существует. Из-за неполной изученности некоторые возможные в данной искусственной системе события могут оказаться необнаруженными и не попасть в список событий, которые должны быть учтены при оценке данного объекта. В результате – считавшаяся невероятной «запроектная» авария, как на АЭС ТМІ или на Чернобыльской АЭС, компрометирует ЯЭ в глазах многих людей и тормозит, а в некоторых странах останавливает рост (но не обязательно совершенствование!) ЯЭ. Запроектной аварией была и авария на АЭС Fukushima. Но если в рассмотренных выше двух авариях фактором торможения развития АЭС было недостаточное знание процессов в ядерном реакторе, то причиной аварии на АЭС Fukushima было недостаточное знание природных процессов в зоне этой АЭС.

Значимость недостаточности знаний при формировании полного множества возможных аварий на АЭС играет гораздо бóльшую роль, чем недостаточность знаний при формировании списка возможных аварий на ТЭС, так как последствия самых тяжелых аварий на АЭС сопряжены с намного более

опасным вредом для людей и окружающей среды, чем последствия от самых тяжелых аварий на ТЭС.

Авария на ТМІ поставила на повестку дня очень сложный вопрос: можно ли добиться того, что «запроектные» аварии в ЯЭ (расплавление активной зоны, выход радиоактивности за пределы АЭС, разрушение ядерного реактора) будут полностью исключены из списка возможных событий? Аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС Fukushima показали, что пока этой цели достичь не удалось. Это, несомненно, является существенным фактором, тормозящим рост ЯЭ. Однако этот же фактор способствует развитию ЯЭ, стимулируя поиск дизайна ЯЭ, в котором эта задача, возможно, будет решена.

Но как подходить к оценке ЯЭ сегодня, когда «запроектная» авария возможна? Задача оценки объекта, в процессе эксплуатации которого возможны различные аварии с разными последствиями, аналогична игре человека с человеко-технической системой. Этот тип игры, заметим, существенно отличается от игр с природой – традиционного объекта, рассматриваемого в теории игр. Принципиальное отличие состоит в том, что природа может быть описана моделями, основанными на законах природы. В человеко-технической системе действует человек, поведение которого не описывается полностью законами, а в значительной мере определяется его, вообще говоря, непредсказуемой активностью. Создать же для такой системы как ядерный реактор, в котором протекают высокоскоростные опасные процессы, «дуракоустойчивую» модель управления – исключительно сложно, а может быть даже и невозможно. Очевидно, что без использования в такой модели знаний психологии персонала, привлеченного для работы с техническими устройствами АЭС и социальных отношений коллективах АЭС, составить множество возможных событий невозможно. Междисциплинарный подход для решения этой задачи естественен.

Каждое возможное событие в игре человека с человеко-технической системой описывается парой чисел: суммарной величиной ущерба для людей и окружающей среды от данного события и вероятностью этого события. Произведение этих чисел дает вклад данного события в общую оценку объекта, а сумма вкладов по всем возможным событиям – результирующую оценку объекта. Сравнение оценки ЯЭ с оценками других источников первичной энергии может послужить основой для оптимизации структуры используемых источников первичной энергии.

Такая схема оценивания кажется естественной и ясной. Но в ней очень много проблем, некоторые из которых не имеют ясного решения. О трудности составления полного списка возможных событий уже говорилось. Ясно, что в настоящее время этот список должен быть дополнен «запроектными» авариями, специфичными для конкретного дизайна ЯЭ.

При этом сразу возникает проблема «входного билета»: приемлема ли такая игра, в которой возможна «запроектная» авария на АЭС. Очевидно, что ответ на этот вопрос – один из самых важных для развития и роста ЯЭ. Неприемлемость, несомненно, затормозит рост ЯЭ. Проблема приемлемости ЯЭ рассматривается во многих работах. В русскоязычной литературе одной из первых была работа (Чернавский, 1988), где рассматривается влияние психологических и социальных факторов на оценку приемлемости ЯЭ.

Но предположим, что «запроектную» аварию общество оценило как приемлемую и она включена среди других событий в общую оценку ЯЭ. Чтобы оценить вклад этой аварии в общую оценку, необходимо, как уже говорилось, определить ущерб от этой аварии (предположим, что такую оценку удалось получить) и ее вероятность. Здесь возникает серьезная проблема: теорию вероятности использовать нельзя, так как для очень редких событий нет эмпирических статистических данных. Субъективной вероятностью тоже нельзя воспользоваться, так как субъектов, у которых можно было попросить вероятностную оценку, не существует – у людей пока нет надлежащего опыта такого оценивания, до этот опыт вряд ли когда-нибудь появится. По-видимому, в этом случае придется вернуться к вопросу: приемлема ли ЯЭ, если «запроектная» авария произойдет «завтра»?

Ответ на этот вопрос носит исторический характер. Если бы такой вопрос был задан лет тридцать тому назад в условиях, когда нет другой альтернативы, кроме развития ЯЭ, ответ мог быть позитивным: да, приемлема. Сегодня, когда технологии использования НВИЭ достигли коммерческой зрелости, ответ становится уже не таким однозначным. Если общество в данной стране не хочет рисковать тем, что в отсутствие полностью «дуракоустойчивых» объектов ЯЭ «запроектная» авария в стране может случиться «завтра», оно может предпочесть более дешевой (при нормальной эксплуатации предприятий ЯЭ) ядерной энергии более дорогие источники первичной энергии – традиционные (нефть, газ, уголь и крупные ГЭС) или нетрадиционные возобновляемые источники (солнечный свет, ветер, биотопливо, геотермальную энергию).

Если общество под давлением разного рода обстоятельств (не только экономических) готово рискнуть, то выбор будет сделан в пользу ЯЭ, несмотря на риск столкнуться с «запроектной» аварией. Из сказанного выше следует, что в обоих случаях для определения оптимальной (с точки зрения интересов общества) структуры используемых источников первичной энергии необходимы глубокие междисциплинарные исследования, охватывающие многие аспекты человеческой деятельности. Это серьезный вызов научным и практическим работникам.

Список использованных источников

Александров А. П. (1978). Атомная энергетика и научно-технический прогресс. Статьи и выступления. М.: Наука.

Александров А.П. (1984). Технические аспекты ядерной энергетики на грани веков // Атомная энергия. – Том 56. – Вып. 6, Июнь 1984. – С. 339-343.

Аникеев В.А., Жибоедов В.Г. (1995). Экологические аспекты энергетики / Новая энергетическая политика России. Под общей ред. Ю.К. Шафраника. Ред. коллегия: В.В. Бушуев, А.А. Макаров, А.М. Мастепанов, А.А. Соловьянов. М.: Энергоатомиздат.

Воробьев В.К., Воскресенский Ю.К., Гончаров Ю.А. (1987). Энергетика СССР в 1986–1990 годах. Под ред. А.А. Троицкого. М.: Энергоатомиздат.

Воскресенский Ю. К. (1987). Атомные электростанции / Энергетика СССР в 1986–1990 годах / Под ред. А. А. Троицкого. М.: Энергоатомиздат.

Корякин Ю.И. (2002). Окрестности ядерной энергетики России: новые вызовы. М.: Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н. А. Доллежала (ГУП НИКИЭТ).

Легасов В.А., Новиков В.М. (1988). Безопасность и эффективность ядерной энергетики: критерии, пути совершенствования / В сб.: Ядерная энергетика: перспективы развития, проблемы прогнозирования. – Под ред. М.А. Стыриковича. – М.: Международный центр научной и технической информации, Рабочая консультативная группа при Президенте АН СССР для разработки новых вопросов дальних перспектив развития энергетики. – С. 35-47.

Мировая энергетика (1980). Мировая энергетика: прогноз развития для 2020 г. Пер. с англ. под ред. Ю.Н. Старшинова. М.: Энергия.

Ожегов С.И. (1988). Словарь русского языка. – Под ред. Н.Ю. Шведовой. – 20-е изд. – М.: Русский язык.

Сидоренко В.А. (1988). Безопасность и стратегия развития ядерной энергетики / В сб.: Ядерная энергетика: перспективы развития, проблемы прогнозирования. – Под ред. М.А. Стыриковича. – М.: Международный центр научной и технической информации, Рабочая консультативная группа при Президенте АН СССР для разработки новых вопросов дальних перспектив развития энергетики. – С. 26-34.

Стырикович М.А. (1980). Предисловие к русскому изданию / Мировая энергетика: прогноз развития для 2020 г. – Пер. с англ. под ред. Ю.Н. Старшинова. – М.: Энергия.

Стырикович М.А., Белова А.М., Рассохин Н.Г., Хаинсон Я.И., Чернавский С.Я. (1984). Проблемы покрытия переменной части графиков электрических нагрузок в перспективе / Энергетика. Топливо. 1984. Вып. 6. С. 21-27. М.: МЦНТИ.

Стырикович М.А., Шпильрайн Э.Э. (1981). Энергетика. Проблемы и перспективы. – М.: Энергия.

Чар Н.Л., Шик Б.Дж. (1987). Развитие ядерной энергетики: история и перспективы. – Бюллетень МАГАТЭ. – № 3. – С.22-28. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/29304781925_ru.pdf.

Чернавский С.Я. (1980). Системное прогнозирование ядерной энергетики. Теория и методы. – М.: Наука.

Чернавский С.Я. (1988). Ядерная энергетика: перспективы развития, проблемы прогнозирования / Ядерная энергетика: перспективы развития, проблемы прогнозирования. – Под ред. М.А. Стыриковича. – М.: Международный центр научной и технической информации; Рабочая консультативная группа при Президенте АН СССР для разработки новых вопросов дальних перспектив развития энергетики.

Чернавский С.Я. (2023). Системное прогнозирование (на примере ядерной энергетики). 2-е изд., доп. – М.: Ленанд.

Экспертная оценка-1975. (2013). Ядерная энергетика. Основные проблемы и перспективы развития. Экспертная оценка 1975 г. / В: И. В. Курчатов и А. П. Александров о стратегии ядерного энергетического развития. Отв. ред. А. Ю. Гагаринский, М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2013.

Энергетический комплекс СССР. (1983) / Под ред. Л. А. Мелентьева и А. А. Макарова. М.: Экономика.

NEPSG. (1977). Nuclear power issues and choices. Report of the Nuclear Energy Policy Study Group. – Cambridge: Ford Foundation.

Nuclear Power in the World Today. (2022). <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>.

Drivers and brakes on the development of nuclear energy

Doctor of Economic Sciences,
Candidate of Technical Sciences,
Chief Researcher
of the Central Institute
of Economics and Mathematics of RAS
Chernavskii S.Ya.

Abstract

Many countries, for one reason or another, suffer from a shortage of fossil fuels, which have been the main source of primary energy in the world for more than 200 years. As early as the 1960s, nuclear power plants with lower production costs than fossil fuel condensing power plants began to be built. This created a widespread demand for nuclear power plants in many not only developed but also developing countries. However, the spread of nuclear power as a primary energy source has been very uneven. Periods of accelerated growth of nuclear power alternate with periods of deceleration and even stagnation. A wide palette of factors influencing both the growth of nuclear power (energy balance deficit, countries' desire for energy independence and reduction of energy supply costs, threat of global warming on Earth, depletion of fossil fuel resources, use of economies of scale, etc.) and its inhibition (assessment of the acceptability of nuclear energy as a primary energy source, lack of knowledge about the development of nuclear reactions in nuclear reactors, complexity of human and technical systems, serious a It is shown that a realistic, objective and comprehensive assessment of the whole palette of drivers and limiting factors of nuclear power growth requires an interdisciplinary approach and contributes to improving the quality of forecasting the development of nuclear power and society as a whole.

Key words: nuclear power, public welfare, energy demand, energy production costs, primary energy, accidents at nuclear power plants, acceptability, global climate warming, renewable energy sources, depletion of fossil fuel resources.