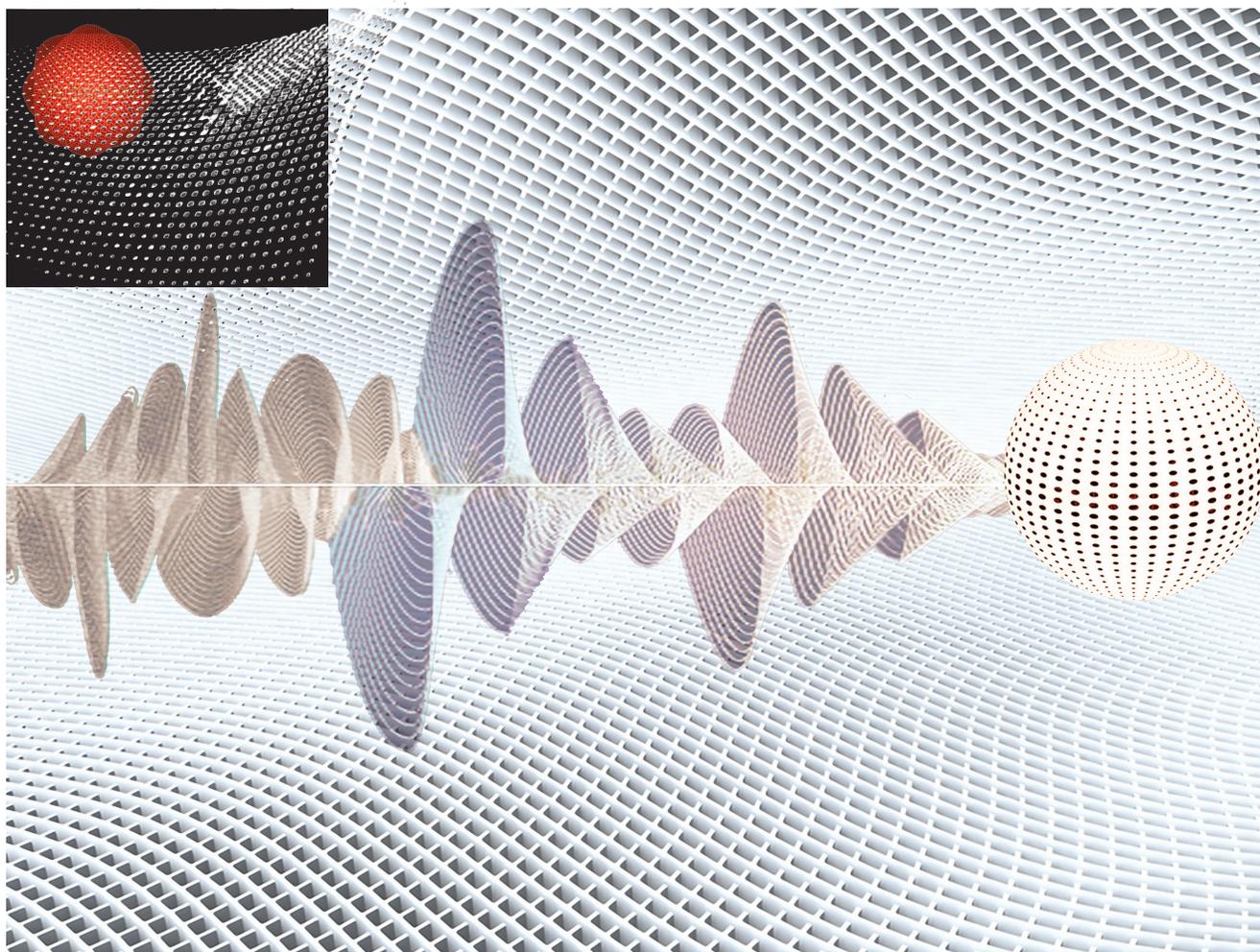


# Долгосрочное стохастическое прогнозирование мирового рынка ядерной энергетики

Владимир Харитонов, Ульяна Курельчук, Сергей Мастеров



Серьезные аварии, имевшие место на объектах ядерной энергетики в последние годы, сформировали негативный фон по отношению к этому сектору.

Тем не менее он играет ключевую роль в экономике, обладает многообещающим инновационным потенциалом. Уже сегодня достигнут значительный прогресс в эффективности производства энергии и уменьшении ее себестоимости.

В статье предложена авторская модель оценки будущего состояния рынка ядерной энергетики, рассчитываются его предполагаемые объемы до 2035 г., оцениваются последствия этих изменений, определяющие формирование политики в разных странах и регионах.

Владимир Харитонов — заместитель директора  
Экономико-аналитического института.  
E-mail: VVKharitonov@mephi.ru

Ульяна Курельчук – ведущий инженер.  
E-mail: ulyanakurelchuk@gmail.com

Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ)  
Адрес: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

Сергей Мастеров – заместитель начальника отдела конъюнктуры, Объединенная компания АО «НИАЭП» — ЗАО «Атомстройэкспорт» (НИАЭП-АСЭ).  
Адрес: 127434, Москва, Дмитровское шоссе, д. 2, стр. 1.  
E-mail: s.masterov@atomstroyexport.ru

## Ключевые слова

стохастическое прогнозирование; рынок ядерной энергетики; установленная мощность АЭС; строительство АЭС; вывод АЭС из эксплуатации; уран природный и обогащенный; работа разделения изотопов урана; метод Монте-Карло; дисперсия

DOI: 10.17323/1995-459X.2015.2.58.71

Цитирование: Kharitonov V., Kurelchuk U., Masterov S. (2015) Long-term Stochastic Forecasting of the Nuclear Energy Global Market. *Foresight-Russia*, vol. 9, no 2, pp. 58–71. DOI: 10.17323/1995-459x.2015.2.58.71.

Стратегическое прогнозирование — актуальная задача как для глобального, так и для локальных рынков ядерной энергетики и даже отдельных игроков отрасли. Последняя характеризуется высокой инерционностью, связанной с длительными сроками проектирования, строительства и эксплуатации атомных электростанций (АЭС), доходящими в сумме до 100 и более лет. Под рынком ядерной энергетики в нашей статье понимается сеть взаимосвязанных рынков, характеризуемых в терминах их объема в натуральном выражении. Речь идет о следующих рынках:

- строительство и вывод из эксплуатации АЭС (выражен в количестве реакторов или их установленной электрической мощности, ГВт);
- природный и обогащенный уран (в тоннах, тU);
- услуги по обогащению урана (в единицах работы разделения, ЕРР).

Игроками этих рынков выступают правительства, частные и государственные компании, международные корпорации. Все они заинтересованы в минимизации рисков при принятии технологических, экономических и политических решений. Одним из инструментов демпфирования рисков служит регулярная публикация рядом международных организаций и крупных энергетических компаний прогнозов развития отрасли и вклада ядерной энергетики в структуру топливно-энергетического комплекса (ТЭК) отдельных стран, регионов и мира в целом. К числу наиболее авторитетных относятся прогнозы Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) (International Atomic Energy Agency, IAEA) [IAEA, 2014a, 2014b], Всемирной ядерной ассоциации (World Nuclear Association, WNA) [WNA, 2013, Emsley, 2013], Международного энергетического агентства (МЭА) (International Energy Agency, IEA) [IEA, 2012, 2014], Министерства энергетики США (U.S. Department of Energy, DOE) [DOE, 2014], Европейского сообщества по атомной энергии (Евратом) (European Atomic Energy Community, Euratom) [European Commission, 2012], консалтинговой компании Ux Consulting Company, LLC (США) [Ux Consulting, 2013; Carter, 2014], Института энергетических исследований (ИНЭИ) РАН [ИНЭИ РАН, 2013], энергетических компаний Exxon Mobil [Exxon Mobil, 2013] и British Petroleum [BP, 2013]. Периодические обзоры и прогнозы развития мировой энергетики, публикуемые перечисленными организациями, вносят значимый вклад в глобальные дебаты о перспективах отрасли.

Подавляющее большинство публикаций опираются на так называемый сценарный подход к долгосрочному прогнозированию с горизонтом в 20–30 лет. Существуют три основных типа сценариев: пессимистические, умеренные и оптимистические (в терминологии WNA — *lower*, *reference* и *upper*). Приведенные в прогнозах международных организаций и компаний сценарии [IAEA, 2014a, 2014b; WNA, 2013; Emsley, 2013; IEA, 2012, 2014; DOE, 2014; European Commission, 2012; Ux Consulting, 2013; Carter, 2014; ИНЭИ РАН, 2013; Exxon Mobil, 2013; BP, 2013] базируются на анализе энергетических стратегий отдельных государств — как располагающих действующими АЭС, так и планирующих их строительство, и учитывают тренды развития

экономики этих стран и мира в целом. Практически во всех прогнозах существенное расхождение между тремя типами сценариев наблюдается после 2020 г., причем прогнозы 2013–2014 гг. сулили более низкие темпы развития ядерной энергетики по сравнению с более ранними прогнозами 2011 г. (см., например, [WNA, 2011, 2013]). Пессимистический сценарий отражает политические последствия аварии на АЭС в Фукусиме, пересмотренные в сторону сокращения планов в развивающихся странах и остановки ряда реакторов в развитых. В умеренном сценарии WNA от 2013 г. предполагается рост установленных мощностей АЭС с 364 ГВт в 2011 г. до 574 ГВт в 2030 г., то есть почти на 60%. Оптимистический сценарий предусматривает завершение строительства заложенных АЭС во всех странах и продление эксплуатации действующих станций. Установленная мощность АЭС возрастет в 1.9 раза до 700 ГВт.

Некоторые расхождения в сценариях развития ядерной энергетики перечисленных организаций и компаний в большей степени связаны с их отношением к «зеленой энергетике» (солнечной, ветряной и т. д.) и парниковому эффекту от использования углеводородного топлива. Ни в одном из указанных прогнозов сколь-либо серьезной альтернативы ядерной энергетике фактически не представлено. Лишь авторы исследования АО «НИКИЭТ» [Аврорин и др., 2012], горизонт прогнозирования которого простирается до 2100 г., указывают на возможность и целесообразность в срок до 2030 г. начать строительство реакторов нового поколения на быстрых нейтронах, способных в 100–200 раз увеличить ресурсную базу ядерной энергетики. Однако продолжительность эксплуатации АЭС и разработки новых реакторов делает смену поколений оборудования в данной сфере крайне длительной. Об этом свидетельствует, в частности, перенос на более поздний срок (после 2035 г.) строительства коммерческих реакторов IV поколения и ядерно-энергетических систем с замкнутым топливным циклом, разрабатываемых в рамках международных проектов GIF-IV и INPRO [OECD, 2013, 2014; IAEA, 2011, 2014c].

Оговоримся, что все рассмотренные прогнозы, равно как и наша модель, исходят из предположения, что до 2040 г. в мире не произойдет аварии 6-го или 7-го уровня по Международной шкале ядерных событий (International Nuclear Event Scale, INES). В противном случае последуют новые моратории на АЭС, перенос и отмена части новых проектов, а также частичные отказы от продления эксплуатации действующих блоков.

Участники рынка ядерной энергетики формируют прогнозы своих возможностей и рисков на основании оценки дисперсии (или квантилей 5 и 95%) объемов спроса и предложения на глобальном рынке. В зависимости от целей и стратегии игроков их риски могут быть вызваны переоценкой либо недооценкой потребностей рынка, поэтому, в отличие от широко применяемого в прогнозах сценарного подхода [IAEA, 2014a, 2014b; WNA, 2013; Emsley, 2013; IEA, 2012, 2014; DOE, 2014; European Commission, 2012; Ux Consulting, 2013; Carter, 2014; ИНЭИ РАН, 2013], требуются инструменты, позволяющие задавать дисперсии ожидаемых тенденций

и анализировать произвольные срезы структуры рынка ядерной энергии, варьировать исходные параметры и тем самым системно измерять риски реализации того или иного сценария. В нескольких работах [Runte, 2013; Schneider et al., 2012; Андрианова и др., 2008, 2011] предпринимаются попытки вероятностной оценки ожидаемых трендов развития отрасли. В исследовании [Runte, 2013] приведены статистические данные о разбросе некоторых динамических параметров строительства АЭС (сроки, установленные мощности, капитальные затраты, расчетная стоимость электроэнергии и др.) без прогнозирования более общих процессов: вероятностных сценариев развития ядерной энергетики и ее потребностей в услугах предприятий ядерного топливного цикла. В работе [Schneider et al., 2012] рассматриваются вопросы статистического измерения стоимости работы реактора. В публикациях [Андрианова и др., 2008, 2011] разработан программный комплекс DESAE, использующий метод стохастического поиска минимума функций, необходимых для построения конкретного сценария, но без учета дисперсии результатов. Авторы этих двух работ уделяют также значительное внимание возможной структуре отрасли, включающей реакторы разного типа (на тепловых и быстрых нейтронах) и различные топливные циклы.

В отличие от подобных подходов предлагаемая нами методика долгосрочного прогнозирования объемов рынков мировой ядерной энергетики (с горизонтом в 20–25 лет) основывается на стохастическом моделировании жизненных циклов реакторов и физической взаимосвязи их типов и мощности с потребностями в услугах ядерного топливного цикла. С использованием официальных отчетов WNA, МАГАТЭ и других источников [IAEA, 2012, 2014a, 2014b, 2014d; WNA, 2011, 2013; Emsley, 2013; IEA, 2012, 2014; DOE, 2014; Schneider et al., 2013; Sholly, 2013] нами сформирована база данных, охватывающая все типы действующих и строящихся (или планируемых к возведению) ядерных реакторов на тепловых нейтронах, преимущественно относящихся к последней категории, III и III+ поколениям. В модели не учитываются реакторы-бридеры IV поколения с замкнутым циклом, поскольку запуск их коммерческой эксплуатации ожидается не ранее 2035 г.

Модель позволяет получать вероятностные распределения указанных характеристик рынка, необходимых для оценки экономических рисков различных глобальных игроков. В нашей статье представлены основные принципы и лишь некоторые результаты применения модели: динамика установленной мощности АЭС по отдельным регионам и миру в целом; потребность АЭС в природном и обогащенном уране и работе разделения. Показаны перспективы и вероятные объемы рынков строительства новых станций и вывода из эксплуатации выработавших свой ресурс реакторов в различных регионах.

### Методика вероятностного прогнозирования развития ядерной энергетики

Модель вероятностного прогнозирования рынков ядерной энергетики приведена на рис. 1.

На первом этапе составляется перечень всех существующих, планируемых и потенциально реализуемых проектов строительства атомных энергоблоков в разных странах с использованием данных МАГАТЭ, WNA и других источников.

На втором этапе формируется база технико-экономических показателей каждого энергоблока: тип реактора; его электрическая и тепловая мощности; средние значения коэффициента использования установленной мощности (КИУМ), глубины выгорания топлива, обогащения топлива подпитки, массы и обогащения начальной топливной загрузки и др. Показатели заложенных АЭС моделируются в виде распределений случайных величин на основе существующих проектов.

На третьем этапе учитываются и моделируются такие ключевые временные параметры жизненного цикла каждого энергоблока, как дата закладки, начало и вывод из эксплуатации. Плановая длительность эксплуатации строящихся реакторов поколений III и III+ достигает, как правило, не менее 50–60 лет.

На четвертом этапе (и далее) осуществляется вероятностный расчет объемов рынков ядерной энергетики в натуральном выражении. Результаты могут быть сгруппированы по нескольким критериям: по времени, регионам, компаниям, типам реакторов и т. д.

Ключевой и самый чувствительный этап моделирования — третий, связанный с определением временных параметров жизненного цикла энергоблоков АЭС (этап 3). Установленные проектные сроки практически никогда в точности не выполняются, поэтому в основу метода положено вероятностное моделирование длительности основных этапов работы станции и ряда параметров ядерного топливного цикла. Важнейшие моменты жизненного цикла каждого энергоблока [Runte, 2013; Sholly, 2012; IAEA, 2012] моделируются в виде дерева событий (рис. 2). Вероятность ветвления «Да» — «Нет» зависит от региона, в котором происходит строительство; времени, прошедшего с момента составления прогноза; полноты исходных данных. В расчет принимается и то обстоятельство, что для каждого региона размещения АЭС вероятности ветвления, связанные с планированием ввода новых блоков, коррелируют друг с другом так же, как и при выводе блоков из эксплуатации. Таким образом, для каждой ветви дерева генерируются уникальные наборы случайных распределений временных параметров энергоблока, где  $T_C$  — распределение вероятности даты начала строительства,  $T_O$  — начало эксплуатации,  $T_D$  — начало вывода из эксплуатации. Вероятностные значения временных параметров моделируются с использованием равномерных и PERT-распределений [Davis, 2008]. Поскольку временные параметры жизненного цикла энергоблока являются зависимыми величинами ( $T_O = f(T_C)$ ;  $T_D = f(T_O)$ ), вероятностные распределения для них определяются последовательно с учетом длительности строительства  $t_C$  и длительности эксплуатации  $t_O$ :

$$T_C \rightarrow T_O = T_C + t_C \rightarrow T_D = T_O + t_O. \quad (1)$$

Параметры вероятностных распределений строятся на основе статистических, проектных и прогнозных

Рис. 1. **Схема построения модели вероятностного прогнозирования рынков ядерной энергетики**

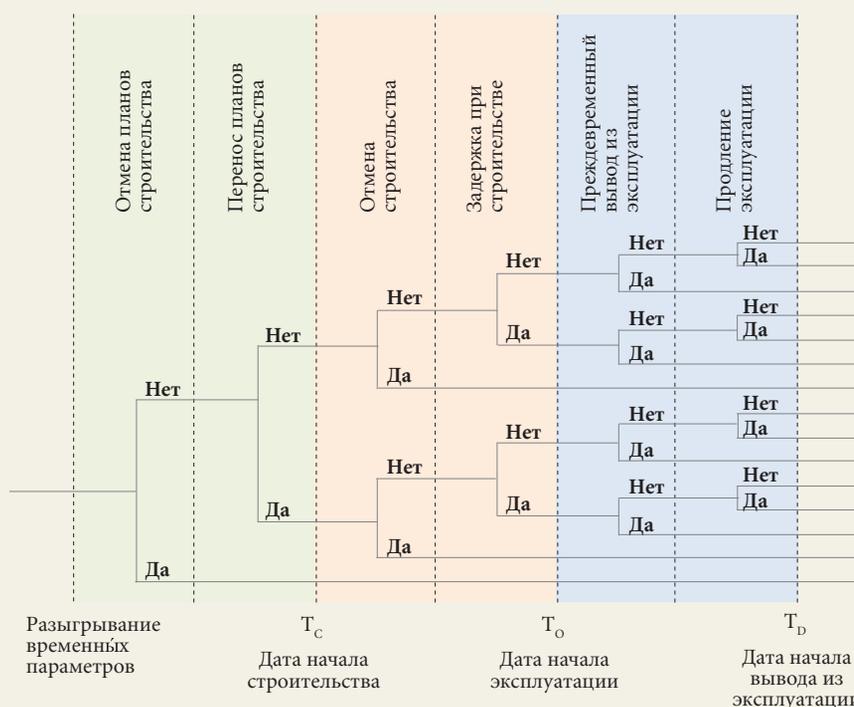


**Источники информации и методы ее обработки**

Этап 1	Базы данных МАГАТЭ, WNA и другие источники	Исследуемый элемент
Этап 2	Детерминированные данные (определены тип и мощность) Стохастическое моделирование (разыгрывание конфигурации)	Промежуточный элемент
Этап 3	Детерминированные данные (статистика) Стохастическое моделирование (разыгрывание жизненного цикла)	Не исследуемый элемент
Этап 4	Детерминированные данные (статистика) Стохастическое моделирование (разыгрывание технологических параметров)	

Источник: составлено авторами.

Рис. 2. **Схема моделирования временных характеристик жизненного цикла энергоблока**



Источник: составлено авторами.

данных для разных типов ядерных реакторов [IAEA, 2012, 2014a, 2014b, 2014d; WNA, 2013; Emsley, 2013; IEA, 2012, 2014; DOE, 2014; Schneider et al., 2013; Sholly, 2013] с учетом оценок их достоверности. Как следствие, форма отдельных распределений вероятности (например, значения минимума, максимума и моды для PERT-распределения) выбирается с учетом места, времени и специфических характеристик конкретного энергоблока. Результат моделирования временных параметров жизненного цикла одного энергоблока может быть представлен в виде наложения частотных гистограмм (рис. 3).

Моделирование структуры глобальной ядерно-энергетической отрасли проводится с использованием метода Монте-Карло через воспроизведение жизненных циклов и технико-экономических показателей каждого отдельного энергоблока. Связь между различными случайными факторами учитывается за счет коэффициентов корреляции и введения стохастических управляющих параметров как в географическом, так и во временном измерениях. Прослеживание этой связи свидетельствует, что решения о строительстве, продлении или досрочном прекращении эксплуатации энергоблока АЭС принимаются не произвольно, а испытывают влияние тенденций развития ядерной энергетики в той или иной стране, регионе или мире в определенный период времени. Коэффициент корреляции может служить одним из управляющих параметров модели наряду с параметрами распределений, отражающих степень достоверности исходных данных, различные технологические и региональные особенности, научно-технический прогресс в реакторостроении и т. д.

Расчетная модель в принципе позволяет учесть влияние таких факторов, как крупные аварии, экономические кризисы, политические решения, а также совершенствование технологий строительства и эксплуатации АЭС, обогащения урана и производства ядерного топлива.

## Прогнозирование числа и установленной мощности АЭС

Базой для представленной модели, использующей данные и прогнозы Информационной системы МАГАТЭ по энергетическим реакторам (Power Reactor Information System, PRIS), WNA и других источников по состоянию на конец 2013 г., служат примерно 1100 энергетических реакторов, из которых работающих — 434 в 31 стране (где проживают 2/3 населения Земли) и строящихся — 72 в 14 странах. Наряду с этим более 600 реакторов в почти 40 странах находятся на стадии разработки или запланированы к строительству в период до 2030 г. Наибольшее их число принадлежат Китаю (почти 250 реакторов), Индии (70), другим азиатским (117) и европейским странам, исключая Россию (до 60).

Установленная годовая  $t$  электрическая мощность  $W(t)$  всех действующих блоков АЭС, объединенных определенным признаком  $\Omega$  (географическое положение, технические, экономические или иные параметры), находится как сумма мощностей по каждому  $j$ -реактору в данном множестве:

$$W_{\Omega}(t) = \sum_j W_{\Omega_j}(t) \cdot [\eta(t - T_{O,j}) - \eta(t - T_{D,j})]. \quad (2)$$

Выражение в скобках равно нулю на всем временном интервале, кроме периода эксплуатации блока от  $t = T_{O,j}$  до  $T_{D,j}$ ;  $W_{\Omega_j}(t)$  — установленная электрическая мощность  $j$ -блока;  $\eta(t)$  — функция Хевисайда, или единичная ступенчатая функция, равная нулю для отрицательных значений аргумента и единице — для положительных. В ходе построения прогноза момент начала коммерческой эксплуатации  $T_O$  каждого реактора рассчитывается путем прибавления к дате начала строительства  $T_C$  длительности строительства  $t_c$ , а дата окончания эксплуатации  $T_D$  — прибавлением к  $T_O$  длительности эксплуатации  $t_o$  (1).

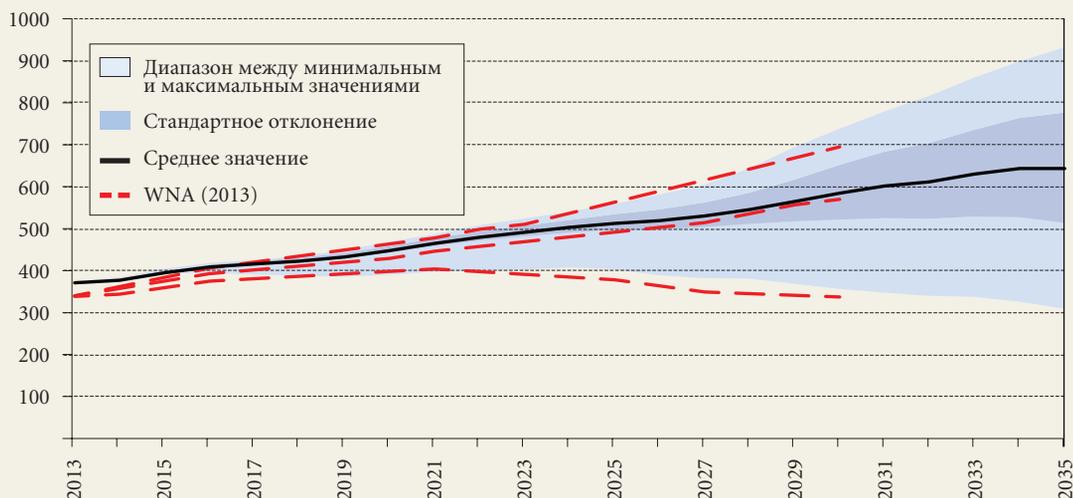
Итак, в формуле (2) даты начала  $T_{O,j}$  и окончания  $T_{D,j}$  коммерческой эксплуатации  $j$ -блока принимают

Рис. 3. Распределение плотностей вероятности временных характеристик жизненного цикла энергоблока АЭС (%)



Источник: расчеты авторов на основе данных [WNA, 2013].

Рис. 4. Динамика установленной мощности АЭС в мире (ГВт)\*



\* Указаны среднее значение (сплошная линия), коридор в одно стандартное отклонение, а также максимальные и минимальные реализации модели при количестве итераций (траекторий) 5000. Штриховые линии — три сценария WNA.

Источник: расчеты авторов на основе данных [WNA, 2013].

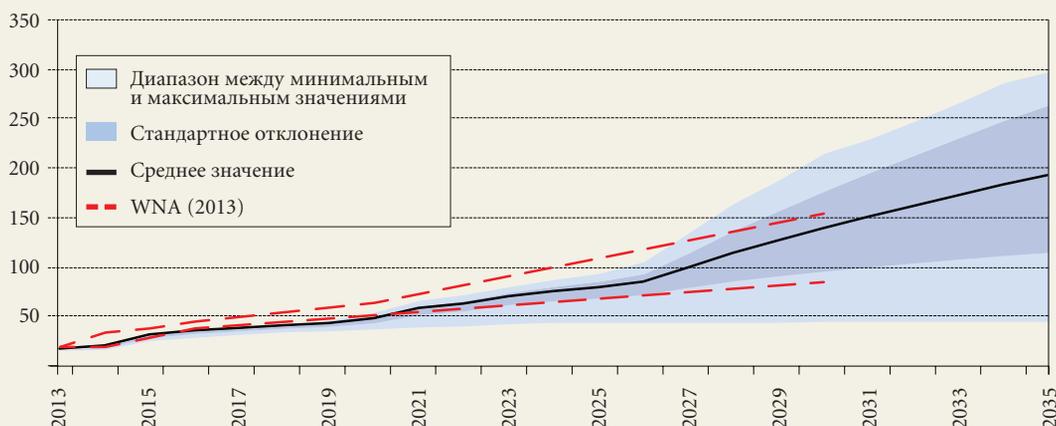
случайные значения в соответствии с вероятностными распределениями в рамках ограниченных интервалов согласно описанной методике. Воспроизведение жизненного цикла (этапов и технико-экономических показателей) каждого энергоблока, включая еще не существующие, а при необходимости — их типа, класса и мощности дает годовое  $t$ -распределение установленной электрической мощности АЭС  $W(t)$  на рассматриваемом сегменте  $\Omega$  в горизонте до 2035 г. (рис. 4).

По базовому варианту средняя установленная мощность АЭС в мире растет со скоростью около 2.5% в год, как это и предусмотрено в умеренном сценарии WNA [IAEA, 2014a], а минимальные и максимальные значения соответствуют пессимистическому и оптимистическому сценариям. В начале 2014 г. установленная мощность мировых АЭС составила 374 ГВт (в России около 25 ГВт при 34 реакторах). Близость результатов модели к сценариям WNA подтверждает обоснованность выбора частотных распределений основных событий «дерева жизни» реакторов.

Прогнозируемый нами темп роста ядерно-энергетической отрасли Китая оценивается приблизительно в 11% (рис. 5). К 2035 г. число реакторов в этой стране почти вдвое превысит уровень США (рис. 6) — крупнейшей ядерной державы мира с установленной мощностью АЭС порядка 100 ГВт при 103 реакторах на конец 2013 г. Для столь развитой национальной отрасли вероятны низкий рост (0.6% в год) и даже сокращение суммарных ядерных мощностей к 2035 г.

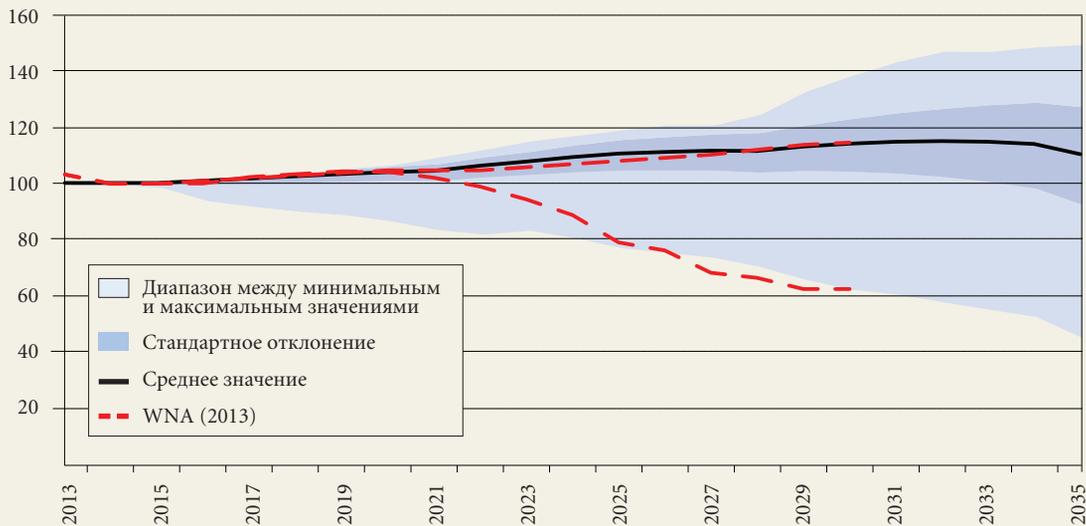
Расчеты показывают, что неопределенность заметно возрастает по мере удаления от начальной точки прогноза (2013 г.), аналогично тому, как это наблюдается в сценариях МАГАТЭ и WNA (см. рис. 4–6). Вместе с тем дисперсия распределения в 2035 г. остается приемлемой. Рост неопределенности прогноза представляется не дефектом методики, а мерой неизвестности, присутствующей в национальных программах развития ядерной энергетики. Ежегодный пересмотр прогноза с учетом реализованных пусков и остановок реакторов позволит адаптировать модель к меняющемуся облику отрасли.

Рис. 5. Динамика установленной мощности АЭС в Китае (ГВт)



Источник: расчеты авторов на основе данных [WNA, 2013].

Рис. 6. Динамика установленной мощности АЭС в США (ГВт)



Источник: расчеты авторов на основе данных [WNA, 2013].

### Прогнозирование потребности АЭС в топливе и услугах по обогащению урана

Прогноз динамики установленных мощностей АЭС дает возможность оценить спрос на ядерное топливо и услуги по обогащению урана. Уровень годового потребления отдельного энергоблока зависит от установленной тепловой мощности реактора  $Q$  (ГВт), глубины выгорания топлива  $B$  (ГВт-сут/тU) и КИУМ. Масса урана  $M_j$  в топливе для подпитки одного реактора (т/год) определяется известным выражением [Харитонов, 2014; Синев, 1987]:

$$M_j(t) = \frac{Q_j \cdot \text{КИУМ}_j(t) \cdot 365}{B_j(t)}. \quad (3)$$

В настоящее время среднемировой коэффициент использования установленной мощности АЭС составляет 0.75. КИУМ некоторых реакторов достигает 0.93. Глубина выгорания топлива — примерно 40–50 ГВт-сут/тU с тенденцией к повышению до 60–80 ГВт-сут/тU. Ежегодная потребность  $P(t)$  в обогащенном уране определяется суммой масс  $M_{Ok}$  для начальной загрузки вводимых в эксплуатацию реакторов и масс  $M_j$  подпитки действующих реакторов:

$$P(t) = \sum_{\Omega k} M_{Ok} [\eta(t - T_{Ok} + 1) - \eta(t - T_{Ok})] + \sum_{\Omega j} M_j [\eta(t - T_{Oj}) - \eta(t - T_{Dj})]. \quad (4)$$

Индексы  $j$  и  $k$  учитывают все типы реакторов, действующих в году  $t$  и вводимых в эксплуатацию на следующий год, так как потребность в топливе для первичной загрузки возникает примерно за год до начала коммерческой эксплуатации реактора. Закупка топлива для подобных нужд осуществляется заранее, поэтому для расчета рыночного спроса на обогащенный уран применяется лаг в 2 года. Как и при подсчете мощности, суммирование в формуле (4) производится по всем реакторам базы данных или любому интересующему множеству  $\Omega$ .

Для того чтобы получить количество  $P$  топлива с обогащением  $x$  (массовой концентрацией урана-235 в топливе) на заводе по разделению изотопов, требуется природный уран с концентрацией  $c = 0.711\%$  в количестве  $F$  с образованием на выходе обедненного урана с концентрацией  $y$  в количестве  $D$  [Харитонов, 2014; Синев, 1987]:

$$F = P \frac{x - y}{c - y}; \quad D = F - P. \quad (5)$$

Процесс обогащения урана принято характеризовать *работой разделения*  $R$ , выраженной в тех же единицах, что и расходы урана (т/год и т. п.):

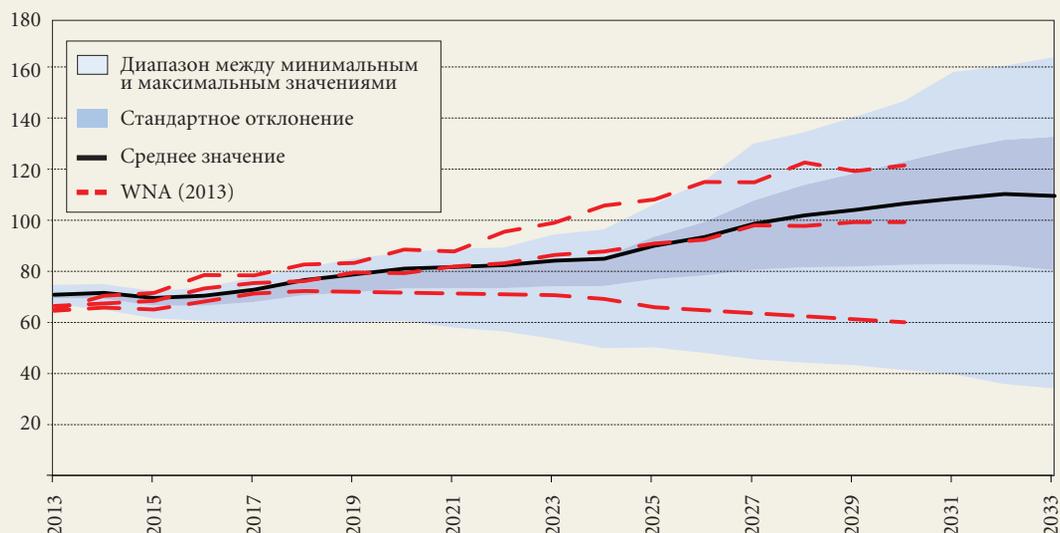
$$R = P\Phi(x) + D\Phi(y) - F\Phi(c), \quad (6)$$

и представляющей собой разность между «ценностями» полученных продуктов  $P$  и  $D$  и исходного сырья (питания)  $F$ . Работа разделения, равная 1 кг, называется *единицей работы разделения* (ЕРР) (*separative work units, SWU*). Работа разделения, как и разделительный потенциал  $\Phi(x) = (2x - 1) \ln[x/(1 - x)]$ , характеризует состояние газовой смеси независимо от физического способа, которым производится сепарация изотопов [Борисевич и др., 2005].

Сохранить на минимальном уровне себестоимость обогащенного урана позволяет некоторая оптимальная концентрация  $y$  урана-235 в отвале («хвостах обогащения»), представляющая собой отношение стоимости природного урана и ЕРР. В настоящее время оптимальная концентрация «хвостов обогащения» в среднем в мире приблизительно равна  $y \approx 0.22\text{--}0.25\%$ . Ожидается, что со временем цена на природный уран будет расти быстрее, чем стоимость работы разделения. Это повлечет за собой снижение оптимальной концентрации отвалов предположительно до  $y \approx 0.15\text{--}0.18\%$  или даже ниже. Такая неопределенность в величине  $y$  вносит дополнительный разброс в расчеты потребностей в природном уране и работе разделения.

Потребность мировой ядерной энергетики в природном уране и работе разделения его изотопов будет

Рис. 7. Прогноз потребности мировой ядерной энергетики в природном уране (кту/год)



Источник: расчеты авторов на основе данных [WNA, 2013].

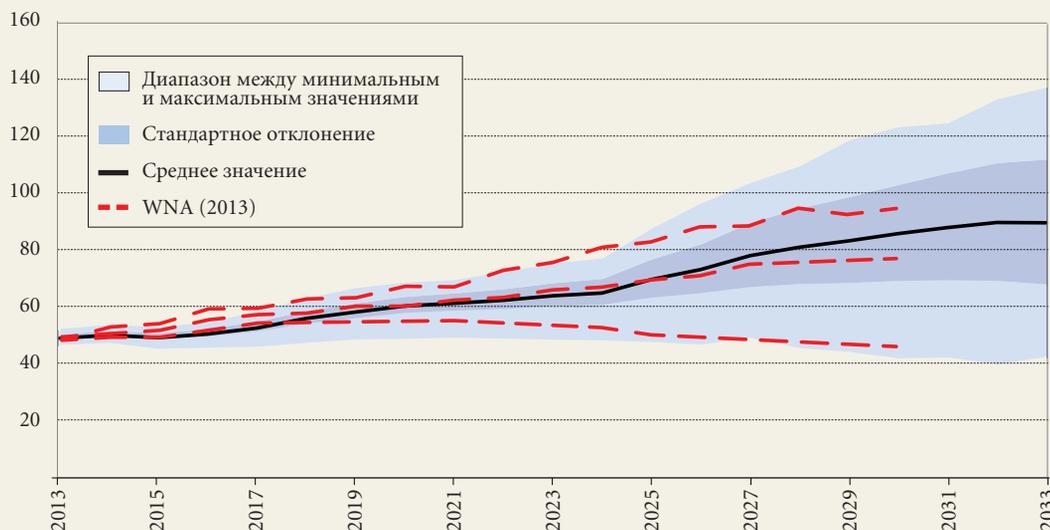
расти с темпом 2–3% в год (рис. 7, 8). Разброс приведенных расчетных величин характеризует риски неопределенности: при реализации оптимистического сценария развития ядерной энергетики мировой спрос на услуги по обогащению урана может превзойти существующие мощности обогатительных заводов. В условиях стагнации отрасли ее потребности в природном уране могут долгое время покрываться за счет складских запасов (текущий объем — 600 кт) на фоне неизбежного обвала цен на это сырье и закрытия многих предприятий по его добычке.

Отметим, что в России сосредоточены около 40% мировых производственных мощностей по разделению изотопов урана, целиком основанных на высокотехнологичном методе газовых центрифуг. Соответственно такова же, т. е. в диапазоне 30–40%, доля России на глобальном рынке услуг по обогащению урана.

### Прогнозирование объема рынка строительства новых АЭС

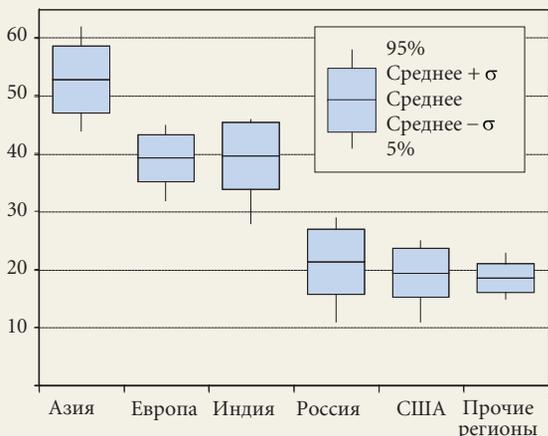
Атомная электростанция — один из самых сложных и высокотехнологичных объектов промышленности. Сооружение и эксплуатация АЭС связаны с множеством других секторов экономики — строительством, машиностроением, приборостроением, логистикой, финансами, страхованием, наукой, образованием и т. д. — и порождают значительный мультипликативный эффект для динамики ВВП [Ивантер, 2014]. В среднем сооружение АЭС занимает от 5 до 15 лет и требует сотен тысяч человеко-часов. По завершении строительства станция, как правило, на многие десятилетия становится градо- и структурообразующим объектом региона. Прогнозы объемов строительства в отрасли помогают оценить перспективы не только локальных рынков инжиниринга, поставок и строи-

Рис. 8. Прогноз потребности мировой ядерной энергетики в работе разделения изотопов урана (млн ЕРР/год)



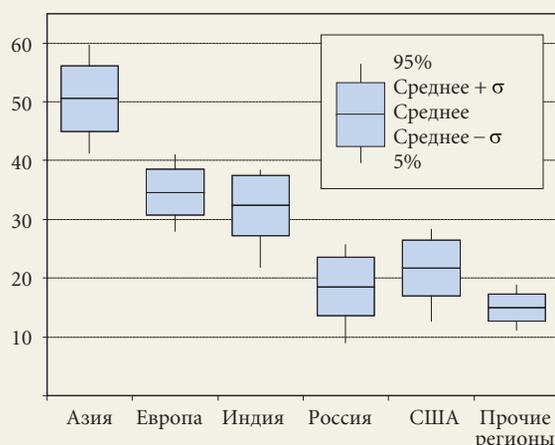
Источник: расчеты авторов на основе данных [WNA, 2013].

**Рис. 9. Число новых энергоблоков АЭС в мире (исключая Китай), начало строительства которых ожидается в период 2015–2025 гг.**



Источник: составлено авторами.

**Рис. 10. Установленная мощность новых энергоблоков АЭС в мире (исключая Китай), начало строительства которых ожидается в период 2015–2025 гг. (ГВт)**



Источник: составлено авторами.

тельства, но и всех сопутствующих продуктов и услуг. Далее приводится прогноз объемов рынка строительства новых АЭС на период 2015–2025 гг., основанный на сформированной авторами базе данных по реакторам в различных регионах.

Наше исследование охватывает следующие регионы мира и страны — участницы рынка ядерной энергетики: Россию, Китай, Индию, развитые азиатские экономики, Японию и Южную Корею, другие азиатские государства, Европу (исключая Россию), США, прочие — в том числе Канаду, страны Южной Америки и Африки. Совокупная установленная мощность АЭС  $W_{\Omega}$  и число энергоблоков  $N_{\Omega}$ , строительство которых начнется в ближайшее десятилетие в регионе  $\Omega$ , вычисляются по формулам:

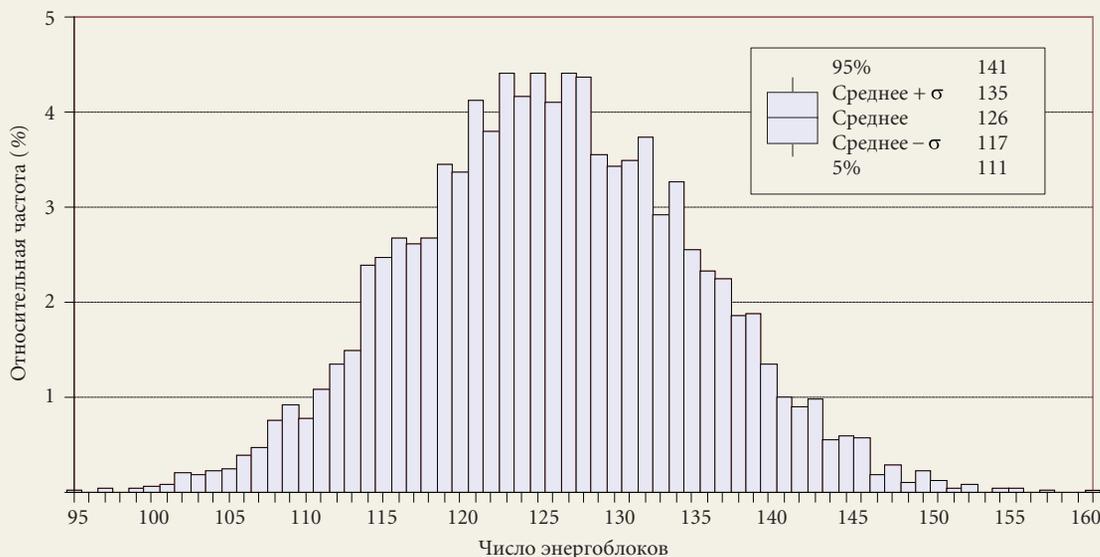
$$W_{\Omega} = \sum_{t=2015}^{2025} \sum_j W_{\Omega_j} \cdot \delta(T_{Cj} - t); \quad N_{\Omega} = \sum_{t=2015}^{2025} \sum_j \delta(T_{Cj} - t). \quad (7)$$

Здесь  $\delta(t)$  — дельта-функция, равная нулю всюду, кроме  $t=0$ , где она равна 1. Число и мощность новых реакторов, начало строительства которых ожидается в 2015–2025 гг., довольно велики во всех рассмотренных регионах: 17 и 53 реактора суммарной мощностью 15 и 52 ГВт соответственно (рис. 9, 10).

Учитывая, что удельные капитальные затраты на строительство реакторов III и III+ поколений в разных регионах мира достигают сегодня 2–6 тыс. долл./кВт [Харитонов, 2014], совокупные инвестиции в отрасли могут составлять от 34 до 370 млрд долл. за десятилетие 2015–2025 гг. Степень волатильности рынка подтверждают оценки дисперсии, приведенные на рис. 9 и 10.

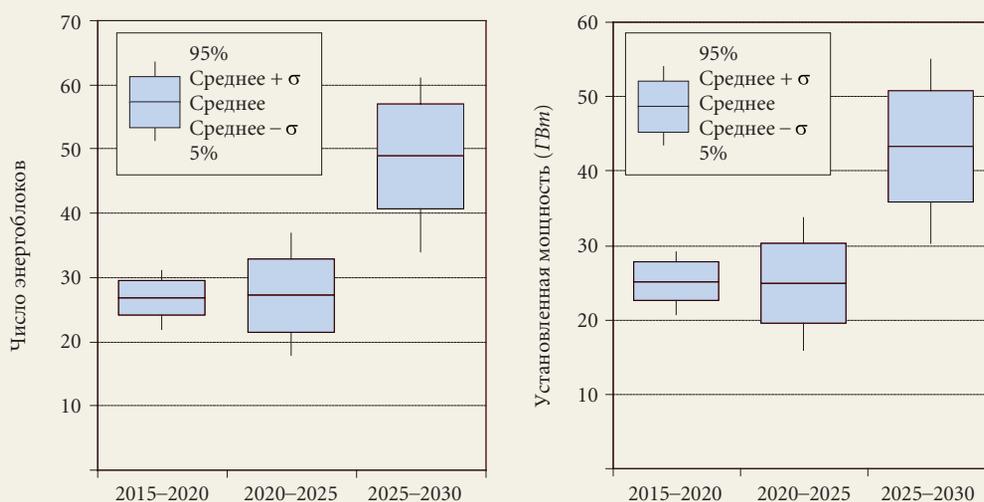
Прогнозируемые объемы строительства новых АЭС в Китае значительно превосходят его масштабы во всех прочих регионах мира (рис. 11). Вторая после Китая группа стран с максимальным объемом строительства,

**Рис. 11. Распределение плотности вероятности числа новых энергоблоков АЭС в Китае, строительство которых начнется в 2015–2025 гг.**



Источник: составлено авторами.

Рис. 12. Объемы строительства энергоблоков АЭС российского дизайна в 2015–2030 гг.



Источник: составлено авторами.

обозначенная ранее как «другие азиатские государства», в этом отношении находится практически на нижней границе китайского рынка.

Предложенная методика образует основу исследования перспектив рынка с точки зрения подрядчика строительства АЭС. В качестве примера рассмотрим ожидаемый объем экспортного строительства реакторов российского дизайна в ближайшие три пятилетия — 2015–2020, 2020–2025 и 2025–2030 гг. (рис. 12, 13). В этом случае в формуле (7) меняется временной интервал и в  $\Omega$  добавляется условие «реактор российского дизайна». В настоящее время на долю России приходится около 20% мирового рынка строительства АЭС.

Полученные оценки свидетельствуют о том, что дисперсия доли энергоблоков российского производства превышает дисперсию общего числа реакторов в мире, а это в свою очередь объясняется наложением неопределенностей строительства отечественных блоков на неустойчивость параметров развития отрасли в глобальном масштабе. Имеющиеся мощности по-

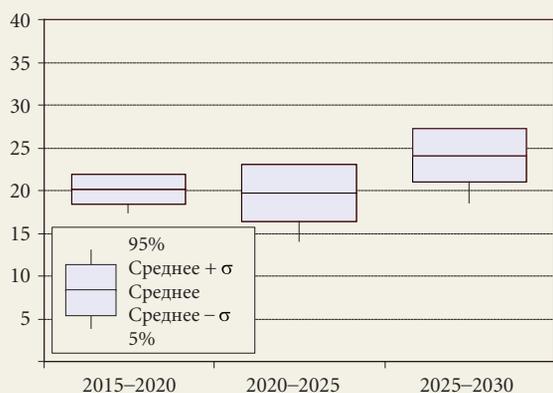
зволят ежегодно возводить за рубежом от пяти энергоблоков российского дизайна в 2015–2020 гг. до девяти в 2025–2030 гг. Заметим, что в настоящее время машиностроительная база обеспечивает производство лишь четырех реакторов в год.

По заявлению аналитиков WNA, доля ядерной энергетики в странах ЕС в ближайшие десятилетия может снизиться до критического уровня в силу отсутствия собственных разработок реакторов нового поколения и ограничений на строительство российских энергоблоков [Tarlton, 2014]. В тех европейских странах, где такого рода ограничений не существует, по нашему мнению, объемы выработки электроэнергии на АЭС не претерпят подобного угрожающего спада.

### Прогнозирование вывода АЭС из эксплуатации

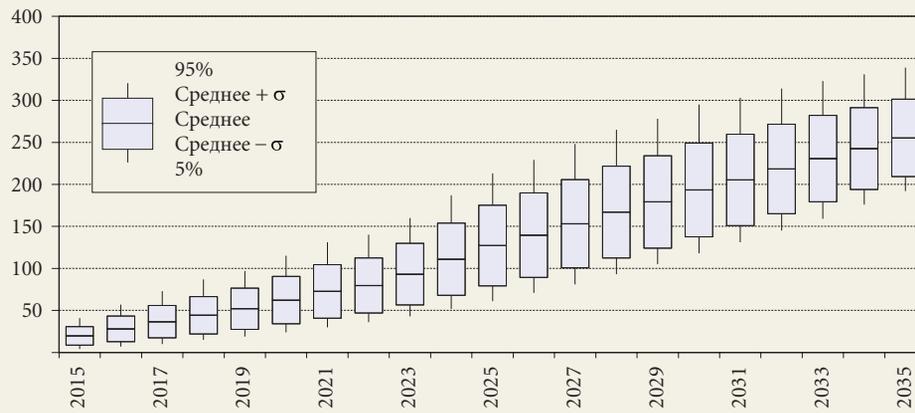
Проектный срок эксплуатации большинства действующих энергетических реакторов составляет 30–40 лет. Продление срока службы АЭС на 10–15 лет практически всегда признается экономически выгодным и допустимым с точки зрения безопасности. Это обусловлено прежде всего низкой себестоимостью выработки электроэнергии блоками, уже окупившими вложенные в их строительство капитальные затраты. Заявленный срок службы возводимых реакторов III и III+ поколений, как правило, не опускается ниже 60–80 лет, а значит, в пределах принятого нами временного горизонта до 2035 г. такие реакторы не будут выводиться из эксплуатации. Сам этот процесс представляет собой специфичную и трудоемкую процедуру продолжительностью в десятки лет. В настоящее время рынок вывода АЭС из эксплуатации в большинстве регионов мира развит слабо, поскольку потребность в подобных услугах до последних лет возникала сравнительно редко. Тем не менее в среднесрочной перспективе прогнозируется существенное увеличение объема данного рынка, вызванное устареванием глобального парка АЭС (рис. 14). Для расчета выбытия энергоблоков нарастающим итогом используется формула, подобная (7), где вместо да-

Рис. 13. Доля АЭС российского дизайна в общем числе АЭС, возводимых в мире (%)



Источник: составлено авторами.

Рис. 14. Число энергоблоков, завершивших эксплуатацию (нарастающим итогом с 2015 г.)



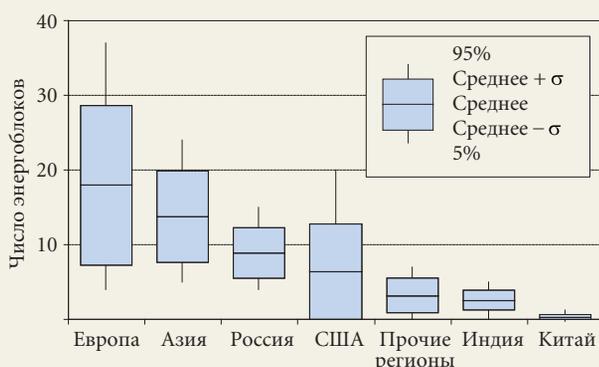
Источник: составлено авторами.

ты начала строительства фигурирует дата  $T_D$ , а вместо дельта-функции  $\delta(t)$  — ступенчатая функция  $\eta(t)$ .

Высокая дисперсия наших оценок обусловлена непоследовательной политикой ряда стран в вопросе продления сроков эксплуатации действующих реакторов (рис. 14, 15). К 2035 г. ожидается остановка свыше 200 энергоблоков с продленным сроком эксплуатации. Таким образом, в ближайшее десятилетие будет формироваться капиталоемкий рынок вывода АЭС из эксплуатации, причем весьма неоднородный с точки зрения распределения его объемов между отдельными государствами и группами стран (рис. 15).

Самыми перспективными выглядят рынки услуг вывода АЭС из эксплуатации в Европе, где функционирует наибольшее число реакторов (свыше 160), и в Азии (исключая Китай) (см. рис. 15). Характерно, что формы распределений существенно различаются от региона к региону, так как возможности продления сроков эксплуатации работающих блоков зависят от типа реакторов, технических возможностей и локальной политики. В частности, в США, несмотря на большое — порядка сотни — число действующих реакторов, ожидаемый масштаб рынка вывода АЭС из эксплуатации соизмерим с российским, но превосходит последний по верхнему квантилю.

Рис. 15. Объемы вывода АЭС из эксплуатации в различных регионах мира за период 2015–2025 гг.



Источник: составлено авторами.

В Китае, ядерная отрасль которого сравнительно молода, число отработавших свой ресурс АЭС минимально. Однако в регионах со «старой» ядерной энергетикой к 2025 г. компании успеют накопить опыт вывода АЭС из эксплуатации и смогут начать экспорт своих услуг на новые рынки.

### Заключение

В нашей статье представлены результаты прогноза ожидаемых объемов рынка мировой ядерной энергетики до 2035 г. на основе стохастического моделирования, позволяющего оценивать экономические риски игроков. В базу данных модели включены все типы действующих, планируемых к строительству и возводимых реакторов III и III+ поколений на тепловых нейтронах. В ней не учитывается роль реакторов-бридеров IV поколения с замкнутым топливным циклом, поскольку начало их коммерческой эксплуатации ожидается не ранее 2035 г.

Проанализированные данные подтверждают, что в ближайшие 20 лет среднегодовые темпы прироста мировой ядерной энергетики составят около 2%. Максимальных масштабов рынок строительства новых АЭС достигнут в Китае, Индии и других азиатских странах. Масштабы отрасли в России и США находятся примерно на одном уровне, но с большей волатильностью для первой. Между тем вероятные объемы строительства энергоблоков российского дизайна в мире к 2030 г. могут увеличиться как в абсолютном, так и в относительном исчислении.

В статье показано, что доля производства электроэнергии на АЭС в странах ЕС в ближайшие десятилетия рискует снизиться до критического уровня из-за отсутствия собственных разработок ядерных реакторов нового поколения и квотирования строительства российских аналогов. Вместе с тем в ряде европейских стран уже реализуются либо запланированы несколько проектов по строительству российских реакторов последнего поколения.

В предстоящие два десятилетия ожидается рост числа реакторов, выработавших свой ресурс, — до 250. Это приведет к формированию нового научно- и капиталоемкого рынка вывода АЭС из эксплуатации.

Наибольший его объем ожидается в Европе — регионе мира со старейшим парком ядерных реакторов. В Китае, как и в других странах с молодой ядерной энергетикой, рынок вывода АЭС из эксплуатации исчезающе мал.

Динамика пуска новых и остановки старых реакторов существенно влияет на статус-кво и объем регио-

нальных рынков природного и обогащенного урана и услуг по его обогащению. В свете отмеченных тенденций текущая политика ряда стран по диверсификации и квотированию поставщиков ресурсов и оборудования для генерации энергии может претерпеть заметные изменения.



- Аврорин Е.Н., Адамов Е.О., Алексахин Р.М., Джалавян А.В., Драгунов Ю.Г., Иванов В.Б., Калякин С.Г., Лопаткин А.В., Молоканов Н.А., Муравьев Е.В., Орлов В.В., Рачков В.И., Смирнов В.П., Троянов В.М. (2012) Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в XXI веке. М.: АО «НИКИЭТ».
- Андрианова Е.А., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф. (2008) Программа DESAE для системных исследований перспектив развития ядерной энергетики // Атомная энергия. Т. 105. Вып. 6. С. 303–306.
- Андрианова Е.А., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф. (2011) Динамика атомной энергетической системы (Руководство пользователя). М.: НИЦ «Курчатовский институт».
- Борисевич В.Д., Борман В.Д., Сулаберидзе Г.А., Тихомиров А.В., Токманцев В.И., Борман В.Д. (2005) Физические основы разделения изотопов в газовой центрифуге / Под ред. В.Д. Бормана. М.: МИФИ.
- Ивантер В.В. (2014) Инвестиции – не благотворительность // Атомный эксперт. № 5–6 (26–27). С. 8–9.
- ИНЭИ РАН (2013) Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года / Под ред. А.А. Макарова. М.: Институт энергетических исследований РАН, Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации.
- Синев М.Н. (1987) Экономика ядерной энергетики: Основы технологии и экономики производства ядерного топлива. Экономика АЭС. М.: Энергоатомиздат.
- Харитонов В.В. (2014) Динамика развития ядерной энергетики. Экономико-аналитические модели. М.: НИЯУ МИФИ.
- BP (2013) BP's Energy Outlook 2030. London: BP.
- Carter N. (2014) A Market in Transition. Paper presented at the IAEA International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle, Vienna, June 27.
- Davis R. (2008) Teaching Note—Teaching Project Simulation in Excel Using PERT-Beta Distributions // INFORMS Transactions on Education. Vol. 8. № 3. P. 139–148.
- DOE (2014) Annual Energy Outlook 2014 with Projections to 2040. DOE/EIA-0383(2014). Washington: U.S. Department of Energy, U.S. Energy Information Administration.
- Emsley I. (2013) WNA 2013 Fuel Market Report. Paper presented at the IAEA International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle, Vienna, June 27.
- European Commission (2012) Euratom Supply Agency Annual Report 2011. Luxembourg: European Commission.
- Exxon Mobil (2013) The Outlook for Energy: A View to 2040. Irving, TX: Exxon Mobil.
- IAEA (2011) Introduction to the Use of the INPRO Methodology in a Nuclear Energy System Assessment. Vienna: IAEA.
- IAEA (2012) Project Management in Nuclear Power Plant Construction: Guidelines and Experience. IAEA Nuclear Energy Series NP-T-2.7. Vienna: IAEA.
- IAEA (2014a) Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050. Reference Data Series № 1, 2014 Edition. Vienna: IAEA.
- IAEA (2014b) Nuclear Power Reactors in the World. Reference Data Series № 2, 2014 Edition. Vienna: IAEA.
- IAEA (2014c) INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Economics. INPRO Manual. IAEA Nuclear Energy Series № NG-T-4.4. Vienna: IAEA.
- IAEA (2014d) OPEX. Operating Experience with Nuclear Power Stations in Member States in 2013. Vienna: IAEA.
- IEA (2012) World Energy Outlook 2012. Paris: IAEA.
- IEA (2014) World Energy Investment Outlook. Special Report. Paris: IAEA.
- OECD (2013) GIF Symposium Proceeding. San Diego, California, USA, 14–15 November 2012. Paris: OECD.
- OECD (2014) Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems. Paris: OECD.
- Runte G. (2013) Probabilistic Assessment of Global Nuclear Power Plant Construction Through 2030. York: Worthington Sawtelle LLC.
- Schneider E., Phathanapirom B., Eggert R., Segal E. (2012) Uncertainties in the Uranium and Enrichment Markets: A Stochastic Approach. Paper presented at the 31st USAEE/IAEE North American Conference, Austin, November 5, 2012.
- Schneider M., Froggatt A., Hosokawa K., Thomas S., Yamaguchi Y., Hazemann J. (2013) World Nuclear Industry Status Report. Paris, London, Kyoto: Mycle Schneider Consulting.
- Sholly S. (2013) Advanced Nuclear Power Plant Concepts and Timetables for Their Commercial Deployment. Vienna: Institute of Safety/Security and Risk Sciences, University of Natural Resources and Life Sciences.
- Tarlton S. (2014) Crunch time for the EU // World Nuclear News, 12 August. Режим доступа: <http://www.world-nuclear-news.org/F-Crunch-time-for-the-EU-1208141.html>, дата обращения 15.02.2015.
- Ux Consulting (2013) Enrichment Market Outlook. Quarterly Market Report Q2. Singapore: Ux Consulting.
- WNA (2011) The Global Nuclear Fuel Market: Supply and Demand 2011–2030. London: World Nuclear Association.
- WNA (2013) The Global Nuclear Fuel Market: Supply and Demand 2013–2030. London: World Nuclear Association.

# Long-term Stochastic Forecasting of the Nuclear Energy Global Market

**Vladimir Kharitonov**

Deputy Director, Economical-Analytical Institute. E-mail: VVKharitonov@mephi.ru

**Uliana Kurelchuk**

Leading Engineer. E-mail: ulyanakurelchuk@gmail.com

National Research Nuclear University ‘MEPhI’ (NRNU MEPhI)  
Address: 31, Kashirskoe sh., Moscow, 115409, Russian Federation

**Sergey Masterov**

Deputy Head, Market Analysis Department, NIAEP–ASE united company. Address: 2, Dmitrovskoye sh., Moscow, 127434, Russian Federation. E-mail: s.masterov@atomstroyexport.ru

## Abstract

This article looks at the problem of devising a long-term developmental forecast of the nuclear energy market and the possibility of studying certain sections of the market. Bearing in mind the current state of the market and associated industries, it is particularly important to have a scientific approach to developing statistical forecasting instruments and methods with assessments of the dispersion of forecasts. is particularly important. The authors are the first to have developed and applied a probabilistic forecasting method for several a number of market indicators reflecting the physical size of the global nuclear energy industry for the period up to 2035, and in particular: the number and electrical capacity of reactors in service or taken out of service, and the demand for natural and enriched uranium and enrichment services. The forecasting relies on stochastic modelling of nuclear power plant (NPP) life cycles and operating characteristics, open nuclear fuel cycle parameters, and energy policy in corresponding regions around the world. Unlike scenario

approaches, this model makes it possible to obtain probabilistic distributions of these characteristics, which is important when assessing the economic risks of various participants in the global nuclear energy market.

The results obtained from the long-term forecast of NPP capacity dynamics for the world as a whole and for the largest regions of the planet are consistent with the scenarios of the World Nuclear Association (WNA) and the International Atomic Energy Agency (IAEA). These scenarios are developed on the basis of data provided by members of these organisations, which confirms the reliability of the frequency distribution model used for key stages of the reactor life cycle. The authors have modelled the market’s probable new NPP construction volumes and NPP decommissioning volumes over the next 15 years in Russia, globally, and in certain world regions. The paper also presents an analysis of the likely capacity of the new Russian-made NPP construction market globally and its share of the global services map in this field up to 2030.

## Keywords

stochastic forecasting; nuclear energy market; NPP installed capacity; NPP construction; NPP decommissioning; natural and enriched uranium; uranium isotope separation work; Monte-Carlo method; variance

DOI: 10.17323/1995-459X.2015.2.58.71

## Citation

Kharitonov V., Kurelchuk U., Masterov S. (2015) Long-term Stochastic Forecasting of the Nuclear Energy Global Market. *Foresight-Russia*, vol. 9, no 2, pp. 58–71. DOI: 10.17323/1995-459x.2015.2.58.71.

## References

- Andrianova E., Davidenko V., Tsibul'skii V. (2008) Programma DESAE dlya sistemnykh issledovaniy perspektiv razvitiya yadernoi energetiki [DESAE-program for system research of nuclear energy development perspectives]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], vol. 105, issue 6, pp. 303–306 (in Russian).
- Andrianova E., Davidenko V., Tsibul'skii V. (2011) *Dinamika atomnoi energeticheskoi sistemy (Rukovodstvo pol'zovatelya)* [Dynamics of nuclear energy system (User manual)], Moscow: NRC “Kurchatov Institute” (in Russian).

- Avrorin E., Adamov E., Aleksakhin R., Dzhalyanov A., Dragunov Yu., Ivanov V., Kalyakin S., Lopatkin A., Molokanov N., Murav'ev E., Orlov V., Rachkov V., Smirnov V., Troyanov V. (2012) *Kontseptual'nye polozheniya strategii razvitiya yadernoi energetiki Rossii v XXI veke* [Conceptual positions of Russia nuclear energy development strategy in XXI century], Moscow: NIKIET (in Russian).
- Borisevich V., Borman V., Sulaberidze G., Tikhomirov A., Tokmantsev V., Borman V. (2005) *Fizicheskie osnovy razdeleniya izotopov v gazovoi tsentrifuge* [Physical fundamentals of isotopes separation in gas centrifuge] (ed. V. Borman), Moscow: MEFPI (in Russian).
- BP (2013) *BP's Energy Outlook 2030*, London: BP.
- Carter N. (2014) *A Market in Transition*. Paper presented at the IAEA International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle, Vienna, June 27.
- Davis R. (2008) Teaching Note — Teaching Project Simulation in Excel Using PERT-Beta Distributions. *INFORMS Transactions on Education*, vol. 8, no 3, pp. 139–148.
- DOE (2014) *Annual Energy Outlook 2014 with Projections to 2040* (DOE/EIA-0383(2014)), Washington: U.S. Department of Energy, U.S. Energy Information Administration.
- Emsley I. (2013) *WNA 2013 Fuel Market Report*. Paper presented at the IAEA International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle, Vienna, June 27.
- European Commission (2012) *Euratom Supply Agency Annual Report 2011*, Luxembourg: European Commission.
- Exxon Mobil (2013) *The Outlook for Energy: A View to 2040*, Irving, TX: Exxon Mobil.
- IAEA (2011) *Introduction to the Use of the INPRO Methodology in a Nuclear Energy System Assessment*, Vienna: IAEA.
- IAEA (2012) *Project Management in Nuclear Power Plant Construction: Guidelines and Experience* (IAEA Nuclear Energy Series NP-T-2.7), Vienna: IAEA.
- IAEA (2014a) *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050* (Reference Data Series no 1, 2014 Edition), Vienna: IAEA.
- IAEA (2014b) *Nuclear Power Reactors in the World* (Reference Data Series no 2, 2014 Edition), Vienna: IAEA.
- IAEA (2014c) *INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Economics*. *INPRO Manual* (IAEA Nuclear Energy Series no NG-T-4.4), Vienna: IAEA.
- IAEA (2014d) *OPEX. Operating Experience with Nuclear Power Stations in Member States in 2013*, Vienna: IAEA.
- IEA (2012) *World Energy Outlook 2012*, Paris: IEA.
- IEA (2014) *World Energy Investment Outlook* (Special Report), Paris: IEA.
- Ivanter V. (2014) Investitsii – ne blagotvoritel'nost' [Investment – is not a charity]. *Atomnyi ekspert* [Atomic Expert], no 5–6 (26–27), pp. 8–9 (in Russian).
- Kharitonov V.V. (2014) *Dinamika razvitiya yadernoi energetiki. Ekonomiko-analiticheskie modeli* [Dynamic of nuclear energy development. Economic models], Moscow: MEFPI (in Russian).
- OECD (2013) *GIF Symposium Proceeding. San Diego, California, USA, 14–15 November 2012*, Paris: OECD.
- OECD (2014) *Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems*, Paris: OECD.
- RAS IER (2013) *Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii do 2040 goda* [Forecast of World and Russia Energy development up to 2040] (ed. A. Makarov), Moscow: RAS Institute of Energy Research, Russian Government Analytical Center (in Russian).
- Runte G. (2013) *Probabilistic Assessment of Global Nuclear Power Plant Construction Through 2030*, York: Worthington Sawtelle LLC.
- Schneider E., Phathanapirom B., Eggert R., Segal E. (2012) *Uncertainties in the Uranium and Enrichment Markets: A Stochastic Approach*. Paper presented at the 31st USAEE/IAEE North American Conference, Austin, November 5, 2012.
- Schneider M., Froggatt A., Hosokawa K., Thomas S., Yamaguchi Y., Hazemann J. (2013) *World Nuclear Industry Status Report*, Paris, London, Kyoto: Mycle Schneider Consulting.
- Sholly S. (2013) *Advanced Nuclear Power Plant Concepts and Timetables for Their Commercial Deployment*, Vienna: Institute of Safety/ Security and Risk Sciences, University of Natural Resources and Life Sciences.
- Sinev M. (1987) *Ekonomika yadernoi energetiki: Osnovy tekhnologii i ekonomiki proizvodstva yadernogo topliva* [Economics of nuclear Energy: Nuclear Fuel Technology and Economics Basis], Moscow: Energoatomizdat (in Russian).
- Tarlton S. (2014) Crunch time for the EU. *World Nuclear News*, 12 August. Available at: <http://www.world-nuclear-news.org/F-Crunch-time-for-the-EU-1208141.html>, accessed 15.02.2015.
- Ux Consulting (2013) *Enrichment Market Outlook. Quarterly Market Report Q2*, Singapore: Ux Consulting.
- WNA (2011) *The Global Nuclear Fuel Market: Supply and Demand 2011–2030*, London: World Nuclear Association.
- WNA (2013) *The Global Nuclear Fuel Market: Supply and Demand 2013–2030*, London: World Nuclear Association.