

УДК 504.75/620.98

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-46-52

## Выбросы парниковых газов в электроэнергетике и их снижение от внедрения российских проектов атомных электростанций

Ю.В.Черняховская

Охарактеризована проблематика устойчивого развития учета ограничений энергетического и экологического развития. Цель исследования заключается в оценке вклада атомной энергетики в снижение выбросов парниковых газов. Для ее достижения проведены: сравнительный анализ технологий генерации электроэнергии по показателям выбросов парниковых газов на 1 кВт·ч выработанной электроэнергии на базе обзора крупномасштабных мировых исследований; расчет экономии выбросов парниковых газов за счет эксплуатации атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР), сооруженных по российским (советским) технологиям.

Объектом исследования являются электростанции разных типов, предметом исследования — количественные показатели выбросов парниковых газов от электростанций на протяжении жизненного цикла (ЖЦ) в привязке к производимой электроэнергии. Принципиальное значение имеет комплексный подход к оценке объема выбросов на протяжении всего ЖЦ генерирующей технологии и связанного топливного цикла, что обосновано в документах ИСО и МАГАТЭ.

Исследование охватывает оценку гидро- (ГЭС), атомных (АЭС) и тепловых (ТЭС) электростанций на угле и газе, а также различных возобновляемых источников энергии, работающих на энергии ветра, солнца, биомассы, геотермальных вод.

Выбросы парниковых газов от АЭС детализированы по различным стадиям ЖЦ. Представлены результаты расчетов по экономии выбросов парниковых газов за счет эксплуатации АЭС в России и за рубежом с 1954 по 2014 гг., сооруженных по российским (советским) технологиям ВВЭР. Данные по реальным объемам выработки электроэнергии на АЭС типа ВВЭР в Армении, Болгарии, Венгрии, Германии, Индии, Иране, Китае, России, Словакии, Украине, Финляндии, Чехии получены из базы данных МАГАТЭ (информационной системы энергетических реакторов PRIS).

Отмечена неопределенность при оценке объема парниковых газов на ЖЦ различных технологий генерации электроэнергии, которая происходит от использования негармонизированных методик оценки выбросов. Направление учета выбросов на всем ЖЦ представляется перспективным для комплексной сравнительной оценки влияния на окружающую среду и климат разных технологий генерации электроэнергии. В связи с этим актуально развитие унифицированной методологии оценки выбросов и получение более точных данных по выбросам на разных стадиях ЖЦ различных электростанций.

Сравнительный анализ генерирующих технологий по выбросам парниковых газов на всем ЖЦ показал преимущества атомной генерации по сравнению с большинством технологий производства электроэнергии из традиционного углеводородного топлива и на возобновляемых источниках энергии.

*Ключевые слова:* парниковые газы, устойчивое развитие, жизненный цикл генерирующей технологии.

*Для цитирования:* Черняховская Ю.В. Выбросы парниковых газов в электроэнергетике и их снижение от внедрения российских проектов атомных электростанций // Вестник МЭИ. 2017. № 3. С. 46—52. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-46-52.

## Greenhouse Gas Emissions in the Electric Power Sector and Their Abatement due to Russian NPP Projects

Yu.V. Chernyakhovskaya

The scope of problems connected with the need to continuously improving the consideration of constraints pertinent to development of the power sector and environment protection technologies is outlined. The aim of the study is to assess the contribution of the nuclear power industry in the abatement of greenhouse gas (GHG) emissions. The following has been done in pursuance of this aim:

the power generation technologies have been subjected to a comparative analysis in terms of GHG emissions per kW·h of generated electricity based on a review of large-scale investigations performed around the world, and

the abatement of greenhouse gas emissions due to operation of nuclear power plants equipped with VVER-type water-cooled water-moderated power-generating reactors constructed using the technologies developed in Russia (Soviet Union) has been evaluated.

Different types of power plants are considered in the investigation in regard of the quantitative characteristics of GHG emissions from the power plants throughout their life cycle (LC) per kilowatt-hour of produced electricity.

It should be pointed out that a holistic approach to evaluating the amount of GHG emissions throughout the entire LC of the generation technology including its fuel cycle is of paramount importance, which is substantiated in the relevant ISO and IAEA documents.

The study encompasses assessment of hydro- and nuclear power plants, thermal power plants utilizing coal and gas, as well as various renewable energy sources operating on the energy of wind, sun, biomass, and geothermal water.

The GHG emissions from NPPs are considered for different power plant LC stages. The article presents the results from calculations of the GHG emissions abatement due to operation of NPPs in Russia and abroad in the period from 1954–2014 for nuclear power plants constructed according to the Russian (Soviet Union's) technologies of VVER-type reactors. The data on the actual amounts of electricity generated at VVER-type NPPs in Armenia, Bulgaria, China, Czech Republic, Finland, Germany, Hungary, India, Iran, Russia, Slovakia, and Ukraine were retrieved from the database available in the IAEA Power Reactor Information System (PRIS).

It is pointed out that there is some uncertainty in evaluating the amount of GHG emissions produced during the LC for different generation technologies, which is stemming from the use of non-harmonized methods for estimating GHG emissions. An approach implying consideration of GHG emissions for the entire LC is believed to be promising for a holistic comparative analysis of different power generation technologies in terms of their influence on the environment and climate. In this connection, developing a unified methodology for assessing GHG emissions and obtaining more precise data on GHG emissions at different LC stages of power plants of different types seem to be a topical issue.

The performed comparative analysis of generation technologies in terms of GHG emissions throughout the LC has demonstrated that NPPs are advantageous in this respect over the majority of power generation technologies based on the use of conventional hydrocarbon fuels and renewable sources of energy.

*Key words:* greenhouse gases, sustainable development, life cycle of a generation technology.

*For citation:* Chernyakhovskaya Yu.V. Greenhouse Gas Emissions in the Electric Power Sector and Their Abatement due to Russian NPP Projects. MPEI Vestnik. 2017; 3:46–52. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-46-52.

## Введение и описание проблематики исследования

Вопрос выбросов парниковых газов держит первые позиции в мировой повестке глобальных проблем. На 22 конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК-22) в Марракеше в ноябре 2016 г. представители правительств из почти 190 стран мира обсуждали планы реализации Парижского соглашения по климату, вступившего в силу 4 ноября 2016 г. За год после принятия этого соглашения, в декабре 2015 г., его ратифицировали 112 государств. Была поставлена ключевая задача — найти баланс между сдерживанием экономического роста (для снижения выбросов парниковых газов) и эффективными технологиями для удовлетворения растущих количественных и качественных потребностей человечества.

Устойчивое развитие требует согласования потребностей окружающей среды, общества и экономики — «трех китов», которые должны усиливать друг друга, но часто имеют разнонаправленные задачи развития. Обеспечение человечества энергией — одно из важнейших условий устойчивого развития, то есть развитие должно быть без истощения экономических, экологических и социальных ресурсов и без переноса непропорционально тяжелого бремени на будущие поколения. По оценкам Международного энергетического агентства (МЭА), 1,2 млрд чел. имеют доступ к электроэнергии, без которой невозможны экономическое и социальное процветание [1, с. 101].

С каждым годом мировые потребности в электроэнергии неуклонно растут, та же тенденция наблюдается с выбросами парниковых газов ( $\text{CO}_2$  как основного эквивалента). В связи с насущной задачей по снижению поступающих в атмосферу парниковых газов страны стремятся использовать «зеленые» технологии производства электроэнергии.

Вопросам подходов и методологии оценки экологичности генерирующих технологий посвящена настоящая статья. Целью исследования является оценка

вклада атомной энергетики в снижение выбросов парниковых газов. Для ее достижения были решены следующие задачи:

- проведен сравнительный анализ разных технологий генерации электроэнергии по показателям выбросов парниковых газов на 1 кВт·ч выработанной электроэнергии на базе обзора крупномасштабных мировых исследований;

- рассчитана экономия выбросов парниковых газов за счет эксплуатации атомных электростанций (АЭС) с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР), сооруженных по российским (советским) технологиям.

Объект исследования — генерирующие технологии для производства электроэнергии (электростанции) разных типов. Предмет исследования — количественные показатели выбросов парниковых газов от различных генерирующих технологий на протяжении всего жизненного цикла в привязке к производимой электроэнергии.

## Методологические подходы к оценке выбросов парниковых газов от технологий генерации электроэнергии с учетом их жизненного цикла

Были использованы системный подход и общенаучные методы познания: аналитический, сравнительного анализа, статистический, научной визуализации данных. Принципиальное значение имеет комплексный подход к оценке объема выбросов на протяжении всего жизненного цикла генерирующей технологии и связанного топливного цикла.

При анализе возможностей энергетического развития страны или региона важно использовать адекватные методологические подходы, позволяющие всесторонне оценивать преимущества и недостатки различных опций — генерирующих технологий. В данной работе изучены результаты оценки влияния различных генерирующих технологий на окружающую среду с учетом их ЖЦ. На основании представленных далее методоло-

гических подходов [2—5] оценена экономия выбросов парниковых газов. Распространение анализа на весь ЖЦ представляется самым перспективным методологическим подходом по оценке экологического воздействия от электростанций разных типов с точки зрения выбросов парниковых газов.

Для принятия экологически обоснованных решений следует анализировать не технологию генерации электроэнергии как источник загрязнения, а принимать во внимание всю технологическую цепочку создания электроэнергии путём оценки всего жизненного цикла той или иной технологии. Согласно методологии ИСО, оценка влияния генерирующей технологии на окружающую среду должна проводиться с учетом всего ЖЦ данной технологии, что «...может предотвратить непреднамеренное смещение влияния на окружающую среду на другие стадии ЖЦ...» [3, с. 1]. Анализ ЖЦ генерирующей технологии включает в себя оценку затрат и эффектов на окружающую среду от добычи и изготовления топлива, изготовления систем и оборудования электростанции и вплоть до конечного захоронения отходов.

Концептуально оценка ЖЦ состоит из четырёх фаз [4, с. 1]. На первой фазе ставится цель исследования и даётся определение технологии, для которого проводится анализ ЖЦ. Устанавливаются границы исследуемой системы, отбираются необходимые категории воздействия, выдвигаются предположения. Затем в процессе инвентаризации собирается информация о технологии и ее выбросах, производимых на протяжении всего ЖЦ. Третий этап представляет собой комплексную оценку воздействия ЖЦ, которая нацелена на характеристику потенциального воздействия на окружающую среду и его значимости на основе результатов инвентаризации ЖЦ. В соответствии с международным стандартом ISO 14044 эти фазы являются обязательными.

Оценка ЖЦ для генерирующей технологии охватывает множество различных процессов, которые вносят вклад в создание конечного продукта. Обзор мировых исследований в этой области показывает, что предпосылки и ограничения для оценки ЖЦ могут различаться в зависимости от методики анализа, точности использованных данных, систем учета затрат и прочих факторов [2, с. 13; 5, с. 100].

В любом проекте, связанном с производством электроэнергии, центральное положение занимает именно генерирующая установка — электростанция. Однако границы исследования выбросов парниковых газов должны быть установлены так, чтобы учитывать все возможные последствия топливного цикла на всем ЖЦ (включая прямые и косвенные выбросы парниковых газов). Полный перечень стадий ЖЦ генерирующей технологии сильно зависит от соответствующего топливного цикла, но принципиально включает в себя следующие стадии [6, с. 17; 5, с. 101—102]:

- производство строительных материалов и оборудования;
- транспортировку строительных материалов;
- строительство электростанции;
- разведку месторождений топлива;
- извлечение топлива;
- переработку и изготовление топлива;
- транспортировку топлива;
- транспортировку рабочего персонала;
- производство отходов и побочных продуктов (отходы могут быть вторично использованы);
- переработку отходов;
- демонтаж станции после истечения срока службы;
- рекультивацию земель после демонтажа станции.

Подход к анализу именно ЖЦ генерирующей технологии позволяет оценить вклад технологии как в масштабе одной страны, так и при сокращении мировых выбросов парниковых газов.

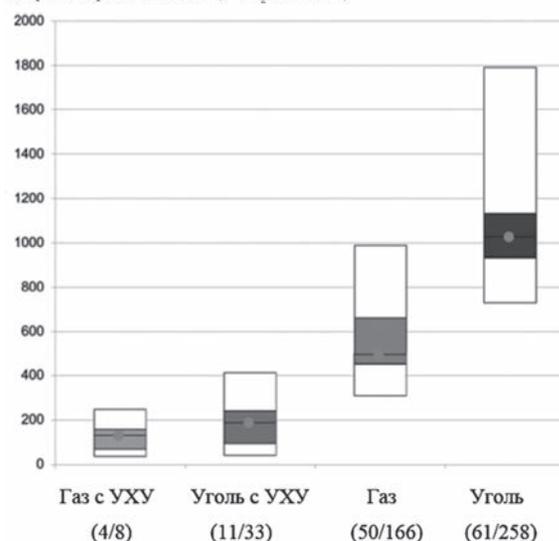
### Результаты оценки выбросов парниковых газов от разных генерирующих технологий

Приведены результаты исследований и сравнительного анализа выбросов парниковых газов от различных генерирующих технологий на протяжении их ЖЦ, представленные в агрегированном виде в отчете МАГАТЭ [2], который разработан на основании информации из международной базы данных по оценке ЖЦ «Экоинвент» (Ecoinvent Database) и исследований Национальной лаборатории США по возобновляемой энергетике [2, с. 14].

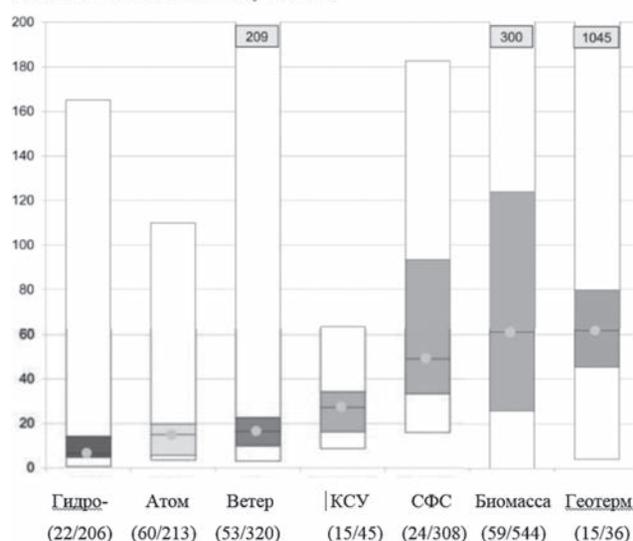
На рисунке представлены показатели выбросов парниковых газов на всем ЖЦ разных генерирующих технологий, взятые из указанных источников. Поскольку в мире нет единой методологии определения границ ЖЦ, а также в силу разных параметров исследованных электростанций, показатели выбросов парниковых газов в разных исследованиях различаются. Для визуализации данных из реферированных источников экспертами МАГАТЭ были построены так называемые диаграммы «ящик с усами», которые удобно использовать для представления результатов статистического анализа величин с диапазоном погрешности.

На оси абсцисс указан тип генерирующих технологий, а в скобках — количество использованных для построения диаграммы исследований и результатов оценок отдельных расчетов. Например, для оценки выбросов парниковых газов от угольных электростанций экспертами МАГАТЭ использовано 61 исследование, содержащее 258 расчетов для оценки выбросов парниковых газов от угольных электростанций.

Традиционно диаграммы такого типа отображают диапазон данных, находящихся между первым и третьим квартилем, а медиана делит эту коробку на две части (межквартильный диапазон, на рисунке медиана представлена кружком). Усы

Выбросы парниковых газов (г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч)

а

Выбросы парниковых газов (г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч)

б

Выбросы парниковых газов в течение ЖЦ для генерирующих технологий на ископаемых видах топлива (а) и возобновляемых и атомных источниках (б), CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч [2, с.14, 15]:

□ — общий диапазон; ■ — межквартильный диапазон; ● — среднее значение. Числа в скобках означают количество источников (оценок). Источники показывают количество исследований, расчеты — общее количество расчетов, представленных во всех источниках

отображают данные первого квартиля (от второго квартиля до минимального значения) и четвертого квартиля (от третьего до максимального значения). Продолжая пример по угольным электростанциям, отметим, что в указанном 61 отчете с 258 оценками максимальное значение выбросов составило 1790,7 г CO<sub>2</sub>-экв. на 1 кВт·ч выработанной электроэнергии, минимальное значение — 729 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч, первый квартиль — 931,9 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч, четвертый квартиль — 1131,91 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч, медиана — 1024,8 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч (это значение и используется в последующих расчетах как среднее) [2, с. 16].

Как следует из рисунка, самые большие разбросы в межквартильных и общих диапазонах наблюдаются у ветро-, био- и геотермальной генераций. Различия в оценках по разным источникам столь велико, что для компактности отображения информации на диаграммах использовано числовое указание на верхнюю границу оценки объема выбросов парниковых газов. Если бы эти данные были визуализированы, то потребовалось быкратно увеличить ось ординат, что сделало бы диаграмму менее наглядной. Сам же разброс оценок можно объяснить недостаточной унифицированностью методологии определения границ ЖЦ указанных генерирующих технологий.

Объединяя результаты всех работ по выбросам парниковых газов в течение ЖЦ различных генерирующих технологий, рисунок демонстрирует данные по ископаемым источникам сырья, используемым как с технологиями улавливания и хранения углерода (УХУ), так и без них. На нем содержатся данные по

выбросам парниковых газов от электростанций на возобновляемых источниках энергии и атомном топливе. Атомная энергия в совокупности с ветро- и гидроэнергией, обладает наименьшими показателями выбросов парниковых газов на единицу произведенной электроэнергии. Стоит обратить внимание, что по вертикальной оси в двух диаграммах существует отличие единиц измерения.

Технологии улавливания и хранения углерода считаются во многих исследованиях эффективным вариантом по сокращению выбросов парниковых газов, несмотря на то, что они еще не применяются в промышленных масштабах. Однако средние значения находятся на уровне 128,5 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч для природного газа и 186 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч для угля, что выше аналогичных показателей для атомной энергии. Значительная доля воздействия на окружающую среду систем УХУ связана с перемещением и хранением уловленного CO<sub>2</sub> и с производством химикатов. Без технологии УХУ средние показатели выбросов парниковых газов для газовой и угольной генерации несопоставимо выше — 491,8 и 1024,8 г CO<sub>2</sub>-экв./кВт·ч соответственно [2, с. 15—16].

Солнечные фотоэлектрические системы (СФС) всегда позиционировались как технологии, в процессе функционирования которых не осуществляется выброс парниковых газов. Однако если принять во внимание все стадии ЖЦ данной технологии, результаты более 300 расчетов показывают, что генерация солнечной электроэнергии на фотовольтаических технологиях в среднем производит 49,2 г выбросов CO<sub>2</sub>-экв. на один

произведенный кВт·ч. Этот показатель в 4 раза выше показателей выбросов парниковых газов от ЖЦ АЭС. На данный момент на рынке преобладают более эффективные технологии производства кристаллического кремния, но его энергоемкое производство приводит к повышенному выбросу парниковых газов. Широкий межквартильный и общий диапазоны означают неопределенность, вытекающую из соотношений таких параметров солнечных установок, как необходимый уровень солнечной радиации, срок службы, эффективность и производительность солнечных фотоэлектрических систем. Концентрированная солнечная энергия (КСЭ), имеет в среднем более привлекательные результаты (27,3  $\text{CO}_2$ -экв./кВт·ч), что может быть объяснено большей мощностью, которая обычно ведет к сокращению выбросов парниковых газов на единицу выпуска в рамках оценки ЖЦ [2, с. 16].

Что касается электроэнергии, произведенной ветряными электростанциями, среднее значение выбросов парниковых газов, сопоставимо со значением у атомной энергии 16,4  $\text{CO}_2$ -экв./кВт·ч, хотя диапазон несколько шире [2, с. 17].

Гидроэнергия также обладает сопоставимым с атомной энергией уровнем выбросов парниковых газов в течение ЖЦ. Отдельные различия в показателях между этими двумя системами обычно невелики, но исследования, положенные в основу рисунка, преимущественно оценивают гидроэлектростанции меньшей мощности. Среднее значение для гидроэнергии в целом составляет 6,6 г  $\text{CO}_2$ -экв./кВт·ч (основано на 22 опубликованных источниках, включающих 206 расчетов) [2, с. 17]. Отметим, что гидроаккумулирующие электростанции выдают значительно более широкий диапазон и высокие показатели выбросов парниковых газов, которые могут быть даже выше уровня выбросов при использовании угля, что объясняет значительный уровень возможных выбросов парниковых газов для гидроэнергетических станций.

Множество исследований оценки ЖЦ обнаружили, что средние показатели выбросов парниковых газов при производстве электроэнергии использованием биомассы лишь слегка меньше выбросов геотермальных и солнечных фотоэлектрических технологий. При значении в 61 г  $\text{CO}_2$ -экв./кВт·ч и общем диапазоне с верхней границей в 300 г  $\text{CO}_2$ -экв./кВт·ч конечные результаты чрезвычайно чувствительны к типу биомассы, схемам транспортировки, технологии производства и свойствам материала (продукта) на станции (теплота, удобрение, газ). Генерирующие технологии на базе биомассы обладают высокой степенью негармонизированности, что также объясняет такой значительный разброс в оценках. Некоторые исследования по геотермальной энергии показывают то же среднее значение выбросов парниковых газов как у энергии, полученной

из биомассы, но они отмечают вероятность более высокого воздействия, чем угольная энергетика в связи с высвобождением парниковых газов из геотермальной жидкости (до 1045 г  $\text{CO}_2$ -экв./кВт·ч) [2, с. 16—17].

Выбросы парниковых газов от АЭС с легководными реакторами (к которым относятся и российские технологии ВВЭР) имеют среднее значение в 14,9 г  $\text{CO}_2$ -экв./кВт·ч, при этом разброс значений находится в пределах 5,6...19,7 г  $\text{CO}_2$ -экв./кВт·ч произведенной электроэнергии [2, с. 14]. Анализ выбросов парниковых газов на разных стадиях ЖЦ АЭС свидетельствует о значительных объемах выбросов парниковых газов при изготовлении топлива для АЭС (около 38 % от всего объема) и при обращении с отработанным ядерным топливом (14 %); на сооружение АЭС приходится около 12 % всех выбросов, 18 % выбросов происходят во время эксплуатации и обслуживания АЭС, а остальные 18 % приходятся на стадию вывода АЭС из эксплуатации. Получается, что около половины (52 %) выбросов парниковых газов на ЖЦ атомной генерации связаны с ядерным топливным циклом [5, с. 103]. Расчет долей по стадиям ЖЦ АЭС произведен на основании данных [5, с. 103] путем деления усредненных объемов выбросов на каждой стадии ЖЦ на общее количество выбросов за весь ЖЦ АЭС.

Имеет место значительная неопределенность при оценке объема парниковых газов на всем ЖЦ различных технологий генерации электроэнергии, которая проистекает от использования негармонизированных методик оценки выбросов на разных стадиях ЖЦ, а также определения границ ЖЦ генерирующих технологий и связанных топливных циклов, различий в отнесении выбросов парниковых выбросов при когенерации электрической и тепловой энергий. Однако само направление учета выбросов на всем ЖЦ, безусловно, представляется перспективным для комплексной сравнительной оценки влияния на окружающую среду и климат разных технологий генерации электроэнергии.

### **Расчет экономии выбросов от эксплуатации водо-водяных энергетических реакторов в мире**

По состоянию на 2016 г. в 31 стране работает 449 блоков АЭС с общей установленной мощностью 391 ГВт, что обеспечивает 11,5 % от мировых потребностей в электроэнергии [7]. В странах ЕС доля атомной энергетики составляет 27 % или 53 % от всей электровыработки без выбросов парниковых газов.

По прогнозу МЭА, к 2040 г. доля атомной энергетики в глобальной энерговыработке также составит около 12 %, что потребует увеличения мощности АЭС в мире до 624 ГВт (в результате ввода 380 ГВт новых мощностей и вывода из эксплуатации 148 ГВт АЭС) [8, с. 25]. Сегодня строятся 60 блоков АЭС в 15 странах. Развитие мирового рынка сооружения АЭС про-

исходит благодаря эволюционному расширению использования атомной генерации в странах, имеющих опыт эксплуатации подобных станций, и привлечению стран-новичков «атомного энергетического клуба». Около 50 стран рассматривают возможность или планируют ввод первой АЭС. На разной стадии планирования в мире находятся около 160 новых энергоблоков.

Низкий уровень выбросов на единицу произведённой энергии от АЭС (с учетом всего ЖЦ технологии) подтверждает возможность рассмотрения данной технологии как варианта решения проблемы изменения климата. Исследования показывают, что устойчивое энергетическое развитие и экономический рост недостижимы без участия атомной энергетики в мировой «топливной корзине» (т. е. наборе различных источников энергии). В 2015 г. стартовала международная инициатива «Атом для климата», цель которой — придать импульс мировой дискуссии о роли атомной энергетики и ее вкладе в устойчивое развитие человечества [9].

На основании представленных оценок автором выполнен расчет экономии выбросов парниковых газов за счет эксплуатации АЭС типа ВВЭР, сооруженных по российским (советским) технологиям в России и за рубежом. Сравнительный анализ атомных генерирующих технологий сделан для моделируемой ситуации, при которой вся электроэнергия, полученная на АЭС, была бы произведена на угольных или газовых электростанциях.

При оценке объем выбросов парниковых газов, реально произошедший на всем ЖЦ АЭС, отнимается от гипотетического объема парниковых газов, которые были бы получены, если бы аналогичный объем электроэнергии был произведен на угольной или газовой станциях (без технологий УХУ, которые в исторической ретроспективе просто отсутствовали). Таким образом, экономия рассчитывалась с учетом наличия определенных выбросов парниковых газов в ЖЦ АЭС. Для этого использовались средние показатели выбросов по АЭС, угольным и газовым электростанциям.

Расчет для сравнения атомной и угольной генерации проводился по следующей формуле:

$$\text{ЭПГ} = V(\text{ПГ}_{\text{уголь}} - \text{ПГ}_{\text{атом}}),$$

где ЭПГ — экономия выбросов парниковых газов от замены угольной генерации на атомную, в тоннах  $\text{CO}_2$ -экв.;  $V$  — объем произведенной электроэнергии, кВт·ч;  $\text{ПГ}_{\text{уголь}}$  — выбросы парниковых газов от угольных электростанций (в расчетах используется среднее значение  $1024,8 \text{ г CO}_2\text{-экв./кВт·ч}$  произведённой электроэнергии);  $\text{ПГ}_{\text{атом}}$  — выбросы парниковых газов от АЭС с ВВЭР, в расчетах применяется среднее значение  $14,9 \text{ г CO}_2\text{-экв./кВт·ч}$  произведённой электроэнергии).

При расчете экономии выбросов парниковых газов благодаря генерации на АЭС по сравнению с газовыми электростанциями используется аналогичная форму-

ла, только берутся показатели соответствующих выбросов от газовой генерации (среднее значение  $491,8 \text{ г CO}_2\text{-экв./кВт·ч}$  произведенной электроэнергии).

Данные по объемам выработки (кВт·ч) электроэнергии на АЭС типа ВВЭР, построенных как в России, так и за рубежом, получены из базы данных МАГАТЭ — информационной системы энергетических реакторов PRIS [7]. Из этой базы была взята информация по реальным объемам генерации электроэнергии от АЭС типа ВВЭР, работающих (или работавших) в Армении, Болгарии, Венгрии, Германии, Индии, Иране, Китае, России, Словакии, Украине, Финляндии, Чехии. Суммарная выработка электроэнергии на АЭС типа ВВЭР в указанных странах с 1954 до конца 2014 гг. составила  $6421 \text{ ТВт·ч}$  (или  $6421 \cdot 10^9 \text{ кВт·ч}$ ).

В результате расчетов экономия по выбросам парниковых газов благодаря работе АЭС типа ВВЭР в мире с учетом всего ЖЦ составила:

- около  $6,5 \text{ Гт}$  ( $6,5 \cdot 10^9 \text{ т}$ )  $\text{CO}_2$  в сравнении с угольной электростанцией;
- около  $3,2 \text{ Гт}$  ( $3,2 \cdot 10^9 \text{ т}$ )  $\text{CO}_2$  в сравнении с газовой электростанцией.

### Анализ результатов и перспективы

Сравнительный анализ генерирующих технологий по выбросам парниковых газов на всем ЖЦ показал преимущества атомной генерации по сравнению с большинством технологий производства электроэнергии из традиционного углеводородного топлива и на возобновляемых источниках энергии. По результатам авторских расчетов с использованием данных из международных исследований, за весь период эксплуатации АЭС типа ВВЭР в мире удалось «экономить», т. е. не выбросить, свыше  $6 \text{ Гт}$  парниковых газов. Это реальный и ощутимый вклад атомной генерации по российским (советским) технологиям в борьбу с климатическими изменениями.

АЭС смогут в будущем достичь более низких показателей выбросов парниковых газов, что подкрепляется следующими направлениями по развитию и оптимизации атомных генерирующих технологий:

- совершенствуются процессы ядерного топливного цикла (включая обращение с отработанным ядерным топливом), повышается глубина выгорания топлива, модернизируются проекты АЭС в части повышения КПД, что позволяет уменьшить выбросы на всех стадиях ЖЦ АЭС и удельные выбросы на единицу вырабатываемой электроэнергии;

- продлевается проектный срок эксплуатации АЭС — с 30..40 до 60 лет, улучшаются проекты АЭС в части снижения материалоемкости и адаптации к последующему выводу из эксплуатации, что позволяет не только изначально снизить, но и распределить выбросы, связанные со строительством и выводом из эксплуатации, на более долгий период времени и большую выработку электроэнергии.

Эти усилия на протяжении всего ЖЦ АЭС по достижению большей эффективности позволяют говорить о тренде на позиционирование атомной энергетики как одной из самых низкоуглеродных технологий.

В международных проектах АЭС происходит разделение различных стадий ЖЦ АЭС между национальными границами стран импортеров и экспортеров, и выбросы парниковых газов, связанные с созданием АЭС и ее топлива, происходят в стране-экспортере АЭС. В локальном масштабе страны-импортере АЭС это повышает экологическую конкурентоспособность атомной генерации.

Некоторая неопределенность, связанная с оценками объемов выбросов парниковых газов на всех стадиях ЖЦ генерирующих технологий, не умаляет преимуществ такого анализа, поскольку дает важные ориентиры при сопоставлении различных видов генерации электроэнергии с точки зрения их воздействия на окружающую среду и климат. В перспективе представляется актуальным получение более детальных данных по выбросам на разных стадиях ЖЦ различных электростанций, а также данных для групп генерирующих технологий на одном источнике энергии (например, для газовых электростанций разных типов). При этом большее значение будет иметь и выработка унифицированной методологии оценки выбросов парниковых газов от различных технологий генерации электроэнергии.

## Выводы

Низкий уровень выбросов CO<sub>2</sub> и парниковых газов в целом в течение ЖЦ АЭС позволяет многим странам рассматривать атомную энергию как весомый технологический вариант при разработке стратегий, направленных на смягчение изменений климата. Сегодня 31 страна имеет атомную генерацию, еще порядка 50 стран рассматривают для себя перспективы сооружения первой АЭС. Сколь широко технология атомной генерации будет использоваться, зависит от многих факторов: политических, экономических и технологических условий и особенностей ТЭК страны.

## Литература

1. **World Energy Outlook**. IEA, 2015.
2. **Climate Change and Nuclear Power 2014**. Vienna: IAEA, 2014.
3. **ISO 14044:2015**. Environmental management systems — Requirements with guidance for use.
4. **Life Cycle Impact Assessment Method** // EU project LC-Impact [Электрон. ресурс] [http://www.lc-impact.eu/downloads/documents/Chapter1\\_Framework.pdf](http://www.lc-impact.eu/downloads/documents/Chapter1_Framework.pdf) (дата обращения 14.12.2016)
5. **Tudiver S.** Greenhouse Gas Emissions from Nuclear Power in 2030: Examining Emissions Estimates and Projected Growth // *Yale J. Intern. Affairs*. 2009. Pp. 100—111.
6. **European Commission.** ExternE Externalities of Energy. V. 7. Methodology Update. Office of Publications

for the European Communities, Luxembourg: Office of Publications for the European Communities, 1999.

7. **The Power Reactor Information System (PRIS) / IAEA** [Электрон. ресурс] [www.iaea.org/pris](http://www.iaea.org/pris) (дата обращения 01.11.2016).

8. **World Energy Outlook 2014 Factsheet.** Nuclear power: retreat, revival or renaissance? [Электрон. ресурс] [www.iaea.org/media/news/2014/press/141112\\_WEO\\_FactSheet\\_Nuclear.pdf](http://www.iaea.org/media/news/2014/press/141112_WEO_FactSheet_Nuclear.pdf) (дата обращения 03.11.2016).

9. **Nuclear for Climate** [Электрон. ресурс] <http://www.sfen.org/en/nuclear-for-climate> (дата обращения 14.12.2016).

## References

1. **World Energy Outlook**. IEA, 2015.
2. **Climate Change and Nuclear Power 2014**. Vienna: IAEA, 2014.
3. **ISO 14044:2015**. Environmental management systems — Requirements with guidance for use.
4. **Life Cycle Impact Assessment Method** // EU project LC-Impact [Electron. resource] [http://www.lc-impact.eu/downloads/documents/Chapter1\\_Framework.pdf](http://www.lc-impact.eu/downloads/documents/Chapter1_Framework.pdf) (date of access 14.12.2016).
5. **Tudiver S.** Greenhouse Gas Emissions from Nuclear Power in 2030: Examining Emissions Estimates and Projected Growth // *Yale J. Intern. Affairs*. 2009. P. 100—111.
6. **European Commission.** ExternE Externalities of Energy. V. 7. Methodology Update. Office of Publications for the European Communities, Luxembourg: Office of Publications for the European Communities, 1999.
7. **The Power Reactor Information System (PRIS) / IAEA** [Electron. resource] [www.iaea.org/pris](http://www.iaea.org/pris) (date of access 01.11.2016).
8. **World Energy Outlook 2014 Factsheet.** Nuclear power: retreat, revival or renaissance? [Электрон. ресурс] [www.iaea.org/media/news/2014/press/141112\\_WEO\\_FactSheet\\_Nuclear.pdf](http://www.iaea.org/media/news/2014/press/141112_WEO_FactSheet_Nuclear.pdf) (date of access 03.11.2016).
9. **Nuclear for Climate** [Electron. resource] <http://www.sfen.org/en/nuclear-for-climate> (date of access 14.12.2016).

## Сведения об авторе

**Черняховская Юлия Валентиновна** — кандидат экономических наук, заместитель директора департамента международного бизнеса госкорпорации «Росатом», доцент кафедры экономики и менеджмента в промышленности Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, e-mail: 5267708@mail.ru

## Information about author

**Chernyakhovskaya Yulia V.** — Ph.D. (Econom.), Deputy Director of International Business Department of Rosatom State Corporation, Assistant Professor of Economics and Management in Industrial Dept., National Research Nuclear University MEPhI, e-mail: 5267708@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 01.08.2016*