

# ВЫБРОСЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ОТ ЦЕПОЧЕК ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ОЦЕНКА РАЗЛИЧИЙ

ДЖОЗЕФ В. СПАДАРО, ЛЮСИЛЬ ЛАНГЛУА И БРЮС ГАМИЛЬТОН

**В** последнее десятилетие в мире все более широко обсуждается воздействие деятельности человека на глобальную климатическую систему в связи с выбросами парниковых газов (ПГ). До сих пор дискуссии сосредоточивались в основном на антропогенных выбросах двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ), метана ( $\text{CH}_4$ ), закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) и галогенированных соединений, содержащих фтор, хлор и бром. Концентрации этих газов в атмосфере значительно возросли по сравнению с доиндустриальным периодом, а в случае с метаном — фактически более чем в два раза.

Стремясь стабилизировать концентрации ПГ в атмосфере на уровне, который свел бы к минимуму риск серьезных изменений глобального климата, более 130 стран на Экологическом саммите 1992 г. в Бразилии ратифицировали Рамочную конвенцию Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК). За этим первым шагом последовали другие. На третьем совещании Конференции сторон Конвенции в Киото (декабрь 1997 г.) лица, ответственные за принятие решений, пришли к соглашению о конкретных для каждой страны целевых показателях сокращения выбросов.

В настоящее время промышленно развитые страны, или страны, включенные в приложение I, производят значительную часть мировых выбросов парниковых газов. Около двух третей выбросов ПГ можно отнести на счет деятельности, связанной с

производством электричества, и транспортного сектора. Поэтому соблюдение требований Протокола Киото странами, включенными в приложение I, потребует твердого обязательства разрабатывать и применять те источники энергии, которые производят незначительные выбросы углерода. Усовершенствования в области технологий по преобразованию топлива в энергию также будут играть важную роль, поскольку этим странам нужно обеспечить удовлетворение будущего спроса на энергию. Так как развивающиеся страны не связаны Протоколом Киото, а потребление энергии в них постоянно растет, интенсивность выбросов парниковых газов в них увеличивается довольно быстрыми темпами и, как ожидается, к концу первой четверти XXI столетия их доля в глобальных выбросах будет доминирующей.

Учитывая, что сектор выработки электричества является главным поставщиком парниковых газов (в настоящее время он производит одну треть всех глобальных выбросов), МАГАТЭ в рамках своей Программы по сравнительной оценке энергетических источников осуществило обзор выбросов парниковых газов во всех процессах (цепочках) производства электричества с использованием ископаемого топлива, ядерной энергии и возобновляемых источников энергии. С октября 1994 г. по июнь 1998 г. МАГАТЭ организовало проведение серии из шести совещаний консультативных групп (СКГ), охватывающих следующие

топливные цепочки: лигнит, уголь, нефть, газ, ядерная энергия, энергия биомассы, гидроэнергия, энергия ветра и солнца. Результат этих совещаний был двойным. Во-первых, их участники разработали согласованный набор коэффициентов вредности производства электричества в зависимости от выбросов парниковых газов для полной энергетической цепочки. Во-вторых, они указали пути выбора топлива и технологии, которые можно было бы использовать в целях содействия выполнению обязательств по РКИК. В данной статье представлены и обсуждаются результаты и основные выводы этих совещаний.

## КОЭФФИЦИЕНТЫ ВРЕДНОСТИ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

В процессе различных исследований был проведен анализ целого ряда коэффициентов вредности производства выбросов для различных видов топлива. Результаты выражены в грамах эквивалента углерода (включая  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и т. п.) на киловатт-час электричества ( $\text{гC}_{\text{экв.}}/\text{кВт-ч}$  —  $\text{гC}_{\text{eq}}/\text{kWh}$ ). На диаграмме (стр. 21) приводятся данные по действующим электростанциям (технология 90-х гг.) и коэффициенты вредности выб-

---

*Авторы — сотрудники Секции планирования и экономических исследований Департамента ядерной энергии. Все упомянутые в статье материалы можно получить у авторов.*

## ПАРНИКОВЫЕ ГАЗЫ И РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ

В серии фактологических бюллетеней, опубликованных секретариатом Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций по изменению климата (РКИК), характеризуются пути образования парниковых газов в процессе деятельности человека. Ниже приводятся важнейшие положения этих материалов:

■ Самые важные виды человеческой деятельности приводят к выбросам парниковых газов, и многие из этих видов деятельности в настоящее время необходимы для глобальной экономики.

■ Образующаяся в процессе сжигания ископаемого топлива двуокись углерода является самым крупным источником выбросов парниковых газов, обусловленных деятельностью человека.

■ Большая часть выбросов, связанных с использованием энергии, является результатом сжигания ископаемого топлива. Нефть, природный газ и уголь обеспечивают большую часть энергии, используемой для производства электричества, работы автомобилей, отопления жилищ и снабжения энергией предприятий. При полном сжигании топлива единственным побочным продуктом, содержащим углерод, является двуокись углерода. Но сжигание зачастую бывает неполным, вследствие чего образуются также окись углерода и другие углеводороды. Закись азота и другие окиси азота образуются потому, что в результате сжигания топлива азот в топливе или в воздухе вступает в реакцию с кислородом в воздухе.

■ Выбросы парниковых газов происходят также в процессе добычи, переработки, транспортировки и распределения ископаемого топлива.

Более подробную информацию можно получить в информационном наборе по изменению климата на сайте РКИК в сети Интернет по адресу [www.unfccc.de](http://www.unfccc.de).

росов для систем, эксплуатация которых предполагается в ближайшей и среднесрочной перспективе (технология 2005—2020 гг.).

Приведенные расчеты отражают различия в методологиях оценки, коэффициентах преобразования, практике подготовки топлива и последующей его транспортировки к месту расположения электростанции, а также местные факторы, такие как структура предполагаемого топлива в соответствии с требованиями к электричеству, имеющими отношение к строительству электростанции и производству оборудования. В значениях интенсивности будущих выбросов учтены усовершенствования технического процесса по преобразованию топлива в энергию, сокращение выбросов в ходе добычи и транспортировки топлива, а также более низкие уровни выбросов во время строительства электростанции и производства оборудования.

Совокупная интенсивность выброса для ископаемых видов топлива является суммой выб-

росов из дымовых труб в процессе сгорания топлива и выбросов в результате деятельности по его добыче и переработке или от цепочек. Как правило, выбросы ПГ в процессе строительства электростанции или снятия ее с эксплуатации, а также вклад линий электропередачи, соединяющих электростанцию с сетью, пренебрежимо малы. Например, на строительство электростанции и снятие ее с эксплуатации можно отнести лишь 1% общих выбросов парниковых газов.

Ключевыми факторами анализа технологий производства гидроэнергии, энергии ветра и солнечной энергии являются размер и тип электростанции. Весьма значительное влияние на интенсивность выбросов оказывают такие факторы, как территориальное местоположение и местные правила строительства. Влияние этих факторов на интенсивность выбросов парниковых газов показано на диаграмме.

Результаты финансируемых МАГАТЭ совещаний консульта-

тивных групп последовательно показывают, что основанные на ископаемом топливе технологии дают наивысшие коэффициенты вредности выбросов, при этом коэффициент природного газа примерно вдвое меньше по сравнению с углем или лигнитом и составляет две трети расчетной оценки для мазута. Ядерная и гидроэнергия, с другой стороны, характеризуются наименьшими выбросами парниковых газов, в 50—100 раз меньше по сравнению с углем (в зависимости от технологии). Выбросы парниковых газов от солнечной энергии находятся посередине, примерно на порядок выше по сравнению с ядерной энергией.

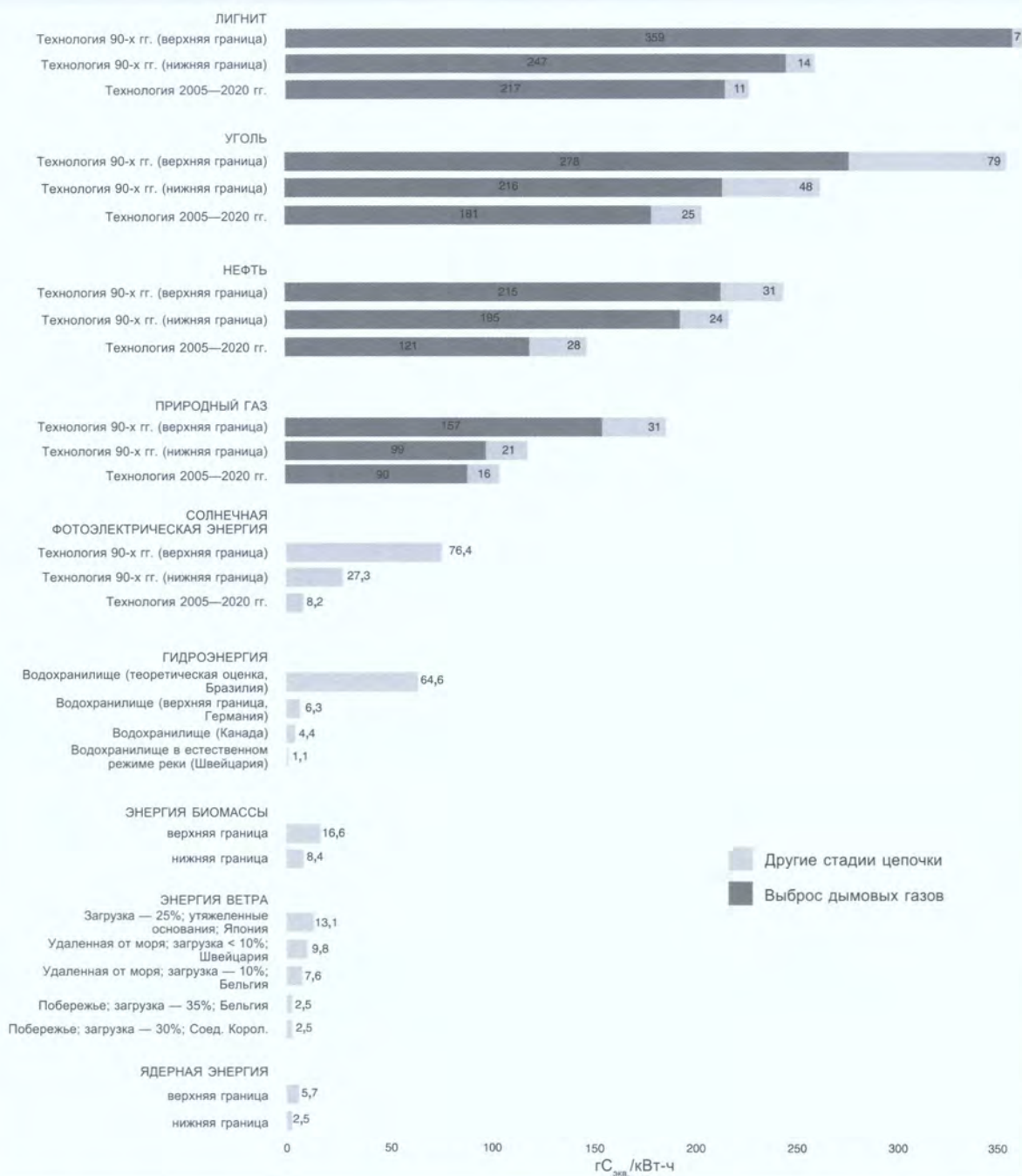
## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Цель при оценке срока службы (ОСС) состоит в установлении экологических нагрузок на окружающую среду, связанных с производством какого-либо продукта, с учетом потоков массы и энергии на каждом этапе процесса. Конечным продуктом в случае выработки электричества является 1 кВт·ч энергии.

Иногда оценка срока службы или анализ технологической цепочки (АТЦ) дополняется анализом вводимых ресурсов—результатов (АВРР). При таком анализе учитываются косвенные выбросы, относимые на счет различных экономических секторов, которые участвуют в создании конечного продукта, таких, например, как электричество, используемое в технологическом процессе, при проектировании технологического оборудования и в работе.

Пренебрежение этими факторами приводит к недооценке экологических последствий из-за искусственного сокращения системных границ анализа. Например, сравнение интенсивности выброса парниковых газов от ископаемого топлива с использованием подхода АВРР на 30% выше эквивалента, полученного с использованием метода АТЦ. В случае с ядерной энергией такое отклонение может быть

# ДИАПАЗОН СУММАРНЫХ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ОТ ЦЕПОЧЕК ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА



еще более заметным, примерно в два раза.

## СИСТЕМНЫЕ ГРАНИЦЫ АНАЛИЗА

При сравнении различных энергетических систем важное зна-

чение приобретает выбор границы системы. Например, игнорирование деятельности по добыче и переработке в цикле ископаемого топлива может привести к недооценке общей интенсивности выбросов парниковых газов

в пределах от 5 до 25%.

В случае с ядерной энергией и возобновляемыми источниками энергии выбросы парниковых газов в месте производства отсутствуют, но имеются выбросы в атмосферу, связанные с добы-

чей, переработкой и транспортировкой топлива, строительством электростанции и снятием ее с эксплуатации, производством оборудования и разложением органического вещества. Уровень выбросов в значительной степени зависит от технологии и территориального расположения электростанции.

Расчет полной энергетической цепочки, учитывающий все этапы от "колыбели до могилы" является, очевидно, самым справедливым способом сравнения климатических и экологических нагрузок, обусловленных различными видами топлива и различными технологиями производства электричества. Аналитические возможности и здравый смысл будут в конечном итоге диктовать выбор границ системы. Интенсивность выбросов должна включать, по меньшей мере, цепочку снабжения топливом, этап производства энергии, а для ядерной и возобновляемой энергии — вклады в выбросы от строительства электростанции и от потребностей в материалах. Более подробный анализ может расширить границы системы до конечного использования энергии, т. е. вплоть до бытовой электроаппаратуры.

В случае с технологиями прерывистой подачи энергии, такими как ветровая, солнечная и, в меньшей мере, гидроэнергия, встает вопрос о том, должна ли анализируемая система включать источники резервной (вторичной) энергии или нет. Предпочтительным является подход, основанный на раздельном расчете выбросов от первичных и резервных систем. Преимущества оказываются тройными. Во-первых, выбросы от первичной системы определяются строго при использовании данной технологии. Во-вторых, может быть четко установлено влияние годовой выработки электростанции или готовности электростанции (часы эксплуатации в год). И, в-третьих, такой подход позволяет проводить сравнение различных вариантов резервного энергообеспечения.

## ПОТЕНЦИАЛ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Потенциал глобального потепления (ПГП) служит измерением способности газа в атмосфере улавливать тепло, излучаемое поверхностью земли, в сравнении с эталонным газом, которым обычно считается двуокись углерода. Время жизни газов в атмосфере характеризуется большими различиями, поэтому полученные результаты интегрируются по различным временным интервалам. Обычно выбирается временной горизонт в 100 лет.

Ниже приводятся самые последние оценки ПГП (временной горизонт — 100 лет). Расчеты были проведены Межправительственной группой экспертов по изменению климата в отношении самых распространенных парниковых газов, выбрасываемых обычно цепочкой выработки электричества:

- двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ ) = 1;
- метан ( $\text{CH}_4$ ) = 21;
- закись азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) = 310;
- гексафторид серы ( $\text{SF}_6$ ) = 23.900;
- тетрафторметан ( $\text{CF}_4$ ) = 6500;
- гидрофторуглероды (HFC): HFC-134a = 1300;
- хлорфторуглероды (CFC): CFC-114 = 9300;
- гидрохлорфторуглероды (HCFC): HCFC-22 = 1700.

## КОЭФФИЦИЕНТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Коэффициент преобразования топлива в электричество (КП) и коэффициент нагрузки электростанции влияют на интенсивность выбросов парниковых газов в процессе сгорания топлива. Коэффициент вредности выбросов ПГ снижается при повышении коэффициента преобразования или коэффициента нагрузки. Выбросы  $\text{CO}_2$  зависят от содержания углерода в топливе и от коэффициента преобразования; интенсивность выбросов  $\text{N}_2\text{O}$  обуславливается прежде всего факторами технологического процесса, в то время как выбросы метана связа-

ны главным образом с практикой поставок ископаемого топлива. Грубо говоря, интенсивность выброса меняется обратно пропорционально коэффициенту преобразования. При КП равном точно 40% дополнительное его повышение на 1% приводит к снижению интенсивности выбросов ПГ на 2,5%. При более низких КП уменьшение интенсивности выбросов происходит еще более заметно, в то время как в случае с более высокими скоростями преобразования дело обстоит наоборот. Тепловой КП всегда снижается при снижении коэффициента нагрузки, и это изменение в огромной степени зависит от технологии.

Типичные коэффициенты преобразования для современных действующих систем колеблются в диапазоне от 27 до 40% для электростанций, работающих на лигните, от 30 до 45% — для угольных электростанций, от 34 до 43% — для мазутных электростанций и от 35% (в режиме пиковой нагрузки) до 55% — для газовых электростанций. Электростанции с более низкими КП находятся обычно в развивающихся странах.

Ожидается, что в среднесрочной перспективе КП наилучших имеющихся технологий будет колебаться в диапазоне от 50 до 55% для угольных и от 60 до 65% — для газовых электростанций.

Что касается ядерного и возобновляемого топлива, то снижение выбросов в окружающую среду в результате усовершенствования преобразования энергии не будет иметь большого значения, поскольку в этой области отсутствуют выбросы дымовых газов; в данном случае выбросы скорее связаны с поставками топлива, строительством электростанции и производством материалов. Более того, требования к топливу и общие выбросы снизятся, поскольку более новые технологии приводят к повышению коэффициентов преобразования.

## ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

На интенсивность выброса парниковых газов оказывают влияние многочисленные факторы. Ниже приводится сводный перечень доминирующих параметров по каждому виду топлива.

### *Ископаемое топливо*

- Характеристики топлива, такие как содержание углерода и калорийность.
- Тип и расположение шахты.
- Методы добычи топлива (влияющие на потребности в перевозках и выбросы метана).
- Потери природного газа в процессе его передачи.
- Коэффициент преобразования.
- Структура топлива по видам для удовлетворения потребностей производства электричества, связанных с поставками топлива, строительством/снятием с эксплуатации электростанции.

### *Гидроэнергия*

- Тип (естественный режим реки или водохранилище).
- Местоположение электростанции (тропики или северный климат).
- Использование энергии для строительства плотины.
- Выбросы в процессе строительства электростанции (бетон и сталь), которые составляют доминирующую часть выбросов для всех типов электростанций, использующих естественный режим реки и альпийские (горные) водохранилища. Что касается крупных водохранилищ с высоким коэффициентом поверхности—объем (расположенных обычно в северных районах, таких как Канада и Финляндия) и во влажных тропических регионах (Бразилия), то на их интенсивность выбросов парниковых газов воздействует разложение биомассы, покрываемой водой во время наводнений, и окисление поверхностных отложений (что приводит к крупным выбросам  $\text{CH}_4$ ). Выбросы  $\text{CO}_2$  водохранилищ "северного типа" превышают интенсивность их выбросов  $\text{CH}_4$  по меньшей мере в десять раз.

### *Энергия биомассы*

- Характеристики исходных материалов (содержание влаги и теплота сгорания).
  - Использование энергии для удовлетворения потребностей по получению исходных материалов (выращивание, сбор и перевозка).
  - Технология растениеводства.
- Коэффициент выброса двуокиси углерода при сгорании биомассы является нейтральным. Это значит, что количество углерода, выделенное в процессе сжига-

ния биомассы, равно биогенному поглощению его во время роста растений.

### *Ядерная энергия (легководный реактор)*

- Использование энергии для добычи, преобразования и обогащения топлива, а также для строительства/снятия с эксплуатации электростанций (плюс материалы).
- Обогащение топлива посредством газовой диффузии, являющейся энергоемким процессом, способным на порядок увеличить выбросы парниковых газов по сравнению с обогащением посредством центрифугирования.
- Выбросы на стадии обогащения, которые характеризуются большими различиями по каждой конкретной стране, поскольку зависят от местной структуры топлива.
- Переработка топлива (оксид урана или смешанный оксид), на долю которой может приходиться от 10 до 15% общей нагрузки на окружающую среду парниковых газов, образующихся в процессе использования ядерной энергии.

### *Энергия ветра*

- Использование энергии для производства лопастей и строительства установки (вышка и основание).
- Структура электроэнергии и правила строительства, которые в высшей степени зависят от каждой конкретной страны и площадки (например, удаленная от моря или на побережье).
- Годовая выработка или коэффициент загрузки (зависит от природных условий на площадке), определяющие частоту эксплуатации (готовность) установки. Средняя скорость ветра является ключевым параметром при оценке степени прерывности в работе установки (увеличение скорости ветра на 50% приводит примерно к удвоению годовой выработки).

### *Солнечная фотоэлектрическая энергия (ФЭ)*

- Количество и качество кремния для изготовления солнечных элементов.
- Тип технологии (аморфный или кристаллический материал).
- Тип установки (крыша или фасад).
- Структура топлива для удовлетворения потребностей в производстве электричества.
- Годовая выработка или предполагаемый срок службы установки, являющиеся важными факторами при расчете выбросов на кВт·ч (это относится и к энергии ветра). Солнечная энергия и энергия ветра характеризуются относительно низкими выбросами на кВт, но высокими величинами для кВт·ч вследствие более низких коэффициентов загрузки (технологии прерывистой подачи энергии).

## СИСТЕМЫ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ БУДУЩЕГО

Новейшие и более эффективные технологии неизбежно вытеснят действующие в настоящее время системы, хотя в ближайшей и

среднесрочной перспективе (от 10 до 20 лет) кардинальных изменений в технологиях выработки электричества промышленно развитых стран не ожидается, учитывая крупные инвестиции, уже произведенные в энергетические технологии и

инфраструктуру. Разработка новых энергетических систем в развивающихся странах представляется не столь ясной, поскольку они сейчас стоят перед трудным выбором, связанным с необходимостью решения экономических, социальных,

политических и экологических проблем.

Необходимость снижения нагрузок на окружающую среду, экономические и политические факторы будут стимулировать заинтересованность в содействии развитию и использованию усовершенствованных технологий и расширению применения возобновляемых источников, таких как энергия биомассы, ветра и солнца.

Наибольшие изменения в системах, работающих на ископаемом топливе, наступят в результате повышения коэффициента преобразования в существующих технологиях (например, технология комбинированного цикла), уменьшения интенсивности утечки метана при передаче природного газа, усовершенствованных методов извлечения метана в процессе добычи топлива, регулирования химических характеристик топлива (например, промывка угля для повышения его калорийности) и оптимального расположения электростанции в целях минимизации выбросов при транспортировке топлива и потерь при передаче энергии. По оценкам экспертов, в Европе выбросы от будущих энергетических систем, работающих на ископаемом топливе, могут быть снижены на 35—50% по сравнению с нынешними уровнями.

Важнейшие изменения в области ядерной энергии будут включать обогащение топлива посредством центрифугирования (или лазерной технологии) вместо процесса энергоемкой газовой диффузии, повышение коэффициента преобразования, расширение применения переработки топлива и будущие достижения в ядерной технологии по выработке электричества (см. соответствующие статьи на стр. 43 и 51).

Усовершенствования конструкции турбин окажут воздействие на выбросы от гидроэнергетических установок, тогда как уменьшение потребностей в материалах и компонентах систем прерывистой передачи энергии и изменения коэффициента преобразования повысят их про-

изводительность. Это в свою очередь приведет к снижению затрат и выбросов. По-прежнему останутся важными вопросы территориального размещения гидроэлектростанций и типов установок.

## ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Парниковые газы обладают потенциалом воздействия на глобальное изменение климата вследствие вмешательства в естественный процесс теплообмена между атмосферой Земли и космическим пространством. Снижение концентраций парниковых газов в атмосфере стало приоритетной международной проблемой, что подтверждается подписанием Протокола Киото, нацеленного на сокращение выбросов в промышленно развитых странах (приложение I) примерно на 5% по сравнению с уровнями 1990-х гг. в период действия обязательств с 2008 по 2012 г.

Существует ряд технических вариантов, осуществление которых может привести к достижению предлагаемых целей снижения выбросов. Что касается выбросов в процессе выработки электричества, то самым важным фактором в этой сфере на ближайшее будущее, возможно, является совершенствование эффективности использования энергии на всех стадиях топливного цикла, включая подготовку и перевозку топлива, преобразование его в электричество на электростанции, и в местах его конечного использования (что в данной статье не рассматривается).

Стратегии по снижению выбросов метана в процессе добычи топлива и передачи газа имеют большое значение. Переход к видам топлива, требующим меньше углерода, или с низким содержанием углерода, таким как газ, ядерная энергия и возобновляемые источники энергии, будет играть значительную роль в снижении объемов выбросов. Такие изменения технически осуществимы с применением современных знаний и опыта, требуют минимальных измене-

ний в привычках потребителя и обеспечивают разумный оборот капитала (газ и ядерная энергия для базисной электрической нагрузки и возобновляемые источники в рыночных нишах или для пиковых нагрузок).

В данной статье приводится информация по коэффициентам вредности выбросов парниковых газов для различных видов топлива; использован подход оценки полной энергетической цепочки, при котором предпринимается попытка количественно определить выбросы в окружающую среду на всех стадиях выработки электричества, то есть от “колыбели до могилы”. Технологии на ископаемом топливе характеризуются наивысшими коэффициентами вредности выбросов; в случае с угольным топливом они в два раза выше по сравнению с природным газом.

Принимая во внимание большие различия в технологиях преобразования топлива в электричество, можно сказать, что коэффициенты вредности выброса парниковых газов могут быть на порядок выше по сравнению с современными фотоэлектрическими гелиосистемами и примерно на два порядка выше по сравнению с ядерной и гидроэнергией. Показатели ПГ для цепочек энергии ветра и биомассы находятся между оценками для солнечной и ядерной энергии.

Необходимо постоянно помнить один важный вывод, значение которого трудно переоценить: ни одна технология, касающаяся энергообеспечения и энергопотребления, будь то производство и передача электричества или что-нибудь иное, не обеспечивает нулевых выбросов парниковых газов. В то же время колебания в коэффициентах выбросов для различных вариантов могут быть весьма значительными. Данный факт будет безусловно учитываться в процессе принятия решения и окажет влияние на выбор электростанций, предназначенных для включения в будущие национальные энергетические системы. □