

УДК 621.311.1

© 1994 г. БЕЛЯЕВ Л. С., КАВЕЛИН И. Я., ФИЛИППОВ С. П.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МИРОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ\*

Описаны подход к исследованию технологической структуры Мировой энергетической системы (МЭС), формирование которой возможно в отдаленной перспективе, и используемые при этом математические модели. Основное внимание уделено разновидности МЭС, включающей Лунную энергетическую систему (ЛЭС). Приводятся результаты расчетов, выполненных для нескольких сценариев внешних условий развития энергетики мира, разделенного на 10 регионов, на период до 2100 г.

**1. Введение.** Данная работа взаимосвязана с работой \*\*, где описана концепция технологически единой Мировой энергетической системы (МЭС) и ее особенности при крупномасштабном получении энергии из Космоса с искусственных спутников Земли или с Луны. Там утилизируется солнечная энергия, передаваемая на Землю с использованием сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения.

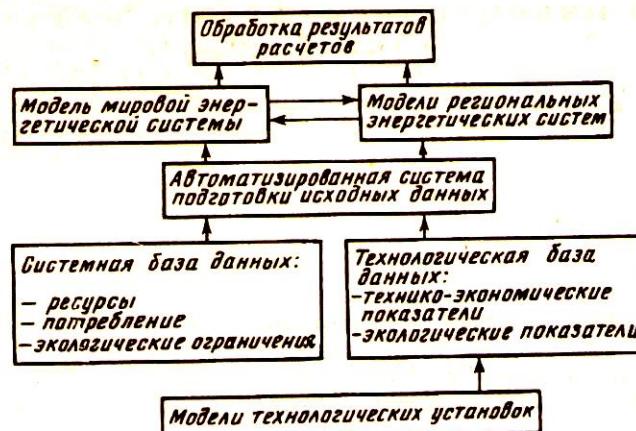
Наибольший интерес представляет получение энергии от Лунной энергетической системы (ЛЭС) [1], мощность которой потенциально может составить тысячи и даже десятки тысяч ГВт при достаточно хороших экономических показателях. Учитывая вращение Земли вокруг своей оси и ежемесячное затенение Луны, для обеспечения непрерывной подачи энергии на Землю предусматриваются специальные меры — запуск спутников-ретрансляторов СВЧ-лучей вокруг Земли, дублирование лунных баз и др. Поступление энергии на ректенны (приемные антенны) происходит либо непосредственно с Луны (когда она видна с Земли), либо через спутники-ретрансляторы. При этом взаимодействие ЛЭС с МЭС имеет поистине глобальный характер — происходит переключение СВЧ-лучей (от антенн на Луне) с ректенны на ректенну в разных частях Земли или с ректенны на спутник-ретранслятор и т. д. Полученная энергия будет использоваться для производства электроэнергии и синтетического топлива (например, водорода), что создает технологическую взаимосвязанность и единство МЭС в территориальном и в отраслевом разрезах (взаимосвязь систем электро- и топливоснабжения).

Цель настоящей работы — предварительная оценка экономической эффективности МЭС, включающей ЛЭС (ее ректенны).

**2. Методический подход.** Рассматриваемая МЭС и исследуемая в ее составе ЛЭС являются уникальными энергетическими образованиями, оценка эффективности которых производилась впервые. Методология такой оценки во многом опирается на опыт исследования других систем энергетики и будет уточняться в процессе дальнейших исследований. Приведем некоторые ее положения.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-02-17440).

\*\*Публикация статьи Беляева Л. С., Коротеева А. С. и Руденко Ю. Н. «Энергия из Космоса: возможная роль и влияние на развитие энергетических систем» предполагается в журнале «Изв. РАН. Энергетика» № 6, 1994 г.



Вычислительная система для глобальных энергетических исследований

1. Рассматривается очень длительная перспектива (до 2100 г.), поскольку формирование исследуемой МЭС и создание ЛЭС можно ожидать лишь в середине будущего века, а их эффект в полной мере проявится еще позже. Внутри этого периода выделяются 2025, 2050 и 2075 гг.

2. Исследования проводятся для энергетики всего мира, но с разбивкой его на несколько регионов для учета разнообразия условий. Выделены следующие регионы: 1) Северная Америка (СА); 2) Западная Европа (ЗЕ); 3) Япония и Южная Корея (ЯК); 4) Австралия и Новая Зеландия (АНЗ); 5) страны бывшего СССР (СССР); 6) Латинская Америка (ЛА); 7) Средний Восток и Северная Африка (СВСА); 8) остальная Африка (АФ); 9) Китай, Северная Корея и Монголия (КМК); 10) Южная и Юго-Восточная Азия (ЮЮВА). Такая разбивка отличается от ранее применявшимся, главным образом, территориальной целостностью регионов.

3. Учет неопределенности информации о предстоящих условиях развития энергетики осуществляется путем конструирования нескольких глобальных сценариев внешних условий, для каждого из которых проводятся отдельные исследования (расчеты).

4. Эффективность МЭС (и ЛЭС в ее составе) оценивается на оптимизационных математических моделях, в которых достаточно подробно представлены технологии получения, преобразования, транспорта и конечного использования энергии. Технологии, вошедшие в оптимальные структуры региональных подсистем МЭС, можно считать эффективными для соответствующего сценария условий. При расчетах на моделях достаточно легко учитываются разнообразные ограничения (на запасы дешевых категорий топлива, глобальные и региональные выбросы CO<sub>2</sub>, сроки и масштабы применения новых технологий и др.).

Главная особенность описываемых исследований состоит в их технологическом уклоне, что потребовало достаточно детальных математических моделей.

3. Комплекс математических моделей. Комплекс предназначен для исследования тенденций развития мировой энергетики, в том числе оценки эффективности крупных технологических мероприятий. Комплекс включает (см. рисунок): 1) оптимизационную линейную модель мировой энергетической системы (модель многоузловая, статическая); 2) аналогичные, но одноузловые и динамические модели энергетики регионов; 3) модели исследуемых технологий (например, ЛЭС), которые могут быть различными в математическом отношении и включаются в комплекс по мере необходимости.

Предполагается возможность итерационного использования мировой и региональных моделей. При этом в мировой модели задается ограниченный набор технологий, состав и показатели которых выявлены на моделях регионов, а в региональных моделях — экспорт-импорт топлива и энергии, полученный при расчетах на мировой модели. Комплекс оснащен базами данных и сервисными программами для автоматизированной подготовки исходных данных и обработки результатов расчетов.

Как в мировой, так и в региональных моделях рассматриваются достаточно широкие наборы первичных энергоресурсов, вторичных энергоносителей, конечных видов энергии, технологий их получения, переработки и использования с соответствующими ограничениями. Потребности задаются в конечной энергии, что позволяет оптимизировать технологии по всей цепочке, от добычи топлива до конечного потребления энергии. Технологии характеризуются расширенным составом технико-экономических показателей, включая экологические.

Применение двух видов системных моделей позволяет уменьшить их размерность и облегчить проведение расчетов. Иной подход выбран японскими специалистами [2] — они создают единую многоузловую модель МЭС, в которую региональные модели включаются в виде отдельных блоков. При достаточно подробно технологическом описании региональных систем (да еще в динамической постановке) единая мировая модель неизбежно станет чрезвычайно громоздкой.

Модели технологий предназначаются для прогнозирования на длительную перспективу их технико-экономических и экологических показателей [4]. При этом могут использоваться термодинамические модели процессов [5] для определения физических пределов энергетического и экологического совершенствования рассматриваемых технологий.

В мировой энергетической модели каждый регион характеризуется:

1. Списком первичных энергетических ресурсов, который в общем случае включает нефть, природный газ, уголь, ядерное топливо, гидроэнергию, биомассу, геотермальную энергию, энергию ветра, солнечную энергию, энергию из Космоса (от ЛЭС). Как правило, каждый энергоресурс разбивается на две категории (дешевая и дорогая) с ограничениями на их использование (добычу).

2. Списком вторичных энергоносителей: моторное топливо (легкие углеводороды), жидкое котельное топливо (тяжелые углеводороды), метanol, водород.

3. Списком конечных видов энергии: электроэнергия (базовая и пиковая), тепловая энергия (двух видов), механическая энергия, сырье для химической промышленности и собственная потребность региона в этих видах энергии.

4. Списком технологий:

- добычи материализуемых первичных энергоресурсов (топлива) — около 10 технологий;
- производства вторичных энергоносителей из соответствующих первичных энергоресурсов (а также водорода путем электролиза воды) — около 15 технологий;
- производства конечных видов энергии из первичных энергоресурсов и вторичных энергоносителей — более 30 технологий (включая аккумулирование электроэнергии);
- транспорта (экспорта-импорта) первичных энергоресурсов, вторичных энергоносителей и электроэнергии — около 20 технологий;
- удаления CO<sub>2</sub> — до 5 технологий.

Каждая технология характеризуется: удельными годовыми затратами на производство продукции (с); удельными расходами ресурсов; удельными выходами продуктов и вредных веществ; ограничениями на минимальное и максимальное применение (в том году, для которого производятся расчеты). Годовые производительности технологий ( $x$ ) являются оптимизируемыми переменными модели.

Для каждого региона составляются балансовые уравнения на производство и

расходование (включая экспорт-импорт) первичных энергоресурсов, вторичных энергоносителей и электроэнергии, записываются упоминавшиеся ограничения на производство первичных энергоресурсов и конечных видов энергии, а также ограничения на оптимизируемые переменные и на глобальные и региональные выбросы CO<sub>2</sub> (с учетом технологий удаления CO<sub>2</sub>).

Минимизируется целевая функция

$$Z = \sum_r \sum_j c_{rj} x_{rj}$$

где  $r$  и  $j$  — индексы регионов и технологий. В описываемых исследованиях оптимизация производилась для 2025, 2050, 2075 и 2100 гг., причем условно предполагалось, что за 25 лет происходит смена технологий (могут изменяться их технико-экономические показатели).

Следует отметить принятый в модели способ учета экспортно-импортных связей регионов — для всех видов энергоресурсов и энергоносителей, кроме электроэнергии, предполагается общий мировой рынок, на который каждый регион выходит непосредственно. Для электроэнергии связи задавались попарно, но только между теми регионами, где они реально возможны. Это существенно уменьшило размерность модели.

Модель энергетики региона имеет такую же структуру в смысле выделения первичных Энергоресурсов, вторичных энергоносителей и конечных видов энергии, но их списки значительно расширены за счет более подробной дифференциации по видам, качеству и стоимости топлива и энергии. Существенно увеличены также наборы технологий и состав их технико-экономических показателей. Вместо одной технологии производства какого-либо вторичного (или конечного) энергоносителя из определенного энергоресурса (как это принято в мировой модели) здесь рассматривается несколько конкурирующих технологий. Учитывается до 10 видов вредных выбросов (включая канцерогены, тяжелые металлы и радионуклиды) с соответствующими ограничениями на их суммарный объем или концентрацию.

Существенные особенности в модель энергетики региона вносят учет динамики, однако мы не будем здесь на этом останавливаться. Эта модель в описываемых исследованиях пока не применялась. Ее прототип использовался для исследований технологической структуры зоны КАТЭКа на перспективу до 2030 г. Оценка эффективности МЭС и ЛЭС на данном начальном этапе исследований выполнена только на мировой энергетической модели.

4. Глобальные сценарии, использованные в расчетах. При подготовке информации по перспективным потребностям в энергии, энергетическим ресурсам, развитию энергетических технологий, возможным ограничениям на применение тех или иных ресурсов и технологий. Неопределенность информации, особенно для второй половины будущего века, оказалась, естественно, очень большой, что и потребовало применения сценарийного подхода.

Количество сценариев, необходимое для достаточно полного отражения возможных будущих условий, составляет несколько десятков или даже сотен. Рассмотреть их на данном этапе исследований не представлялось возможным, поэтому было проанализировано лишь несколько факторов, которые авторам казались наиболее важными с точки зрения оценки эффективности ЛЭС.

Первый из них — энергопотребление. Исходя из прогнозов роста населения и экспертных оценок душевого потребления различных видов конечной энергии (в разных регионах) было составлено четыре глобальных сценария энергопотребления: низкий, пониженный, повышенный и высокий. Крайние сценарии было решено пока не рассматривать. Расчеты проводились для пониженного и повышенного уровней энергопотребления, которые для мира в целом представлены в табл. 1 (цифры получены суммированием потребления по регионам).

Второй важный фактор связан с политикой расходования невозобновляемых

**Мировое потребление конечной энергии, млн. ТДж/год**

Виды энергии	1990 г.	2025 г.		2050 г.		2075 г.		2100 г.	
		пониженный	повышенный	пониженный	повышенный	пониженный	повышенный	пониженный	повышенный
Электрическая	32,78	58,88	66,00	72,94	105,46	87,93	157,61	118,38	205,23
Тепловая	62,76	85,71	103,28	125,32	154,56	143,05	159,25	151,16	181,55
Механическая	10,55	17,88	19,42	21,52	29,87	22,04	41,55	23,09	59,51
Химическая	7,39	12,21	14,48	13,77	24,68	19,15	35,86	25,54	53,76
Всего	113,48	174,68	206,78	233,55	314,57	272,17	394,26	318,17	500,05

**Ограничения на ежегодное производство первичных энергоресурсов (мир в целом), млн. ТДж/год**

Категории ресурса	Нефть	Природный газ	Уголь	Уран	Гидроэнергия	Биомасса	Тепло Земли	Энергия ветра	Энергия Солнца
Дешевая	42,7	26,3	342,9	33,0	49,4	132,7	80,9	83,5	111,7
Дорогая	69,7	54,0	151,3	12,9	73,4				

**Таблица 1**

**Таблица 2**

Таблица 3

Удельные капиталовложения в электростанции, тыс. долл./кВт

Годы	На газе	На угле	АЭС	ГЭС	Геотермальная	Ветровая	НСЭС	ЛЭС
2025	1,05	1,5	2,8	3,5	3,5	1,1	2,0	4,0
2100	1,25	1,65	3,1	4,0	4,5	0,85	1,7	2,5

Таблица 4

Удельные капиталовложения в технологии преобразования топлива и энергии \*, тыс. долл./кВт

Годы	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2025	0,61	0,71	1,61	0,95	1,42	4,18	0,75	2,45	0,45
2100	0,61	0,74	1,65	0,97	1,45	4,23	0,77	2,25	0,55

\* Виды технологий переработки: 1 — нефти в моторное и жидкое котельное топливо; 2 — природного газа в метanol; 3 — угля в моторное топливо; 4 — угля в заменитель природного газа (ЗПГ); 5 — угля в метanol; 6 — ядерного топлива в водород; 7 — биомассы в ЗПГ; 8 — солнечной энергии в водород; 9 — электроэнергии в водород.

энергоресурсов. Здесь могут быть приняты разные предположения, начиная от полного отсутствия контроля до введения различных ограничений на использование тех или иных ресурсов. Во всех сценариях, для которых проведены расчеты, было заложено предположение о замедленном исчерпании ресурсов (это предположение можно, конечно, критиковать и изменять при последующих исследованиях); дешевые нефть и природный газ расходуются равномерно в течение 150 лет, а дорогие — в течение 200 лет; дешевый уголь равномерно потребляется за 200 лет, а дорогой — за 300 лет. Соответствующая этому предположению максимально допустимая годовая добыча органического топлива указана в первых трех колонках табл. 2 (при расчетах она задавалась для каждого региона).

Большая неопределенность по перспективам развития атомной энергетики обусловлена проблемами безопасности и радиоактивных отходов. Высказываются противоположные суждения о возможностях и целесообразности использования ядерной энергии. В связи с этим в сценариях рассмотрены два варианта развития атомной энергетики в XXI веке: 1) использование только легководных реакторов (ЛВР) на уране; 2) мораторий на ее развитие. В последующем намечается рассмотреть и другие варианты, в том числе с использованием бридеров, тория и термоядерных реакторов. Для первого варианта принята стратегия равномерного использования ресурсов природного урана (дешевого и дорогого) в течение всего будущего века. Годовое его производство указано в четвертой колонке табл. 2.

В этой же таблице приведены ресурсы возобновляемых источников энергии, принятые во всех сценариях.

Последний фактор, варьировавшийся в сценариях, — ограничения на выбросы CO<sub>2</sub>, отражающие опасения о разогреве планеты и изменении климата. Рассмотрено два варианта — отсутствие ограничений и поддержание глобальных выбросов CO<sub>2</sub> на современном уровне (примерно 22 млрд. т/год или 4,56 т/год на одного жителя планеты). Возможны разные принципы формирования региональных нормативов: а) пропорционально современному уровню эмиссии; б) и в) — пропорционально нынешней и будущей численности населения.

В первом случае в очень невыгодном положении оказываются развивающиеся страны, в последнем — развитые. Хотя последний принцип и основан на гуманной

Таблица 5

## Характеристика глобальных сценариев

Сценарий	Энергопотребление	Выбросы CO <sub>2</sub>	Атомная энергетика
1	Пониженное	Не ограничены	ЛВР на уране
2	*	Ограничены	*
3	*	*	Мораторий
4	Повышенное	Не ограничены	ЛВР на уране
5	*	Ограничены	*
6	*	*	Мораторий

идее, что каждый человек должен иметь в будущем право на свою долю в выбросах CO<sub>2</sub>, он излишне либерален к проводимой в регионах демографической политике. Поэтому для сценариев с ограничениями на выбросы CO<sub>2</sub> был принят второй принцип распределения их между регионами.

Остальные факторы, включая *технико-экономические показатели технологий*, на данном этапе исследований приняты неизменными во всех сценариях. Однако предусматривалось изменение технико-экономических показателей по мере совершенствования технологий или, наоборот, ухудшения экологических и других условий. В табл. 3 и 4 выборочно даны удельные капиталовложения для некоторых технологий, чтобы проиллюстрировать их соотношения (инфляция не учитывается).

Показатели первых пяти видов электростанций указаны в табл. 3 применительно к базисному режиму работы, а показатели ветровых, наземных солнечных (НСЭС) и космических (ЛЭС) электростанций — без учета аккумулирующих устройств, выравнивающих их отдачу.

В целом было сконструировано шесть сценариев, показанных в табл. 5.

5. Технико-экономические показатели ЛЭС. Лунная энергетическая система [2] имеет космическую часть, включающую солнечные коллекторы (фотоэлементы) и антенны СВЧ-лучей на Луне, спутники-ретрансляторы вокруг Земли и др., а также наземную часть — ректенны и инвенторы для приема энергии и преобразования ее в переменный ток. Подавляющая масса элементов космической части должна изготавливаться на Луне из лунных материалов, так как доставка их с Земли просто немыслима по экономическим и экологическим условиям (полезный груз составляет лишь около 1% исходного веса ракеты). Для этого на Луне должны быть созданы обитаемые базы и максимально автоматизированные и роботизированные производства по добыче материалов, изготовлению и монтажу элементов ЛЭС (включая производство ракетного топлива и запуск спутников вокруг Земли и Луны).

Длина волн СВЧ-передачи — 10—12 см (2,5—3,0 ГГц), что обеспечивает ее практическую независимость от погодных условий на Земле. Полный КПД передачи оценивается в 50—60% с возможностью повышения до 70—75%. Плотность СВЧ-излучения должна быть достаточно низкой для обеспечения безопасности людей и природы и сохранности ионосферы Земли. По этому вопросу сейчас имеется большая неопределенность — указываются цифры от 10 до 500 Вт/м<sup>2</sup> (для сравнения: плотность солнечного излучения на Земле достигает 800—1000 Вт/м<sup>2</sup>). В любом случае площадь ректенна на Земле получается очень большой.

Очень важной особенностью ЛЭС являются небольшие затраты в ее космическую часть (всего 10—15% полных затрат). Это объясняется тем, что для Земли эти затраты состоят в проведении необходимых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ; изготовлении и запуске на Луну и орбиты некоторого минимума оборудования и материалов для создания и поддержания лунных баз и производств; запуске, жизнеобеспечении, замене и зарплате ра-

Таблица 6

## Масштабы применения ЛЭС

Сценарий	Мощность, ТВт (эл.)			
	2025 г.	2050 г.	2075 г.	2100 г.
3				0,97
5			4,63	12,32
6	1,24	3,01	6,29	13,87

ботающего в Космосе персонала (несколько тысяч человек). Остальное осуществляется непосредственно на Луне роботами и автоматизированными механизмами и заводами. Основная же часть затрат в ЛЭС связана с сооружением и эксплуатацией ректанн. Это обуславливает достаточно хорошие экономические показатели ЛЭС.

По оценкам авторов идеи [2] удельные капиталовложения для ЛЭС мощностью 20 000 ГВт (принимаемой на Земле) составят 400 долл./кВт, а себестоимость энергии — 0,2 цента/кВт·ч. Наши собственные оценки (для мощности 2000 ГВт) получились гораздо выше — в диапазонах 1600—9500 долл./кВт и 0,8—7,5 цента/кВт·ч (в зависимости от допустимой плотности СВЧ-излучения, возможной удельной стоимости ректанн и прерывистого или непрерывного приема энергии).

В сценариях, для которых проводились расчеты, приняты некоторые средние показатели (см. табл. 3) — 4000 долл./кВт и 3,5 цента/кВт·ч в 2025 г. со снижением их до 2500 долл./кВт и 2,0 цента/кВт·ч в 2100 г. В дальнейшем намечается уточнить и рассмотреть другие значения этих показателей.

**6. Результаты расчетов на мировой энергетической модели.** Расчеты показали, что прием энергии от ЛЭС становится эффективным (или необходимым) при ограничениях на выбросы CO<sub>2</sub> и моратории на развитие ядерной энергетики для третьего, пятого и шестого сценариев. При этом при повышенном энергопотреблении масштабы использования энергии ЛЭС могут быть огромны (табл. 6).

Прежде всего снабжаться энергией из Космоса начинают страны Западной Европы и Япония. К концу расчетного периода (к 2100 г.) основная доля поступающей из Космоса энергии приходится на развивающиеся страны.

Ближайшим конкурентом ЛЭС является наземная солнечная энергетика. При отсутствии ЛЭС потребуется в очень больших масштабах использовать наземные солнечные электростанции и установки по производству водорода. При этом из-за неравномерности распределения ресурсов солнечной энергии по территории Земли начинаются огромные межрегиональные перетоки водорода. Основным центром его производства становится Северная Африка и Средний Восток. Именно этим фактом во многом и объясняется экономическая эффективность ЛЭС (энергию из Космоса можно доставлять непосредственно в районы потребления).

Следует подчеркнуть, что рассмотренные шесть сценариев далеко не охватывают всего многообразия условий, которые могут сложиться в будущем веке. Возможны сочетания условий, при которых эффективность ЛЭС будет выше (например, еще более высокое энергопотребление или улучшение показателей самой ЛЭС) и, наоборот, ниже.

Поэтому предварительный вывод может состоять в том, что энергия из Космоса может составить важное направление дальнейшего развития энергетики мира и исследования этого направления можно продолжить.

Одновременно созданный инструмент исследований МЭС может эффективно использоваться для изучения других энергетических стратегий, крупномасштабных технологий и мероприятий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Criswell David R. and Waldron Robert D. Lunar system to supply solar electric power to earth//Proc. 25th Intersociety Energy Conv. Engin. 1990. V. 1. P. 61—70.
2. Kaya Y. et al. Assessment of technologies for reducing CO<sub>2</sub> emission//Proc. IPCC/EIS — IIASA Int. Workshop on Energy — Related Greenhouse Gases Reduction and Removal, 1—2 Oct., 1992. IIASA, Laxenburg, Austria, 45 p.
3. Каганович Б. М., Филиппов С. П., Кавелин И. Я. Прогнозные исследования технологий использования угля. Иркутск: СЭИ, 1984. 219 с.
4. Каганович Б. М., Филиппов С. П., Анциферов Е. Г. Эффективность энергетических технологий: термодинамика, экономика, прогнозы. Новосибирск: Наука, 1989. 256 с.

Иркутск

Поступила в редакцию  
22.XII.1993