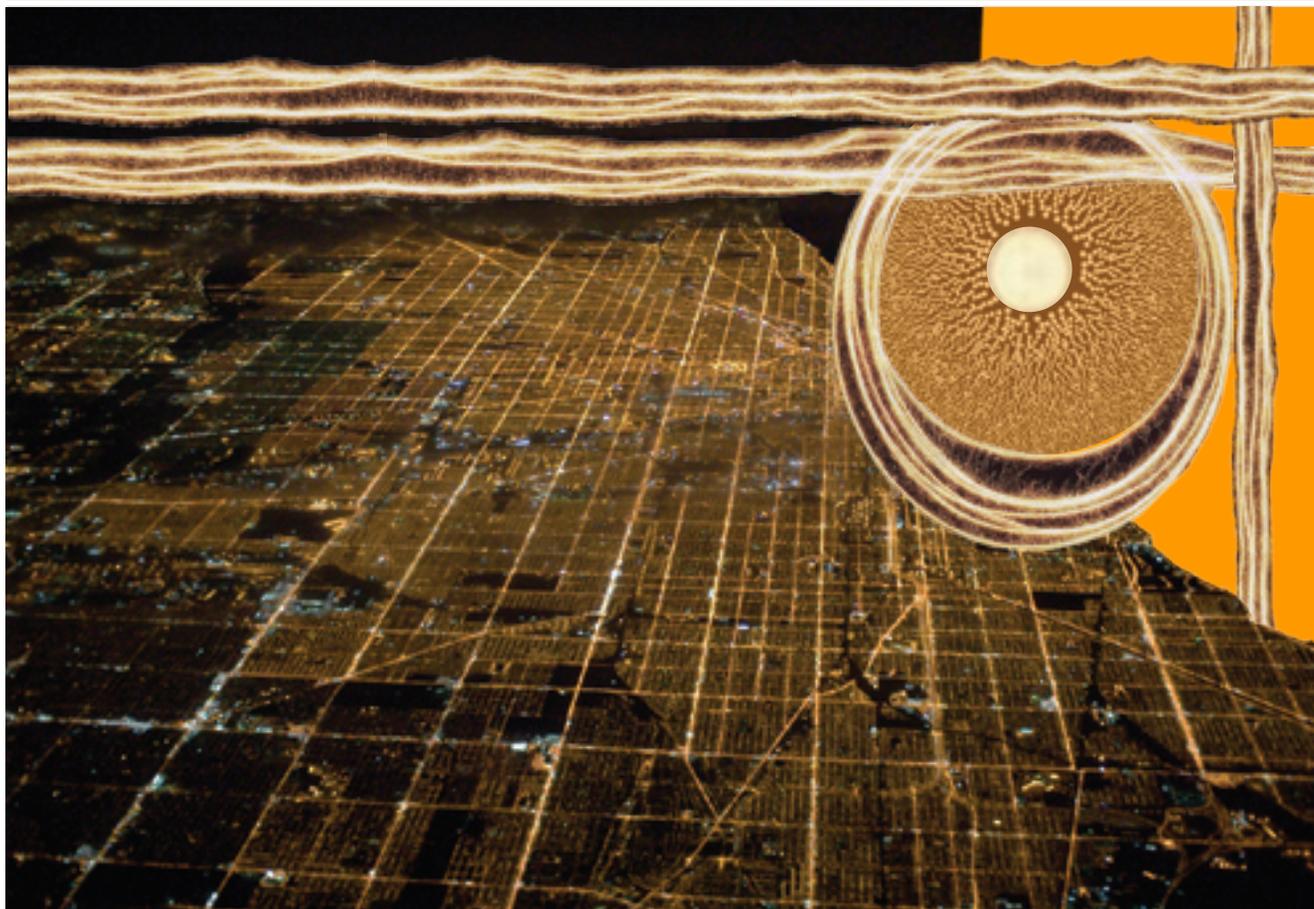


# Энергетические технологии 2050

М. Аренс<sup>I</sup>, М. Витшель<sup>II</sup>, К. Дётч<sup>III</sup>, **В. Кревитт<sup>IV</sup>**, П. Маркевиц<sup>V</sup>,  
Д. Мёст<sup>VI</sup>, Ю. Обершмидт<sup>VII</sup>, С. Херкель<sup>VIII</sup>, М. Шойфен<sup>IX</sup>



Процесс исследований и разработок в энергетике сопряжен с рисками и требует значительных инвестиций, масштабы которых не сопоставимы с возможностями промышленного сектора. Для обеспечения технологического прогресса необходимо финансовое участие государства.

Вариант эффективного отбора приоритетных технологических направлений продемонстрирован в проекте «Энергетические технологии-2050». Предложенные методология и рекомендации представляют ценный опыт для развития данной сферы.

<sup>I</sup> Аренс Марлен — научный сотрудник, Фраунгоферовский институт системных и инновационных исследований (Германия). E-mail: marlene.aren@isi.fraunhofer.de

<sup>II</sup> Витшель Мартин — руководитель направления «Экономика энергетики», Фраунгоферовский институт системных и инновационных исследований (Германия). E-mail: martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

<sup>III</sup> Дётч Кристиан — руководитель бизнес-подразделения «Энергетические системы», Фраунгоферовский институт технологий защиты окружающей среды, обеспечения безопасности и энергетики (Германия). E-mail: christian.doetsch@umsicht.fraunhofer.de

<sup>IV</sup> **Кревитт Вольфрам** — руководитель подразделения, Германский центр авиации и космонавтики.

<sup>V</sup> Маркевиц Петер — научный сотрудник, Исследовательский центр Юлиха. E-mail: p.markewitz@fz-juelich.de

<sup>VI</sup> Мёст Доминик — руководитель проектов, Высшая техническая школа, Университет Карлсруэ (Германия). E-mail: dominik.moest@wiwi.uni-karlsruhe.de

<sup>VII</sup> Обершмидт Юлия — научный сотрудник, Фраунгоферовский институт системных и инновационных исследований (Германия). E-mail: julia.oberschmidt@gmx.de

<sup>VIII</sup> Херкель Себастьян — руководитель подразделения, Фраунгоферовский институт систем солнечной энергетики (Германия). E-mail: sebastian.herkel@ise.fhg.de

<sup>IX</sup> Шойфен Мартин — научный сотрудник, Институт техники высоких напряжений, Рейнско-Вестфальский технический университет Аахена (Германия). E-mail: scheufen@ifht.rwth-aachen.de

<sup>1</sup> Статья подготовлена по результатам исследования, проведенного по инициативе Федерального министерства экономики и технологий на основании решения Бундестага ФРГ. Ответственность за содержание статьи лежит на авторах. Авторы благодарят Федеральное министерство экономики и технологий за финансовую поддержку. Более детально результаты исследования представлены в докладе [Wietschel et al., 2010].

Исследования и разработки (ИиР), связанные с созданием новых и модернизацией существующих энергетических технологий — длительный процесс. Из-за медленного внедрения и коммерциализации инновационных разработок развитие энергетики требует долгосрочных капиталовложений. Во многих случаях, чтобы удовлетворить динамично меняющийся спрос на энергетическом рынке, требуется продолжительное время. Поддержка со стороны государства может существенно снизить имеющиеся риски и повысить эффективность принятия решений в данной сфере. Руководствуясь приведенными соображениями, Федеральное министерство экономики и технологий Германии (das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, BMWi) летом 2008 г. инициировало проект «Энергетические технологии - 2050: основные задачи исследований и разработок».

Проект был призван расставить новые акценты в существующих направлениях, а также определить темы, разработка которых требует государственного вмешательства. Пристальное внимание уделялось следующим тематическим направлениям: энергоэффективность промышленности, торговли, сферы услуг и домохозяйств; возобновляемые источники энергии; водородная энергетика; системы аккумулирования энергии; электростанции, работающие на горючем топливе; электрические сети; стационарные топливные элементы; экономика метанола.

Изначально проект «Энергетические технологии - 2050» позиционировался как площадка для формирования государственной научной политики, предусматривающей выбор приоритетов ИиР неядерных источников энергии. Его результаты станут основой для разработки исследовательских программ министерства в сфере энергетики.

### Методика исследования

Для рационального распределения бюджета энергетических исследований следует систематически корректировать программы ИиР. Исходя из имеющихся энергетических стратегий и широкого спектра задач такой пересмотр должен учитывать множество самых разных аспектов. Задача политики в области энергетических исследований, сформулированная в Пятой рамочной программе Федерального правительства Германии по исследованиям в области энергетики, заключается в том, чтобы «поддерживать усилия бизнеса в тех случаях, когда он в силу длительного подготовительного периода или высоких технологических и экономических рисков не в состоянии самостоятельно оказать ведущимся исследованиям инвестиционную поддержку» [BMW, 2005]. Другими словами, в государственном содействии нуждаются те технологические области, ИиР и вывод на рынок которых связаны с высокими технологическими и экономическими рисками и требуют длительного времени. Рассматривая перспективы коммерциализации технологий, важно учитывать политические приоритеты в области энергоснабжения: обеспечение его надежности, конкурентоспособности и экономической эффектив-

ности, предотвращение климатических изменений и другие аспекты охраны окружающей среды. Чтобы систематически сравнивать исследовательские темы, вынесенные на обсуждение, предстоит одновременно учитывать множество целей или критериев.

В рамках проекта «Энергетические технологии - 2050» была разработана методика, которая стала отправной точкой формирования рекомендаций о целесообразности поддержки тех или иных технологий в этой сфере. Технологические области, объединяющие энергетические технологии со сходными характеристиками (например, солнечно-термальные электростанции) и входящие в состав перечисленных тематических направлений, оцениваются по ряду критериев. Главная цель методики — выявить, нуждаются ли исследования в той или иной области в дальнейшей государственной поддержке. Следующим шагом в случае положительного решения становится выявление специфических проблем для каждой технологической области.

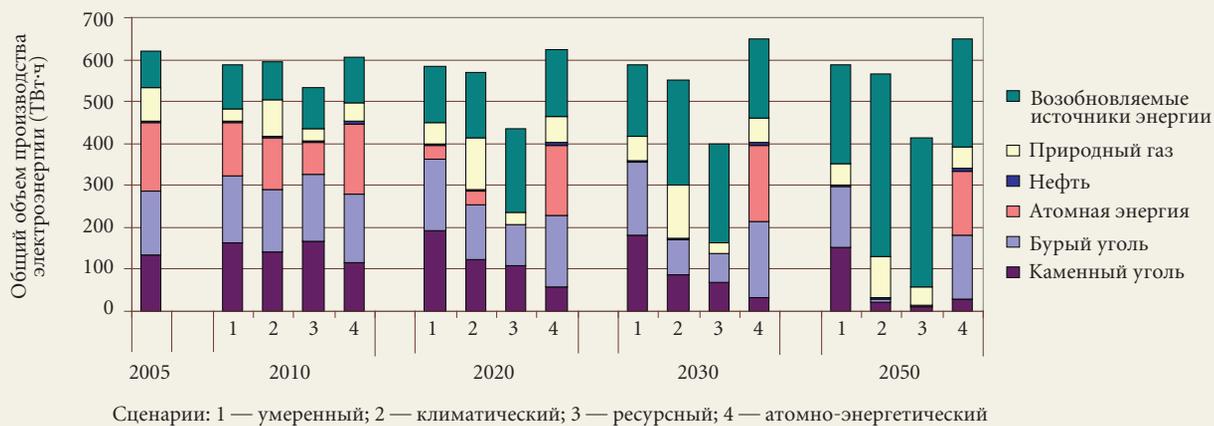
Отметим, что задача заключается не в составлении некоего рейтинга приоритетности технологических областей или входящих в них тем ИиР, а в обеспечении механизма принятия обоснованных решений по поддержке энергетических исследований, базирующихся на открытости процесса разработки рекомендаций и оценке их выполнимости.

Критерии, по которым оцениваются различные технологические области, исходят из задач государственной политики. Значимыми при оценке технологий являются не только специфические характеристики, но и рамочные условия, при которых они будут реализовываться. Сценарий динамичного роста стоимости горючих энергоносителей предполагает иную расстановку приоритетов, чем при стабильных ценах. Так, строительство геотермальных электростанций вряд ли получит весомую поддержку в случае отсутствия жесткой политики по предотвращению изменений климата и сохранения умеренных цен на горючие энергоносители.

С целью выработки рекомендаций были определены три сценария, которые должны приниматься во внимание при оценке технологических областей по отдельным критериям. Сценарии синтезированы из множества вариантов, описывающих релевантные экономические и экологические пути развития Германии до 2050 г. Они охватывают важнейшие тенденции энергорынка Германии и служат основой для исследования «Энерготехнологии - 2050». Сценарии различаются в основном с точки зрения цен на энергоносители, стоимости квот на выбросы CO<sub>2</sub>, цен на потребляемую электроэнергию и выбросов CO<sub>2</sub>, предполагаемых соответствующими энергетическими концепциями.

**«Умеренный» сценарий.** Описывает развитие событий при сохранении существующих рамочных условий энергетической политики и экономики исходя из ранее намеченных целей защиты климата и освоения возобновляемых источников энергии. Имеется и модифицированный вариант, в котором ведущая роль отводится ядерной энергетике (рис. 1).

Рис. 1. Развитие производства электроэнергии в Германии



Источник: расчеты авторов по данным [BMU, 2007; VDEW, 2007; EWI/Prognos, 2005; DENA, 2008].

**«Климатический» сценарий.** Охватывает долгосрочные задачи и меры по сокращению выбросов  $\text{CO}_2$ .

**«Ресурсный» сценарий.** Раскрывает возможное состояние энергетического рынка в условиях дефицита сырья и высоких цен на топливные энергоресурсы.

Анализ энергетических технологий на основе сценариев позволяет идентифицировать «универсальные» технологии, которые будут играть значимую роль в любых условиях, а также выявить технологии, поддержка которых оправдана при реализации только одного из сценариев.

Алгоритм оценки технологических областей приведен на рис. 2. Подобная методология ранее рекомендовала себя в проектах ESTIR<sup>2</sup> и EduaR&D<sup>3</sup> и была адаптирована нами применительно к задачам, стоявшим перед нашим исследованием.

**Первый этап**, согласно алгоритму, представленному на рис. 2, состоит в отграничении анализируемой технологической области (например, солнечно-термальные электростанции) и описании относящихся к ней технологий (параболические желоба, френель-коллекторы, солнечные башни и т. п.). Технологии, развитие которых не требует государственной поддержки, на этом этапе могут быть исключены из дальнейшего рассмотрения.

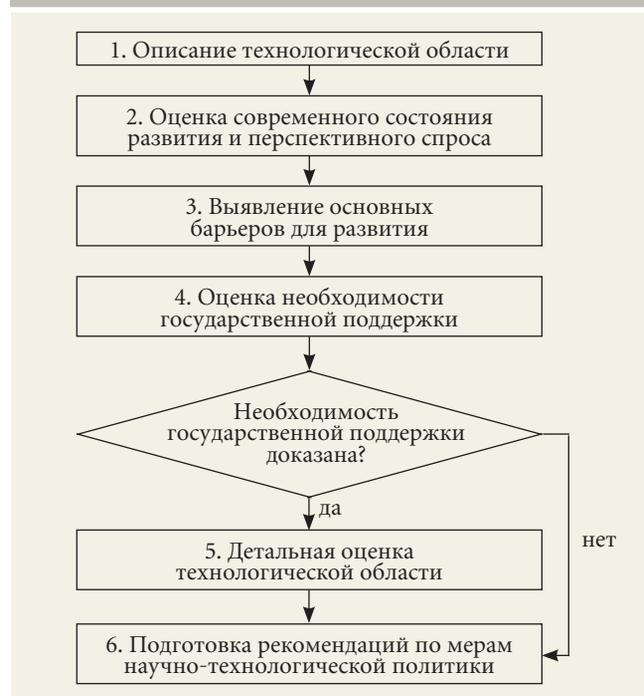
Цель **второго этапа** — описание текущего состояния рассматриваемой области и определение будущих потребностей в ИиР. Вначале технологии, входящие в ту или иную область, ранжируются по стадиям развития (табл. 1). Для каждой стадии определяются основные задачи ИиР и необходимое оснащение, а также идентифицируются ведущие для технологической области акторы. Кроме того, на основе финансовых отчетов по ИиР прошлых лет проводится ретроспективный анализ динамики научной активности.

На **третьем этапе** идентифицируются критические факторы развития технологий, в том числе основные препятствия для их вывода на рынок.

Прежде всего — это барьеры технического характера, имеющие определяющее значение при выработке решений о поддержке тех или иных разработок. Также учитываются экономические, правовые или социальные сдерживающие факторы. Выявляются важнейшие взаимосвязи между сценариями (например, рост цен на энергоносители), барьерами (увеличение тарифов на поставку электроэнергии) и потенциалами технологий.

Для определения ключевых условий, как тормозящих, так и способствующих развитию технологии, требуется по возможности полный учет критических факторов (рис. 3). Это позволяет не только идентифицировать необходимые составляющие успеха, но и учесть накопленный ранее исследовательский опыт преодоления узких мест.

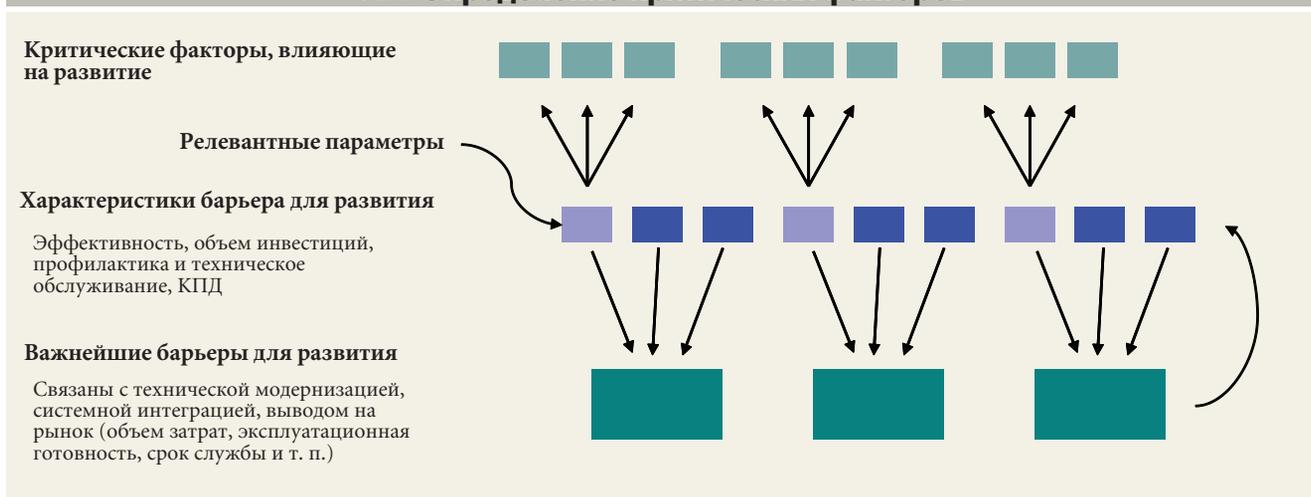
Рис. 2. Алгоритм оценки технологических областей



<sup>2</sup> Energy Scientific & Technological Indicators and References. Подробнее о проекте см.: [Ragwitz et al., 2005].

<sup>3</sup> Energy Data and Analysis of Research & Development. Подробнее о проекте см.: [Bartels et al., 2008; Jochem et al., 2009].

Рис. 3. Определение критических факторов



Чтобы зафиксировать прогресс технологий, устанавливаются ориентировочные показатели критических факторов на временных отметках 2020, 2030 и 2050 гг. Процесс их идентификации отражен на рис. 3. Рассмотрим в качестве примера использование ветровой энергии. В данном случае значительным препятствием для развития является относительно короткий период эксплуатации ветроэнергетических установок, ограниченный сроком службы их компонентов (например, мачты, передаточного механизма или лопастей ротора). Период безотказной работы установки определяется долговечностью наименее надежного ее элемента. Следовательно, критическим фактором дальнейшего прогресса становится, например, повышение прочности зубчатых колес трансмиссии. У топливных элементов срок службы может ограничиваться износостойкостью мембраны и коррозией стеков.

Таким образом, наиболее уязвимые компоненты механизмов, подверженные влиянию специфических технических факторов, могут рассматриваться в качестве барьеров, на преодоление которых должна быть направлена государственная поддержка исследований.

**Четвертый этап** — выяснение степени необходимости государственной поддержки ИиР для анализируемой области. При этом используются определенные критерии и индикаторы:

1. Оценка технических и экономических рисков ИиР на основе заранее определенной шкалы (минимальный; низкий; средний; выше среднего; высокий; очень высокий).
2. Оценка рисков, связанных с обеспечением бесперебойного энергоснабжения и возможностью внезапного повышения цен на электроэнергию, на основе ряда показателей, таких как сезонная эксплуатационная готовность, частота плановых и неплановых сбоев, обеспеченность необходимыми запасами энергоносителей и т. п.
3. Ранжирование временных периодов, предшествующих коммерциализации технологий, по заранее определенной шкале (менее 5 лет; 5–15 лет; 15–30 лет; более 30 лет). Рассматриваются два варианта — с учетом государственной поддержки и при ее отсутствии.

Перечисленные критерии исходят из положений Пятой программы исследований в области энергетики, предусматривающей оказание государственной поддержки, если разработка технологии требует длительного подготовительного периода либо связана с повышенным риском [BMW, 2005]. Каждая технологическая область оценивается по приведенным критериям и индикаторам. Государственная поддержка технологической области становится оправданной при наличии: а) высоких технических и/или экономических рисков, связанных с реали-

Табл. 1. Детализация стадий развития энергетических технологий (на примере геотермальных систем)

Производство в промышленных масштабах (годовой прирост генерирующих мощностей)	Опытное производство	ИиР	Иновационные идеи
Традиционные и усовершенствованные ГеоТЭС  <b>В мировом масштабе</b> Тепловая энергия: в 2005 г. — около 12 ГВт Электрическая энергия: в 2007 г. — около 9 ГВт  <b>В масштабе страны (Германия)</b> Тепловая энергия: в 2008 г. — около 50 МВт Электрическая энергия: в 2008 г. — около 6 МВт	Усовершенствованные ГеоТЭС  Введение в строй около 3 МВт дополнительных мощностей в 2008 г.  Искусственное повышение пропускной способности термических резервуаров  Расширение поставок электро- и тепловой энергии	Усовершенствованные ГеоТЭС  Разведка месторождений и их освоение  Гидротермальный цикл  Пробные поставки энергии потребителям  Системный анализ перспектив развития	Освоение залежей магмы и труднодоступных гейзеров  Повторное использование отработанного пара

зацией ИиР; б) значительных рисков для обеспечения бесперебойного энергоснабжения; в) длительных периодов времени, предшествующих выходу новой разработки на рынок. Если необходимость поддержки не будет доказана, оцениваемая область исключается из дальнейшего рассмотрения. Либо проводится более детальный анализ выбранных технологических областей, позволяющий соотнести возможные преимущества и недостатки входящих в их состав технологий.

**Пятый этап.** Дальнейшая оценка технологической области проводится по следующим критериям:

4. Общий потенциал, включая экономический, а также потенциал, который может проявиться в среднесрочной перспективе при благоприятных рамочных условиях, таких как отсутствие правовых или политических барьеров и т. п. С помощью этого критерия можно оценить, в какой степени та или иная технология способна внести вклад в энергообеспечение, в особенности в Германии.
5. Ранжирование потребности технологий в инфраструктуре по категориям: 1) потребность отсутствует; 2) возможно применение в условиях сложившейся инфраструктуры; 3) необходима модернизация существующей инфраструктуры; 4) требуется строительство новой инфраструктуры.
6. Эффективность затрат — возможное сокращение затрат в краткосрочной (2020 г.), среднесрочной (2030 г.) и долгосрочной (2050 г.) перспективах в сравнении с эталонной технологией по каждому из трех базовых сценариев.
7. Зависимость от выбранной траектории развития и связанная с ней способность к гибкому реагированию на внешние изменения, что позволит оценить, как и в какой мере вывод технологии на рынок повлияет на структуру энергетических систем в кратко-, средне- или долгосрочной перспективе. За основу берутся такие показатели, как: 1) плановое время строительства типовой установки; 2) реальное время строительства; 3) средние сроки амортизации; 4) необходимые инвестиции (евро/кВт).
8. Вклад в энергоэффективность. Определяется исходя из потенциала экономии первичной энергии в кратко- (2020 г.), средне- (2030 г.) и долгосрочной (2050 г.) перспективах в сравнении с эталонной технологией по каждому из трех базовых сценариев.
9. Вклад в защиту окружающей среды и предотвращение изменений климата. Предполагаемое сокращение объема выбросов CO<sub>2</sub> и других основных загрязняющих веществ в кратко- (2020 г.), средне- (2030 г.) и долгосрочной (2050 г.) перспективах в сравнении с эталонной технологией по каждому из трех базовых сценариев.
10. Создание внутренней добавленной стоимости в Германии исходя из возможных объемов производства в будущем (например, ячеистых топливных элементов) и развития рынков услуг (в частности, монтаж установок фотовольтаики,

их обслуживание и т. д.), с учетом текущих процессов.

Критерии подбирались таким образом, чтобы можно было провести сравнительную оценку потенциального вклада отдельных технологических областей в решение задач энергоснабжения: обеспечение надежности, рентабельность, конкурентоспособность на международном уровне и защита окружающей среды. Вначале алгоритм оценки позволяет выделить отдельные области технологий, государственная поддержка которых жизненно необходима (этапы 1–4 согласно рис. 2, критерии 1–3 из перечисленных в списке). Далее следует систематическое сопоставление отличительных характеристик технологий (этап 5, критерии 4–10), по результатам которого разрабатываются рекомендации и формируются приоритеты поддержки ИиР.

Рассмотрим результаты оценки, выполненной с помощью описанной методики.

## Основные результаты

### Электростанции, работающие на ископаемом топливе

Около 60% суммарного объема электроэнергии, вырабатываемой в Германии, производится электростанциями, работающими на природном горючем топливе. На их долю приходится не менее 40% от совокупных выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу. Страна производит пятую часть суммарного объема электроэнергии, вырабатываемой во всем мире с помощью источников подобного типа. Для повышения энергоэффективности и снижения выбросов CO<sub>2</sub> требуются масштабные технологические сдвиги. КПД строящихся электростанций на каменном угле увеличится до 46%, а на буром — до 43%. В будущем возможно увеличение КПД по меньшей мере до 50% для электростанций на каменном угле, а позднее — и для электростанций на буром угле. Это станет возможным за счет технологической модернизации установок острого пара (рабочая температура 700°C, давление 365 бар) и системных мер по обеспечению энергоэффективности. Поскольку потенциал производительности последних (по соотношению затраты/полезность) практически себя исчерпал, дальнейшее увеличение КПД возможно только за счет повышения рабочей температуры установок до 800°C. Поэтому ключевая роль отводится созданию новых недорогих материалов с необходимыми характеристиками. В отличие от угольных, КПД современных газо- и паротурбинных электростанций может достигать 59–60% (пример — электростанция в городе Иршинг). Дальнейшее увеличение КПД подобных электростанций достижимо за счет повышения рабочей температуры турбины при использовании инновационной концепции системы охлаждения.

Согласно сценарию, подразумевающему умеренные цены на энергоносители и снижение выбросов CO<sub>2</sub>, приоритет получают ИиР, связанные с развитием топливной энергетики. В «климатическом» сценарии акцент сделан на улавливание и консервацию CO<sub>2</sub>, в то время как в «ресурсном» из-за высоких цен на энергоносители использованию при-

родного топлива отводится незначительная роль. Потенциал увеличения КПД — аргумент в пользу использования в дальнейшем электростанций на природном горючем, вследствие чего он образует фокус будущих ИиР.

Однако для ввода в строй электростанций с высоким КПД крайне необходимы создание новых материалов и глубокое изучение возможностей применения в различных условиях уже существующих. Это относится и к традиционным угольным электростанциям, цель для которых — достижение рабочей температуры энергоустановок 800°C. С другой стороны, необходимы дальнейшее увеличение рабочей температуры газопаротурбинных установок, разработка новых материалов и изменения в системе охлаждения. В долгосрочной перспективе лопасти газовых турбин будут изготавливаться из цельной керамики, что позволит существенно снизить потери энергии на охлаждение и, соответственно, обеспечит требуемое повышение КПД. Наряду с зарекомендовавшими себя технологическими решениями, следует рассматривать и новые идеи (например, комбинированная угольная электростанция), которые демонстрируют высокий потенциал эффективности и предполагают значительное снижение выбросов CO<sub>2</sub>. Концепции электростанций с высочайшим потенциалом эффективности (например, крупные гибридные электростанции, универсальные паровые электростанции, работающие на различных видах топлива) пока только зарождаются. Их реализация станет возможной лишь в отдаленном будущем. По мере появления новейших знаний (например, в области создания новых материалов) подобные концепции должны систематически переоцениваться и уточняться.

В настоящее время для очистки выбросов от CO<sub>2</sub> рассматриваются три различные технологические последовательности — предкамерное сгорание, дожигание и кислородное сжигание. Современный уровень развития знания не позволяет отдать предпочтения какой-либо из них. Потери КПД при их реализации оцениваются в диапазоне 10-14%. Все технологии CCS (фильтрации и консервации углекислого газа) обладают существенным потенциалом повышения эффективности и снижения стоимости. В среднесрочной перспективе потери КПД могут быть снижены до 8-10%. Ключевую роль здесь играют создание высокоэффективных промышленно-химических жидкостей и оптимальная интеграция сепарации и очистки в производственном процессе. Эффективность всех технологических вариантов в отдаленном будущем предполагается повысить с помощью новых методов (например, мембранных технологий, организации химических и карбонатных циклов). При этом ожидается уменьшение потерь КПД до уровня значительно ниже 8%.

### Возобновляемые источники энергии

Использование возобновляемых источников энергии взамен горючих энергоносителей имеет большой потенциал для снижения выбросов CO<sub>2</sub> не только в Германии, но и во всем мире. Можно ожидать,

что в среднесрочной перспективе это существенно повлияет на экономию затрат. Предпосылка тому — целенаправленное выведение на рынок технологий и проведение ИиР, что позволит ускоренно пройти «кривые обучения» и раскрыть потенциал снижения издержек.

Задачи защиты окружающей среды и предотвращения климатических изменений могут быть решены только при помощи комплексных мер по развитию возобновляемых источников энергии. В ближайшей перспективе для Германии особенно актуально проведение исследований в области прибрежной ветровой энергетики. Для реализации колоссальных возможностей солнечной энергии потребуется средне- и долгосрочная поддержка ИиР. Условием успеха инновационных разработок в отдаленной перспективе выступает согласование проводимых ИиР с механизмами коммерциализации.

Развитие ветровой энергетики, в особенности использование энергии ветра в прибрежной зоне, предполагает, прежде всего, углубленный анализ розы ветров (с использованием данных спутникового зондирования и наземных метеорологических наблюдений). Следующим шагом должны стать исследования по оптимизации концепций будущих ветроэнергоустановок (нестационарная аэродинамика и аэроакустика; усовершенствованные материалы; несущие конструкции, как серийно выпускаемые, так и адаптированные для работы на больших глубинах; сопроводительные экологические исследования) и сетевой интеграции (совершенствование механизмов управления энергоустановками, системное обслуживание).

Условием применения фотогальванических установок является проведение исследований, направленных на повышение КПД и увеличение срока службы компонентов. Эти задачи будут решаться за счет улучшения характеристик существующих материалов и создания новых, разработки комплексного производственного процесса с высокой производительностью и отдачей, «умной» интеграции фотогальванических систем.

Для развития солнечно-термальных систем необходимо увеличение рабочей поверхности солнечных батарей. Важнейшее значение в этом процессе приобретает создание новых материалов (прежде всего полимерных) для производства коллекторов и совершенствование системной интеграции. Основной компонент солнечно-термической системы — тепловой аккумулятор, и, чтобы достичь высокой плотности аккумуляции, требуются материалы, обеспечивающие латентное и химическое аккумулирование. Предпосылка успешного выведения на рынок технологии солнечного охлаждения — комплексные фундаментальные исследования свойств применяемых материалов, в частности их адсорбционной и абсорбционной способности. Кроме того, целесообразна дальнейшая разработка систем теплопередачи и механизмов охлаждения низкой мощности (менее 10 кВт).

При использовании биогаза следует уделять внимание процессам газообразования (более глубокому

пониманию процессов, совершенствованию способов предварительной обработки топлива), очистке газа и его применению, соединив все в единую концепцию.

Центральное направление в развитии геотермальной энергетики — совершенствование геотермальных систем. Планируется создание пилотной петротермальной системы, работа которой будет продемонстрирована как минимум в двух репрезентативных районах — в условиях средней глубины, высокой температуры и низкой естественной продуктивности природного резервуара, что позволит оценить ее готовность к функционированию на всех этапах: от разведки месторождений до выработки готовой энергии. Искусственное повышение продуктивности месторождений — одна из основных задач развития геотермальной энергетики на отдаленную перспективу.

### Аккумуляция энергии

Специфика производства электроэнергии приводит к неравномерной загрузке электрической сети и к увеличивающемуся дисбалансу между энергообеспечением и энергопотреблением. Возникает необходимость создания межрегионального равновесия в энергообеспечении, управления нагрузками и производством и аккумуляции энергии с целью ее последующей подачи в сеть.

Электрическая энергия чаще всего «хранится» в одной из следующих форм: механико-потенциальная (гидро- и пневмоаккумулирующие электростанции), механико-кинетическая (гироскопическая аккумуляция) или электрохимическая (кислотно-аккумуляторные, литиево-ионные, жидкоэлектродные окислительно-восстановительные, никелево-металлгидридные, никелево-кадмиевые батареи, водородные аккумулярующие установки). При «распаковке» ее накопительные формы преобразуются в электрический ток. Энергия может накапливаться и в электростатической либо элек-

ромагнитной форме (двухслойные конденсаторы, сверхпроводящие магнитные катушки), при этом хранение больших объемов слишком затратно. В качестве еще одной альтернативы предлагаются термические конденсаторы, в которых сберегаемая энергия не трансформируется обратно в электричество, а используется в форме тепла.

В настоящее время использование накопителей энергии экономически обоснованно лишь в узкоспециализированных приложениях, где конденсатор технически необходим (например, в автономных электросетях). Исключением можно считать зарекомендовавшие себя во всем мире пневмоаккумулирующие электростанции. Тем не менее, в среднесрочной и долгосрочной перспективе ожидается достаточно высокая востребованность подобных хранилищ электроэнергии. Для гармоничной и экономически обоснованной интеграции таких «накопителей» в мировую энергосистему должна быть осуществлена специальная программа ИиР.

Степень актуальности технологий и их научно-исследовательский потенциал ранжируются по четырем группам. Высшая оценка — «чрезвычайная важность» (1 балл), низшая — «актуальность сомнительна» (4 балла) (рис. 4). Актуальность оценивалась с позиций общеевропейской энергосистемы и европейских компаний, а потенциал ИиР — с точки зрения ЕС в целом и Германии в частности.

Из приведенной диаграммы видно, что наибольшим потенциалом и актуальностью для ЕС, и в частности для Германии, обладают ИиР по следующим направлениям: адиабатические пневмоаккумулирующие электростанции (Adiabatic Compressed Air Energy Storage, A-CAES) и водородные аккумулярующие электростанции (Wasserstoff-Gas- und-Dampf, H<sub>2</sub>-GuD) для накопления больших объемов энергии; жидкоэлектродные окислительно-восстановительные батареи (Redox-Flow) для средних объемов; литиево-ионные батареи для мобильных устройств. За ними следуют термические конденсаторы и литиево-ионные батареи для стационарного применения. К перспективным темам исследований относятся также гироскопические накопители и двухслойные конденсаторы.

ИиР в области натриево-серных батарей (NaS), кислотных батарей и сверхпроводящих магнитных катушек (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) актуальны лишь в отдельных аспектах. Исследования, связанные с никель-металлгидридными (NiMH) и никель-кадмиевыми (NiCd) батареями, не представляют интереса для государственной поддержки.

Развитие пневмоаккумулирующих электростанций потребует разработки адиабатных конденсаторов, а также малозатратных герметичных и высокотемпературных термических конденсаторов. Для гидроаккумулирующих электростанций прежде всего нужны эффективные и недорогие электролизеры высокого давления. В долгосрочной перспективе ожидается появление газовых турбин (в первую очередь — системы горения), работающих на чистом водороде. ИиР в области жидкоэлектродных

Рис. 4. Расстановка приоритетов в области технологий аккумуляции энергии

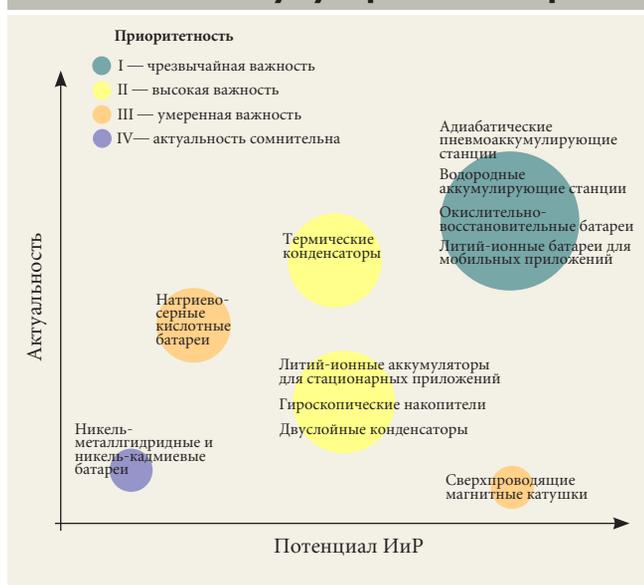
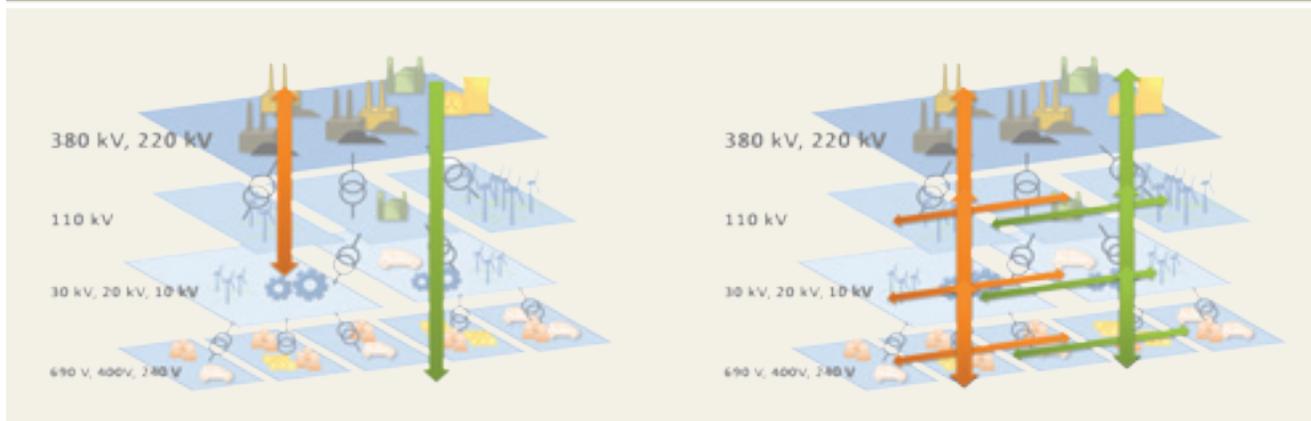


Рис. 5. Изменения направлений информационного (оранжевый цвет) и энергетического (зеленый цвет) потоков в традиционных (слева) и будущих системах электроснабжения (справа)



окислительно-восстановительных батарей ориентированы на снижение общей стоимости мембран и стеков, создание новых электролитов (как альтернативы ванадию) и мембран, а также соответствующих структур стеков и ячеек. В фокусе исследований по созданию литиево-ионных батарей для мобильного применения — уменьшение их стоимости, увеличение срока службы и повышение надежности за счет объединения в крупные массивы.

### Электрические сети

Электросети являются существенной предпосылкой для внедрения инновационных технологий производства электроэнергии и таким образом определяют осуществление настоящего и будущего производственных сценариев. Для того чтобы обеспечить качественное, надежное, бесперебойное и рентабельное энергоснабжение, следует заранее планировать развитие сетей; решения, касающиеся поддержки ИиР, должны приниматься одновременно с выбором сценария развития энергетики. Традиционная организация сетей по принципу односторонней передачи электроэнергии от поставщиков потребителям постепенно трансформируется в двунаправленную, где энергия гибко распределяется (рис. 5).

Изменения принципов производства и потребления электроэнергии требуют создания новых и радикальной перестройки существующих сетей энергоснабжения. Чтобы они выдерживали повышенную нагрузку и обеспечивали стабильность энергоснабжения в любой ситуации, необходимо уже сегодня осуществлять замену отдельных компонентов.

В современных условиях процесс развития сетей определяется двумя основными факторами: изменением структуры источников электроэнергии, обусловленным использованием энергии ветра, отказом от атомной энергии, перемещением новых электростанций на природном сырье с севера на юг и т. д., а также набирающей обороты международной торговлей электроэнергией. Растущая интеграция децентрализованных поставщиков энергии вызывает дополнительные проблемы при соблюдении технических границ системы. Возникают новые задачи, связанные с оптимизацией распределения

электроэнергии и сохранением регламентной системной производительности (например, соблюдение требований по бесперебойным поставкам энергии). Это касается и идеи широкого использования электромобилей (E-mobility).

Адаптация передающих и распределительных сетей должна обеспечить, прежде всего, возможность применения новых технологий, надежность и качество энергоснабжения и оптимизацию затрат.

Увеличение пропускной способности сетей составляет одну из задач государственной поддержки в ближайшем будущем. Потребуется высокая интенсивность реализации программ ИиР, чтобы выиграть время для осуществления более масштабных исследовательских инициатив.

Наиболее актуальное направление германских ИиР — гибридные системы переменного/постоянного тока. Эти технологии, особенно создание асинхронных коридоров передачи электроэнергии (die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, HGÜ), обладают большим техническим потенциалом, так как хорошо совместимы с сетями переменного тока, отвечают высоким техническим стандартам энергоснабжения и конкурентоспособности.

Многообещающими являются и технологии на основе сверхпроводимости, но им сопутствуют высокие технико-экономические риски. Растет потребность в надежных сетевых элементах, способных выдерживать повышенную нагрузку. Государственная поддержка особенно актуальна для осуществления стратегий регулирования и стимулирования производства на базе концепции гибких систем передачи переменного тока (Flexible AC Transmission Systems, FACTS). Основой реализации новых стратегий производства и рыночных моделей становятся концепции «активной сети» и «умной сети», обеспечивающие постоянный мониторинг состояния всех узлов распределительной сети. Ключевая роль наряду с автоматизацией предприятий и сопутствующей ей разработкой «политики энергосистем» (grid policy) принадлежит общесистемному анализу интеграции, трансформации и эксплуатации инфраструктуры сетей. Соответственно, растет потребность в разработке новых динамических систем переключения, защиты и изоляции. Ранжирование технологических

областей по степени актуальности и величине потенциала ИиР приведено на рис. 6.

### Рациональное использование энергии в промышленности

Для повышения эффективности использования энергии в промышленности и третичном секторе (объединяющем сферы торговли, транспорта и услуг) разработаны разнообразные организационные и технологические решения. На долю указанных секторов приходится более 40% электроэнергии, потребляемой в Германии, и почти 30% прямых выбросов CO<sub>2</sub>. Согласно сценариям Международного энергетического агентства (International Energy Agency, IEA), приведенным в докладе [IEA 2008b], повышение энергоэффективности — наиболее действенная из возможных мер для значительного снижения выбросов CO<sub>2</sub>. В рамках нашего исследования были подробно проанализированы соответствующие инструменты, в той или иной степени признанные релевантными. К ним относятся:

- Технологии сбережения электроэнергии за счет более рационального потребления ресурсов: ресайклинга, эффективного применения материалов, использования облегченных конструкций, автоматизации управления и контроля.
- Эффективные технологии в энергоемких процессах: инновации в сырьевом секторе, новые подходы в химико-биологической индустрии и водоснабжении населенных пунктов.
- Кросс-технологии: усовершенствованные электромеханизмы, мембранные технологии, управление энергоснабжением и потреблением, обработка поверхностей.
- Технологии вторичного использования и аккумуляции тепла, выделяемого в ходе производственного процесса: термоэлектроэнергетика, органический цикл Ренкина, цикл Калины, машина Стирлинга, промышленные высокотемпературные тепловые насосы, солнечно-термальные системы, теплоизоляция производственно-технического оборудования.

В основном ИиР в области повышения энергоэффективности промышленности и третичного сектора сфокусированы на эффективности использования ресурсов в энергоемких обрабатывающих секторах и внедрении комплексных технологических решений.

В рамках стратегий рационального использования ресурсов особую актуальность приобретают исследования по переработке материалов и вторичному использованию топлива, облегчению конструкций транспортных средств и статичных механизмов, эффективности использования материалов. Усиливается значимость исследовательских работ, связанных с применением биогенного сырья в химической индустрии, в центре которых — развитие концепции биорафинирования. В энергоемких отраслях, таких как производство железа и стали, цемента, бумаги и цветных металлов, приоритет отдается модернизации существующих технологий. Освоение новых способов производства предполагается лишь в долгосрочной перспективе. Области катализа и энергоемких методов сепарации веществ также являются актуальными зонами для ИиР. Особенно перспективны (при системной оптимизации) комплексные технологии, в частности электросиловые установки. Важны и специальные исследования, направленные на повышение эффективности процессов теплопередачи, но реальный потенциал таких работ до конца не оценен.

### Энергоэффективность зданий и сооружений

На отопление, кондиционирование и освещение жилых и коммерческих зданий в Германии приходится примерно 35% всего объема энергии, вырабатываемой за год, или 2.940 ПДж. При этом в атмосферу поступает 342 млн т CO<sub>2</sub>. Снижение доли CO<sub>2</sub> в выбросах — одна из ключевых задач государственной политики по предотвращению изменений климата. Энергоэффективные технологии в жилищно-коммунальном секторе можно разделить на две группы. Первую составляют технологии, уменьшающие затраты энергии на отопление, кондиционирование и освещение, а вторую — технологии, повышающие эффективность преобразования энергоносителей в полезную энергию.

Уже сегодня часть зданий, построенных с применением технологий энергоэффективности (с нулевым энергопотреблением), используют незначительное количество энергии, обеспечить которое могут локальные возобновляемые источники энергии. Другая важная составляющая энергоэффективности зданий — их планировка и условия эксплуатации, они составляют весьма перспективный рынок. В индустриально развитых странах важнейшее значение приобретает энергетическая модернизация зданий, а в быстро развивающихся регионах мира, таких как Китай, Индия и Ближний Восток, еще и возведение новых. Энергетические стандарты строительства будут только повышаться: к существующим строениям станут предъявляться столь же жесткие требова-

Рис. 6. Расстановка приоритетов в сфере «Электрические сети»

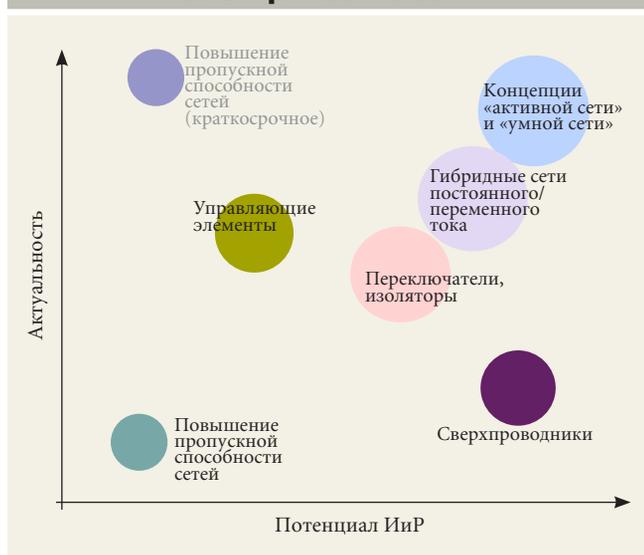
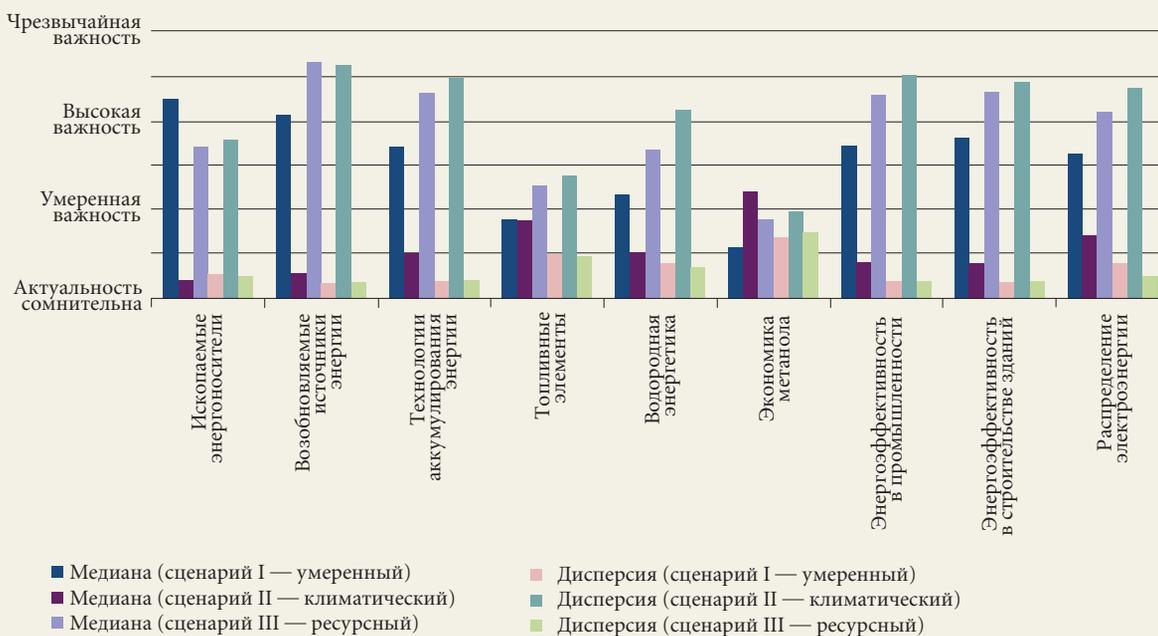


Рис. 7. Экспертная оценка актуальности государственной поддержки различных технологических областей (медианы и дисперсные коэффициенты)



ния, как и к вновь возводимым. К тому же фасады новых домов помимо своей основной задачи — теплоизоляции, будут выполнять функции по энергообеспечению процессов вентиляции, отопления и кондиционирования, а также вносить вклад в генерацию электроэнергии. Преобразование систем отопления и кондиционирования происходит под влиянием двух ключевых тенденций: растущего использования возобновляемых источников энергии (особенно солнечной) и неуклонного сокращения выбросов  $\text{CO}_2$ . Усилению качества и оптимизации процессов планировки и эксплуатации зданий способствует внедрение информационных и компьютерных технологий.

Задача повышения энергоэффективности сооружений подразумевает увеличение расходов на ИиР. В фокусе государственной научной политики находятся системно-технические задачи, решение которых предполагает сравнительно небольшие расходы на ИиР, поскольку они основаны на универсальности оборудования и технологий.

В каждой из рассмотренных областей присутствуют исследовательские темы, реализация которых связана со значительной степенью риска или требует продолжительного времени. Как правило, они связаны с новыми материалами, технологиями, способами оценки и комплексной системной модернизацией, например, в области многофункциональных фасадов. Междисциплинарный характер носят исследования, касающиеся создания нормативов, управления производством, обеспечения качества, новых методик оценки (например, эксергия<sup>4</sup>), мониторинга и демонстрации лучших разработок (новых энергоэффективных способов отопления,

кондиционирования и освещения) с целью их продвижения на рынок.

### Определение приоритетов поддержки исследований

Описанная выше методика оценки позволяет идентифицировать необходимость исследований в отдельных технологических областях. Для определения исследовательских задач, нуждающихся в государственной поддержке, предстоит ранжировать области и объединяющие их тематические сферы по приоритетности.

С этой целью в рамках заключительного семинара был проведен анкетный опрос участников проекта. Исходя из проведенной оценки каждой технологической области и разработанных на ее основе рекомендаций по мерам политики (см. предыдущий раздел) респонденты смогли дать собственные заключения по поводу их актуальности. На рис. 7 приведены медианы и дисперсии экспертных оценок. Следует подчеркнуть, что в большинстве случаев отмечена высокая степень совпадения мнений экспертов в определении приоритетности тематических сфер и составляющих их областей.

В «умеренном» сценарии приоритетное значение имеют исследования в области ископаемых видов топлива. В других сценариях их значимость уменьшается, и доминантную роль начинают играть новые источники энергии. Не менее высокую актуальность в умеренном сценарии приобретают тематические области «Возобновляемые источники энергии» и «Энергоэффективность в промышленности и третьем секторе». Еще более заметная роль отводится им в «климатическом» и «ресурсном» сценариях,

<sup>4</sup> Эксгергия — термин, применяемый в термодинамике для обозначения максимальной работы, которую может совершить система при переходе из данного состояния в равновесие с окружающей средой. Эксгергией иногда называется работоспособность системы (<http://bse.sci-lib.com/article125692.html>) (прим. ред.).

где использование возобновляемых источников энергии выступает основным средством решения проблем. Указанные тематические сферы, наряду с «Ископаемыми видами топлива», являются предметом наиболее жестких рекомендаций.

Большее, чем когда-либо, значение приобретают исследования областей «Аккумуляция энергии» и «Электрические сети». Рост технических требований к инфраструктуре электрических сетей и их компонентам определяет потребность в ИиР, необходимых для каждого из сценариев. Все сценарии при этом предполагают разработку возобновляемых источников энергии, которые должны быть интегрированы в существующие сети, что указывает на важность модернизации инфраструктуры энергоснабжения, повышения эффективности производства и поставок энергии. Кроме того, требуется разработка новых стратегий управления производством.

Другие тематические области в большей степени зависят от реализации одного определенного сценария и, следовательно, соблюдения соответствующих рамочных условий. Так, «Фильтрация и консервация выбросов CO<sub>2</sub>», относящаяся к тематической сфере «Горючие энергоносители», приобретает особое значение в «климатическом» сценарии. В «ресурсном» сценарии, предполагающем преодоление зависимости от импорта горючих энергоносителей, на первый план выходит водородная энергетика. Кроме того, в «климатическом» сценарии развитие водородной энергетика позволит снизить выбросы парниковых газов в транспортном секторе. «Экономика метанола» в этом контексте рассматривается лишь как переходное решение.

## Заключение

Проект «Энергетические технологии - 2050» направлен на расстановку приоритетов в выборе исследований, нуждающихся в государственной поддержке. Для достижения этой цели была разработана методика оценки, обеспечивающая систематическое сравнение технологических областей, исследования в которых претендуют на государственное финансирование. Исходя из долгосрочного характера поддержки исследований необходимо учесть не до конца определенные рамочные условия. Затем на основе установленных условий оценка технологических областей может быть существенно пересмотрена.

Три сценария, разработанные на основе актуальных исследований, раскрывают весь спектр возможных направлений развития энергетического рынка и позволяют предложить общие технологические рекомендации. Поскольку проект охватывал различные направления неядерных энергетических ИиР, предстояло сформулировать критерии, в равной степени применимые для всех тематических сфер и технологических областей, обеспечив унифицированную базу для сравнения. При этом были отобраны критерии, отражающие ключевые цели энергетической политики. Взвешивание и агрегирование критериев в рамках исследования не проводилось, так как окончательное решение в выборе целевых ориентиров находится в компетенции лиц, ответственных за разработку энергетической политики. Опросы экспертов в области энергетики или общественного мнения позволяют лишь расширить, исходя из возможных перспектив, диапазон целей, а также провести их сравнительный анализ. Подобное исследование может внести существенный вклад в идентификацию перспективных тем и определение приоритетов поддержки ИиР. F

Bartels M., Dittmann L., Huther H., Kocyba H., Lindenberg D., Lutsch W., Münch W., Neckel S., Oberschmidt J., Radgen P., Witterhold F.-G. (2008) Schwerpunkte und Effizienzstrategien in der Energieforschung: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben «Multidimensionale Technikbewertung / Programm Eduar&D des BMWi, Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft (AGFW). Frankfurt am Main: VDEW.

BMU (2007) Ausbaustrategie Erneuerbare Energien. BMU Leitstudie. Stuttgart.

BMWA (2005) Innovation und neue Energietechnologien. Das 5. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit.

BMWi (2008) Energiedaten — nationale und internationale Entwicklung. Berlin. <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/energiestatistiken.html>.

DENA (2008) Abschlussbericht — GermanHy — Studie zur Frage «Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?». Berlin.

EWI/Prognos (2005) Energiereport IV — Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030., München: Oldenburg Industrieverlag.

EWI/Prognos (2006) Auswirkungen höherer Ölpreise auf Energieangebot und -nachfrage — Ölpreisvariante der Energiewirtschaftlichen Referenzprognose 2030. Köln, Basel.

VDEW (2007) Energiewirtschaftliches Gesamtkonzept 2030. Köln. [http://www.strom.de/vdew.nsf/id/DE\\_6WAEPD\\_Materialien/\\$file/20070620\\_Erweiterte\\_Dokumentation\\_Juli\\_2007.pdf](http://www.strom.de/vdew.nsf/id/DE_6WAEPD_Materialien/$file/20070620_Erweiterte_Dokumentation_Juli_2007.pdf).

Wietschel M., Arens M., Dötsch C., Herke S., Krewitt W., Markewitz P., Möst D., Scheufen M. (2010) Energietechnologien – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN 978-3-8396-0102-0.

European Commission, Eurostat (2008) Energy Yearly Statistics 2006. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.

European Commission (2006) World Energy Technology Outlook 2050. WETO H2. Bruxelles: Office for Official Publications of the European Communities.

IEA (2008a) Energy Technology Perspectives 2008 — Scenarios and Strategies to 2050. Paris: IEA Publications.

IEA (2007) World Energy Outlook 2007 — China and India Insights. Paris: IEA Publications.

IEA (2008b) World Energy Outlook 2008. Paris: IEA Publications.

Jochem E. (ed.) et al. (2009) Improving the efficiency of R&D and the market diffusion of energy technologies. Heidelberg: Physica-Verlag. ISBN 978-3-7908-2153-6.

Ragwitz M., Eichhammer W., Hasenauer U. et al. (2005) Energy scientific & technological indicators and references (ESTIR). Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung.