

УДК 004:[621.22+621.3]

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ  
В РАЗЛИЧНЫХ СТРАНАХ: АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ,  
ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ, ВЛИЯНИЯ РАЗВИТИЯ  
ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

*Статья поступила в редакцию 01.12. 2018, в окончательном варианте – 27.12.2018.*

**Маркелов Константин Алексеевич**, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,  
кандидат экономических наук, доцент, и.о. ректора университета, e-mail: aspu@aspu.edu.ru, ORCID <http://orcid.org/0000-0001-8218-4496>

Развитие энергетики, использующей возобновляемые источники энергии, характерно для многих стран мира. В данной статье обоснованы объективные причины развития энергетики, основанной на возобновляемых источниках энергии в современных условиях; представлены основные направления такой энергетики (в том числе в сочетании с традиционными направлениями энергетики); рассмотрена динамика показателей, отражающих развитие энергетики, основанной на возобновляемых источниках энергии. Представлены некоторые математические модели изменения рассматриваемых показателей энергетики во времени, в том числе в отношении «синхронности» изменения этих показателей в различных странах. Отражено также влияние расширения возможностей информационно-телекоммуникационных технологий на развитие электроэнергетики, использующей возобновляемые источники энергии; повышение эффективности такого использования.

**Ключевые слова:** выработка электроэнергии, возобновляемые источники энергии, солнечная энергия, социально-экономическое развитие, энергопотребление, экология окружающей среды, математические модели, информационно-телекоммуникационные технологии

**Графическая аннотация (Graphical annotation)**



**USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN DIFFERENT COUNTRIES:  
ANALYSIS OF INDICATORS DYNAMICS, MANAGEMENT APPROACHES,  
INFLUENCE OF THE DEVELOPMENT OF INFORMATION  
AND TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES**

*The article was received by editorial board 01.12. 2018, in the final version – 27.12.2018.*

**Markelov Konstantin A.**, Astrakhan State University, 20a Tatischev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Economics), Associate Professor, Acting Rector of the University, e-mail: aspu@aspu.edu.ru, ORCID <http://orcid.org/0000-0001-8218-4496>

The development of power industry based on renewable energy sources (RES) is typical for many countries of the world. This paper substantiates the objective reasons for the development of RES-based power industry in modern conditions; describes the main directions of such power industry (including in combination with conventional power industry directions); considers the dynamics of the indicators that reflect the development of RES-based power industry. The article describes some mathematical models of changes occurring in the considered power industry indicators over time, including the ones concerning the “synchronicity” of changes in these indicators in different countries. The influence of the expansion of the information and telecommunication technologies capabilities on the development of the RES-based electric power industry and the efficiency improvement of such application are also reflected.

**Key words:** electricity production, renewable energy sources, solar energy, social and economic development, energy consumption, environmental ecology, mathematical models, information and telecommunication technologies

**Введение.** Социально-экономическое развитие современного общества во многом базируется на производстве и потреблении электрической и тепловой энергии; использовании моторного топлива. При выработке электроэнергии ключевыми факторами являются ее себестоимость, экологические последствия использования технологий ее производства. Существенно, что с течением времени доступные месторождения нефти, газа, угля истощаются – это приводит к началу добычи на более труднодоступных месторождениях и, как следствие, увеличению себестоимости такой добычи. Добыча сланцевой нефти и сланцевого газа изначально является достаточно затратной, так как требует бурения большого количества скважин для использования технологий «гидроразрыва пластов».

В целом необходимость добычи и транспортировки энергоносителей (прежде всего нефти и газа), обеспечения экологических требований при таких процессах, а также регулирования цен на такие энергоносители приводит к расширению международных связей (двусторонних и многосторонних) не только в экономической, но и в политической сфере. Это в полной мере относится, в частности, к странам, прилежащим к Каспийскому морю. В настоящее время последнее является не только зоной интенсивной добычи углеводородных ресурсов, но и используется для их транспортировки с использованием трубопроводного транспорта и судов.

Как следствие необходимо развитие международных связей прикаспийских государств, и особенно их приморских территорий. Это касается, в частности, развития логистических процессов, включая использование мультимодальных перевозок; согласование деятельности логистических комплексов отдельных стран; региональных комплексов, обеспечивающих переработку углеводородного сырья; рыбохозяйственной отрасли; интересов населения, проживающего на приморских территориях.

Термин «*возобновляемые источники энергии*» (ВИЭ) применяется по отношению к тем источникам, запасы которых восполняются естественным образом, прежде всего за счет поступающего на поверхность Земли потока энергии солнечного излучения, и в обозримой перспективе являются практически неисчерпаемыми [22]. Подчеркнем, что использование ВИЭ осуществляется в «пределах национальных границ», что повышает энергетическую безопасность стран, особенно сильно зависящих от «внешних» поставок энергоносителей. Поэтому важное значение играет расширение использования ВИЭ, в том числе на основе нетрадиционных технологических решений.

Увеличение объемов и повышение эффективности использования ВИЭ требует применения информационно-телекоммуникационных технологий (ИТКТ) для разработки и производства оборудования, использующего ВИЭ; оперативного контроля и управления работой такого оборудования; управления накоплением выработанной энергии, ее передачей к местам потребления; оптимизации процессов использования энергии, выработанной с использованием ВИЭ. Ряд вопросов по указанным направлениям исследований и разработок в литературе остается раскрытым недостаточно комплексно. Поэтому целью настоящей статьи является комплексный анализ проблематики, связанной с ВИЭ с акцентом на малоисследованные вопросы. Для проведения анализа используются различные материалы, относящиеся к России и зарубежным странам, в том числе информация, доступная на интернет-сайтах.

Отметим, что используемые в статье прогнозы были получены на основе разных подходов: анализ временных рядов с применением их компьютерной обработки; имитационное моделирование процессов; индивидуальное и коллективное экспертное оценивание с учетом существующих тенденций, принятия и реализации некоторых нормативных документов и пр.

**Общая характеристика предметной области.** Энергетическая стратегия России на период до 2030 г., утвержденная распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 № 1715-р [25], нуждается в систематическом обновлении и корректировках. Геополитические процессы и структурная трансформация мировой энергетики и экономики определили целесообразность исследования (оценки) проектных разработок для сценариев развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России и мира на долгосрочную перспективу, в том числе влияния расширения использования ВИЭ.

Авторами [5] указывается, что «*возросшие экологические требования, рост издержек в топливной энергетике и изменение характера спроса при переходе от индустриального типа развития к постиндустриальному вызывают кризис современных форм организации энергетики и требуют создания*

*энергетики нового типа. ... в среднесрочной перспективе (2020 г.) начнутся, а к 2050 г. произойдут глобальные изменения в технологической и организационной структуре мировой энергетики».*

Развитие энергетики должно ориентироваться не столько на ресурсный капитал, сколько на развитую инфраструктуру, научно-технологический и интеллектуальный капитал и должно быть вписано в логику устойчивого развития стран и регионов. Поэтому, по мнению директора по энергетическому направлению Фонда «Институт энергетики и финансов» А.И. Громова [7], необходимо сформировать концепцию Энергетической стратегии России до 2050 года, центральной идеей которой является формирование облика энергетики будущего на основе ресурсно-инновационного развития, обеспечивающего ее определяющую роль в реализации принципов устойчивого социально-ориентированного (энерго-эколого-экономического) развития России.

На заседании Совета Безопасности Российской Федерации от 29.11.2018 г. по теме «О дополнительных мерах по обеспечению энергетической безопасности страны» оценены как нынешние, так и потенциальные вызовы, стоящие перед российской энергетикой; определены дополнительные меры по предотвращению таких угроз и одобрена обновлённая Доктрина энергобезопасности России [17], в том числе учитывающая необходимость использования ВИЭ.

Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» [21] дал правовое определение ВИЭ и установил механизмы государственного регулирования в области их использования. Международное энергетическое агентство (МЭА), рассматривая модели развития глобальной энергетической системы, особое внимание уделяет вопросам ускорения развития электрификации и расширению использования ВИЭ, которые определяют тренды развития мировой энергетики с учетом положений устойчивого развития.

Развитие энергетики, основанной на использовании ВИЭ, происходит в различных странах мира, хотя и с разными темпами. Это связано с рядом факторов, включая следующие. **1.** Доступность и себестоимость производства энергии в отдельных странах на основе традиционных технологий и с использованием ВИЭ. **2.** Изменение требований к характеристикам качества электроэнергии, в том числе предназначенной для питания компьютерного, телекоммуникационного и других видов сложного оборудования. **3.** Уровни экологических требований к деятельности организаций и оборудованию, применяемому для производства энергии. **4.** Требования к обеспечению уровней энергетической безопасности стран и их отдельных регионов, в том числе при конъюнктурных изменениях цен на энергоносители. **5.** Соотношение между энергопотреблением для различных категорий потребителей энергии. В связи с этим отметим, что компьютерное оборудование уже стало значительным источником энергопотребления по следующим причинам: значительное количество эксплуатируемых персональных ЭВМ, в том числе эксплуатируемых продолжительное время в течение суток; рост количества серверов, которые должны работать круглосуточно; увеличение количества телекоммуникационного оборудования, также требующего непрерывной работы; увеличение количества так называемых суперкомпьютеров, которые потребляют достаточно много электроэнергии. **6.** Задачи обеспечения совместного использования традиционных источников энергии и ВИЭ требуют рациональной организации управления, что может достигаться с использованием соответствующих программных средств.

При этом ряд вопросов, связанных с ВИЭ, остаются исследованными недостаточно полно. К ним необходимо, в частности, отнести следующие. **1.** Разработка математических моделей роста производства энергии на основе использования ВИЭ и оценка возможностей использования их для целей прогнозирования выработки энергии, роста количества устройств и пр. **2.** Анализ технических возможностей и целесообразности использования ВИЭ для энергообеспечения различных категорий потребителей, в том числе проживающих в удаленных и труднодоступных местностях, куда сложно протягивать линии электропередачи, завозить моторное топливо для дизель-генераторов. **3.** Определение влияния развития использования ВИЭ на энергетическую независимость государств в условиях потенциально возможных экономических и иных конфликтов между ними, а также возникновения экстремальных погодных условий. **4.** Оценка направлений и возможностей использования ИТКТ для управления производством энергии на основе ВИЭ, включая дистанционное управление режимами эксплуатации оборудования и распределения энергии; диагностику неисправностей генерирующих мощностей, систем передачи (транспортировки) энергии и пр. **5.** Методы управления развитием энергетики, основанной на использовании ВИЭ, в различных странах, а также на межгосударственном уровне (включая «передачу технологий», а также трансграничные поставки электроэнергии).

Отметим некоторые важные тренды в развитии мировой энергетики. В ежегодном Обзоре мировой энергетики (World Energy Outlook – WEO-2018), представленном Международным энергетическим агентством, спрогнозированы возможные перспективы взаимодействия в энергетической системе мира [28].

1. Глобальный спрос на энергию вырастет более чем на четверть к 2040 г. В сценарии указываются такие причины: новые политики из-за роста доходов и глобального населения. Предполагается, что оно вырастет на 1,7 миллиарда человек – в основном в городских районах развивающихся стран. При этом прогнозируется примерно двукратное увеличение спроса на энергию, если не произойдет дальнейшего повышения энергоэффективности экономики стран.

2. Еще в 2000 г. более 40 % мирового спроса на энергию приходилось на Европу и Северную Америку; примерно 20 % приходилось на развивающиеся страны Азии. В настоящее время рост энергопотребления приходится на развивающиеся страны, «возглавляемые» Индией. К 2040 г. эта ситуация полностью изменится. Низкоуглеродные технологии, основанные на использовании ВИЭ и природного газа, будут удовлетворять более 80 % роста мирового спроса на энергию. При этом потребление электроэнергии будет расти в два раза быстрее, чем общий спрос на энергию.

3. Более 70 % глобальных инвестиций в энергетику будет управляться государством, причем возрастающий спрос на энергию будет требовать более 2 триллионов долларов в год инвестиций в «новое энергоснабжение».

4. Энергетический сектор продвигается все дальше и быстрее в отношении развертывания производства с низким уровнем выбросов. Технологии применения ВИЭ обеспечивают расширение всеобщего доступа к энергии. Будут использоваться все экономически эффективные средства выработки энергии.

5. Использование ВИЭ увеличится примерно на 25 %, и их доля составит в 2040 г. в общей сложности около 41 %. Гидроэнергетика останется крупнейшим источником низкоуглеродистой электроэнергии. Также будут развиваться ветроэнергетика и гелиоэнергетика. Представление будущего – это электрический сценарий (FiES).

Сценарные проекты развития глобальной энергетики определяют комплексный подход, который сформируется в соответствии с Повесткой дня Организации Объединенных Наций в области устойчивого развития на период до 2030 г. Резолюция Генеральной Ассамблеи Организации Объединенных Наций от 25.09.2015 № 70/1 «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года» предусматривает [16] следующее:

«Цель 7. Обеспечение доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех».

7.1 К 2030 году обеспечить всеобщий доступ к недорогому, надежному и современному энергоснабжению.

7.2 К 2030 году значительно увеличить долю энергии, вырабатываемой из возобновляемых источников, в мировом энергетическом балансе.

7.3 К 2030 году удвоить глобальный показатель повышения энергоэффективности.

7.a К 2030 году активизировать международное сотрудничество в целях облегчения доступа к исследованиям и технологиям в области экологически чистой энергетики, включая возобновляемую энергетику, повышение энергоэффективности и к передовым и более чистым технологиям использования ископаемого топлива; поощрять инвестиции в энергетическую инфраструктуру и технологии экологически чистой энергетики.

7.b К 2030 году расширить инфраструктуру и модернизировать технологии для современного и устойчивого энергоснабжения в развивающихся странах, в частности в наименее развитых странах, малых островных развивающихся государствах и развивающихся странах, не имеющих выхода к морю, с учетом соответствующих программ их поддержки».

**Энергетика как системообразующий межотраслевой комплекс.** «Энергетический ресурс» – это носитель энергии, энергия которого используется или может быть использована при осуществлении хозяйственной и иной деятельности, а также вид энергии (атомная, тепловая, электрическая, электромагнитная энергия или другой вид энергии) [20]. Обеспечение доступности использования энергетических ресурсов для физических и юридических лиц является важнейшим условием социально-экономического развития. При этом в рамках такого обеспечения важна роль межгосударственных соглашений, транснациональных корпораций, использования ИТКТ для целей оперативного управления и стратегического планирования.

Виды экономической деятельности, определяющие указанные выше признаки «энергетического ресурса», характеризуются как топливно-энергетический комплекс (ТЭК), представляющий собой крупнейшую межотраслевую систему; системообразующий комплекс экономики различных стран.

Оборудование (или его блоки), использующее ВИЭ, может применяться для энергообеспечения в различных целях: только для подачи энергии к конкретной единице оборудования или зданию; для энергообеспечения группы единиц оборудования и/или группы зданий; для определенной организации или населенного пункта, в том числе расположенного в отдаленной местности [1]; для подключения к единым энергосистемам регионов или стран.

Отметим, что помимо увеличения объемов производства энергии с использованием ВИЭ стоит и задача обеспечения «качества» этой энергии. В частности, это касается контроля и управления частотой генерируемой электроэнергии; отсутствия в ней «всплесков» и «провалов», в частности при изменениях нагрузки [1]; автоматической фиксации в электронной форме нарушений «стандартов» на качество поставляемой электроэнергии [2]; дистанционного контроля исправности и управления режимами работы автономного оборудования, в том числе использующего энергию ветра [32].

Управление развитием энергетики (в том числе стимулирование развития энергетики, использующей ВИЭ) на государственном уровне может осуществляться различными методами. 1. Создание и исполь-

зование в области энергетики государственных организаций или коммерческих организаций, в которых контрольные пакеты акций принадлежат государству или его структурам. 2. Проведение льготной налоговой политики в отношении организаций, использующих ВИЭ – в том числе путем освобождения их от уплаты тех или иных налогов. 3. Установление значительных платежей за загрязнение окружающей среды для организаций, вырабатывающих энергию на основе использования невозобновляемых энергоносителей (нефтепродуктов, угля). Такие меры могут стимулировать не только совершенствование указанными организациями технологий (включая уменьшение выбросов в окружающую среду), но и развитие энергетики, основанной на использовании ВИЭ. 4. Государственное финансирование исследований и разработок, направленных на совершенствование технологий, используемых в сфере «альтернативной энергетики». 5. Государственное финансирование подготовки (и повышения квалификации) специалистов, деятельность которых связана с использованием ВИЭ для получения энергии. 6. Совершенствование нормативной (законодательной) базы по использованию источников энергии, в том числе ВИЭ; снижению энергопотребления в экономике стран и отраслей; управлению экологической политикой на уровне стран, в частности в отношении выбросов в атмосферу углекислого газа, мелких загрязняющих частиц и пр.

На «корпоративном уровне» расширение использования ВИЭ может стимулироваться региональной политикой в области налогообложения, а также региональными законодательными актами. При этом ВИЭ могут использоваться в сочетании с традиционными источниками питания от электросетей [12] – с учетом прогнозов потребления электроэнергии, необходимости обеспечения бесперебойного энергоснабжения потребителей и пр.

На уровне отдельных физических лиц и их семей расширение использования ВИЭ связано прежде всего с включением соответствующих решений в проекты загородных зданий, соответствующих категории «коттеджное строительство», а также при реализации таких решений для уже эксплуатируемых зданий. Это касается ферм, расположенных в труднодоступных местностях [1].

Управление автономными системами энергоснабжения для отдельных зданий (включая автоматическое управление) может осуществляться в рамках компьютеризованных систем типа «умное здание» («умный дом»). Современным подходом является «проактивное» управление, использующее прогнозную информацию, полученную для населенного пункта или участка территории из интернет-источников [5]. Отметим, что управление автономными энергосистемами для коттеджей (отдельных зданий) может касаться не только выработки электрической и тепловой энергии (а также «холода»), но и своевременной подпитки аккумуляторов от внешней электросети. Это касается, в частности, следующего: эксплуатации зданий при высокой вероятности того, что ВИЭ нельзя будет использовать в последующий период времени, а также возможных длительных перерывов во внешнем энергоснабжении; при использовании так называемых «двухтарифных» планов оплаты электроэнергии – различных расценок для разных периодов суток; автоматического укрытия генерирующих электроэнергию солнечных панелей при наступлении (или прогнозировании наступления) неблагоприятных внешних условий и пр.

Новая индустриализация связана с внедрением передовых технологий, включая следующие «компоненты»: реиндустриализация (соответствует замене традиционных технологий на более совершенные); неоиндустриализация; сверхиндустриализация [9]. В условиях новой индустриализации энергетика приобретает особое значение для обеспечения устойчивого развития экономики (на уровне стран, регионов, на межрегиональном уровне). В свою очередь это обеспечивает конкурентоспособность различных отраслей.

Сопоставление мировых стран-лидеров по размеру валового внутреннего продукта (ВВП) и по показателю энергоёмкости (ПЭ) ВВП свидетельствует о существенном разбросе значений ПЭ. К наиболее энергетически эффективной экономике (с низкими значениями ПЭ) из крупных стран относятся Великобритания, Италия, Япония и Германия, а к наиболее затратным (с высокими значениями ПЭ) – Россия, Китай и Индия. Так, например, в экономике России на 1 \$ производства ВВП по паритетной покупательной способности затрачивается 0,331 кг условного топлива (кг у.т.), а в перечисленных выше развитых странах – в 2,5–3,6 раза меньше.

Это указывает на различия в воспроизводственных системах данных стран и различия в структурах их производств. В странах с высоким уровнем ПЭ важное место в экономике занимает промышленность. В то же время в странах с низкими значениями ПЭ большую роль играет сектор нематериального производства. Однако в некоторых высокоразвитых странах, где энергоёмкость экономики находится на низком уровне (например, в Германии), сохраняется значимая роль промышленности. Это свидетельствует о качественно ином характере промышленности, основанной на энергоэффективных технологиях, позволяющей повысить уровень отдачи расходуемых энергоресурсов в пересчете на генерацию добавленной стоимости в экономике [11]. На практике в развитых странах велика доля высокотехнологичных производств, обеспечивающих возможности экспорта продукции. Однако в сфере «компьютерной техники» многие высокотехнологичные производства размещаются и в развивающихся странах, что позволяет снизить издержки производства, налоговое бремя и пр. Кроме того, в ряде случаев приходится учитывать и некоторые «строительные требования» к размещению производственных мощностей.

Российская Федерация по рейтингу ПЭ расположена в конце мировых стран-лидеров, хотя на ее территории размещено достаточно много высокотехнологичных производств, в том числе в оборонной отрасли.

Указом Президента РФ от 07.05 2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» поставлена национальная цель развития государства – обеспечить вхождение Российской Федерации в число пяти крупнейших экономик мира по ВВП, обеспечить темпы экономического роста выше мировых при сохранении макроэкономической стабильности.

Международное энергетическое агентство предполагает, что при реализации консервативного сценария технологического развития в энергетике доля ископаемых топлив (т.е. невозобновляемых источников энергии) в структуре мирового топливно-энергетического баланса (ТЭБ) вплоть до 2050 г. будет превышать 75 %. Однако по мере развития новых энергетических технологий возрастают шансы реализации так называемого «технологического» сценария развития мировой энергетики. В соответствии с ним доля ископаемых топливных ресурсов через 50 лет может упасть до 45–50 %, а доля ВИЭ вырасти до 40–45 % [24].

Соответственно в зависимости от сценарных условий развития меняется состав и структура мирового потребления первичной энергии (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1 – Структура мирового потребления первичной энергии по сценариям развития, в процентах, в млн т н.э.

| Показатели              | 2010  | Инерционный сценарий |       | Стагнационный сценарий |       | Инновационный сценарий |       |
|-------------------------|-------|----------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|
|                         |       | 2030                 | 2050  | 2030                   | 2050  | 2030                   | 2050  |
| Нефть                   | 32,7  | 28,3                 | 27,5  | 31,1                   | 29,1  | 24,8                   | 16,2  |
| Природный газ           | 22,3  | 24,2                 | 24,8  | 23,1                   | 24,2  | 22,4                   | 18,2  |
| Уголь                   | 27,6  | 28,3                 | 24,6  | 22,5                   | 12,5  | 24,0                   | 10,7  |
| Атомная энергия         | 5,3   | 4,7                  | 4,5   | 3,6                    | 2,4   | 9,1                    | 13,7  |
| Биомасса                | 5,5   | 3,6                  | 3,3   | 4,2                    | 4,2   | 2,0                    | 1,2   |
| Гидроэнергия            | 4,8   | 4,5                  | 5,2   | 5,1                    | 6,6   | 5,0                    | 5,6   |
| Использование новых ВИЭ | 1,8   | 6,4                  | 10,1  | 10,4                   | 21,0  | 12,7                   | 34,4  |
| Всего                   | 100,0 | 100,0                | 100,0 | 100,0                  | 100,0 | 100,0                  | 100,0 |

Источник: составлено по данным [18, 31].

В наглядной форме для 2010 г. распределение долей между отдельными источниками для производимой в мире энергии показано на рисунке 1.

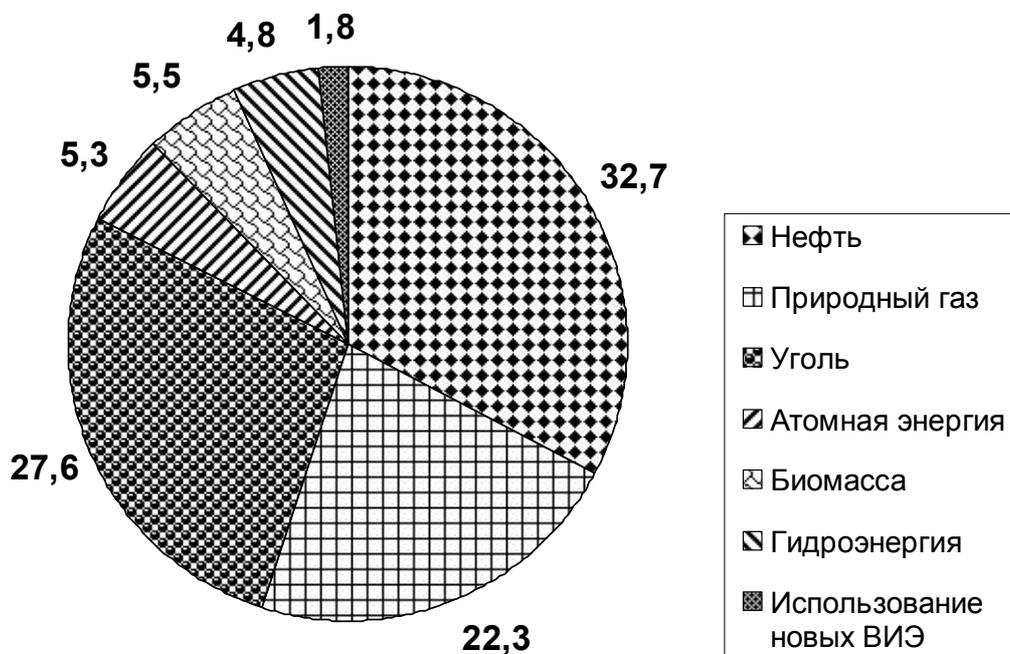


Рисунок 1 – Распределение долей в 2010 г. между отдельными источниками производимой в мире энергии (в %)

При этом целесообразно отметить следующее.

1. Использование производства электроэнергии с применением гидроэлектростанций является традиционным и его принято относить к «основной» энергетике. Его основным недостатком считается необходимость «отчуждения» под водохранилища достаточно больших площадей территорий. В горных местностях сооружаются «высоконапорные» водохранилища с большой высотой плотин – это позволяет использовать меньшие площади водохранилищ, но стоимость сооружения таких ГЭС выше, чем на равнинах.

Все более широко начинают использоваться устройства типа небольших «погружных гидротурбин», которые не требуют создания плотин и запруд и, как следствие, не оказывают негативного влияния на окружающую среду и ее обитателей. Такие устройства могут использоваться, в частности, в отдаленных фермерских хозяйствах, в том числе расположенных в горной местности [1].

2. Отношение к атомной энергетике в разных странах серьезно отличается. Как пример, укажем Германию (фактически отказалась от развития атомной энергетике после аварии на Чернобыльской АЭС) и Францию (высокая доля производства электроэнергии на АЭС).

3. В отношении использования для производства энергии нефтепродуктов отметим, что большинство развитых стран серьезно зависят от внешних поставок нефти. Поэтому колебания цен на нефть значительно влияют на себестоимость производства продукции, цены на моторное топливо и пр.

4. Термин «биомасса» в контексте приведенной выше таблицы следует понимать, как получение биогаза из биомассы (в том числе и биомассы, содержащейся в отходах). В дальнейшем этот газ может быть использован для производства электроэнергии или тепла – в частности для использования на объектах, прилежащих к месту получения биогаза. В настоящее время биогаз производится преимущественно из отходов, содержащих биологические объекты того или иного типа (включая бытовые пищевые отходы, отходы промышленных пищевых производств, отходы сельскохозяйственного производства и пр.). Однако в принципе возможно и целенаправленное производство биомассы (в том числе в виде фитопланктона) с целью последующего получения из нее биогаза. Такое производство может быть реализовано главным образом при интенсивной солнечной инсоляции. Местами его размещения могут быть естественные или искусственные непроточные водоемы; отдельные мелководные участки морей, хорошо прогреваемые солнцем и пр.

**Общая характеристика состава и направлений использования природных возобновляемых источников энергии (ВИЭ).** По мнению академика РАН В.Е. Фортова, «энергетический кризис» 70-х гг. дал толчок к пересмотру энергетических стратегий развития многих стран. Стало ясно, что нефть не может быть надежной долговременной основой развития мировой энергетики и необходимо диверсифицировать используемые первичные источники энергии. Во многих странах начались активные исследования и разработки по поиску новых более экологически безопасных источников энергии и технологий их преобразования. К таким источникам относятся и природные ВИЭ [22].

В результате многие технологии энергетического использования ВИЭ приблизились к порогу конкурентоспособности с традиционными технологиями, базирующимися на использовании традиционных органических энергоресурсов. В некоторых случаях (при благоприятных климатических условиях) ВИЭ превзошли этот порог для некоторых практических приложений.

В силу интенсивно проводимых исследований и освоения современных промышленных технологий стоимость энергии и биотоплива, производимых с помощью ветроустановок, фотоэлектрических преобразователей, солнечных тепловых, геотермальных и биоэнергетических установок, удалось снизить в разы [27].

Это дало основание рассматривать «возобновляемую энергетику» как один из ключевых трендов развития мировой энергетики, способных содействовать решению глобальных энергетических и экологических проблем человечества, обусловленных неуклонным ростом населения и растущим потреблением энергии, которое к 2020 г. по прогнозам должно возрасти до 18–20 млрд т н.э. в год [23].

По оценкам профессора В.Н. Половинкина, в зависимости от сценариев развития мировой энергетики мировое потребление первичной энергии вырастет к 2050 г. примерно в 1,2–1,6 раза. При этом доля новых ВИЭ (без «большой» гидроэнергетики) к 2050 г. достигнет 10–35 % мирового потребления первичной энергии (в 2010 г. – 1,8 %) [14].

Одновременно ожидаются существенные структурные изменения мирового потребления: доля для «традиционной» нефти к 2050 г. будет снижена на 10–15 % по сравнению с современным уровнем; потребление природного газа возрастет в 2–2,5 раза; потребление угля может вырасти в 2 раза; использование ВИЭ возрастет в 3–4 раза; производство атомной и термоядерной энергии может увеличиться в 1,5–2,5 раза [13]. Отметим следующее: использование атомной энергии требует применения адекватных мер очистки продуктов выброса в воздух тепловых электростанций; термоядерная энергетика уже несколько десятилетий рассматривается как перспективное направление, однако каких-либо действующих прототипов таких установок пока не создано.

По данным Биоэнергетической ассоциации Украины (БАУ), самыми крупными производителями «зеленой» электроэнергии являются 7 стран, суммарные мощности которых составляют 71,5 % мировых (470 ГВт, без учета гидроэнергии): Китай, США, Германия, Италия, Испания, Япония, Индия [6].

Доля мировой энергии, полученной с использованием ВИЭ, в общем объеме конечного энергопотребления растет достаточно скромными темпами: она увеличилась с 17,5 % в 2010 г. до 18,3 % в 2014 г. [8].

По данным транснациональной корпорации British Petroleum, на долю ВИЭ (включая биотопливо) будет приходиться 18 % роста предложения энергоносителей до 2030 г. и 21 % – в последующий период [3, 26].

Согласно прогнозу научно-технологического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России, «мировое потребление энергии на основе ВИЭ к 2035 г. может вырасти почти в 2 раза. Наибольший рост потребления будет наблюдаться в США, ЕС и Китае. Еще более заметную роль ВИЭ будет играть в производстве электроэнергии: к 2035 г. ее доля вырастет почти в 2,5 раза» [15].

Стратегии развития возобновляемой энергетики ЕС, США и Китая [1] предусматривают увеличение ВИЭ в энергопотреблении на 27 % для снижения выбросов парниковых газов на 40 % по сравнению с 1990 г. и рост доли ВИЭ в общей генерации электроэнергии до 20 % (в США – к 2020 г., а в Китае – к 2030 г.).

**Важнейшие направления использования информационно-телекоммуникационных технологий при разработках оборудования на основе ВИЭ, производстве электроэнергии, передаче, распределении и потреблении.** В настоящее время широкое использование ИТКТ характерно для различных сфер деятельности, в том числе и электроэнергетики. При этом, как уже отмечалось выше, возможны различные сочетания пар «средство производства энергии с использованием ВИЭ – потребитель (или потребители) энергии».

В общем случае можно указать следующие направления использования ИТКТ в сфере создания и использования энергогенерирующих мощностей, использующих ВИЭ.

1. Проведение теоретических исследований, связанных с производством энергии на основе ВИЭ, в том числе путем выполнения математического моделирования.

2. Накопление и обобщение данных, связанных с использованием ВИЭ, потреблением полученной таким образом энергии. Повторим, что при этом широко используются компьютерные методы анализа временных рядов, в том числе параллельных временных рядов.

3. Проведение экспериментальных исследований, связанных с созданием соответствующего оборудования, производством и использованием ВИЭ. Сюда мы отнесем, в частности, компьютеризованные информационно-измерительные системы, средства математического моделирования и пр.

4. Компьютеризованное проектирование оборудования, предполагающего использование ВИЭ (применение САД-систем). В этот пункт мы включаем также формирование «баз данных» с типовыми элементами конструкций, а также баз данных по типовым (уже апробированным) техническим решениям, связанным с проектированием ВИЭ.

5. Автоматизация промышленного производства оборудования, основанного на использовании ВИЭ. Это позволяет снизить издержки его производства и, как следствие, стоимость оборудования при продажах.

6. Контроль состояния и управление режимами эксплуатации такого оборудования, в том числе контроль в дистанционной форме [32]. Отметим, в частности, что для солнечных панелей может осуществляться автоматический мониторинг положения солнца и поворот этих панелей перпендикулярно направлению падения солнечных лучей. Кроме того, при возникновении сильных порывов ветра такие панели могут автоматически переводиться в горизонтальное положение и фиксироваться в нем (при таких условиях «парусность» панелей обычно является минимальной).

7. Согласованное управление различными видами оборудования, обеспечивающего получение энергии с применением традиционных источников энергии и ВИЭ. При этом необходимо учитывать такие факторы: *а*) периодический характер получения электроэнергии с использованием солнечных панелей (только в светлое время суток и только при отсутствии значительной облачности). При этом прогноз уровня облачности может браться из интернет-источников даже в автоматическом режиме; *б*) незакономерный характер производства электроэнергии на основе использования энергии ветра. Однако скорости ветра также могут достаточно эффективно прогнозироваться с использованием информации из Интернета. Отметим, что ветроэлектрогенераторы могут работать и в случае отрицательных температур (при условии использования адекватных технических решений, соответствующих смазок, обогрева устройств для предотвращения их обмерзания и пр.).

8. Распределение энергопотоков в сетях, в том числе потоков энергии, полученной с использованием ВИЭ (с учетом естественных ограничений на использование солнечной энергии, энергии ветра, приливов и пр.). При этом приходится учитывать следующие факторы: *а*) в настоящее время основным средством накопления электрической энергии являются аккумуляторы, в том числе применяемые в составе «источников бесперебойного питания». Несмотря на значительный объем исследований и разработок, относящихся к «суперконденсаторам», применение их для сколько-нибудь длительного хранения больших объемов энергии пока не слишком эффективно – из-за относительно больших токов утечки. В то же время литий-ионные и литий-полимерные аккумуляторы пока имеют значительно большую стои-

мость по сравнению с традиционными свинцово-цинковыми; б) предельные скорости изменения интенсивности выработки энергии (включая электрическую, и особенно тепловую, энергию) для большинства традиционных видов «генерирующих мощностей» являются достаточно ограниченными; в) потребление электрической и тепловой энергии во многих случаях являются взаимосвязанными. В частности, электроэнергия или газовое топливо могут использоваться для «локальной» выработки тепла в отдельных помещениях (при этом, например, для теплиц может применяться не только природный газ, но и искусственно полученный биогаз). Такое техническое решение может быть экономически рациональной альтернативой по отношению к централизованному теплоснабжению зданий (оно очень широко применяется в России, а за рубежом является значительно менее популярным). В частности, централизованное теплоснабжение за рубежом практически не применяется для коттеджных зданий в большинстве развитых стран. Для объективности отметим, что в большинстве таких стран климат является менее «суровым», чем в России; г) надежность функционирования линий электропередач, в том числе при потенциальных возможностях значительных ветровых воздействий, «обмерзаниях» электропроводов и пр., требует непрерывного дистанционного контроля и, при необходимости, автоматического принятия адекватных мер реагирования – например, путем создания «управляемых коротких замыканий» для прогрева проводов с целью ликвидации ледяной корки на них.

9. Контроль «качества» производимой/поставляемой электрической и тепловой энергии, в том числе получаемой с использованием ВИЭ, фиксация характеристик такого качества [1, 2] в объективной форме.

10. Накопление в компьютерных базах данных информации, связанной с производством энергии на основе использования ВИЭ, относящейся к оборудованию, предназначенному для выработки энергии на основе ВИЭ.

Таким образом, использование ИТКТ обеспечивает широкий спектр возможностей для проектирования, выпуска и использования оборудования, обеспечивающего получение энергии на основе ВИЭ.

**Сравнение показателей развития энергетики, основанной на использовании ВИЭ, в ряде зарубежных стран.** Согласно данным по общей выработке электроэнергии на основе ВИЭ с учетом «больших» ГЭС, Россия значительно превосходит другие страны Каспийского региона, однако уступает США и Китаю (табл. 2).

Таблица 2 – Динамика общей выработки электроэнергии на основе использования ВИЭ (млрд. кВт × час)

| Год / Страна | Азербайджан | Россия | Великобритания | Иран | Китай | США | Казахстан | Финляндия | Туркменистан | Германия |
|--------------|-------------|--------|----------------|------|-------|-----|-----------|-----------|--------------|----------|
| 2000         | 1           | 163    | 15             | 13   | 201   | 398 | 14        | 23        | 0            | 41       |
| 2001         | 1           | 178    | 16             | 14   | 300   | 300 | 16        | 21        | 0            | 44       |
| 2002         | 1           | 163    | 17             | 17   | 302   | 398 | 17        | 20        | 0            | 52       |
| 2003         | 1           | 158    | 16             | 18   | 298   | 399 | 17        | 19        | 0            | 57       |
| 2004         | 2           | 179    | 18             | 17   | 396   | 398 | 16        | 27        | 0            | 62       |
| 2005         | 3           | 178    | 20             | 27   | 400   | 398 | 15        | 24        | 0            | 63       |
| 2006         | 2           | 178    | 21             | 29   | 408   | 400 | 15        | 21        | 0            | 78       |
| 2007         | 2           | 179    | 21             | 28   | 500   | 398 | 15        | 22        | 0            | 96       |
| 2008         | 1           | 168    | 23             | 13   | 600   | 400 | 14        | 31        | 0            | 99       |
| 2009         | 2           | 178    | 29             | 14   | 605   | 401 | 14        | 21        | 0            | 101      |
| 2010         | 3           | 170    | 29             | 16   | 800   | 403 | 15        | 27        | 0            | 110      |
| 2011         | 2           | 170    | 38             | 17   | 800   | 588 | 15        | 24        | 0            | 130      |
| 2012         | 1           | 170    | 42             | 17   | 1000  | 565 | 15        | 30        | 0            | 147      |
| 2013         | 1           | 181    | 57             | 18   | 1100  | 570 | 15        | 28        | 0            | 160      |
| 2014         | 1           | 179    | 68             | 17   | 1300  | 597 | 15        | 29        | 0            | 170      |

Источник: составлено по данным [30].

В наглядной форме сравнение производства электроэнергии с использованием ВИЭ в разных странах представлено на рисунке 2. При этом для вертикальной оси в силу значительных различий в показателях для разных стран принят логарифмический масштаб, а данные для Туркмении (значение равно «0») и Азербайджана (значение равно «1») не приведены.

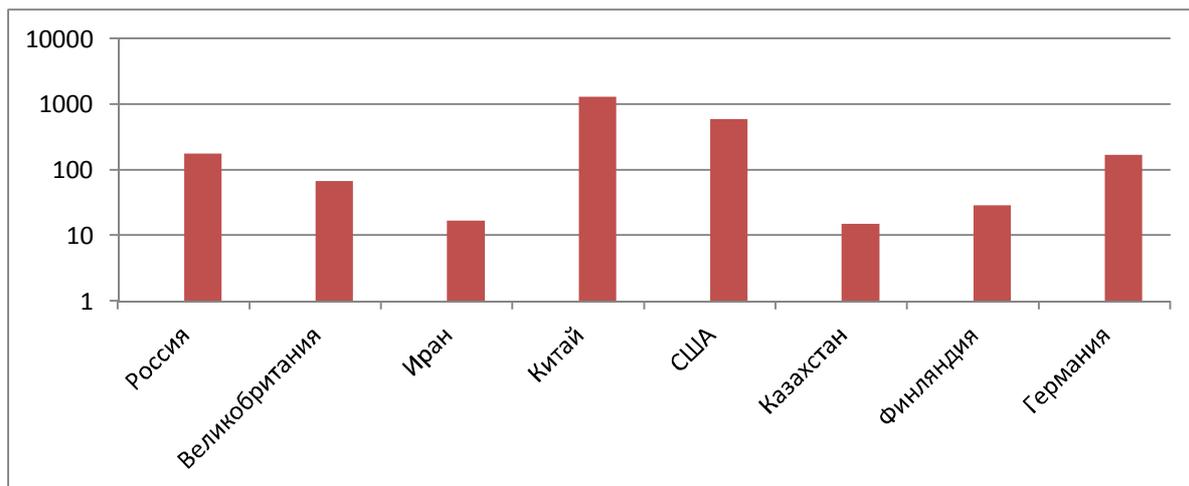


Рисунок 2 – Сравнение производства электроэнергии с использованием ВИЭ в различных странах (2014 г.) по [30]

Представляет также интерес сравнение относительных величин производства электроэнергии в тех же странах с использованием ВИЭ (рис. 3). Для расчетов были взяты численности населения тех же стран в 2014 г. с сайта <https://mostinfo.su/6614-chislennosti-naseleniya-stran-mira-v-2014-godu.html>. Отметим, что часть этих данных представляет собой «оценки», а не результаты статистических обследований.

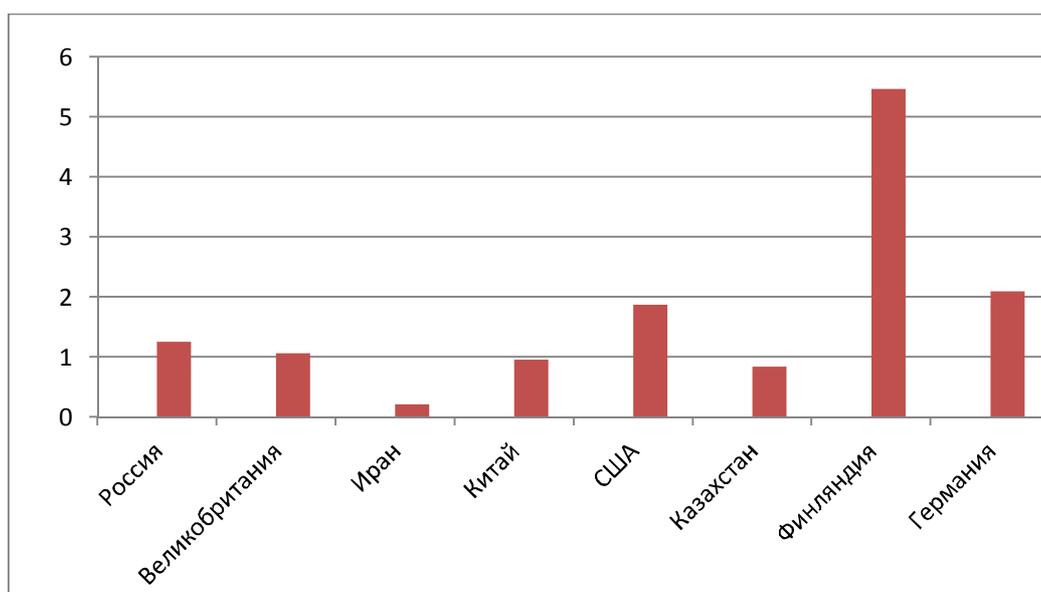


Рисунок 3 – Сравнение производства электроэнергии с использованием ВИЭ в некоторых странах (в млрд кВт·ч / 1 млн чел. населения)

Кроме того, автором была рассчитана матрица коэффициентов парной корреляции (КПК) по Пирсону для данных о выработке электроэнергии в ряде стран из представленной выше таблицы 2 (по информации за 2000–2014 гг.). Из рассмотрения была исключена страна с «нулевыми» значениями показателей (Туркмения), так как при этом использование формул для расчета КПК приводит к операциям «деления на ноль».

Жирным шрифтом увеличенного размера выделены ячейки с наиболее высокими положительными коэффициентами корреляции. Такие значения показывают, что между ростом показателей за указанный период времени для соответствующих пар стран имеется «тесная линейная связь». В содержательном плане это можно интерпретировать как «одинаковый характер роста» в этих парах стран в течение рассматриваемого периода времени.

Таблица 3 – Верхний треугольник матрицы парных коэффициентов корреляции (по Пирсону) в отношении динамики производства электроэнергии на основе ВИЭ

| Страна         | Азербайджан | Россия | Великобритания | Иран  | Китай       | США         | Казахстан | Финляндия   | Германия |
|----------------|-------------|--------|----------------|-------|-------------|-------------|-----------|-------------|----------|
| Азербайджан    | 1           |        |                |       |             |             |           |             |          |
| Россия         | 0,33        | 1      |                |       |             |             |           |             |          |
| Великобритания | -0,20       | 0,37   | 1              |       |             |             |           |             |          |
| Иран           | 0,48        | 0,38   | -0,11          | 1     |             |             |           |             |          |
| Китай          | -0,09       | 0,36   | <b>0,96</b>    | -0,12 | 1           |             |           |             |          |
| США            | -0,19       | 0,12   | <b>0,88</b>    | -0,06 | <b>0,85</b> | 1           |           |             |          |
| Казахстан      | -0,19       | -0,29  | -0,25          | 0,09  | -0,30       | -0,19       | 1         |             |          |
| Финляндия      | -0,08       | 0,22   | 0,59           | -0,27 | <b>0,70</b> | 0,54        | -0,44     | 1           |          |
| Германия       | -0,08       | 0,35   | <b>0,94</b>    | -0,05 | <b>0,98</b> | <b>0,87</b> | -0,36     | <b>0,66</b> | 1        |

Источник: составлено автором.

Дадим оценку статистической значимости коэффициентов парной корреляции (КПК), приведенных в предшествующей таблице. Во временных рядах, использованных для построения корреляционной матрицы, имеется по 15 точек (за 2000–2014 гг.). Поэтому количество степеней свободы составляет 13. Выполним оценки t-факторов по методике из [10, с. 175] с использованием «таблицы V» приложений.

Таблица 4 – Результаты расчетов t-факторов для КПК по Пирсону (см. предшествующую таблицу)

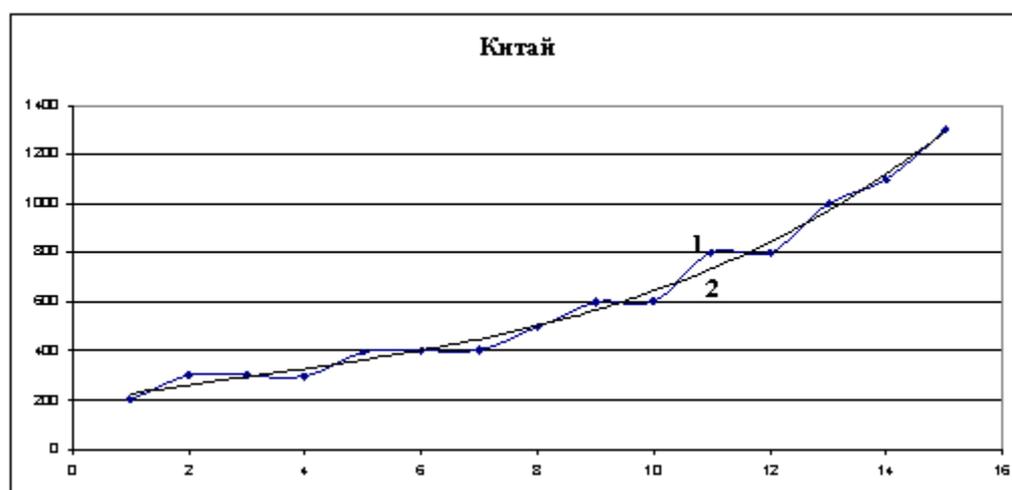
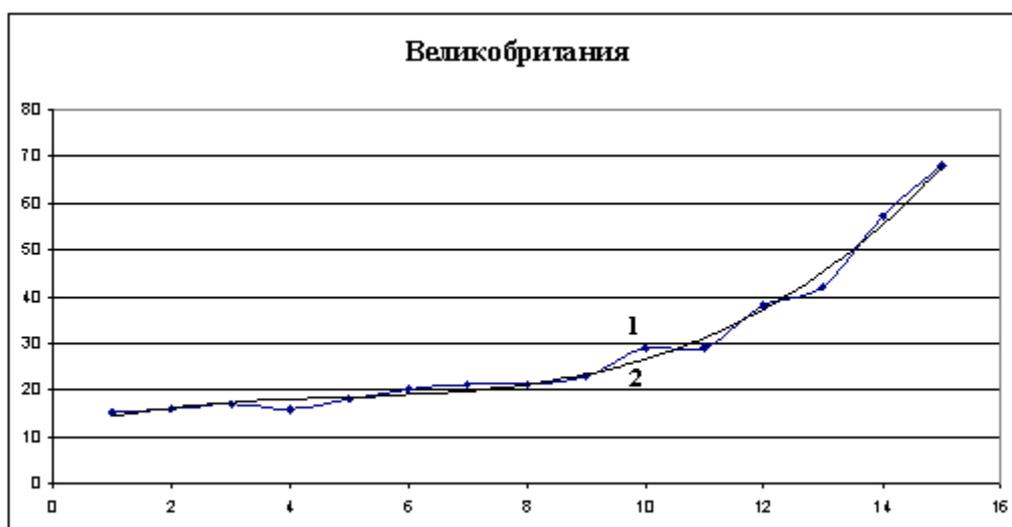
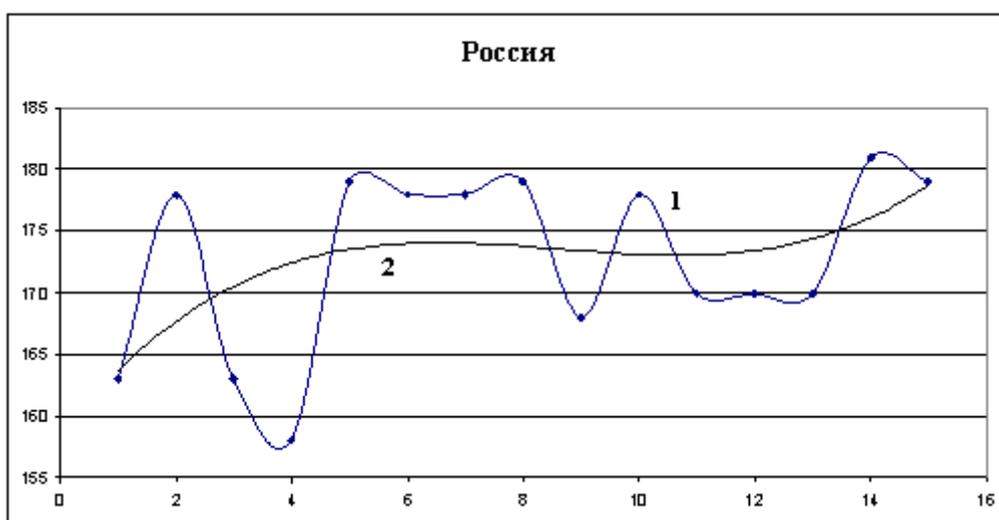
| КПК по Пирсону | t-фактор |
|----------------|----------|
| 0,98           | 17,76    |
| 0,96           | 12,36    |
| 0,94           | 9,93     |
| 0,88           | 6,68     |
| 0,87           | 6,36     |
| 0,85           | 5,82     |
| 0,7            | 3,53     |
| 0,66           | 3,17     |

Источник: составлено автором.

В то же время критическое значение t-фактора для уровня значимости 0,01 при 13 степенях свободы составляет 3,01 (по таблице V приложений из [10]). Следовательно, все включенные в таблицу 4 КПК являются статистически значимыми. В содержательном плане это можно интерпретировать так – с вероятностью, превышающей 99 % тем КПК, которые включены в таблицу 3, можно доверять. Менее одного процента вероятности соответствует тому, что значения этих КПК носят случайный характер.

Приведем теперь данные о росте производства электроэнергии с использованием ВИЭ из таблицы 2 за 2000–2014 гг. в графической форме, а затем выполним регрессионный анализ тех же данных. При этом на графиках по горизонтальной оси время отложено в годах (за «1» берется 2000 год, а за шаг по оси времени – один год). По вертикальной оси результаты представлены в виде абсолютных показателей. На каждом из графиков представлены две линии: линия 1 – на основе исходных данных, показанных в виде точек линия (она получена с использованием сплайн-аппроксимации по этим точкам); линия 2 – соответствует расчетным значениям регрессионного уравнения (кубическое полиномиальное уравнение).

Приведем числовые значения для коэффициентов зависимостей производства электроэнергии на основе использования ВИЭ с применением аппроксимирующего регрессионного уравнения в виде кубического полинома и величины показателей «достоверности аппроксимации» ( $R^2$ ). При  $R^2 = 1$  все расчетные и экспериментальные (фактические) точки на графиках совпадают. Чем  $R^2$  ниже, тем хуже регрессионное уравнение соответствует расположению фактических точек.



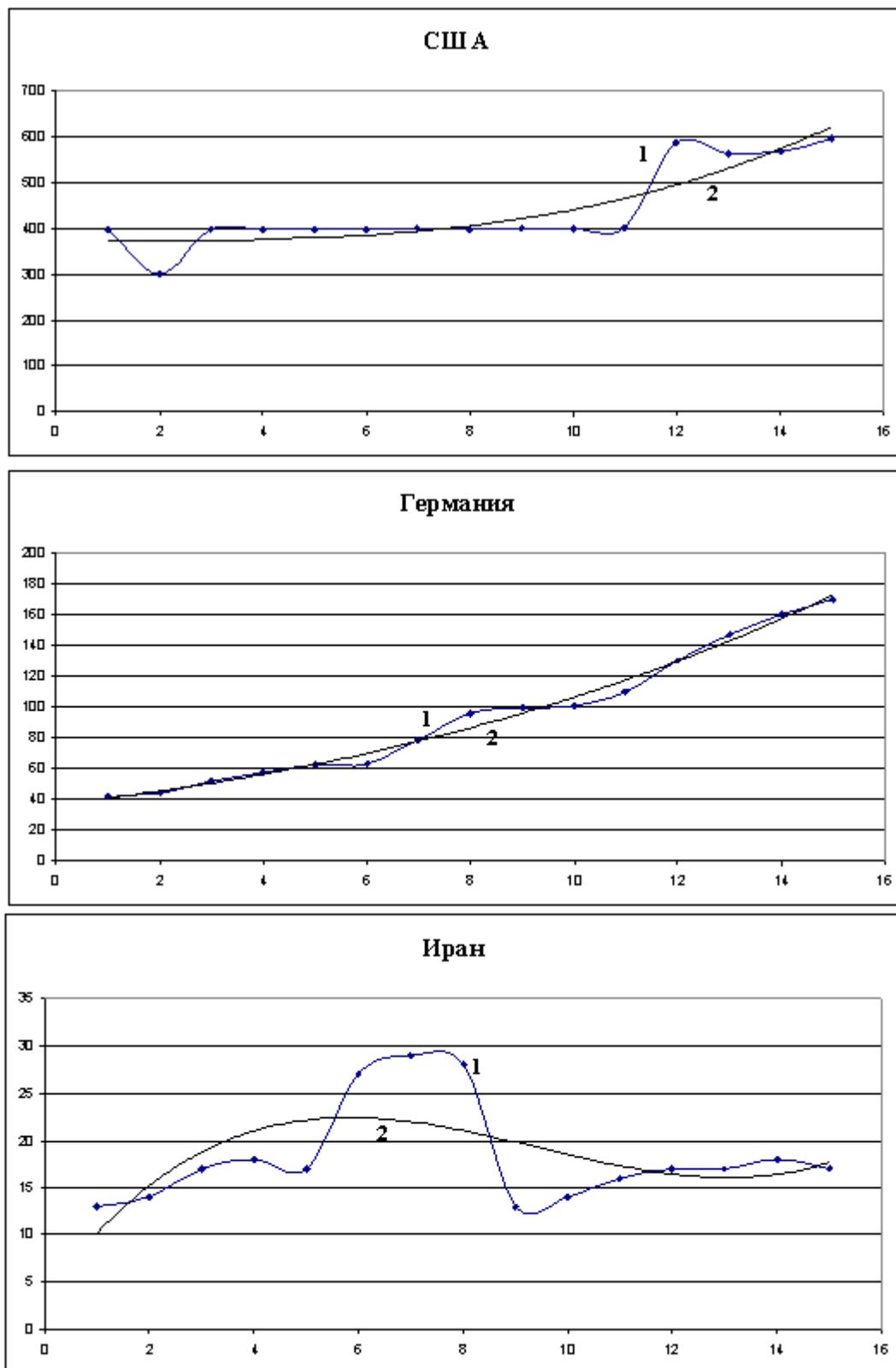


Рисунок 4 – Наглядное представление динамики изменения производства электроэнергии с использованием ВИЭ в России и некоторых других странах (авторские результаты)

Таблица 5 – Математические модели (в форме полиномиальных кубических зависимостей) для роста производства электроэнергии с использованием ВИЭ по некоторым странам

| Страна                        | Регрессионные зависимости и R <sup>2</sup> -факторы для них              |
|-------------------------------|--|
| Россия                        | $y = 0,0288x^3 - 0,7431x^2 + 6,0358x + 158,33$ ; R <sup>2</sup> = 0,2265 |
| Великобритания                | $y = 0,0427x^3 - 0,6202x^2 + 3,4497x + 11,337$ ; R <sup>2</sup> = 0,9911 |
| Китайская Народная Республика | $y = 0,3559x^3 - 3,2885x^2 + 43,125x + 185,84$ ; R <sup>2</sup> = 0,9898 |
| США                           | $y = 0,0913x^3 - 0,3245x^2 + 1,1226x + 371,03$ ; R <sup>2</sup> = 0,7918 |
| Германия                      | $y = 0,0069x^3 + 0,2483x^2 + 3,7744x + 36,619$ ; R <sup>2</sup> = 0,9894 |
| Иран                          | $y = 0,0336x^3 - 0,9515x^2 + 7,6605x + 3,4469$ ; R <sup>2</sup> = 0,3871 |

Источник: рассчитано автором.

К таблице 5, а также приведенным выше графикам на рисунке 4 сделаем следующие примечания.

1. Для России и Ирана значения R<sup>2</sup> низкие, поэтому использовать полученные аппроксимирующие зависимости в прогностических целях нельзя. Возможно, для этих стран целесообразнее было бы использовать регрессионные уравнения, построенные по данным только за несколько последних лет.
2. Для Великобритании и, особенно, Китайской Народной Республики целесообразно использование кубической зависимости для представления математической модели. Для Германии коэффициент при x<sup>3</sup> невысок. Поэтому можно было бы ограничиться и квадратичной зависимостью роста производства электроэнергии на основе использования ВИЭ от времени.
3. Для США величина R<sup>2</sup> невысокая. Поэтому регрессионное уравнение имеет низкие прогностические возможности. Причина – наличие на графике «полки» с примерно одинаковым значением анализируемого показателя в течение нескольких лет подряд (см. линию 1 для США на рис. 4).

**Анализ развития солнечной энергетики.** Пятнадцатилетний период стремительного развития рынка солнечной энергетики, показывает стабильные индикаторы роста объемов ввода новых средств генерации в 2012–2014 гг. (рис. 5). Этот сегмент энергетики, основанной на использовании ВИЭ, сохраняет свои уверенные позиции в энергетической политике стран-лидеров отрасли – США, Китая, Японии, Индии, ЮАР, Германии, Италии [19].

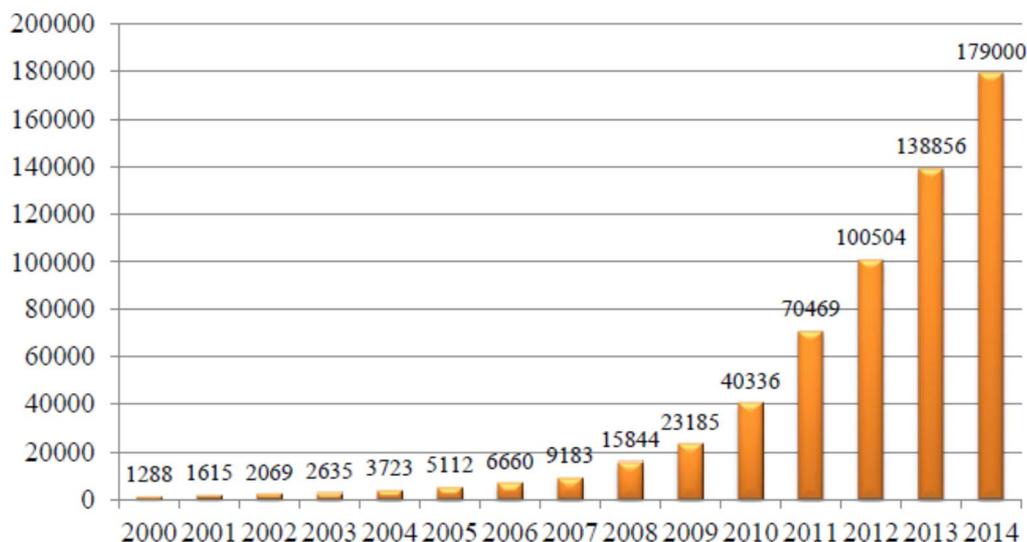


Рисунок 5 – Динамика роста объемов установленной мощности солнечной генерации в мире в период с 2000 по 2014 г., МВт (по данным Европейской ассоциации солнечной энергетики EPIA4) [29]

Отметим, что для производства электроэнергии с использованием солнечных панелей могут применяться различные варианты их расположения: на крышах зданий; в стенах зданий, в том числе и в сочетании с расположением их на крышах; в виде отдельно стоящих конструкций на тех территориях, на которых размещены обслуживаемые здания (т.е. вблизи мест энергопотребления); на «свободных» землях, преимущественно непригодных для застройки зданиями и использования в сельскохозяйственных целях, и пр.

Помимо общего роста производства электроэнергии с помощью солнечных электростанций растут и их мощности. Так, согласно сообщениям в Интернете, в Объединенных Арабских Эмиратах начато строительство такой «наземной» электростанции мощностью 700 МВт, причем высота сооружения будет достигать 260 м ([https://tvzvezda.ru/news/vstrane\\_i\\_mire/content/201709170722-rw02.htm](https://tvzvezda.ru/news/vstrane_i_mire/content/201709170722-rw02.htm)).

Китай за трехлетний период превратил солнечную энергетику в гигантскую отрасль благодаря активной поддержке государства. По состоянию на декабрь 2014 г., суммарная установленная мощность солнечной генерации в стране достигла 28 ГВт. Только в 2014 г. мощность всех построенных электростанций составила 10,6 ГВт – одна четверть от мирового объема введенной солнечной генерации. Объективно этому способствует и наличие многочисленных высокогорных участков на территории страны: туда сложно передавать электроэнергию с использованием линий электропередач или кабелей; расположение солнечных панелей на больших высотах значительно увеличивает интенсивность поступающей солнечной энергии на единицу площади панелей – за счет снижения поглощения облаками, запыленным воздухом и пр. Кроме того, Китай сохранил за собой лидирующие позиции в производстве солнечных модулей – основного компонента электростанций [19].

Судя по сообщениям в Интернете (<https://hightech.fm/2018/02/09/floating-pv-plan>), за рубежом предпринимаются попытки размещения солнечных панелей и в морских акваториях (на понтонах), в том числе для создания весьма мощных генерирующих мощностей (<https://nplus1.ru/news/2018/03/28/solar>).

Регрессионный анализ представленных на рисунке 5 данных по производству электроэнергии с использованием солнечных панелей показал следующее:

1) для кубической полиномиальной зависимости:

$$y = 151,03x^3 - 1940,3x^2 + 7668,5x - 5901,4; \quad R^2 = 0,9979;$$

2) для степенной зависимости:

$$y = 632,8e^{0,3745x}; \quad R^2 = 0,9869.$$

Таким образом, кубический полином дает несколько лучшие результаты по показателю  $R^2$ . Однако для степенной зависимости значение  $R^2$  примерно одинаковое. Поэтому для прогнозных целей (по крайней мере, в случае краткосрочных прогнозов) можно применять оба эти уравнения.

**Выводы.** 1. Приведенные в статье результаты свидетельствуют о том, что высокие темпы экономического роста стран возможны при переходе к ресурсоэффективным моделям развития. Структурные изменения мирового потребления энергии связаны с существенным возрастанием использования ВИЭ (в 3–4 раза), источники которых являются практически неисчерпаемыми.

2. Наличие значительного потенциала развития ВИЭ и, в первую очередь, солнечной энергетики, может стать катализатором развития экономики и привести к возникновению совокупных синергетических эффектов во всех отраслях и сферах деятельности на основе повышения инвестиционной привлекательности и проведения институциональных рыночных преобразований.

3. Развитие «возобновляемой» энергетики сдерживается многочисленными факторами, в том числе недостаточностью проводимых исследований, определяющих эффективность ее развития и учитывающих следующее:

- разработку математических моделей роста производства энергии на основе ВИЭ и оценку возможностей использования их для целей прогнозирования;
- анализ технических возможностей и целесообразности использования ВИЭ для энергообеспечения различных категорий потребителей и др.

4. В работе представлены некоторые математические модели изменения рассматриваемых показателей энергетики во времени, в том числе в отношении «синхронности» изменения этих показателей в различных странах.

5. Рассчитанная автором матрица коэффициентов корреляции для данных о выработке электроэнергии в ведущих странах мира (по информации за 2000–2014 гг.) показала высокие значения этих коэффициентов для некоторых пар государств. Это может интерпретироваться как наличие «тесной линейной связи» и «одинакового характера роста» в этих странах.

6. Математические модели (в форме полиномиальных кубических зависимостей) для роста производства электроэнергии с использованием ВИЭ по некоторым странам мира и анализ возможностей их использования позволят сделать следующие выводы:

- для России и Ирана использовать полученные аппроксимирующие зависимости за 2000–2014 гг. в прогностических целях нельзя (для этих стран может быть целесообразным использование регрессионных уравнений, построенный по данным за несколько последних лет из соответствующей таблицы);
- для Великобритании и Китайской Народной Республики целесообразно использование кубической зависимости для представления математической модели;
- для Германии коэффициент можно ограничить квадратичной зависимостью от времени для роста производства электроэнергии на основе использования ВИЭ.

## Библиографический список

1. Асиев А. Т. Автономные системы электроснабжения в отдаленных районах: обоснование целесообразности использования и методы оценки показателей качества электроэнергии на основе имитационного моделирования / А. Т. Асиев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2017. – № 3. – С. 80–94.
2. Асиев А. Т. Разработка многофункционального анализатора показателей качества электроэнергии для контроля автономных систем электроснабжения / А. Т. Асиев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2017. – № 1. – С. 155–170.
3. Акимов А. В. Страны Востока к 2050 г.: население, энергетика, продовольствие, инвестиционный климат / А. В. Акимов, М. Г. Борисов, И. В. Дерюгина, В. Г. Кандалинцев. – М.: Ин-т востоковедения РАН, 2017. – 288 с.
4. Брумштейн Ю. М. Системный анализ совокупности концепций «умных объектов» городской среды в условиях развития информационно-коммуникационных технологий / Ю. М. Брумштейн, В. Ю. Гайфитдинова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2017. – № 1. – С. 24–38.
5. Бушуев В. В. Качественные изменения мировой экономики и энергетики до 2050 г.: Сценарии возможных событий / В. В. Бушуев, А. М. Мастепанов, Н. К. Куричев. – Режим доступа: <http://isem.irk.ru/symp2010/papers/RUS/P1-02r.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
6. Гелетуа Г. Г. Анализ энергетических стратегий стран ЕС и мира и роли в них возобновляемых источников энергии / Г. Г. Гелетуа, Т. А. Железная, А. К. Праховник // Аналитическая записка БАУ. – 01.12.2015. – № 13. – Режим доступа: <http://uabio.org/img/files/docs/uabio-position-paper-13-ru.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
7. Громов А. И. Концепция энергетической стратегии России на период до 2050 года / А. И. Громов // Энергетическая политика. – 2014. – № 2. – С. 37–43.
8. Доклад о Целях в области устойчивого развития, 2017 год / Организация Объединенных Наций. – Нью-Йорк, 2017. – 64 с.
9. Кульков В. М. Новая индустриализация в контексте экономического развития России / В. М. Кульков // Экономика. Налоги. Право. – 2015. – № 2. – С. 81–85.
10. Лакин Г. Ф. Биометрия / Г. Ф. Лакин. – М.: Высшая школа. – 1973. – 343 с.
11. Ляпунцова Е. В. Приоритетные инструменты снижения энергоемкости национальной промышленности / Е. В. Ляпунцова, Н. Р. Гукасова // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 1, ч. 2. – Режим доступа: [ivdon.ru/magazine/archive/n1p2y2015/2793](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1p2y2015/2793), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
12. Май Н. Т. Мультиагентный метод управления энергопотоками в гибридной энергосистеме с источниками возобновляемой энергии / Н. Т. Май, В. А. Камаев, М. В. Щербаков, Т. Х. Чинь // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 2. – С. 30–42.
13. Маркелов, К. А. Место и роль России и прикаспийских стран в энергетике и экономике мира / К. А. Маркелов, В. П. Зволинский. – Астрахань: Астраханский гос. ун-т, 2017. – 249 с.
14. Половинкин В. Н. Энергетические вызовы XXI века / В. Н. Половинкин, А. Б. Фомичев. – 24.09.2015. – Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=6260>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
15. Прогноз научно-технологического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России на период до 2035 года: [Утв. министром энергетики Российской Федерации 14.10.2016]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456026524>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
16. Резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей 25 сентября 2015 года. – Режим доступа: [https://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/ares70d1\\_ru.pdf](https://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/ares70d1_ru.pdf), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
17. Стенограмма Заседания Совета Безопасности Российской Федерации «О дополнительных мерах по обеспечению энергетической безопасности страны» от 29.11.2018 года. – Режим доступа: <http://kremlin.ru/events/president/news/59262>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
18. Тренды и сценарии развития мировой энергетики в первой половине XXI века / А. М. Белогорьев, В. В. Бушуев, А. И. Громов, Н. К. Куричев, А. М. Мастепанов, А. А. Троицкий; под ред. В. В. Бушуева. – М.: Энергия, 2011. – 68 с.
19. Усачёв А. М. Анализ динамики мировой индустрии солнечной энергетики / А. М. Усачева // Наукосведение. – 2015. – Т. 7, № 4. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/10EVN415.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
20. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». – Режим доступа: <http://base.garant.ru/12171109/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
21. Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации (с изменениями и дополнениями)». – Режим доступа: <http://logos-pravo.ru/zakon-no-35-fz-ob-elektroenergetike>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
22. Фортов В. Е. Возобновляемые источники энергии в мире и в России / В. Е. Фортов, О. С. Попель. – Режим доступа: <http://www.reenfor.org/upload/files/77f24b05ec0fe4d2d44dbb6e666f1c7f.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
23. Фортов, В. Е. Энергетика в современном мире / В. Е. Фортов, О. С. Попель. – Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 168 с.
24. Энергетика России: постстратегический взгляд на 50 лет вперед / В. В. Бушуев, А. И. Громов, А. М. Белогорьев, А. М. Мастепанов. – М.: Энергия, 2016. – 96 с.

25. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 № 1715-р. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
26. BP energy outlook 2030. – L., 2011. – P. 18–19; Energy outlook for Asia. – T., 2012. – P. 9. Рассчитано по данным: BP statistical review of world energy. – L., 2013. – P. 7–41.
27. Arent D. J. The status and prospects of renewable energy for combating global warming / D. J. Arent, A. Wise, R. Gelman. // *Energy Economics*. – July 2011. – Vol. 33, issue 4. – P. 584–593.
28. International Energy Agency. – Режим доступа: <https://www.iea.org/weo2018/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
29. Growth of photovoltaics. – Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Growth\\_of\\_photovoltaics](https://en.wikipedia.org/wiki/Growth_of_photovoltaics), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ.
30. IEA Key World Energy Statistics 2016. – Режим доступа: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (Дата обращения: 04.04.2018).
31. International Energy Outlook 2009. Energy Information Administration. Office of Integrated Analysis and Forecasting U.S. Department of Energy. – Washington, DC, 2009.
32. Kodjo Koffi Mawugno. Using Connectionist Methods in the Diagnosis of Networked Control Systems: Application to the Operation of a Wind Turbine / Kodjo Koffi Mawugno, Ajavon Akoda Ayite Senah, Salami Akim Adenkule, Bedja Koffi-Saa // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. – 2015. – № 3. – С. 202–216.

### References

1. Asiev A. T. Avtonomnye sistemy elektrosnabzheniya v otdalennykh rayonakh: obosnovanie tselesoobraznosti ispolzovaniya i metody otsenki pokazateley kachestva elektroenergii na osnove imitatsionnogo modelirovaniya [Autonomous systems of power supply in the remote areas: justification of expediency of use and valuation methods of figures of merit of the electric power on the basis of simulation modeling]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2017, no. 3, pp. 80–94.
2. Asiev A. T. Razrabotka mnogofunktsionalnogo analizatora pokazateley kachestva elektroenergii dlya kontrolya avtonomnykh sistem elektrosnabzheniya [Development of the multifunction analyzer of figures of merit of the electric power for control of autonomous systems of power supply]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2017, no. 1, pp. 155–170.
3. Akimov A. V., Borisov M. G., Deryugina I. V., Kandalintsev V. G. *Strany Vostoka k 2050 g.: naselenie, energetika, prodovolstvie, investitsionnyy klimat* [The countries of the East by 2050: population, power engineering specialist, food, investment climate]. Moscow, Institute of Oriental Studies of RAS Publ., 2017, 288 p.
4. Brumshiteyn Yu. M., Gayfitdinova V. Yu. Sistemnyy analiz sovokupnosti kontseptsiiy “umnykh obektov” gorodskoy sredy v usloviyakh razvitiya informatsionno-kommunikatsionnykh tekhnologiy [Systems analysis of set of concepts of “smart objects” of the urban environment in the conditions of development of information and communication technologies]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2017, no. 1, pp. 24–38.
5. Bushuev V. V., Mastepanov A. M., Kurichev N. K. *Kachestvennye izmeneniya mirovoy ekonomiki i energetiki do 2050 g.: Stsenarii vozmozhnykh sobytiy* [High-quality changes of world economy and power till 2050: Scenarios of possible events]. Available at: <http://isem.irk.ru/symp2010/papers/RUS/P1-02r.pdf>.
6. Geletukha G. G., Zheleznaya T. A., Prakhovnik A. K. Analiz energeticheskikh strategiy stran YeS i mira i roli v nikh vozobnovlyemykh istochnikov energii [The analysis of energy strategies of EU countries and the world and a role renewable energy resources]. *Analiticheskaya zapiska BAU* [Analytical note of BAU], 01.12.2015, no. 13. Available at: <http://uabio.org/img/files/docs/uabio-position-paper-13-ru.pdf>.
7. Gromov A. I. Kontseptsiya energeticheskoy strategii Rossii na period do 2050 goda [Concept of the energy strategy of Russia until 2050]. *Energeticheskaya politika* [Power Policy], 2014, no. 2, pp. 37–43.
8. *Doklad o Tselyakh v oblasti ustoychivogo razvitiya, 2017 god* [Report on the Purposes in the field of sustainable development, 2017 year]. New York, 2017, 64 p.
9. Kulkov V. M. Novaya industrializatsiya v kontekste ekonomicheskogo razvitiya Rossii [New industrialization in the context of economic development of Russia]. *Ekonomika. Nalogi. Pravo* [Economy. Taxes. Right], 2015, no. 2, pp. 81–85.
10. Lakin G. F. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973, 343 p.
11. Lyapuntsova Ye. V., Gukasova N. R. Prioritetnye instrumenty snizheniya energoemkosti natsionalnoy promyshlennosti [Priority instruments of decrease in power consumption of the national industry]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of Don], 2015, no. 1, part 2. Available at: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2793](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2793).
12. May N. T., Kamaev V. A., Shcherbakov M. V., Chin T. Kh. Multiagentnyy metod upravleniya energopotokami v gibridnoy energosisteme s istochnikami vozobnovlyаемой energii [Multiagentnyy a method of management of power flows in hybrid power supply system with sources of renewable energy]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2013, no. 2, pp. 30–42.
13. Markelov K. A., Zvolinskiy V. P. *Mesto i rol Rossii i prikaspiyskikh stran v energetike i ekonomike mira* [The place and a role of Russia and the Caspian countries in power and economy of the world]. Astrakhan, Astrakhan State University Publ., 2017, 249 p.
14. Polovinkin V. N., Fomichev A. B. *Energeticheskie vyzovy XXI veka* [Power Calls of the 21st century]. Available at: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=6260>.
15. *Prognoz nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya otrasley toplivno-energeticheskogo kompleksa Rossii na period do 2035 goda, utverzhden ministrom energetiki Rossiyskoy Federatsii 14.10.2016* [The forecast of scientific and technologi-

cal development of branches of the energy industry of Russia until 2035, is approved by the Minister of Energy of the Russian Federation 14.10.2016]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/456026524>.

16. *Rezolyutsiya, prinyataya Generalnoy Assambleey* [The resolution adopted by the General Assembly]. Available at: [https://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/ares70d1\\_ru.pdf](https://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/ares70d1_ru.pdf).

17. *Stenogramma Zasedaniya Soveta Bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii "O dopolnitelnykh merakh po obespecheniyu energeticheskoy bezopasnosti strany" ot 29.11.2018 goda* [The shorthand report of the Meeting of Security Council of the Russian Federation "About additional measures for ensuring energy security of the country" of 29.11.2018]. Available at: <http://kremlin.ru/events/president/news/59262>.

18. Belogorev A. M., Bushuev V. V., Gromov A. I., Kurichev N. K., Mastepanov A. M., Troitskiy A. A. *Trendy i stsennarii razvitiya mirovoy energetiki v pervoy polovine XXI veka* [Trends and scenarios of development of world power in the first half of the 21st century (centuries)]. Ed. by V. V. Bushuev. Moscow, Enyergiya Publ., 2011, 68 p.

19. Usachev A. M. Analiz dinamiki mirovoy industrii solnechnoy energetiki [Analysis of dynamics of the world industry of solar power]. *Naukovedenie* [Science studies], 2015, vol. 7, no. 4. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/10EVN415.pdf>.

20. *Federalnyy zakon ot 23.11.2009 № 261-FZ "Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti, i o vnesenii izmeneniy v otdelnye zakonodatelnye akty Rossiyskoy Federatsii"* [Federal law of 23.11.2009 No. 261-FZ "About energy saving and about increase in power efficiency, and about introduction of amendments to separate acts of the Russian Federation]. Available at: <http://base.garant.ru/12171109/>.

21. *Federalnyy zakon ot 26.03.2003 № 35-FZ "Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmeneniy v otdelnye zakonodatelnye akty Rossiyskoy Federatsii (s izmeneniyami i dopolneniyami)"* [Federal Law of March 26, 2003 No. 35-ФЗ "On Energy Saving and On Increasing Energy Efficiency and On Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation (with amendments and additions)"]. Available at: <http://logos-pravo.ru/zakon-no-35-fz-ob-elektroenergetike>.

22. Fortov V. Ye., Popel O. S. *Vozobnovlyayemye istochniki energii v mire i v Rossii* [Renewable energy resources in the world and in Russia]. Available at: <http://www.reenfor.org/upload/files/77f24b05ec0fe4d2d44dbb6e666f1c7f.pdf>.

23. Fortov V. Ye., Popel O. S. *Energetika v sovremennom mire* [Power in the modern world]. Dolgoprudny, Intellect Publ., 2011, 168 p.

24. Bushuev V. V., Gromov A. I., Belogorev A. M., Mastepanov A. M. *Energetika Rossii: poststrategicheskyy vzglyad na 50 let vpered* [Power industry of Russia: a post-strategic look on 50 Years ahead]. Moscow, Energiya Publ., 2016, 96 p.

25. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda, utverzhennaya rasporyazheniem Pravitelstva RF ot 13.11.2009 No. 1715-r* [The energy strategy of Russia until 2030 approved by the order of the Government of the Russian Federation of 13.11.2009 No. 1715-r.]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>.

26. *BP energy outlook 2030*. L., 2011, pp. 18–19; *Energy outlook for Asia*. T., 2012, p. 9. It is calculated by data: *BP statistical review of world energy*. L., 2013, pp. 7–41.

27. Arent D. J., Wise A., Gelman R. The status and prospects of renewable energy for combating global warming. *Energy Economics*, July 2011, vol. 33, issue 4, pp. 584–593.

28. *International Energy Agency*. Available at: <https://www.iea.org/weo2018/>.

29. *Growth of photovoltaics*. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Growth\\_of\\_photovoltaics](https://en.wikipedia.org/wiki/Growth_of_photovoltaics).

30. *IEA Key World Energy Statistics 2016*. Available at: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf> (Accessed: 04.04.2018).

31. *International Energy Outlook 2009. Energy Information Administration. Office of Integrated Analysis and Forecasting U.S. Department of Energy*. Washington, DC, 2009.

32. Kodjo Koffi Mawugno, Ajavon Akoda Ayite Senah, Salami Akim Adenkule, Bedja Koffi-Saa. Using Connectionist Methods in the Diagnosis of Networked Control Systems: Application to the Operation of a Wind Turbine. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian journal: control and high technologies], 2015, no. 3, pp. 202–216.