



# ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА

**3**  
**ВЫПУСК**  
**2018**

— МОСКВА —

УДК 620.9 (100) «20»

С.П. Филиппов<sup>1</sup>

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ В ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ПЕРИОД: ДОСТИЖЕНИЯ И РАЗОЧАРОВАНИЯ, ОПЫТ НА БУДУЩЕЕ

*Аннотация.* Выполнен ретроспективный анализ технологического развития энергетики в индустриальный период, охватывающий практически весь XX век. Отмечены имеющиеся, несомненно, технологические достижения. Однако основной упор сделан на выявление причин неудач с реализацией большого числа новых энергетических технологий и соответствующих технологических прогнозов. Показано, что основными причинами этих неудач стали: недооценка сложности решения технических проблем, несостоятельность научно-технических прогнозов в отношении сравниваемых технологий и некорректность оценки их конкурентоспособности, недостаточный учет некоторых институциональных ограничений. Среди технических проблем наиболее важные – создание требуемых материалов и обеспечение необходимого уровня безопасности. Результаты исследования должны помочь в совершенствовании используемых методов технологического прогнозирования в энергетике и разработке более качественных технологических прогнозов на будущее.

*Ключевые слова:* энергетика, энергетические технологии, научно-технический прогресс, научно-технологическое развитие, топливно-энергетические ресурсы, централизация энергоснабжения, интеграция ресурсов, концентрация производства, органическое топливо, ядерная энергия, возобновляемая энергетика.

Хорошо известно, что развитие человеческой цивилизации характеризуется большой неравномерностью. На протяжении всей ее истории периоды бурного расцвета чередовались длительными застоями. Имевшие место ускорения («рывки») в развитии были обусловлены массовым освоением новых технологий и благодаря им – новых территорий. Исторические примеры достаточно хорошо описаны, сделаны попытки их научного обобщения и осмысления (длинные циклы Кондратьева, теория волнового развития Гельдерена, технологические уклады Глазьева, технологические циклы Шимулы, волны инноваций, технологические эры и т.д.) [1-4]. Констатируется существенное ускорение в последнее столетие научно-технического прогресса (НТП) во многих областях человеческой деятельности, в том числе и в энергетике [4, 5]. Более того, говорят о приближающейся эре «технологической сингулярности» (Technological Singularity) – относительно короткого периода времени с чрезвычайно высокими темпами НТП [5, 6]. Предполагается, что в этот период произойдет слияние машин и человека путем интеграции машинных технологий и биологической оболочки челове-

ка, его умственных способностей и возможностей суперкомпьютеров (искусственного интеллекта). Результатом станет окончательное покорение человечеством окружающей природной среды в планетарном масштабе.

Наблюдаемый феномен ускорения НТП может быть связан с увеличением расходов на науку и образование, поскольку НТП имеет явное экономическое измерение, а также с беспрецедентной доступностью образования и научной информации [7]. Поскольку технологические «рывки», как правило, обусловлены достаточно длительными периодами накопления знаний (временами технологического застоя), то говорить о близкой эре технологической сингулярности нужно с очень большой осторожностью. В конце концов, совершенно неизвестно: а) сколько еще нужно времени для того, чтобы накопить необходимый объем соответствующих знаний и вообще какова их «критическая масса» и б) сколько потребуется для этого финансовых ресурсов, которые в каждый период времени весьма ограничены.

Тем не менее имеются достаточно веские основания полагать, что мир вступает в эпоху

<sup>1</sup> Сергей Петрович Филиппов – директор Института энергетических исследований (ИНЭИ) РАН, академик РАН, д.т.н., e-mail: fil\_sp@mail.ru.

новой технологической революции. На это указывают впечатляющие достижения последних двух десятилетий в фундаментальных и прикладных науках, интенсивное развитие новых производственных и информационно-коммуникационных технологий, разработки принципиально новых материалов и т.д., а также быстро множась опыт их успешного практического применения.

Все предыдущие технологические революции скачкообразно, в историческом масштабе, меняли структуру экономики и общества. Это находило прямое отражение в требованиях к энергетике. Есть все основания полагать, что и ожидаемая технологическая революция, и порождаемые ею постиндустриальная экономика и постиндустриальное общество не станут исключением. Следовательно, необходимо вовремя предвидеть те требования, которые будут предъявлены к энергетике в этот раз, чтобы своевременно подготовить адекватный ответ. Для этого, как минимум, нужно осмыслить опыт технологического развития энергетики в индустриальный период, охватывающий весь XX в., оценить имеющиеся, несомненно, успехи и понять причины неудач. Полученные результаты должны помочь в разработке более качественных технологических прогнозов на будущее.

В рассматриваемый период наиболее мощное воздействие на развитие энергетики оказала индустриализация экономики – через спрос на энергию, требования потребителей к составу и качеству поставляемых энергоносителей и т.д. Ответом энергетики стало предложение новых энергоносителей и технологий. В частности, быстрый рост спроса на энергию потребовал освоения новых видов первичной энергии (сначала угля – основного топлива первой промышленной революции, затем нефти, природного газа, ядерной энергии и т.д.). Всеобразное увеличение разнообразия потребителей энергии нашло отражение в предложении рынку новых вторичных энергоносителей (водяного пара и светильного газа в первую промышленную революцию, потом электроэнергии, моторных топлив и др.). Усиление конкуренции стимулировало создание и применение новых технологий производства энергии (паровые машины, вытесненные позже

паровыми турбинами в энергетике и двигателями внутреннего сгорания на транспорте, газовые турбины в энергетике и авиации и т.д.). Энергосбережение и НТП стали основными драйверами внедрения новых технологий конечного использования энергии (газовое освещение сменили лампы накаливания, газоразрядные и светодиодные источники света; огневой нагрев вытесняется резисторным, микроволновым, индукционным; централизованный механический привод в промышленности практически повсеместно заменен электроприводом и т.д.).

Главными технологическими трендами в развитии энергетики стали:

- а) концентрация энергетических производств;
- б) интеграция топливно-энергетических ресурсов (ТЭР);
- в) централизация энергоснабжения потребителей.

Ведущие факторы, обусловившие формирования данных трендов, были во многом схожими и тесно взаимосвязанными. Так, сосредоточение населения и промышленности в городах вызвало концентрацию энергетических нагрузок, затем последовало создание систем централизованного энергоснабжения. Освоение крупных месторождений топлива и сооружение мощных ГЭС вдали от центров потребления привели к формированию энергетической инфраструктуры (трубопроводных и электрических сетей, топливных баз и т.д.). Экономическая целесообразность увеличения единичной мощности энергетических установок стала причиной сооружения крупных энергетических объектов (электростанций, угольных шахт и разрезов, и т.д.). Это, в свою очередь, потребовало повышения параметров энергетического оборудования (температуры и давления рабочего тела в тепловых машинах, напряжения в электрических сетях, рабочего давления в газо- и нефтепроводах и т.д.), что стимулировало НТП в энергетике и способствовало развитию энергетического машиностроения и смежных отраслей промышленности.

Важнейшей характерной чертой энергетики XX в. стало широкое использование электроэнергии – универсального безэнтропийного энергоносителя. Только за последние 40 лет доля электроэнергии в мировом потреблении

конечной энергии (final energy consumption) возросла с 9,4 до 18,1% [8]. Освоение техники высоких и сверхвысоких напряжений позволило сформировать крупные электроэнергетические системы (ЭЭС) – региональные, национальные, межгосударственные и таким образом надежно обеспечить потребителей электроэнергией и снизить затраты на ее доставку. Известная «война токов» (War of Currents) – постоянного и переменного завершилась победой последнего [1]. В результате передача и распределение электроэнергии стали практически повсеместно осуществляться на переменном токе. Постоянный ток сохранил свои позиции в технике малых мощностей (электронные приборы и т.п.). В большой энергетике он нашел применение для целей транспорта электрической энергии на сверхдальние расстояния и обеспечения межсистемных связей без жесткого требования их предварительной синхронизации (вставки постоянного тока). Электроэнергетика превратилась в ключевую отрасль топливно-энергетического комплекса (ТЭК) и стала основным интегратором ТЭР.

Стремительное увеличение объемов потребления энергии в мире в XX в. вследствие высоких темпов роста народонаселения и промышленного производства, неравномерность размещения ТЭР по планете и несовпадение мест их производства с центрами энергопотребления привели к созданию мировых энергетических рынков (нефти, природного газа, угля, нефтепродуктов и др.) и мировой энергетической системы. Многочисленными исследованиями прогнозировался дальнейший бурный рост спроса на энергию, что на фоне панических оценок крайней ограниченности энергоресурсов на планете порождало настоятельные требования поиска новых источников энергии и ее экономии. Также ставился вопрос о дальнейшем развитии мировой энергетической системы на основе интеграции энергетических ресурсов [9-11].

Особые надежды возлагались на ускоренное развитие атомной энергетике, в том числе на основе бридерных технологий и замыкания ядерного топливного цикла. Были предложены проекты создания так называемых «атомных островов» – кустов крупных АЭС, расположенных вдали от густонаселенных районов и обе-

спечивающих за счет этого повышенный уровень ядерной безопасности. На этих «островах» предполагалось с применением новых атомных энерготехнологий на основе термохимических циклов и тепла высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов организовать производство атомного водорода, синтетических жидких топлив, заменителя природного газа, а также синтез-газа (смеси монооксида углерода и водорода) для использования в качестве промежуточного энергоносителя в системах дальнего «атомного» теплоснабжения (схема «Адам-Ева») [12-14]. Однако по техническим и экономическим причинам данные идеи не были реализованы.

После чернобыльской катастрофы (1986 г.) развитие ядерной энергетике в мире на долгие годы практически прекратилось, и последующее восстановление оказалось очень вялым. Недооценка важности надежного обеспечения безопасности ядерных объектов с малой вероятностью крупных аварий с катастрофическими последствиями и технологическая самонадеянность дорого обошлись обществу. Но были и другие причины несбывшихся радужных прогнозов бурного развития ядерной энергетике: недооценка ресурсов ископаемых топлив, прежде всего углеводородов с невысокой стоимостью извлечения, и возможностей НТП в развитии традиционных энергетических технологий. Сегодня грандиозные планы развития ядерной энергетике во всем мире, по сути, всеми забыты.

По техническим и экономическим причинам оказались несостоятельными многочисленные предложения по крупномасштабной интеграции ТЭР и создания на этой основе глобальных энергетических систем. Так, невостребованной осталась концепция новых горизонтально интегрированных энергетических систем (ИЭС), выдвинутая проф. Хефеле [14], в основу которой положена идея интеграции всех имеющихся в регионе первичных энергоресурсов с производством единственного промежуточного энергоносителя – синтез-газа и созданием соответствующей газотранспортной системы. Трубопроводным транспортом синтез-газ предполагалось доставлять в центры потребления, где на его основе должны были производиться необходимые конечные виды энергии (электроэнергия, тепловая энергия, моторные топлива). Кроме того,

синтез-газ мог служить сырьем для химической промышленности. Выявленная исследованиями невозможность гарантированного обеспечения безопасности обращения с огромными объемами токсичного монооксида углерода в густонаселенных районах стала фатальной для данной концепции [15]. Близкие идеи по интеграции ТЭР лежали в основе концепций «водородной энергетики» («водородной экономики») [16-19], «метанольной экономики» [20,21], «метановых» ИЭС [15]. В первом случае в качестве базового энергоносителя выступает водород, во втором – метанол, в третьем – метан.

Идея «водородной энергетики», базирующейся на возобновляемых источниках энергии (ветровой и солнечной), была выдвинута Халдайном еще в начале XX в. [16] в качестве альтернативы электрогенерации на основе угля и нефти, ресурсы которых в то время оценивались как весьма скромные. Однако развитие она получила только спустя полвека трудами Бокриса, который и ввел термин «водородная экономика» [17]. Теперь с помощью широкого использования водорода как экологически чистого энергоносителя, получаемого преимущественно за счет ядерной энергии, предлагалось кардинально решать задачу защиты окружающей среды. Однако возникшие проблемы обеспечения ядерной безопасности АЭС, технические сложности с разработкой высокотемпературных ядерных реакторов и дороговизна создания водородной инфраструктуры встали непреодолимым барьером на пути практической реализации данной концепции. Впрочем, успехи в разработке новых технологий получения водорода (фотоэлектрокаталитических, микробиологических, электролизных и др.), а также фотопреобразователей оставляют надежды на ее востребованность уже в недалеком будущем [18], в частности в форме «солнечно-водородной энергетики» [19].

В качестве альтернативы водородной энергетике Олахом была предложена концепция «метанольной экономики» [20, 21]. Полагалось, что метанол, будучи при обычных условиях жидкостью, по сравнению с водородом обладает хорошей транспортабельностью, лучше подходит для использования в качестве моторного топлива в ДВС и не требует создания чрезмерно

дорогостоящей инфраструктуры. Однако многие негативные физико-химические свойства метанола (достаточно низкая теплота сгорания, коррозионная активность, высокая растворимость в воде) и его высокая токсичность стали причинами того, что данная концепция не получила поддержки, несмотря на многочисленные попытки внедрения метанола в качестве топлива на автомобильном транспорте и в установках распределенной электрогенерации.

В «метановых» ИЭС [15] предлагалось имеющиеся в регионе ископаемые топлива преобразовывать в заменитель природного газа (метан), на основе которого строится региональная энергосистема. Эта концепция, являющаяся, по сути, развитием идей Хефеле, представляется наиболее реалистичной, поскольку может базироваться на существующих системах трубопроводного транспорта природного газа. Реализация ее пока не состоялась по экономическим причинам. Технологии производства из угля заменителя природного газа оказались дорогими и энергорасточительными. Поскольку в то время электрогенерация базировалась преимущественно на паротурбинных технологиях, то получать электроэнергию из угля оказалось дешевле, чем из искусственного газа. Применение более эффективных парогазовых установок и топливных элементов оставляет для «метановых» ИЭС шанс на масштабную реализацию.

Не привели к практическим результатам неоднократные попытки разработать концепцию создания мировой энергетической системы, обеспечивающей интеграцию энергетических ресурсов в глобальном масштабе и за счет этого повысить эффективность энергетического производства [22, 23]. Для электроэнергетики большой эффект виделся в использовании меридиональной и широтной разновременности пиков электропотребления. Но это требовало передачи больших объемов электроэнергии на значительные расстояния и, следовательно, наличия соответствующих линий электропередачи (ЛЭП). Предполагалось, что это будут ЛЭП постоянного тока на сверхвысоком напряжении (1000 кВ и выше).

Утопическими оказались разнообразными предложениями по организации энергоснабжения Земли из космоса и создания соответствующей

глобальной электроэнергетической системы. Предлагалось получать энергию в виде микроволнового или лазерного излучения с «солнечных» спутников [24] или с лунных баз (концепция «лунной энергетической системы») [25, 26]. В обоих случаях исходной была солнечная энергия. Эффект предполагалось достичь за счет более высокой величины солнечного излучения за пределами земной атмосферы, а также практически круглосуточного облучения фотоэлементов [27]. Однако все эти проекты на тот период времени оказались технически сложными в реализации и экономически несостоятельными [28, 29]. Такие же выводы в [29] были сделаны для концепции развития термоядерной энергетики на Земле за счет изотопа гелия  $He^3$ , доставляемого с поверхности Луны [30].

Следует отметить, что все рассмотренные концепции преследовали две основных цели развития энергетики: во-первых, перехода от использования ограниченных на Земле ресурсов органического топлива к практически неисчерпаемым ( $U^{238}$ ,  $Th^{232}$ , дейтерия) или возобновляемым энергоресурсам и, во-вторых, переход к экологически «чистой» энергетике [31]. Однако более полной можно считать концепцию «энергетики устойчивого развития» [32, 33], в рамках которой к двум отмеченным выше целям добавилась еще одна – энергообеспечение устойчивого развития экономики и общества на долгосрочную перспективу. При этом устойчивое развитие трактовалось в соответствии с решениями Конференции ООН по окружающей среде и развитию, состоявшейся в Рио-де-Жанейро в июне 1992 г. [34].

Ресурсную основу энергетики индустриального периода составили органические топлива. На их долю в структуре мирового производства первичной энергии (total primary energy supply – TPES) 40 лет назад (в 1973 г.) приходилось 86,7%, в настоящее время эта величина сократилась до 81,1%, то есть налицо понижательный тренд [8]. До чернобыльской катастрофы (1986 г.) органические топлива активно вытеснялись ядерной энергией. В последнее десятилетие эту роль выполняют ВИЭ. В настоящее время доля ядерной энергии в мировом TPES составляет 4,8%, а ВИЭ – 14,1% против соответственно 0,9 и 12,4% 40 лет назад [8]. В структуре добываемых

в мире органических топлив наблюдается тренд на сокращение доли нефти за счет роста доли природного газа и угля. За период 1973-2014 гг. доля нефти уменьшилась с 46,2 до 31,3%, при этом доля газа увеличилась с 16 до 21,2%, а угля – с 24,5 до 28,6%. Следовательно, можно констатировать, что прогнозировавшееся наступление «эры метана» (Methane Age) пока не состоялось [35]. Но мир движется в этом направлении. Ускорить данный процесс могут различные неэкономические ограничения, в частности, требования по сокращению глобальных выбросов парниковых газов и введение странами моратория на развитие ядерной энергетики, что приведет к замещению угля и ядерной энергии природным газом. Заменить его может интенсивное развитие возобновляемой энергетики за счет стимуляции мерами государственной поддержки или в результате новых впечатляющих достижений НТП в данной области.

В последние десятилетия XX в. технологическое развитие энергетики осуществлялось преимущественно эволюционным путем. В основном оно было связано с повышением эффективности добычи, переработки и использования органических топлив и транспорта энергоносителей, а также с совершенствованием ядерных энергетических технологий. Таким образом проявилась большая технологическая инерционность отрасли. Тем не менее и этот период отмечен многими важными техническими достижениями, оказавшими существенное влияние на развитие энергетики.

В частности, благодаря внедрению технологий многозабойного и наклонного бурения в совокупности с 3D-идентификацией продуктивных пластов удалось снизить стоимость извлечения углеводородов. Освоение в дополнение к ним технологий гидроразрыва позволило вовлечь в оборот трудно извлекаемые ресурсы углеводородов из плотных отложений. Результатом стала «сланцевая революция» в США оказавшая колоссальное дестабилизирующее влияние на мировые рынки нефти, природного газа и других топлив. С созданием плавучих добычных платформ на основе опыта крупнотоннажного кораблестроения стала возможной разработка крупных шельфовых месторождений углеводородов. На основе известных криоген-

ных технологий была создана индустрия производства сжиженного природного газа (СПГ) и его морского транспорта, что позволило сформировать мировой рынок СПГ. Совершенствование горного оборудования обеспечило повышение производительности труда и рентабельности добычи угля, причем как шахтным, так и открытым способом. Все это позволило диверсифицировать мировые энергетические рынки и для многих стран решить проблему обеспечения энергетической безопасности.

Централизация энергоснабжения потребителей требовала совершенствования энергосетевых технологий. Главными технологическими тенденциями в трубопроводном транспорте углеводородов стали повышение давления и увеличение диаметра трубопроводов, что дало возможность увеличить объемы перекачки нефти и газа и таким образом снизить ее стоимость. Промышленно освоенным является давление в магистральных газопроводах около 11 МПа и диаметр трубопровода около 1,5 м. Дальнейшее их повышение ограничено проблемами надежного обеспечения требований прочности и безопасности конструкций трубопроводов, регулирующей и запорной арматуры. Решение их связано с поиском новых конструкционных материалов.

Технологии передачи электроэнергии развивались в направлении повышения напряжения с целью увеличения пропускной способности ЛЭП, сокращения удельных затрат в них, а также снижения потерь энергии при ее передаче. В электроэнергетике для целей дальнейшей передачи больших объемов электроэнергии было освоено напряжение 500-800 кВ. На пути его дальнейшего повышения имеются серьезные экономические и технические проблемы. Для их преодоления нужны новые токопроводящие и электроизолирующие материалы, а также более эффективная коммутационная аппаратура.

Существенный прогресс в эффективности использования органических топлив достигнут на тепловых электростанциях (ТЭС), где ключевая роль принадлежит машинным технологиям производства электроэнергии. Их энергетическая эффективность приближается к технологическим пределам, обусловленным свойствами конструкционных материалов. Передовые па-

рогазовые установки (ПГУ) на природном газе достигли КПД нетто 60-62% [36], а паротурбинные установки (ПТУ) на твердом топливе – 42-43% [37, 38]. Лидером с КПД 63,7% является ПГУ на природном газе мощностью 1613 МВт с двумя газовыми турбинами 9НА.02 фирмы GE Power по 544 МВт каждая и КПД 43,9% [36]. Единичные экземпляры мощных угольных ПТУ с суперсверхкритическими параметрами пара (ССКП) имеют более высокий КПД. В частности, введенный в эксплуатацию в 2009 г. на ТЭС Isogo в Японии блок № 2 мощностью 600 МВт с параметрами пара 25 МПа, 600/620 °С имеет КПД 45%. Такой же КПД имеют 4 блока на ТЭС Yuhuan в Китае (26 МПа, 600/600 °С, 2007 г.). КПД 46% достигнут на ТЭС Waigaogiao в Китае (2 блока по 1000 МВт, 28 МПа, 600/600 °С, 2008 г.) и на ТЭС Lunen в Германии (блок 750 МВт, 28 МПа, 597/609 °С, 2013 г.) [37, 38]. Между тем мировым рекордсменом остается пущенный еще в 1992 г. на угольной ТЭС Nordjylland в Голландии блок № 3 мощностью 400 МВт с КПД 47% (29 МПа, 582/580/580 °С с двойным промперегревом) [37].

Созданная ядерная энергетика базируется на использовании урана-235 и паротурбинных установках. Причем эти установки в силу особенностей применяемых типов ядерных реакторов вынуждены работать преимущественно на насыщенном паре с низкими параметрами (давление 5-6 МПа, температура 250-270 °С) и, следовательно, имеют низкий электрический КПД – около 33%. В результате эффективность использования энергии природного урана оказывается чрезвычайно низкой – около 0,2%. Попытки повысить КПД атомных электростанций (АЭС) за счет освоения более высоких температур путем разработки высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов оказались неудачными. Не были созданы требуемые материалы, не гарантировались необходимые уровни безопасности, не обеспечивалась конкурентоспособность с альтернативными техническими решениями.

Следует отметить, что известны, но пока остаются неосвоенными многие принципиально новые энергетические технологии. В частности, это касается применения в электроэнергетике эффекта сверхпроводимости. В мире реализова-

но относительно небольшое количество демонстрационных проектов на основе так называемых высокотемпературных сверхпроводников (способных переходить в сверхпроводящее состояние при температуре жидкого азота – 77 °К) (сверхпроводящие кабели для глубокого ввода электроэнергии в города, трансформаторы со сверхпроводящими обмотками) [39]. Потребность в достаточно дорогостоящей криогенной системе и сложности ее эксплуатации резко снижают потребительские свойства данной технологии. Видимо, она может стать промышленно привлекательной только в случае успешного завершения поиска материалов с «теплой сверхпроводимостью», то есть способных стабильно работать при комнатной температуре и быть относительно недорогими. Такие поиски могут затянуться на неопределенно долгое время.

Оказались неудачными попытки внедрения в энергетику много обещавших технологий прямого преобразования тепловой энергии в электрическую – МГД-генераторов. Несмотря на значительные усилия не удалось создать ультра жаропрочные материалы с рабочей температурой 2700-3000 °С и решить проблемы надежного обеспечения стабильности свойств высокотемпературной плазмы на крупных установках в реальных условиях работы. Первый в мире МГД-энергоблок электрической мощностью 582 МВт (в составе МГД-генератора 270 МВт и паротурбинной установки К-300-240 на 312 МВт) с 1985 г. сооружался на Рязанской ГРЭС. Однако в 1989 г. финансирование уже почти готовой установки было прекращено. Целевые параметры энергоэффективности МГД-электростанций (КПД 60%) были через 20 лет обеспечены другими технологиями – ПГУ при вдвое более низкой температуре рабочего тела (менее 1500 °С). Не нашли применения в энергетике термоэмиссионные и термоэлектрические генераторы из-за их малой мощности, низкого КПД, высокой стоимости, хотя они рассматривались в качестве высокотемпературных надстроек к традиционным паротурбинным электростанциям [15]. Из-за высокой стоимости пока остаются невостребованными в энер-

гетике в должном объеме технологии прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую (топливные элементы). Наконец, будущим поколениям, возможно, достанутся лавры промышленного освоения термоядерной энергии и создания практически неограниченной по ресурсам термоядерной энергетики. Более чем полувековые интенсивные разработки в данной области все еще далеки от завершения. Это уникальная ситуация, которая говорит о чрезвычайной сложности физических и технических проблем, с которыми пришлось столкнуться [40].

Таким образом, ретроспективный анализ развития энергетики в индустриальный период позволяет заключить, что основными причинами неудач с реализацией большого числа новых энергетических технологий и соответствующих технологических прогнозов стали:

- а) технологические проблемы, прежде всего связанные с разработкой необходимых материалов и обеспечением требуемых уровней безопасности;
- б) проблемы прогнозирования – несостоятельность научно-технических прогнозов в отношении сравниваемых технологий (переоценка НТП по лоббируемым технологиям и недооценка по альтернативным);
- в) экономические проблемы – некорректность технико-экономического сопоставления рассматриваемых технологий и оценки их конкурентоспособности;
- г) неправильная оценка доступных энергетических ресурсов;
- д) недостаточный учет влияния некоторых институциональных ограничений на технологическое развитие энергетики.

Многие крупные интеграционные проекты не были реализованы по политическим причинам, в частности, вследствие наличия непримиримых межгосударственных противоречий. Результаты исследования должны помочь в совершенствовании используемых методов технологического прогнозирования в энергетике и разработке более качественных технологических прогнозов на будущее.



ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Zvorykin A.A, Osmova N.N., Chernyshev V.I., Shukhardin S.V. *History of technology*. M: Publ. house of socio-economic literature, 1962.
2. Kondratiev N.D. *Large cycles of economic conjuncture: Report / Problems of economic dynamics*. M.: Economics, 1989, p. 172-226.
3. Glazyev S.Yu. *The theory of long-term technical and economic development*. M.: VlaDar, 1993. 310 p.
4. Šmihula D. *Long waves of technological innovations*. // *Studia politica Slovaca*, 2011, N2, Bratislava, pp. 50-69.
5. Kurzweil R. *The Singularity Is Near*. Viking Adult, New York, 2005. 432 p.
6. Vinge V. *The Coming Technological Singularity* // *Whole Earth Review*, the Winter 1993 issue, Department of Mathematical Sciences, San Diego State University. 9 p. Available online: <http://www.accelerating.org/articles/comingtechsingularity.html>
7. Koh W.T.H., Leung H.-M. *Education, Technological Progress and Economic Growth*. Singapore Management University, 2003. 29 p.
8. *Key World Energy Statistics*. International Energy Agency, 2016. 80 p.
9. *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind / Donella H. Meadows, Dennis I. Meadows, Jorgen Randers, William W. Behrens III*. Universe Books, New York, 1972. 211 p.
10. *Energy in a finite world: a global system analysis / W. Hafele, Program leader*. – Cambridge, Massachusetts: Bullinger Publ. Comp., 1981. 837 p.
11. *Limits of growth: 30 years later / D.H. Meadows, J. Randers, D.L. Meadows; trans. with English. E.S. Oganessian / ed. N.P. Tarasova*. M.: BINOM. Laboratory of Knowledge, 2012. 358 p.
12. Nakicenovic N., Perry A.M. *Nuclear Development Strategies with Limited Natural Uranium Requirements*. Laxenburg, Austria, International Institute of Applied System Analysis, WP-79-129, 1979. 30 p.
13. Marchetti C. *Geoengineering and the energy island*. Laxenburg, Austria, International Institute of Applied System Analysis, RR-76-1, 1976. 28 p.
14. Hafele W., Martinson D., Walbeck M. *The concept of Novel horizontally integrated energy systems* // *Proc. Of the X World Congress on Automatic Control*. – Munchen, IPAC, 1988. – Vol. 5. P. 155-161.
15. Kaganovich B.M., Filippov S.P., Antsiferov E.G. *Efficiency of energy technologies: thermodynamics, economics, forecasts*. Novosibirsk: Nauka, 1989. 256 p.
16. Haldane J. B. S. *Daedalus or Science and the Future*. A paper read to the Heretics, Cambridge, on February 4th, 1923. 18 p. Available online: <http://bactra.org/Daedalus.html>.
17. Bockris J.O'M., Appleby A.J. *The Hydrogen Economy – An Ultimate Economy?* // *Environment This Month*, 1972, № 1, p. 29-35.
18. Bockris J.O'M. *Hydrogen*. Review // *Materials*, 2011, № 4, p. 2073-2091.
19. Bockris J.O'M. *Solar-Hydrogen Alternative*. Wiley: NY, USA, 1975.
20. Olah G.A. *Beyond Oil and Gas: the Methanol Economy* // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2005, 44, p. 2636-2639.
21. Olah G.A., Goepfert A., Suria Prakash G.K. *Beyond Oil and Gas: the Methanol Economy*. 2nd ed. Wiley VCH: Berlin, Germany, 2009.
22. Hafele W., Sassin W. *The global energy system* // *Behavioral Sci.*, 1979, Vol. 24, N 3, p.160-189.
23. Rudenko, Y. and Yershevich, V. *Is it possible and expedient to create a global energy network?* // *International Journal of Global Energy Issues*, 1991, Vol. 3, No. 3, pp. 159-165.
24. Glaser P. *Solar power from satellites* / *Physics Today*, 1977, No. 3, p. 30-38.
25. Criswell D.K., Waldron R.D. *Lunar system to supply solar electric power to Earth* // *Proc. of the 25 Int. Energy Conversion Engineering Conf.*, Reno, NV, 1990, Vol.1, p. 61-67.
26. Criswell D.K., Waldron R.D. *Lunar solar power system: options and beaming characteristics* // *Proc. of the 43rd Int. Astronautical Federation Congr.*, Paris, 1993.
27. Belyaev L.S., Rudenko Yu.N., Filippov S.P. *Space systems concepts: modes of power supply to Earth* // *Proc. of the Conf. on Alternative Power from Space*, Albuquerque, USA, 1995, p. 945-949.
28. Belyaev L.S., Filippov S.P., Marchenko O.V. *Possible role of power from Space in the 21st century* //

*Proc. of the Conf. on Space Power Systems: Energy and Space for Humanity, Montreal, Canada, 1997, p. 35-40.*

29. *World energy and transition to sustainable development / Belyaev L.S., Marchenko O.V., Filippov S.P., Solomin S.V., Stepanova T.B., Kokorin A.L. // Kluwer Academic Publishers, 2002. 264 p.*

30. *Kulcinski G. L. et al. Fusion energy from the Moon for the 21st century // Proc. of the 2nd Lunar Base Conf., Houston, TX, 1988.*

31. *Hefele V. Energy in the transition period. The main problems // Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Energy and Transport, 1999, No. 5, p. 43-53.*

32. *Energy for a sustainable world / J. Goldemberg, T/B/ Johansson, A.K.N. Reddy, R.H. Williams. New Delhi: Willey Eastern Ltd., 1988.*

33. *Belyaev L.S., Marchenko O.V., Filippov S.P. Energy and the transition to sustainable development // Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Energy and Transport, 1999, No. 2, p. 3-13.*

34. *Koptyug V.A. United Nations Conference on Environment and Development (Rio de Janeiro, June 1992). Inform. Review. Novosibirsk: Publ. of the Siberian Branch of the RAS, 1992. 62 p.*

35. *Rogner H.-H., Messner S., Strubegger M., Schmidt E. The Methane Age: Likely Gains in*

*Current Technologies, Emerging Technologies and Their Likely Consequences, Economic - Political - Geopolitical. - Laxenburg, Austria, International Institute of Applied System Analysis, WP-86-068, 1986. 28 p.*

36. *Turbine Technologies Directory // Modern Power Systems. 20176. V. 37. № 7. P. 24-39.*

37. *Santoianni D. Setting the Benchmark: The World's Most Efficient Coal-Fired Power Plants. Cornerstone. The official Journal of the World Coal Industry. 2015. 5 p. Available online: <http://cornerstonemag.net/setting-the-benchmark-the-worlds-most-efficient-coal-fired-power-plants/>.*

38. *Coal-fired steam power plants. Siemens, 2015. 13 p. Available online: [https://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/steam-turbines/downloads/new/coal-fired-steam-power-plants\\_EN.pdf](https://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/steam-turbines/downloads/new/coal-fired-steam-power-plants_EN.pdf).*

39. *The first in Russia HTSC transformer 1 MVA, 10/ 0,4 kV. E.P. Volkov, E.A. Jafarov, L.S. Fleishman, V.S. Vysotsky, V.V. Sukonkin // Proceedings of the RAS. Power Engineering, No 5, p. 45-56.*

40. *Orlov V.V., Ponomarev L.I. Nuclear Problems of Thermonuclear Energy // Atomic Energy, 2018. Vol. 124, № 2, p. 105-113.*

Поступила в редакцию  
16.04.2018 г.

**S.P. Filippov<sup>2</sup>**

### **POWER TECHNOLOGY DEVELOPMENT IN THE INDUSTRIAL PERIOD: ACHIEVEMENTS AND DISAPPOINTMENTS, EXPERIENCE FOR THE FUTURE**

*Abstract.* A retrospective analysis of the power technology development in the industrial period covering virtually the entire 20th century is conducted. Technology advances that are clearly achieved are noted. However, the paper mainly focuses on identifying the reasons of failures occurred when introducing numerous new energy technologies and relevant technology forecasts. It is shown that the root causes of these failures are as follows: underestimated complexity of technical problem solution, untenable technological forecasts as regards technologies compared and incorrect evaluation of their competitiveness, inadequate consideration of certain institutional constraints. The most important technical problems include creating new materials and providing a required level of safety. The results obtained in this study should facilitate improving technological forecast methods used in the power industry and developing higher-quality technological forecasts for the future.

*Keywords:* power industry, power technologies, technological advances, research and technology development, fuel and energy resources, power supply centralization, resource integration, production concentration, fossil fuel, nuclear power, renewable energy industry.

<sup>2</sup> Sergey P. Filippov – Director of the Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (ERI RAS), Academician of the RAS, Doctor of Engineering, e-mail: fil\_sp@mail.ru