

Новая технологическая революция и требования к энергетике

Сергей Филиппов

Директор, fil@eriras.ru

Институт энергетических исследований (ИНЭИ) РАН, 117186, ул. Нагорная, 31–2

Аннотация

Разворачивающаяся на наших глазах новая технологическая революция радикально меняет облик и условия развития мировой энергетики. Растущий спрос на энергию и изменение его структуры обуславливают потребность в создании прорывных технологий и освоении новых энергоносителей, что сопряжено с затратами значительных ресурсов. Исследования и разработки в энергетической отрасли требуют своевременного предвидения социально-экономических изменений и формулирования траектории развития энергетики.

В статье анализируется возможное влияние новой технологической революции на мировую и отечественную энергетику. Оцениваются текущие и пер-

спективные тренды, такие как: изменение режимов энергопотребления ввиду растущего спроса со стороны домохозяйств и сферы услуг при сокращении потребностей крупной промышленности, цифровизация, формирование мобильной и портативной энергетики и др.

Автор показывает, что в России при сохранении спроса на централизованное энергоснабжение будут развиваться распределенная генерация и когенерация на основе возобновляемых источников энергии, технологий smart grid и иных решений. В статье подчеркивается, что текущая структура национального топливно-энергетического комплекса остается уязвимой к масштабной электрификации транспорта и декарбонизации мировой энергетики.

Ключевые слова: научно-технический прогресс; новая технологическая революция; постиндустриальная экономика; постиндустриальное общество; энергетика; спрос на энергию; требования к энергетике; энергетические технологии; распределенная генерация; мобильная энергетика

Цитирование: Filippov S. (2018) New Technological Revolution and Energy Requirements. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 20–33. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.20.33

В мире разворачивается новая технологическая революция. Об этом свидетельствуют многочисленные впечатляющие достижения в развитии науки и технологий, массированный вывод на рынок принципиально новых инновационных продуктов. Подобные изменения не могут не затронуть энергетический сектор, поскольку удовлетворить растущие потребности позволят лишь новые энергетические технологии и энергоносители. Для этого необходимы значительные ресурсы, а потому особенную актуальность приобретает задача вовремя предвидеть ожидаемые изменения в развитии экономики и общества и те требования, которые будут предъявлены к энергетике будущего.

Всякое прогнозирование основано на анализе предшествующего опыта, в данном случае — предыдущих технологических революций и их влияния на энергетику. Известны многочисленные попытки научного осмысления технологических революций и различные концепции технологического развития человечества. В их числе — теория волнового развития, технологические уклады, волны инноваций, технологические эры, технологические циклы [van Gelderen, 1913; Šmihula, 2011; Зворыкин и др., 1962; Кондратьев, 1989; Глазьев, 1993]. Предпринимались попытки объяснить феномен ускорения научно-технического прогресса (НТП) [Šmihula, 2011; Kurzweil, 2005; Vinge, 1993] через доступ к образованию и научной информации, экономическую востребованность инноваций [Koh, Leung, 2003]. Результаты упомянутых исследований полезны для формирования возможного облика новой экономики и общества.

Вместе с тем наблюдаемые научно-технологические преобразования настолько стремительны и масштабны, что исследование их последствий для мировой и российской энергетики требует дополнительных усилий. Разработка этого направления позволит уменьшить неопределенность технологического развития энергетики и успешно решить проблемы «черных лебедей» — неожиданных событий со значительными последствиями [Taleb, 2007]. Их появления нельзя исключить даже в случае такой высокоинерционной отрасли, как энергетика. Своевременно выявлять в ней «черных лебедей» позволит регулярный мониторинг и тщательный анализ достижений науки и технологий, включая смежные области, и развитие специфичных для энергетики методов технологического прогнозирования [Филиппов, Дильман, 2018]. Сохраняют актуальность и методы системного анализа, успешно применявшиеся ранее к решению исследовательских задач [Каганович и др., 1989] и основанные на физико-техническом и последующем технико-экономическом анализе. Развитие этих подходов может оказаться конструктивным за счет внедрения в них процедур своевременного выявления новых технологий путем регулярного сканирования сектора исследований и разработок (ИиР) с использованием новейших методов анализа «больших данных».

Описываемая технологическая революция особым образом отразится на энергетике России как одного из крупнейших экспортеров сырьевых ресурсов — около половины добываемых на ее территории. В этой связи

нас интересуют прежде всего влияние новой технологической революции на мировой спрос на энергию и состояние мировых топливных рынков, что, впрочем, не отменяет значимости оценки возможных изменений внутреннего спроса.

Ключевую роль в технологическом развитии энергетики играет электроэнергетика как крупнейший мировой потребитель органических топлив. В России на ее долю приходится около 40% используемого в стране природного газа и 50% угля. На развитие электроэнергетики вынуждены ориентироваться и топливные отрасли. Основным потребителем нефтяных моторных топлив выступает транспортный сектор, который уже в обозримой перспективе может претерпеть коренные изменения. Особого внимания поэтому заслуживает место электроэнергии и моторных топлив в экономике будущего.

Технологические революции: накопленный опыт

За последние три столетия мир пережил несколько технологических революций, отразившихся на различных сферах человеческой деятельности и породивших разнообразные отраслевые революции: промышленные, энергетические, транспортные, сельскохозяйственные и т. д. Масштабное внедрение революционных новаций сопровождалось бурным развитием соответствующих отраслей экономики и скачкообразным ростом в них производительности труда и его энерговооруженности. Технологические революции завершались, как правило, формированием в этих отраслях новых технологических укладов, под которыми обычно понимают особого рода структуры, представляющие собой совокупность тесно связанных друг с другом физически и функционально технологий и систем управления ими.

Технологические и промышленные революции часто отождествляют, несмотря на то что существуют различные интерпретации этих процессов, которые делают акцент на их хронологию, технологическом наполнении и полученных результатах [Toffler, 1970; Toffler, Toffler, 2006; Bell, 1973]. И, разумеется, все промышленные революции принципиально различались энергетической составляющей.

Первая промышленная революция (первая половина XVII — начало XIX в.) состояла в переходе от ручного труда к машинному производству. Она базировалась на широком применении водяного пара и паровых машин в промышленности, замещении древесного угля каменноугольным коксом в металлургии, переводе железнодорожного и морского транспорта на паровую тягу. Это позволило механизировать основные технологические процессы и резко повысить производительность труда, сократить производственные и транспортные издержки, расширить товарооборот. Освоение подземной добычи высококалорийного каменного угля и вывод его на рынок сняли ограничения на размещение крупных производств. Уголь стал базовым видом топлива.

Вторая промышленная революция (вторая половина XIX — начало XX в.) была связана с освоением конвейерного производства, обеспечившего выпуск дешевых товаров массового спроса. Это потребовало широкого использования энергоносителей высокой «плотности» (электроэнергии и нефтяных топлив) и двигателей нового типа с большой тягой (электродвигателей и двигателей внутреннего сгорания (ДВС)), а также развития крупнотоннажной органической химии, прежде всего на основе углей. Применение электродвигателей обеспечило высокую производительность труда на установках даже малой мощности. Использование ДВС способствовало дальнейшему развитию железнодорожного и водного транспорта и возникновению новых его видов — автомобильного и авиационного. Как следствие, резко расширилась география поставок сырья, сбыта продукции и повысилась мобильность населения. Благодаря достижениям в химии удалось заметно разнообразить спектр материалов, применяемых в промышленном производстве и бытовой сфере, и совершить «зеленую» революцию в сельском хозяйстве благодаря минеральным удобрениям и средствам защиты растений и животных. Так сформировались базовые отрасли современной экономики — промышленность, транспорт, сельское хозяйство.

Третья промышленная революция (середина XX — начало XXI в.) ассоциируется с расцветом крупной промышленности, массовым внедрением электроники и средств автоматизации технологических процессов, компьютерной техники, информационных и коммуникационных технологий (ИКТ), созданием сети Интернет, началом «цифровой» революции (*digital revolution*) [Toffler, Toffler, 2006]. ИКТ проникли во все сферы производственной и повседневной деятельности человека. Их применение позволило кардинально усовершенствовать управление производственными процессами, снизить издержки и повысить качество конечной продукции, изменить условия и формы организации труда. Конкурентные преимущества получили крупные корпорации, возросла эффективность международного разделения труда, что привело к глобализации производственных отношений и формированию мировых рынков товаров и услуг, в том числе в секторах энергоносителей, энергетического оборудования, нефтесервиса и т. д. [Toffler, Toffler, 2006; Bell, 1973].

Колоссальные изменения претерпела социальная сфера. Активизировались процессы урбанизации, рост мобильности, автомобилизация населения и т. д. Концентрация промышленного производства стимулировала укрупнение городов и образование мегаполисов. Резко повысились уровень и качество жизни людей, коренным образом изменился их бытовой уклад. Беспрецедентное развитие получила сфера услуг — медицина, образование и индустрия развлечений, превратившиеся в ключевые элементы современной экономики. Важнейшим атрибутом сформировавшегося на этой основе общества потребления (*consumer society*) [Baudrillard, 1998] стал безудержный рост спроса на энергию, прежде всего в глубоко преобразованных формах — моторных топлив и электроэнергии.

Ответом на экспоненциальный рост энергопотребления и концентрацию промышленности стали создание мощных установок и сосредоточение энергетического производства на крупных предприятиях (добывающих, перерабатывающих, генерирующих), формирование мощных электроэнергетических и трубопроводных систем, освоение принципиально нового источника энергии — деления тяжелых нестабильных ядер урана, т. е. создание ядерной энергетики.

Новая технологическая революция и ее особенности

В основе очередной технологической революции, по-видимому, будут лежать новые системы управления, материалы, производственные и транспортные технологии, зачастую тесно взаимосвязанные, а потому обеспечивающие значительный синергетический эффект при совокупном применении. Технологические инновации затрагивают все отрасли экономики, изменяя спрос на энергию и требования к поставляемым энергоносителям, т. е. в конечном счете сам вектор технологического развития энергетики.

Развитие науки и возможные последствия

При всякой технологической революции появление новых технологий и материалов базируется на достижениях науки, прежде всего фундаментальной. При становлении нового технологического уклада следует ожидать сохранения тренда на ускорение генерации новых знаний и их коммерциализации. Важнейшая роль при этом будет принадлежать математике, материаловедению, робототехнике и особенно наукам о жизни: физико-химической, молекулярной и клеточной биологии, нейробиологии, бионике и т. д. Успехи в геномике могут привести к созданию «синтетической жизни» (*synthetic life*) [Richardson et al., 2017]; развитие нейротехнологий позволит ускорить разработку нейросетей и нейрокомпьютеров [Горбань, 1998]. Большие надежды на дальнейшее развитие ИКТ и систем защиты информации связаны с созданием квантовых компьютеров и разработкой методов квантовой криптографии [Ladd, 2010].

Популярна гипотеза о приближающейся эре «технологической сингулярности» (*technological singularity*) — относительно коротком периоде времени с чрезвычайно высокими темпами научно-технологического развития [Kurzweil, 2005; Vinge, 1993]. Предполагается, что в этот момент произойдут слияние машин и людей путем интеграции машинных технологий и биологической оболочки человека, соединение его умственных способностей с возможностями искусственного интеллекта и формирование на этой основе человеко-машинных гибридов (киборгов) и их сообществ. Дальнейшие успехи наук о жизни могут привести к созданию андроидов — человекоподобных синтетических живых организмов (роботов-гуманоидов). Высококачественные химические энергоносители будут покрывать их потребности в энергии, в том числе обеспечивать функционирование таких энергоемких узлов, как искусственные мышцы,

наделяющие андроидов подвижностью и позволяющие совершать полезную работу. С этой задачей может справиться глюкоза — наиболее универсальный источник энергии для метаболических процессов всех живых организмов, включая человека. Глюкоза является высококалорийным веществом (около 15.7 МДж/кг) и эффективно производится промышленным путем из доступного сырья (гидролиз крахмала или целлюлозы) или с использованием механизма фотосинтеза из CO_2 , как это происходит в естественных условиях. Впрочем, сегодня трудно в полной мере оценить реальные перспективы создания и риски массового внедрения таких инноваций, их влияние на дальнейшее развитие человеческой цивилизации, экономики, общества и, в частности, энергетики.

Новые системы управления

Новые системы управления, получившие название киберфизических систем (*cyber-physical systems*), призваны синтезировать физический и цифровой миры (виртуальную реальность) посредством интеллектуальных сетевых технологий и сенсоров [Lee, 2008; Khaitan, McCally, 2014]. Ключевая роль в этом процессе отводится специализированным встраиваемым системам (*embedded systems*), в реальном времени управляющим большим числом разнородных объектов на основе высокопроизводительных алгоритмов, микропроцессорной техники, микро- и наноразмерных исполнительных механизмов (электро- и биомеханических), «интеллектуальных» измерителей/счетчиков (*smart meters*) и (био)сенсоров, встроенных непосредственно в объект управления [Heath, 2003; Elk, 2016]. Благодаря им управление станет интеллектуальным, т. е. требующим минимального участия человека, и будет включать аналитические и прогностические функции, принятие решений с использованием ресурсов искусственного интеллекта.

Важная роль будет принадлежать новым средствам коммуникации на базе мобильной связи следующего поколения со скоростью передачи данных в десятки Гбит/с, что сделает повсеместно доступной связь в формате «от устройства к устройству» (*device-to-device, D2D*). Широкое распространение получат интеллектуальные межмашинные интерфейсы (*machine-to-machine, M2M*) и технологии автоматической идентификации объектов, в частности, с использованием радиочастотных меток (*radio frequency identification, RFID*). Расширение функциональности RFID-меток путем интеграции их с сенсорами позволит создавать «умные» продукты (*smart products*). Рост вычислительных мощностей и емкости хранилищ данных в совокупности с повышением эффективности алгоритмов обработки больших объемов разнородной информации и ее защиты (блокчейн-технологии и др.) явится серьезным успехом цифровой революции.

Встраиваемые системы способны обеспечить в режиме реального времени мониторинг состояния объекта (продукта), прогнозирование ключевых его характеристик, в том числе остаточного ресурса, определение оптимального режима взаимодействия с окружением

и автоматическое принятие решений о продолжении использования (функционирования) объекта, его развитии (модернизации) или выводе из эксплуатации. В последнем случае объект в нужное время автоматически направляется на переработку либо захоронение с обеспечением оптимальной рециркуляции ценных компонентов (металлов, пластиков и т. д.), минимизации потребления невозобновляемых природных ресурсов, включая энергетические, и любого другого негативного воздействия на окружающую среду.

Реальную проблему для массового внедрения новых систем управления может представлять обеспечение должного уровня кибербезопасности. К традиционной задаче защиты данных здесь прибавляется новая, на порядок более сложная — защита самой системы управления объекта. Скрытое несанкционированное проникновение, не требующее больших энергетических или финансовых затрат, чревато колоссальным ущербом вплоть до полного разрушения объекта, примером чего служит разрушение центрифуг на заводе по обогащению урана в Иране.

Новые производственные технологии

Новая (четвертая) промышленная революция на базе встраиваемых систем, получившая наименование *Industry 4.0* [Hermann et al., 2015], предположительно позволит резко повысить эффективность производства и сократить потребность в природных ресурсах, в том числе энергетических. Новая промышленность будет формироваться на основе большого числа новых технологий, преимущественно «природоподобных» («дружественных» к окружающей среде и климату) — термин, понимать который следует с определенной долей условности. В природе действует широкий спектр условий: от «мягких» (развитие живых организмов, минерализация, выщелачивание и др.) до экстремальных (минералообразование при сверхвысоких температурах и давлениях и т. д.) — и воздействий (механические, физико-химические, электрофизические и др.).

К перспективным производственным технологиям относятся:

- биоинженерные («живые производственные системы»);
- безмашинные способы формообразования на основе аддитивных технологий и инжиниринг поверхностей с разнообразным высокоэнергетическим воздействием на вещество (излучение различного частотного диапазона, электрические и магнитные поля высокой интенсивности, ионы высоких энергий и др.), многократно повышающим качество продукции, производительность труда и эффективность использования ресурсов;
- интеллектуальные промышленные (био)роботы для конечной сборки компонентов в производственных циклах без участия человека;
- высокоэффективное разделение газообразных и жидких сред;
- высокочувствительные сенсоры для всеобъемлющего 4D-контроля параметров физических полей, свойств и химического состава различных сред

и биологических объектов («техническое зрение», «электронный нос» и др.);

- микро- и нанoeлектромеханические системы и их миниатюрные источники питания, биомеханические устройства («искусственная мышца») с «биохимическим питанием» и т. д.

На основе перечисленных технологий предполагается создание «умных» фабрик (*smart factories*) и «темных» производств (*lights out manufacturing*) — не требующих участия человека (а значит, и освещения), полностью автоматизированных и роботизированных, позволяющих выпускать товары по индивидуальным заказам с низкими затратами. Тем самым будут сокращены неоправданные траты природных ресурсов, характеризующие современное массовое производство, значительная часть продукции которого не находит сбыта и попросту утилизируется. «Умные» фабрики и продукты позволят в полной мере управлять всем производственным циклом — от разработки продукта до его утилизации. В более отдаленной перспективе возможно создание «самовоспроизводящихся машин» (*self-replicating machine*) [Freitas, Merkle, 2004] — «выращивание» необходимых компонентов с их последующей сборкой «на месте» с использованием передовых биотехнологий.

Революционные изменения ожидаются и в технологической платформе сельского хозяйства. Роботизация обработки земли, совершенствование систем мониторинга сельхозугодий, в том числе с применением дронов и космических аппаратов, разработка новых типов сенсоров для контроля состояния почв и выращиваемых культур укладываются в концепцию «точного» (координатного) земледелия (*precision agriculture*) [Zhang et al., 2002; McBratney et al., 2005; Балабанов и др., 2013; Якушев, 2016]. Роботы, системы освещения с регулируемым спектром, светопрозрачные конструкции с большим термическим сопротивлением открывают новые возможности для развития круглогодичного тепличного земледелия. Точное земледелие в совокупности с роботизированным животноводством входит в концепцию интеллектуального сельскохозяйственного производства (*smart farming*). В более отдаленной перспективе можно ожидать массового тиражирования технологий производства натуральных высококачественных белковых продуктов питания (молока, мяса и др.) из растительного сырья с использованием искусственных организмов, включая функциональные элементы сельскохозяйственных животных. Соответствующие технологии уже активно разрабатываются.

Новые производственные технологии требуют серьезного смещения баланса потребляемой энергии в пользу электричества и ужесточения критериев качества энергии и надежности поставок.

Новые материалы

Достижения науки вкупе с новыми производственными технологиями способствуют появлению целого спектра инновационных конструкционных и функциональных материалов с уникальными свойствами. Повсеместное ужесточение природоохранного законодательства обуславливает их использование новыми

требованиями, такими как природоподобность (дружественность к окружающей среде, биосовместимость и биобезопасность при длительном нахождении в естественных условиях, т. е. (био)разложимость на безопасные компоненты (отходы) в относительно короткие сроки. В этой связи можно прогнозировать наибольшую востребованность биоматериалов и их прекурсоров (биосырье для последующей производственной переработки в промышленные товары, продукты питания, фармпрепараты и т. д.). Высоким потенциалом обладают «умные» материалы (со свойствами, изменяющимися под внешним воздействием, т. е. «материалы-хамелеоны», адаптирующиеся к условиям окружающей среды).

Энергетика испытывает острую потребность в разнообразных новых материалах. Разрабатываемые сегодня жаропрочные сплавы и термобарьерные покрытия позволяют довести температуру газов на входе в газовую турбину до 1700–1900°C, что делает возможным увеличение КПД парогазовых установок до 66–68%, а температуры пара на входе в паровую — до 720–750°C. Итогом станет рост КПД паротурбинных установок до 53–55%. 3D-печать в энергомашиностроении нуждается в диспергированных материалах узкофракционного состава, в том числе в тугоплавких (нанопорошки, наночернила).

Электроэнергетика предъявляет спрос на материалы экстремально высокой проводимости для создания новых классов проводников, включая «теплые сверхпроводники» — материалы со сверхпроводящими свойствами при комнатной температуре. Их применение будет способствовать сокращению потерь электроэнергии в сетях. Существует потребность в полупроводниковых и оптических материалах для фотопреобразователей и силовой электроники, электрокатализаторах для повышения КПД электрохимических генераторов и емкости аккумуляторов, высокопористых материалах для более эффективной теплоизоляции.

Добыча трудноизвлекаемых запасов углеводородного сырья требует новых скважинных материалов (в целях снижения вязкости флюидов и увеличения пористости вмещающих пород). «Скользкие» пластики и керамики (материалы с высокой гидрофобностью, малой шероховатостью и большой адгезией к конструкционным материалам) обеспечат значительное снижение гидравлического сопротивления трубопроводов и, следовательно, сокращение расхода энергии на перекачку нефти и других жидкостей. В нефте- и газохимии понадобятся новые высокопроизводительные катализаторы для всех базовых процессов переработки, а также мембранные материалы с управляемыми характеристиками для высокоселективного разделения жидких и газовых сред.

Для повышения безопасности ядерных технологий и достижения термоядерного синтеза необходимы новые радиационно стойкие материалы. Большие ожидания в этом отношении возлагаются на сплавы на основе корректировки изотопного состава исходных компонентов.

С разработкой новых конструкционных материалов связаны надежды на принципиально более высокие уровни энергосбережения. Так, новое поколение композитных материалов на базе синтетических биополиме-

ров, чрезвычайно прочных и легких, обещает революцию в авто- и авиастроении, приведет к существенному сокращению расхода энергии транспортными средствами. Примером может служить разрабатываемая компанией AmSilk «биосталь» — биополимерный, синтетический аналог паучьей нити (*synthetic spider silk*). Преимуществом подобных материалов являются биоразложимость и экологичность — синтезирование генномодифицированными бактериями в биореакторе с питательной средой при температуре около 37°C [Sadowy, 2018].

Создание большей части новых материалов сопряжено с широким применением электрофизических и электрохимических процессов, что означает рост спроса на электроэнергию. Для масштабного выпуска разнообразных углепластиков и иных углеродсодержащих материалов требуются мощные источники углерода. Ими могут выступать ископаемые органические топлива (уголь, природный газ, нефть) и биомасса природного или искусственного происхождения. Использование сложных биомолекул из биомассы в качестве прекурсоров промышленных биоматериалов позволяет сэкономить энергию на синтезе их из простых компонентов.

Новые транспортные технологии

Новая технологическая революция характеризуется следующими основными тенденциями в сфере транспорта:

- увеличение объемов и скорости перемещения людей и грузов;
- широкое распространение электрического и гибридного транспорта, прежде всего в городах, в целях снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду;
- высокие темпы прироста парка «легких» индивидуальных электротранспортных средств (электроскутеры, электросамокаты и т. п.);
- активное освоение воздушного пространства индивидуальным (аэромобили), легковым общественным (воздушные такси) и малотоннажным грузовым (грузовые дроны) транспортом;
- расширение использования беспилотных транспортных средств.

Реализация этих тенденций тем отчетливее, чем больше появляется новых транспортных технологий и систем управления движением разнообразных транспортных средств, в том числе беспилотных в 4D-пространстве (в реальных дорожных и воздушных условиях и реальном времени) [OECD, IEA, 2017]. Ведущие мировые автопроизводители уже вступили в новую технологическую гонку [Toyota, 2017], сосредоточившись на разработке полностью электрических (с внешне подзаряжаемыми аккумуляторами) и гибридных (с электроэнергией, генерируемой *in situ* водородными топливными элементами) автомобилей. Аналогичные схемы энергоснабжения предлагаются для легких пассажирских и грузовых летательных аппаратов. В то время как разработка новых дизельных двигателей для легковых автомобилей постепенно сворачивается, расширяются масштабы использования

традиционного городского электротранспорта — равно под- и наземного, что актуализирует вопрос оптимального соотношения общественного и индивидуального транспорта.

Популярность «умных» продуктов и дальнейшее развитие интернет-торговли вкупе с роботизированными транспортными средствами могут полностью изменить логистические схемы как на производстве, так и за его пределами. «Умные» продукты расширяют возможности отслеживания (трекинга) их временного и пространственного распространения, принципиально преобразуя характер планирования производства и сбыта товаров, сбора и переработки отслуживших свой срок изделий, утилизации отходов в сторону ресурсосбережения и охраны природной среды. Результатом массового применения «умной» логистики станут трансформация существующих и формирование новых рынков.

Развитие традиционного городского электротранспорта, массовый выпуск электромобилей и легких индивидуальных средств передвижения увеличат объемы потребления электроэнергии в городах и потребуют коренной трансформации городской электросетевой инфраструктуры. Встанет вопрос о массовом возведении дорогостоящих «быстрых электрозаправок» (использующих высокоамперный постоянный ток, мощные аккумуляторы и силовую электронику), усилении городской электросети и повышении ее надежности, «глубоком» вводе больших электрических мощностей в города, внедрении новых технологий управления сложными энергорегимами.

Постиндустриальное общество

Роль промышленного производства в экономике неуклонно сокращается на фоне неукротимого роста сферы услуг, особенно медицинских и образовательных, индустрии красоты и развлечений. Подобная динамика позволила назвать общество будущего постиндустриальным (*post-industrial society*) [Bell, 1973], синонимами которого также служат постиндустриальная экономика, экономика или общество знаний.

Такие технологии, как интернет вещей (*internet of things, IoT*) или услуг (*internet of services, IoS*), преобразуют весь сервисный и бытовой технологический ландшафт. Роботы могут постепенно вытеснить людей даже из пока еще трудно алгоритмизируемой ниши «ручного» труда: медицинского обслуживания (младший персонал), воспитания (няни, младшие воспитатели дошкольных учреждений), социального обслуживания (сиделки) и т. д. Можно ожидать дальнейшей роботизации бытовой сферы, изменения сервисов с внедрением технологии «умных» продуктов, что в конечном счете трансформирует жизненный уклад людей. У них появится больше свободного времени, возрастут их мобильность и, как следствие, спрос на транспортные услуги.

Повышение уровня жизни населения, связанное с улучшением жилищных условий, расширением использования бытовых электроприборов, осветительной и климатической техники, обеспечивающей комфортные условия вне зависимости от времени года и географиче-

ской точки планеты, приведет к росту спроса на электроэнергию и будет оказывать влияние на сезонную динамику энергопотребления. Тем самым новые технологии способны в очередной раз коренным образом преобразовать антропогенную среду, сделать ее дружелюбной, что является первоочередной, но весьма непростой задачей. Вместе с тем массовая роботизация услуг и быта, внедрение систем «умный дом», удаленное управление бытовыми приборами актуализируют проблему кибербезопасности, ответом на которую может стать концепция «умного и безопасного города» (*smart and safety city*).

Заметной тенденцией постиндустриального развития общества выступает массовое внедрение разнообразных носимых гаджетов (информационно-коммуникационных, развлекательных и др.), рынок которых достиг гигантских размеров. По данным на 2016 г., в мире активно использовалось около 5 млрд мобильных телефонов, т. е. обеспеченность жителей планеты ими превосходила 68% [Ahoonen, 2016]. Примерно половина из имеющихся мобильных телефонов относится к классу смартфонов, и их удельный вес неуклонно растет. Годовые продажи смартфонов в мире в 2017 г. составили 1.46 млрд шт., а выручка превысила 300 млрд долл. Еще около 60 млрд долл. потребители потратили на приобретение сопутствующих приложений. К 2020 г. количество активных смартфонов предположительно достигнет 6 млрд шт., а обеспеченность ими — 76%. Кроме мобильных телефонов в мире эксплуатируются более 1 млрд ноутбуков и 230 млн планшетных компьютеров. Мировые продажи ноутбуков в 2017 г. превысили 162 млн шт. [T-Adviser, 2018a].

В русле глобальных тенденций находится и Россия. В 2017 г. в стране было приобретено около 28.5 млн смартфонов на общую сумму 3.6 млрд долл. [T-Adviser,

2018b]. Число активно используемых телефонов превышает 100 млн шт. Продажи ноутбуков в 2017 г. составили около 2.5 млн шт. на сумму 79.9 млрд руб. [T-Adviser, 2018a].

Аккумуляторы носимых гаджетов совокупно потребляют колоссальные объемы электроэнергии и лежат в основе так называемой портативной энергетики. Ими в существенной мере определяется рост мобильного трафика, требующего развития сетей мобильной связи и соответственно систем их энергоснабжения.

Энергетика постиндустриального периода и условия ее развития

Важными последствиями новой технологической революции для энергетики станут: а) продолжение электрификации производственной сферы, транспорта и быта и б) углубление сегментирования спроса на энергию со стороны различных страт с варьирующимися тенденциями динамики его объемов и структуры. Дальнейшему сегментированию в свою очередь подвергнется технологическая структура энергетики, подчиненная цели максимально эффективного удовлетворения будущего спроса. Наиболее ярко эта тенденция будет проявляться в электроэнергетике, в структуре которой можно выделить портативную и мобильную энергетику, распределенную генерацию и централизованное энергоснабжение. Очевидно, эти сегменты будут нуждаться в совершенно различных технологиях.

Электрификация экономики и общества

Одним из ключевых индикаторов экономического развития страны и достигнутого уровня жизни ее населения выступает величина душевого потребления

Табл. 1. Удельное электропотребление по странам мира: 2015 г.

Страна	Население (млн чел.)	Площадь суши (млн км ²)	Плотность населения (чел/км ²)	Плотность электропотребления (кВт·ч/км ² в год)	Потери в сетях (%)	Душевое электропотребление (тыс. кВт·ч/чел. в год)				
						Всего	ТЭК	Сектор конечного потребления	в том числе домохозяйства	
Развитые страны										
США	320	9.5	33.6	454	5.9	13.5	1.7	11.8	4.4	
Канада	36	10.0	3.6	61	10.0	17.0	3.0	14.0	4.7	
Япония	128	0.4	338.6	2738	4.1	8.1	0.7	7.4	2.1	
Германия	82	0.4	228.9	1678	4.0	7.3	1.0	6.3	1.6	
Франция	64	0.5	117.8	912	6.4	7.7	1.1	6.6	2.4	
Корея	51	0.1	513.7	5575	3.4	10.9	1.1	9.8	1.3	
Развивающиеся страны										
Россия	147	17.1	8.6	62	10.1	7.2	2.3	5.0	1.0	
Бразилия	206	8.5	24.2	72	16.0	3.0	0.6	2.4	0.6	
ЮАР	55	1.2	45.3	202	8.1	4.5	0.9	3.6	0.5	
Китай	1397	9.6	145.6	608	5.1	4.2	0.7	3.5	0.5	
Индия	1309	3.3	398.1	421	18.6	1.1	0.3	0.8	0.2	
Мир	7383	137.4	53.7	176	8.2	3.3	0.5	2.7	0.7	

Источник: ИНЭИ РАН.

Табл. 2. Удельное электропотребление по регионам России: 2017 г.

Регионы России	Население (млн чел.)	Площадь суши (млн км ²)	Плотность населения (чел/км ²)	Плотность электропотребления (кВт·ч/км ² в год)	Потери в сетях (%)	Душевое электропотребление (тыс. кВт·ч/чел. в год)			
						Всего	ТЭК	Сектор конечного потребления	в том числе домохозяйства
Россия	146.9	17 125.2	8.6	64	9.5	7.4	2.3	5.1	1.1
Федеральные округа									
Центральный	39.3	650.2	60.5	346	10.2	5.7	1.3	4.5	1.1
Северо-Западный	14.0	1687.0	8.3	68	9.3	8.2	2.0	6.2	1.1
Южный	16.4	447.8	36.7	154	16.0	4.2	1.2	3.0	1.0
Северо-Кавказский	9.8	170.4	57.6	145	8.5	2.5	0.7	1.8	0.7
Приволжский	29.5	1037.0	28.5	194	7.1	6.8	2.3	4.5	0.9
Уральский	12.4	1818.5	6.8	102	8.0	15.0	8.3	6.7	1.2
Сибирский	19.3	5145.0	3.7	43	12.1	11.5	2.7	8.8	1.2
Дальневосточный	6.2	6169.3	1.0	8	14.7	7.9	2.9	5.0	1.4
Субъекты РФ									
Московская область	7.5	44.3	169.4	1065	14.3	6.3	1.6	4.6	1.1
Ленинградская область	1.8	83.9	21.6	236	10.5	10.9	3.5	7.5	1.4
Москва	12.5	2.6	4810.2	21 783	7.9	4.5	0.8	3.8	1.1
Санкт-Петербург	5.4	1.4	3822.8	20 146	12.6	5.3	1.0	4.3	1.0

Источник: ИНЭИ РАН.

электроэнергии с акцентом на секторе конечного потребления и его субъектах — домохозяйствах. По этим показателям Россия существенно, в 1.5–2.5 раза, отстает от наиболее развитых стран (табл. 1), а значит, сохраняет значительный потенциал роста спроса на электроэнергию.

Характерен заметный разброс обсуждаемых показателей по регионам страны (табл. 2). Россия традиционно располагает мощным топливно-энергетическим комплексом (ТЭК) с высоким уровнем электропотребления. Отрасли ТЭК (прежде всего нефтедобыча) используют около трети производимой в стране электроэнергии, а в Уральском федеральном округе эта доля превышает половину.

Спрос на электроэнергию в большинстве ведущих стран растет опережающими темпами по сравнению с другими вторичными энергоносителями. Россия — не исключение, однако в силу активной автомобилизации высокую динамику роста здесь показывает также спрос на моторные топлива (рис. 1).

Отечественная энергетика характеризуется традиционно значительными масштабами централизованного теплоснабжения. Тепловая энергия превалирует в структуре потребления вторичных энергоносителей: ее доля превышает 42%, хотя и неуклонно сокращается (в 2000 г. она составляла более 53%). Планируемое интенсивное жилищное строительство способно переломить тенденцию к сокращению спроса на централизованное тепло, основным субъектом которого выступают домашние хозяйства с долей около 37%.

Развитие энергетики России непосредственно зависит от корректного определения перспектив когенерации и требований к разрабатываемым когенерационным установкам, обусловленных соотношением спроса на электрическую и тепловую энергию. Можно ожидать сохранения тенденции к росту данного соотношения, которое за период с 1990 г. увеличилось в 1.8 раза (рис. 2). При разработке новых когенерационных технологий необходимо стремиться к повышению не только коэффициента использования топлива, но и электрического КПД.

Ключевыми факторами роста электропотребления в постиндустриальный период станут увеличение парка портативных устройств, электрификация быта и транспорта, расширение использования электрофизических и электрохимических процессов в промышленности, повышение электроемкости сельского хозяйства. Увеличение потребления электроэнергии и расширение сфер ее применения в рамках концепции «электрического мира», сформулированной четверть века назад, предполагают удовлетворение основных потребностей человечества в энергии именно за счет электричества [Каганович и др., 1989].

Портативная энергетика

Наблюдаемый в современном мире бум портативной энергетики стал следствием массового использования различных девайсов, систем мониторинга и безопасности, ИКТ и мобильной связи. Портативные устройства могут быть как стационарными, так и носимыми.

Рис. 1. Потребление вторичных энергоносителей в России (млн ТДж/год)

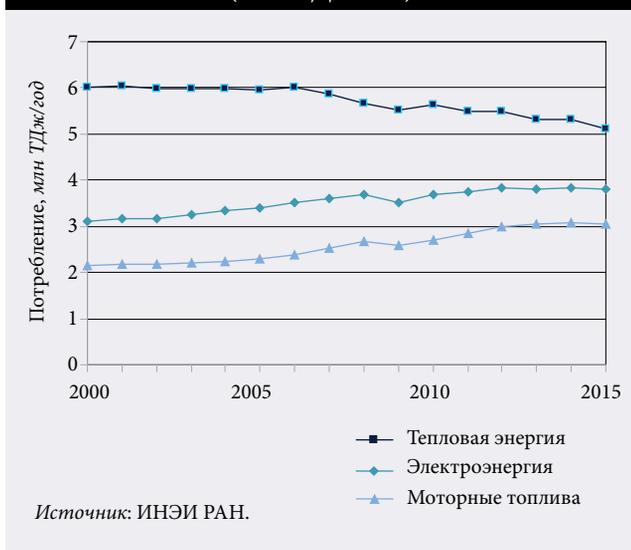
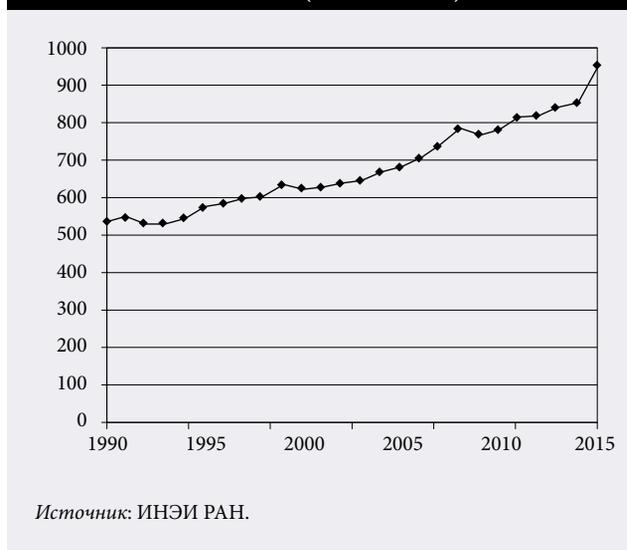


Рис. 2. Соотношение потребления электрической (E) и тепловой (Q) энергии в России (кВтч/Гкал)



Соответствующим требованиям должны удовлетворять и источники их электропитания, которыми первоначально служили химические источники тока, позже вытесненные во многих сферах электрохимическими аккумуляторами.

Суммарная мировая емкость аккумуляторных батарей наиболее массовых портативных устройств — мобильных телефонов и ноутбуков — приблизительно в равных пропорциях распределена между первыми и вторыми: 50 и 40–50 ГВт·ч соответственно. На их зарядку расходуется около 10 и 15 ТВт·ч электроэнергии в год. Вытеснение мобильных телефонов предыдущих поколений смартфонами с большим экраном сопряжено с требованием повышенной емкости аккумуляторных батарей и электропотребления. В России емкость аккумуляторов активно используемых мобильных телефонов равна приблизительно 1 ГВт·ч, ноутбуков — 0.8 ГВт·ч, что в годовом выражении составляет около 0.2 и 0.25 ТВт·ч соответственно.

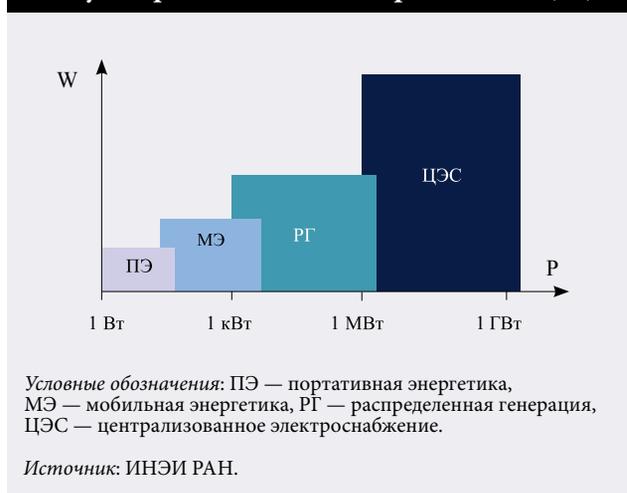
Дополнительный мощный импульс развитию портативной энергетики придаст внедрение новых систем управления с их многочисленными интеллектуальными датчиками и исполнительными механизмами, а также развитие сферы развлечений, включающей в себя разнообразные электронные девайсы.

Портативная энергетика занимает нижний сегмент в мощностном ряду электрогенерирующих установок, который варьирует от долей до нескольких сотен ватт (рис. 3). Ее технологическую основу составят химические источники тока нового поколения, электрохимические аккумуляторы, суперконденсаторы, низкотемпературные водородные топливные элементы, удерживающие водород в связанном состоянии (в интерметаллах, углеродных наноматериалах и др.) либо под высоким давлением в баллонах. В настоящее время активно ведутся разработки метанольных топливных элементов.

Мобильная (транспортная) энергетика

Массовое применение электромобилей, легкого индивидуального и промышленного электротранспорта, промышленных и бытовых автономных роботов позволяет говорить о формировании «мобильной» (транспортной) энергетики. Ее технологическую базу составят электрохимические аккумуляторы, низкотемпературные топливные элементы и суперконденсаторы, а энергетическую — электроэнергия (в «чистых» электромобилях) и водород (в гибридах). Водород может поступать извне либо производиться непосредственно «на борту» из углеводов, спиртов, эфиров или других водородсодержащих энергоносителей. Требуемая мощность электрогенерирующих установок мобильной энергетики находится в диапазоне от сотен ватт (инди-

Рис. 3. Диапазоны единичных мощностей (P) электрогенерирующих установок в различных сегментах энергетики и суммарные объемы их применения (W)



видуальные электротранспортные средства, «легкие» роботы и т. д.) до сотен киловатт (электромобили, промышленный электротранспорт, «тяжелые» роботы).

Рост мобильной энергетики предполагает развитие соответствующей энергетической инфраструктуры: зарядных электрических и водородных заправочных станций, водородной логистики и т. д. Нужны будут новые типы электротехнических устройств, средства силовой электроники (преобразователи тока и напряжения, коммуникационная аппаратура и др.) и системы управления ими. Неопределенной остается будущая роль водорода в силу сложностей с обеспечением надлежащего уровня безопасности при его широком обращении. С этим связаны поиски альтернативных водородсодержащих энергоносителей для массового использования на транспорте.

Со временем по суммарной электрической мощности мобильная энергетика может превзойти «большую» электрогенерацию и начать играть значимую роль в ее развитии и функционировании. Сегодня общая мощность двигателей легковых автомобилей в России превышает 5 ТВт при электрической мощности всех электростанций страны около 0.27 ТВт. Таким образом, замещение электромобилями лишь 5–10% легковых автомобилей и подключение их в реверсном режиме к электрической сети позволят первым стать существенным фактором (в том числе экономическим) в управлении энергосистемой. Аккумуляторы электромобилей могут заряжаться более дешевой электроэнергией в ночное время или в периоды избыточной выработки возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), возвращая дорожающую в периоды пиковых нагрузок электроэнергию обратно в сеть. Тем самым электромобили могут эффективно совмещать функции потребителей-регуляторов и пиковых генераторов, заняв уникальную нишу в электроэнергетической системе. Сглаживание с их помощью кривой электрических нагрузок благоприятно скажется на работе тепловых и атомных станций.

Подключение к электроэнергетической системе большого парка электромобилей может потребовать кардинального изменения структуры электрогенерации и конфигурации сети, причем не только в технологическом, но и в пространственном отношении. Основная масса электромобилей будет сосредоточена в городах, где проблема управления энергорезжимами стоит наиболее остро.

Развитие мобильной энергетики чревато драматическими переменами на рынках нефти и моторных топлив. Последние будут постепенно вытесняться электроэнергией и водородом при крупномасштабном внедрении электротранспортных средств, что выразится в резком снижении спроса с разрушительными последствиями для мирового нефтяного рынка. Неактуальными могут оказаться многие активно продвигаемые в настоящее время в России проекты добычи и переработки тяжелой нефти, освоения углеводородных запасов арктического шельфа — чрезвычайно капиталоемкие и сомнительные с точки зрения экономической целесообразности.

Распределенная генерация

Под распределенной генерацией в общем случае понимаются электростанции всех типов мощностью 25 МВт и менее, работающие:

- автономно (децентрализованное электроснабжение);
- в составе электроэнергетических систем (ЭЭС) (вертикальное управление режимами);
- в «островном» режиме — автономно, но с подключением к ЭЭС в целях резервирования мощности, покрытия за счет сети пиковых нагрузок либо возвращения в нее излишков мощностей;
- в составе микрогридов (горизонтальное управление режимами).

Своеобразными элементами распределенной генерации выступают электроаккумуляторы — как «сетевые» (включенные в электросетевой комплекс и предназначенные для решения системных задач), так и «потребительские» (источники бесперебойного питания и резервирования, электромобили и др.). Иногда разделяют также автономную и распределенную генерацию.

В России в децентрализованной зоне сосредоточено около 18 ГВт электрических мощностей. Значительные объемы распределенной генерации находятся в зоне централизованного энергоснабжения: примерно 7 ГВт приходится на газотурбинные и 3 ГВт — на паротурбинные установки малой мощности [Filippov et al., 2015]. В так называемой серой зоне сконцентрированы плохо отражаемые в статистике дизельные и газопоршневые электростанции небольшой мощности, используемые преимущественно в качестве источников резервного и пикового питания. Только за период 2001–2007 гг. таких электрогенераторов в стране было установлено около 13.4 ГВт против 9.7 ГВт за тот же период в большой энергетике [Filippov, 2009].

Развитию распределенной генерации благоприятствуют следующие условия:

- интенсификация экономической деятельности на территориях с низкой плотностью населения и соответственно электрических нагрузок;
- инфраструктурные ограничения в зоне централизованного электроснабжения (отсутствие технических условий для подключения новых потребителей);
- необходимость повышения качества электроэнергии и надежности снабжения (бесперебойное питание, резервирование и т. д.);
- развитие возобновляемой энергетики на основе повсеместно доступных ресурсов солнечной и ветровой энергии, биомассы;
- снижение стоимости потребляемой электроэнергии за счет более эффективной генерации и исключения так называемой «сетевой» составляющей;
- хозяйственное освоение новых территорий без транспортной и энергетической инфраструктуры.

Указанным критериям отвечают огромные части территории России, характеризующиеся низкой плотностью населения и электропотребления, по сравнению с многими ведущими зарубежными странами (см. табл. 1). Особенно выделяются в этом отношении восточные ре-

гионы России (см. табл. 2). Около 2/3 территории страны не имеет централизованного электроснабжения, а 3/4 — централизованного трубопроводного газоснабжения. Создание на этой территории больших сетей электроснабжения оказывается экономически нецелесообразным и сопряжено с большими энергопотерями.

Развитию распределенной генерации будут благоприятствовать децентрализация промышленного производства и рост сельского хозяйства. В частности, наличие в России хорошей минерально-сырьевой базы и энергетических мощностей открывает широкие возможности для развития высокотехнологичного производства новых наукоемких материалов с высокой добавленной стоимостью. Страна имеет шанс выйти в мировые лидеры в данной области. Развитие малотоннажных производств не требует сооружения огромных комбинатов, а потому может стать привлекательным направлением использования технологий распределенной генерации. Последняя позволяет снизить стоимость потребляемой электроэнергии в централизованной зоне за счет более эффективного ее производства и исключения так называемой сетевой составляющей.

Новыми быстрорастущими секторами экономики, привлекательными для распределенной генерации, становятся мобильная связь и обработка больших данных. Развертывание сетей связи четвертого поколения и интернета создало условия для быстрого роста мобильного трафика, прежде всего за счет мультимедийного контента. Мобильный трафик утроился в России за 2015–2017 гг., вплотную приблизившись к показателям западноевропейских стран [T-Adviser, 2018b]. Не за горами ввод в эксплуатацию существенно более производительных, но и более энергоемких сетей 5G. Дальнейшее развитие мобильной связи будет стимулировать спрос на автономные источники электропитания небольшой мощности (менее 100 кВт) и ужесточение требований к их рабочему ресурсу и надежности.

Рост спроса на удаленные («облачные») хранилища данных, развлекательные, вычислительные и прочие ресурсы обусловил взлет числа центров обработки данных и объемов потребляемой ими электроэнергии. По оценкам компании EvoSwitch, в 2015 г. потребление электроэнергии дата-центрами достигло 416 ТВт·ч, что примерно равно 3% ее совокупного мирового потребления [Лебедев, 2018]. Вследствие стремительного увеличения объемов «тяжелых» данных (поток видео развлекательных сервисов, интернет вещей, системы безопасности и мониторинга промышленных объектов и т. д.) в ближайшее десятилетие прогнозируется трехкратный рост электропотребления дата-центрами, обремененными весьма жесткими требованиями к надежности и качеству поставок. Обязательным поэтому становится их оборудование резервными источниками электропитания (электрогенераторами и/или накопителями) и системами кондиционирования. Все эти задачи требуют развития силовой электроники и электротехнического оборудования, средств аккумулирования электроэнергии.

Серьезные глобальные ограничения на выбросы парниковых газов усугубляют неопределенность тех-

нологического будущего энергетики. Изменения могут коснуться состава используемых первичных энергоресурсов и ускорят переход от крупной энергетики на основе органических топлив к распределенной — на базе безуглеродных ВИЭ.

Централизованное энергоснабжение

Системы централизованного энергоснабжения составляют основу современной электроэнергетики и эксплуатируются практически всеми развитыми странами. В современной России в централизованной зоне сосредоточено около 93% электрогенерирующих мощностей (249 ГВт), 88% (236 ГВт) из которых входят в Единую электроэнергетическую систему.

Ожидаемая децентрализация спроса на энергию и интенсивное развитие распределенной генерации не приведут к отказу от централизованного энергоснабжения в обозримом будущем. Спрос на него будут предъявлять прежде всего крупная промышленность и мегаполисы — районы с высокой плотностью энергетических нагрузок, где централизованное энергоснабжение остается выгодным по экономическим и экологическим причинам.

По-видимому, значительная часть современной крупной промышленности (металлургические, машиностроительные, химические и нефтехимические, целлюлозно-бумажные предприятия и т. д.) еще долго будет сохранять востребованность и конкурентоспособность. Сегодня на этот сектор приходится около 20% потребляемой в России электроэнергии, однако данная категория потребителей крайне чувствительна к цене и при достаточных финансовых ресурсах зачастую обзаводится собственной (распределенной) электрогенерацией.

Значимый вклад в сохранение централизованного электроснабжения может внести продолжающийся глобальный процесс урбанизации. В России не ожидается заметного роста численности населения, чего не скажешь о тенденции к перемещению жителей небольших населенных пунктов в крупные города и мегаполисы. Плотность электропотребления в Москве и Санкт-Петербурге превышает 20 тыс. кВт·ч/км² в год (см. табл. 2). В промышленно развитых регионах, прилегающих к мегаполисам либо входящих в их состав (Московская область), она снижается до 1000 кВт·ч/км² в год, а в регионах с высокой плотностью населения — до 150–200 кВт·ч/км² в год. При этом в Дальневосточном федеральном округе, к примеру, отмеченная величина не достигает и 10 кВт·ч/км² в год. Ввод в мегаполисы значительных объемов «чистой» энергии вместе с электроэнергией и развитие электротранспорта позволяют кардинально решить экологическую проблему, не считая таких частных ее аспектов, как допустимый уровень электромагнитного загрязнения и электромагнитной совместимости используемых приборов и устройств, что требует отдельных усилий.

Распределенная генерация предлагает серьезные технологические альтернативы централизованному электроснабжению в крупных городах и мегаполисах, связанные с разработкой и массовым внедрением эко-

логически чистых топливных элементов на природном газе и электрохимических аккумуляторов [Бредихин и др., 2017]. Наибольшего эффекта можно достичь с помощью когенерационных установок, интегрированных в интеллектуальные микрогриды. Но прежде предстоит решить сложнейшую научно-технологическую задачу кратного снижения стоимости соответствующего оборудования и повышения его рабочего ресурса.

Потребность в централизованном электроснабжении может возрасти с появлением в энергобалансе крупных объемов высокоэффективных ресурсов ВИЭ, удаленных от центров потребления. Современные установки на ВИЭ обладают значительной единичной мощностью, а сетевые решения позволяют эффективно передавать электроэнергию на большие расстояния (в частности, с помощью линий электропередачи с переменным и постоянным током ультравысокого напряжения — в диапазоне 800–1000 кВ и более). Благодаря этому в местах концентрации ВИЭ с высоким потенциалом стали создаваться мощные — в десятки и сотни мегаватт — «ветряные фермы» и «солнечные поля», интегрируемые в электроэнергетические системы. В настоящее время основной прирост вводов электрогенерации на базе ВИЭ приходится на сетевые установки.

Возможное введение жестких, юридически обязывающих международных ограничений на выбросы парниковых газов потребует ускоренной декарбонизации мировой энергетики — и российской, как ее части. Достижение этой цели связано с переходом на безуглеродные природные источники энергии — ядерный синтез и ВИЭ. Термоядерные электростанции вряд ли получат коммерческое применение в ближайшие десятилетия, равно как и технологии электрогенерации на базе органических топлив с улавливанием CO₂, поскольку эффективных способов надежной и долгосрочной (в геологическом масштабе) утилизации колоссальных объемов углекислого газа пока не предложено. Ситуация осложняется плохой репутацией ядерной энергетики во многих странах мира, что вынуждает признать разговоры о ее «ренессансе» несколько преждевременными. Замещение органических топлив ВИЭ в сопоставимых масштабах в свою очередь связано с освоением пустынь и больших прибрежных акваторий, что требует формирования глобальной электроэнергетической системы и развития региональных централизованных энергосистем. Технологическим вызовом станут освоение напряжения в 1500 кВ и создание соответствующих подводных кабелей.

Развитие электросетевого комплекса сопряжено с ростом потерь в электрических сетях в процессе передачи и трансформации электроэнергии. В развитых странах с высокой плотностью электропотребления такие потери удалось снизить до 4–6% (см. табл. 1). В России они примерно вдвое выше (около 10%) и сильно варьируют по территории (см. табл. 2).

Функционирование и развитие электросетевого комплекса требуют значительных затрат, вклад которых в цену электроэнергии для конечного потребителя сегодня зачастую превышает 50–60%. Надежды на существенное снижение таких расходов за счет сете-

вой составляющей цены электроэнергии связаны лишь с некоторыми технологиями. Прорыва можно ожидать от массового применения недорогих «теплых» сверхпроводников (работающих при комнатной температуре), хотя разработка необходимых материалов продвигается крайне медленно.

Заключение

Все технологические революции оказывали определяющее влияние на развитие энергетики, причем как непосредственно — путем создания новых энергетических технологий, так и косвенно — через формирование спроса на энергию, в том числе требований к его объемам, структуре и качеству энергоносителей. Не станет исключением и новая технологическая революция, которая вместе с формирующимися на ее основе постиндустриальными экономикой и обществом предъявляет новые требования к энергетике. Речь прежде всего идет о существенном увеличении спроса на электроэнергию и ужесточении требований к ее качеству и надежности поставок.

Следует ожидать дальнейшего сегментирования технологической структуры энергетики для максимального эффективного удовлетворения будущего спроса на энергию. Особенно ярко эта тенденция будет проявляться в электроэнергетике, в структуре которой достаточно четко выделяются портативная и мобильная энергетика, распределенная генерация и централизованное энергоснабжение. Рост объемов генерации и потребления постоянного тока в первых трех сегментах и создание мощных магистральных сетей постоянного тока в последнем могут возродить интерес к системам электроснабжения на постоянном токе.

Востребованность централизованного энергоснабжения может быть связана с концентрированными энергетическими нагрузками со стороны крупной промышленности, а также с процессами урбанизации и формирования мегаполисов. Запрос на дальнейшее развитие централизованных систем энергоснабжения может быть обусловлен требованиями по декарбонизации энергетики. В этом случае необходимыми станут освоение отдаленных ресурсов ВИЭ в пустынях и прибрежных акваториях дальних морей и, возможно, развитие ядерной энергетики.

Децентрализация, экономическая деятельность в регионах с низкой плотностью энергопотребления, хозяйственное освоение новых территорий и повсеместное использование доступных ресурсов ВИЭ будут благоприятствовать развитию распределенной генерации. Ожидаемое массовое распространение электромобилей, легкого индивидуального электротранспорта и автономных роботов различного функционального назначения может привести к взрывному росту мобильной энергетики. Интеграция миллионов электромобилей в электроэнергетические системы окажет сильное воздействие на развитие «большой» энергетики, поскольку потребует существенной корректировки ее технологической и пространственной структуры. Рост масштабов применения разнообразных девайсов и дру-

гих маломощных автономных устройств подтолкнет к развитию портативную энергетику, а вслед за этим — производство электрохимических аккумуляторов, в свою очередь чреватое дефицитом некоторых материалов и скачком цен на них. Цифровизация энергетики обострит проблему обеспечения кибербезопасности энергетических объектов и систем.

Особенности России, обусловленные структурой спроса на энергию, суровым климатом и огромной территорией, будут предъявлять дополнительные требования к технологическому развитию энергетики страны. В частности, востребованными останутся системы централизованного энергоснабжения, однако спрос на технологии распределенной генерации, в том числе на основе ВИЭ, также будет расти. К числу важнейших от-

носится задача развития когенерации с использованием электрохимических генераторов, технологий смарт-гридов и т. п.

Сложившаяся структура ТЭК России оказывается крайне уязвимой к масштабам электрификации транспорта и декарбонизации мировой энергетики. Широкое применение в мире электромобилей и ВИЭ и вызванное этим снижение спроса на нефть могут оказать разрушительное действие на мировой рынок углеводородов, что негативно отразится на энергетике и экономике страны в целом.

Статья подготовлена по результатам проекта, выполненного при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60117X0014.

Библиография

- Балабанов В.И., Железова С.В., Березовский Е.В., Беленков А.И., Егоров В.В. (2013) Навигационные технологии в сельском хозяйстве. Координатное земледелие. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева.
- Бредихин С.И., Голодницкий А.Э., Дрожжин О.А., Истомин С.Я., Ковалевский В.П., Филиппов С.П. (2017) Стационарные энергетические установки с топливными элементами: материалы, технологии, рынки. М.: НТФ «Энергопрогресс». ISBN 978-5-905918-06-3.
- Глазьев С.Ю. (1993) Теория долгосрочного технико-экономического развития. М.: ВладДар.
- Горбань А.Н., Дунин-Барковский В.Л., Кирдин А.Н., Миркес Е.М., Новоходько А.Ю., Россиев Д.А., Терехов С.А., Сенашова М.Ю., Царегородцев В.Г. (1998) Нейроинформатика. Новосибирск: Наука — Сибирское предприятие РАН.
- Зворыкин А.А., Осьмова Н.Н., Чернышев В.И., Шухардин С.В. (1962) История техники. М.: Издательство социально-экономической литературы.
- Каганович Б.М., Филиппов С.П., Анциферов Е.Г. (1989) Эффективность энергетических технологий: термодинамика, экономика, прогнозы. Новосибирск: Наука.
- Кондратьев Н.Д. (1989) Большие циклы экономической конъюнктуры // Проблемы экономической динамики / Под ред. Л.И. Абалкина. М.: Экономика. С. 172–226.
- Лебедев П. (2018) Приживется ли в России «зеленый» ЦОД? Режим доступа: http://www.cnews.ru/reviews/infrastructure2017/articles/prizhivetsya_li_v_rossii_zelenyj_tsod; дата обращения 29.09.2018.
- Филиппов С.П., Дильман М.Д. (2018) Системные исследования приоритетов технологического развития энергетики: методологические аспекты // Системные исследования в энергетике: методология и результаты / Под ред. А.А. Макарова, Н.И. Воропая. М.: МЭИ. С. 63–86.
- Якушев В.В. (2016) Точное земледелие: теория и практика. СПб.: ФГБНУ АФИ. ISBN 978-5-905200-31-1.
- Ahonen T. (2016) TomiAhonen Phone Book 2016. Statistical Review of Handset Industry. Режим доступа: <http://www.tomiahonen.com/ebook/phonebook.html>, дата обращения 08.10.2018.
- Baudrillard J. (1998) The Consumer Society. Myths & Structures. London, Thousand Oaks, New York, Delhi: SAGE Publications. ISBN 0-7619-5691-3.
- Bell D. (1973) The coming of post-industrial society: A venture of social forecasting. New York: Basic Books. ISBN 0-465-01281-7.
- Elk K. (2016) Embedded Software Development for the Internet of Things: The Basics, The Technologies and Best Practices. Seattle: Create Space Independent Publishing Platform. ISBN 978-1534602533.
- Filippov S.P. (2009) Small-Capacity Power Engineering in Russia // Thermal Engineering. Vol. 56. № 8. P. 665–672.
- Filippov S.P., Dilman M.D., Ionov M.S. (2015) Demand of the Power Industry of Russia for Gas Turbines: The Current State and Prospects // Thermal Engineering. Vol. 64. № 11. P. 829–840. DOI: 10.1134/S0040601517110052.
- Freitas R.A., Merkle R.C. (2004) Kinematic Self-Replicating Machines. Georgetown, TX: Landes Bioscience. ISBN: 978-1570596902.
- Heath S. (2003) Embedded systems design. EDN series for design engineers (2nd ed.). Oxford: Newnes. ISBN 978-0-7506-5546-0.
- Hermann M., Tobias P., Boris O. (2015) Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review (Working Paper no 01). Dortmund: Technische Universität Dortmund.
- Khaitan S.K., McCally J.D. (2014) Design Techniques and Applications of Cyber Physical Systems: A Survey // IEEE Systems Journal. Vol. 9. № 2. P. 1–16. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/275381502_Design_Techniques_and_Applications_of_Cyberphysical_Systems_A_Survey, дата обращения 17.07.2017.
- Koh W.T.H., Leung H.-M. (2003) Education, Technological Progress and Economic Growth. Singapore: Singapore Management University.
- Kurzweil R. (2005) The Singularity Is Near. New York: Viking Adult.
- Ladd D., Jelezko F., Laflamme R., Nakamura Y., Monroe C., O'Brien J.L. (2010) Quantum Computing // Nature. Vol. 464. № 7285. P. 45–53.
- Lee E. (2008) Cyber Physical Systems: Design Challenges. Technical Report No. UCB/EECS-2008-8. Berkeley: University of California. Режим доступа: <https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/EECS-2008-8.pdf>, дата обращения 17.07.2017.

- McBratney A., Brett W., Tihomir A., Johan B. (2005) Future Directions of Precision Agriculture // Precision Agriculture. № 6. P. 7–23.
- OECD, IEA (2017) The Future of Trucks: Implications for Energy and the Environment. Paris: OECD, IEA.
- Richardson S.M., Mitchell L.A., Stracquadiano G., Yang K., Dymond J.S., DiCarlo J.E., Lee D., Huang C.L.V., Chandrasegaran S., Cai Y., Boeke J.D., Bader J.S. (2017) Design of a synthetic yeast genome // Science. Vol. 355. № 6329. P. 1040–1044. Режим доступа: <http://science.sciencemag.org/content/355/6329/1040>, дата обращения 10.03.2017.
- Sadowy B. (2018) Airbus Partners with Amsilk on Synthetic Spider Silk Technology. Режим доступа: <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2018/09/airbus-partners-with-amsilk-on-synthetic-spider-silk-technology/>, дата обращения 27.09.2018.
- Šmihula D. (2011) Long waves of technological innovations // Studia Politica Slovaca. № 2. P. 50–69.
- T-Adviser (2018a) Ноутбуки: мировой рынок — 2017. Режим доступа: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Ноутбуки_\(мировой_рынок\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Ноутбуки_(мировой_рынок)), дата обращения 19.10.2018.
- T-Adviser (2018b) Смартфоны: рынок России — 2018. Режим доступа: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Смартфоны_\(рынок_России\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Смартфоны_(рынок_России)), дата обращения 19.10.2018.
- Taleb N.N. (2007) The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable. New York: Random House. ISBN 978-1-4000-6351-2.
- Toffler A. (1970) Future Shock. New York: Bantam Books. ISBN 0-553-27737-5.
- Toffler A., Toffler H. (2006) Revolutionary Wealth. New York: Knopf Doubleday Publishing. ISBN 0-375-40174-1.
- Toyota (2017) Environmental Report 2017: Toward the Toyota Environmental Challenge 2050. Toyota, Aichi: Toyota Motor Corporation. Режим доступа: http://www.toyota-global.com/sustainability/report/archive/er17/pdf/er17_full_en.pdf, дата обращения 06.11.2017.
- van Gelderen J. (1913) Springvloed Beschouwingen over industrielle Ontwikkelingen prijsbeweging // De Nieuwe Tijd. Vol. 184. № 4–6. P. 253–277; 369–384; 445–464.
- Vinge V. (1993) The Coming Technological Singularity. Paper presented at the VISION-21 Symposium sponsored by NASA Lewis Research Center and the Ohio Aerospace Institute, March 30-31, 1993. Режим доступа: <http://www.accelerating.org/articles/comingtechsingularity.html>, дата обращения 05.03.2017.
- Zhang N., Wang M., Wang N. (2002) Precision Agriculture: A Worldwide Overview // Computers and Electronics in Agriculture. Vol. 36. № 2–3. P. 113–132.