

Возобновляемые источники энергии и их перспективы

Б. А. НАДЫКТО



Б. А. Надикто (в центре) на научной конференции

Человечество в процессе своего развития пользовалось различными источниками энергии, которые облегчали его жизнь и деятельность. Открытие и использование огня привело к применению древесных и растительных источников энергии. Это дало возможность приготовления горячей пищи и обогрева людей в холодное время. Однако по мере роста населения применение для бытовых и промышленных целей древесины привело к уничтожению лесов на значительных территориях (особенно в Европе).

В течение всей своей истории человечество использовало мускульную силу лошадей и других домашних животных. Животные участвовали как в мирной жизни людей, так и в войнах. Монгольское нашествие на Восточную Европу можно считать нашествием лошадей, так как их число значительно превышало количество воинов.

Изменение основных видов энергии связано как с истощением ранее используемых, так и определяется экономикой и возможностью улучшения качества жизни людей за счет применения новых видов энергоресурсов. В Англии открытие месторождений каменного угля и его использование привело к бурному развитию промышленности, но в дальнейшем вызвало негативные экологические последствия (задымление, смог и связанные с этим болезни). До сих пор переход на новые виды энергии происходил

в основном не за счет истощения предыдущих, а за счет технического прогресса, дающего новые возможности. Известно, что каменный век закончился не из-за того, что кончились камни.

Гидроресурсы горных рек в значительной степени исчерпаны. Строительство же гидроэлектростанций на равнинных реках приводит к затоплению больших территорий, использование которых в солнечной и ветровой энергетике может создавать больше энергии, чем ГЭС. В XIX веке в Европе было около полумиллиона водяных мельниц для различных нужд промышленности. Это было использование малых рек. Сейчас рассматривается возможность увеличения гидроэнергетики и за счет потенциала малых рек.

Приведем доли выработки электричества различными источниками энергии в мире на 2018 г. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) дают: гидроэнергетика – 16 %, ветровая – 5,5 %, солнечная – 5 %. Невозобновляемые источники: уголь – 36 %, газ – 23 %, атомная энергетика – 10,5 %, нефть – 4 %.

Ветровая энергетика

Первые простейшие ветродвигатели применяли еще в глубокой древности в Египте и Китае. В Египте (около Александрии) сохранились



Вид древней ветряной мельницы крыльчатого типа, которую вручную поворачивали по ветру

остатки каменных ветряных мельниц барабанного типа, построенных еще во II–I веке до н. э. В VII веке н. э. персы строили ветряные мельницы уже более совершенной конструкции – крыльчатые. Ветряные мельницы использовали для размола зерна в Персии уже в 200 г. до н. э. Мельницы такого типа были распространены также в исламском мире и в XIII веке принесены в Европу крестоносцами.

В 1750-х гг. насчитывалось от 6000 до 8000 ветряных мельниц в Нидерландах, в 1850 г. там уже было их 9000. Это почти в 5 раз больше, чем есть ветряных турбин в Нидерландах сегодня (1974 турбины по состоянию на сентябрь 2009 г.). В Великобритании было от 5000 до 10000 ветряных мельниц в 1820 г. Франция имела 8700 ветряных мельниц в 1847 г. Германия – 18242 ветряные мельницы в 1895 г. (по сравнению с около 18 000 ветровых турбин сегодня). В Финляндии – 20 000 ветряных мельниц в 1900 г. Португалия, Испания и многие страны Восточной Европы и Скандинавии имели тоже много ветряных мельниц.

Общее количество ветряных мельниц в Европе составляло около 200 000 (на пике), по сравнению с около 500 000 водяных. Ветряные мельницы были построены в сельской местности и городах. Первоначально они применялись только для измельчения зерна и (в меньшей степени) откачки воды. В XVI веке появилось много новых промышленных применений ветряным мельницам: пилорамы-мельницы, бумажные фабрики, горчичные мельницы, мельницы табака и т. д.

Первые ветряные установки для получения электрической энергии возникли только в конце XIX века. В 1887 г. шотландский профессор Джеймс Блайт построил на территории своего загородного коттеджа десятиметровый ветряк, который использовал для зарядки аккумуляторов и освещения. В Кливленде (штат Огайо, США) Чарльз Браш сконструировал и построил более крупный и сложный ветряк, проработавший у его дома с 1886 по 1900 г. Ветряк состоял из ротора диаметром 17 м, установленного на 18-метровой башне. Динамомашинка использовалась для питания приборов в лаборатории Браша.

Основы теории ветродвигателей разработаны в Центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ) в 1920 г. Н. Е. Жуковским с сотрудниками. В 1924 г. под руководством М. В. Красовского в отделе ветродвигателей ЦАГИ был разработан быстроходный двигатель

мощностью в 50 л. с. с новой системой регулирования частоты вращения колеса, предложенной Г. Х. Сабининым. Она получила название стабилизаторной.

В 1930 г. на базе ОВД ЦАГИ был организован Центральный ветроэнергетический институт (ЦВЭИ). В 1931 г. в Крыму сооружена самая крупная в мире ВЭС Д-30 мощностью 100 кВт. Станция работала до 1942 г. В августе 1954 г.



Мельницы XIX века в Голландии



Старые мельницы в Ламанче (Испания)



Современные ветряные генераторы электричества распространены во многих странах мира

Совет министров СССР принял постановление о дальнейшем развитии ветроэнергетики. По данным ЮНЕСКО в 1960 г. в мире насчитывалось более 1 млн ВЭС различных типов, в том числе более полумиллиона быстроходных агрегатов.

В большинстве регионов России среднегодовая скорость ветра не превышает 5 м/с, в связи с чем привычные ветрогенераторы с горизонтальной осью вращения практически неприменимы – их стартовая скорость начинается с 3–6 м/с, и получить от их работы существенное количество энергии не удастся. Однако на сегодняшний день все больше производителей предлагают ветрогенераторы с вертикальной осью вращения. Принципиальное отличие состоит в том, что вертикальному генератору достаточно 1 м/с, чтобы начать вырабатывать энергию. На рисунках приводятся некоторые разновидности таких ветрогенераторов.

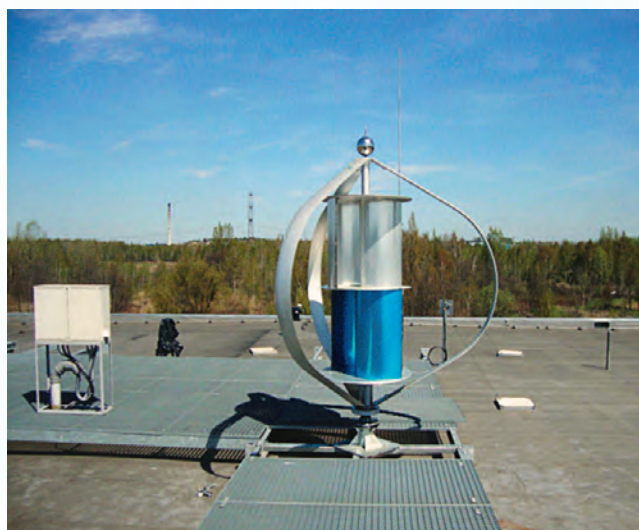
Некоторые страны особенно интенсивно развивают ветроэнергетику. В Дании с помощью ветрогенераторов производится 42 % всего электричества; в Португалии – 27 %; в Никарагуа – 21 %; в Испании – 20 %; в Ирландии – 19 %; в Германии – 8 %; в ЕС в целом – 7,5 %.

История ветроэнергетики Дании начиналась в 1970-х гг., и по настоящее время Дания является лидером по производству ветровых генераторов и их комплектующих. В США ветроэнергетика как отрасль развивается довольно быстро. Установленная мощность ветровых генераторов составляет более 75,0 ГВт. В общей доле вырабатываемой электрической энергии доля ветроэнергетики более 5,0 %. Ветряные электростанции Германии дают более 8,0 % от всей произведенной электроэнергии. Установленная мощность ветровых генераторов превышает 45 ГВт.

В Китае установленная мощность ветровых генераторов составляет более 150 ГВт (более



Гелиоидный ротор. Генератор Горлова



Генератор с ротором Савониуса



Генератор с ротором Дарье



Генератор с торможением воздушного потока

3,0 % производимой электрической энергии в стране). Энергетики Китая продолжают строительство новых ветряных электростанций, в период до 2020 г. планируется запустить в работу еще 100 ГВт установленной мощности. В Китае создан опытный проект ветрогенератора с магнитной левитацией, которая позволила снизить стартовую скорость ветра до 1,5 м/с и на 20 % повысить отдачу генератора в течение года.

Компания Maglev Wind Turbine Technologies из Аризоны намерена производить ветровые турбины с вертикальной осью с максимальной мощностью 1 ГВт, также на магнитной подвеске. Станция выглядит как высотное здание, но по отношению к своей мощности она небольшая и занимает площадь (вместе с зоной отчуждения) около 40 га.

В перспективе планируется использование энергии ветра не посредством ветрогенераторов, а более нетрадиционным образом. В городе Масдар (ОАЭ) планируется строительство электростанции, работающей на пьезоэффекте. Она будет представлять собой лес из полимерных стволов, покрытых пьезоэлектрическими пластинами. Эти 55-метровые стволы будут изгибаться под действием ветра и генерировать электрический ток.

Солнечная энергетика

Используются разные способы получения электричества и тепла из солнечного излучения. Так электроэнергия получается с помощью фотоэлементов. Гелиотермальная энергетика включает в себя нагревание поверхности, поглощающей солнечные лучи, и последующее распределение и использование тепла (фокусирование солнечного излучения на сосуде с водой для последующего использования нагретой воды в отоплении или в паровых электрогенераторах). В солнечных системах концентрирующего типа энергия солнечных лучей с помощью системы линз и зеркал фокусируется в концентрированный луч солнца.

Еще сравнительно недавно существовало скептическое отношение к солнечной энергетике. Приведем высказывание П. Л. Капицы (Вестник АН СССР, 1976, № 1, с. 34): «Ни один из предложенных до сих пор методов преобразования солнечной энергии не может этого осуществить так, чтобы капитальные затраты могли оправдаться полученной энергией. Чтобы это было рентабельно, надо понизить затраты на несколько порядков, и пока даже не видно пути,

как это можно осуществить. Поэтому следует считать, что практическое прямое использование солнечной энергии в больших масштабах нереально».

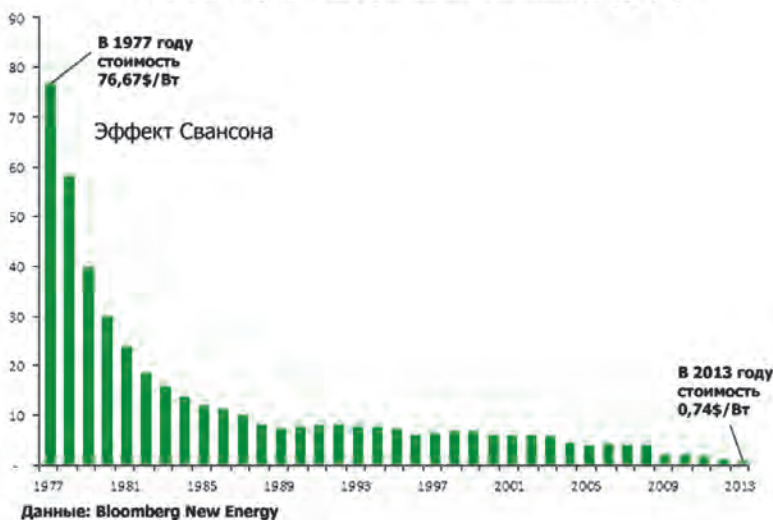
Однако, с тех пор ситуация кардинально изменилась. На рисунке показана стоимость фотоэлектрических элементов с 1977 по 2013 г. (в долларах за ватт). Видно, что за это время стоимость снизилась в 100 раз. В 2017 г. цена на солнечные батареи по всему миру упала до 0,3 доллара за ватт мощности, и солнечная энергия стала конкурентноспособной с другими видами энергии.

Этого удалось достичь за счет целого ряда изобретений, которые привели к повышению КПД солнечных батарей и упрощению их изготовления. В далеком 1988 г. молодой человек по имени Михаэль Гратцель, ныне профессор в Лозанской политехнической школе (Швейцария), совместно с Брайаном О’Реганом предложил на тот момент абсолютно сумасшедшую идею: использовать красители в солнечных батареях для поглощения света и передачи поглощенной энергии на полупроводник (впоследствии – диоксид титана). После чего электрон «перемещается» по полупроводнику, пока не достигнет анода, а оставшийся без электрона краситель (по сути «дырка», в терминах физики полупроводников) получает его от ионов I_3^- , которые, в свою очередь, превращаются в ионы I_3^- (так называемая редокс пара), переносящие заряд к катоду. В результате на двух контактах создается некоторая полезная разность потенциалов. С течением времени такие ячейки стали называть ячейками Гратцеля или DSSC (солнечные батареи сенсibilизированные/активированные красителем).

Суть совершенного открытия заключается в использовании поликристаллического перовскитоподобного соединения свинца – $CH_3NH_3PbI_3$ – в качестве сенсibilизатора и медиатора (проводника «дырок»). Данный материал фактически химически осаждается (не требует вакуумных установок) на поверхности мезопористого диоксида титана. Получившийся слоеный пирог имеет толщину около 1 микрона (в ~50–100 раз тоньше человеческого волоса) и при инкубировании обычно зажимается между двумя более толстыми пластинами стекла.

В результате быстрого расширения рынка в 2015 г. возобновляемые

Стоимость фотоэлектрических элементов (\$/Вт)



источники энергии стали лидерами по количеству введенной в строй мощности – 153 гигаватта. И главную роль в этом сыграли ветряные (62 ГВт) и солнечные (56 ГВт) электростанции. В 2016 г. введено 70 ГВт солнечных батарей, в 2017 г. – 96 ГВт. В 2018 г. планируется ввести до 120 ГВт. На схеме показан вклад разных стран в производство солнечных электростанций в 2017 г. Почти половина мощностей солнечной энергетики находится в Китае.

Солнечная энергия может применяться в различных химических процессах. Например, израильский институт Вейцмана в 2005 г. испытал технологию получения металлического цинка в солнечной башне. Оксид цинка в присутствии древесного угля нагревался зеркалами до температуры 1200 °С на вершине солнечной башни. В результате процесса получался чистый цинк. Далее цинк можно герметично упаковать и транспортировать к местам производства электроэнергии. На месте цинк помещается в воду, в результате химической реакции получается водород и оксид цинка. Оксид цинка можно еще раз поместить в солнечную башню и получить чистый цинк. Технология прошла испытания в солнечной башне канадского института энергетики и прикладных исследований.

Несубсидированные оптовые цены на солнечный или ветровой киловатт-час ниже \$0,03 уже не являются редкостью. Теперь не государственная поддержка, а экономика является главным фактором дальнейшего распространения ВИЭ по планете. По разным прогнозам в солнечной энергетике в 2018 г. будут введены в эксплуата-

цию рекордные 106–120 ГВт новых мощностей. В 2018 г. необходимо построить около 60 ГВт ветряных электростанций.

Солнечные электростанции по цене строительства сравнялись с тепловыми. Осенью 2017 г. в Индии введена в строй солнечная электростанция Камутхи мощностью в 648 МВт, стоившая всего 680 миллионов долларов. Это 1050 долларов за киловатт мощности, столько же, сколько в России стоит новая тепловая электростанция.

Южная Корея в 5 раз увеличит солнечную генерацию к 2030 г. Это заявление было сделано после того, как избранный президент Мун Чжэ Ин пообещал прекратить государственную поддержку строительства новых атомных электростанций и взять курс на экологически чистые источники электроэнергии. Правительство уже отменило строительство шести ядерных реакторов. Всего страна планирует получать к 2030 г. пятую часть электричества из возобновляемых источников. Для этого к назначенному сроку планируется добавить 30,8 ГВт солнечных мощностей и 16,5 ГВт ветровых.

Практически с нуля в России создана своя индустрия в солнечной энергетике, от исследований до производства солнечных панелей и строительства генерирующих станций. За 2017 г. было построено больше мощностей возобновляемых источников энергии, чем за предыдущие два года. В 2015–2016 гг. в России введены 130 МВт, а в 2017 г. построено 140 МВт, из них более 100 МВт – солнечные электростанции, а 35 МВт – первый крупный ветропарк, запуск которого состоится в ближайшее время.

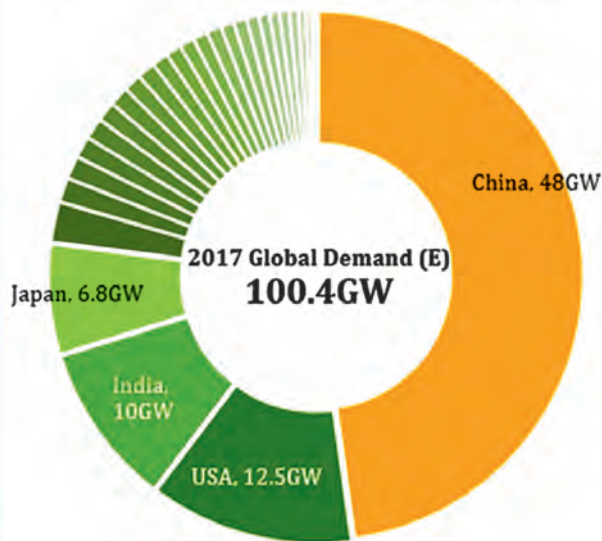
На диаграмме показана динамика роста ветряной и солнечной энергетики, начиная с 2000 г. Видно, что удвоение установленной мощности происходит быстрее, чем за пять лет. К середине 2018 г. их суммарная установленная мощность достигла 1000 ГВт.

Достижение 1 000 ГВт солнечно-ветровой генерации заняло 40 лет, при этом более 90 % мощностей были введены в эксплуатацию в последнее десятилетие. По прогнозу BNEF следующие 1 000 ГВт будут построены всего за 5 лет – к началу 2023 г. – при в 2 раза меньших затратах.

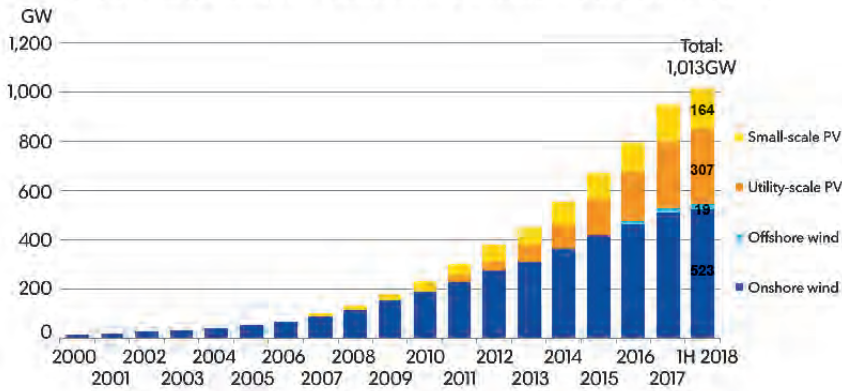
С января по май 2018 г. возобновляемая энергетика обеспечила 20,17 % электроэнергии США, а атомная – 20,14 %, причем в апреле и мае ВИЭ генерировали на 10,6 % больше электричества, чем АЭС.

Вот только некоторые новости, характеризующие переход на возобновляемую энергетику.

Distribution of Global Annual PV Demand, 2017



Global wind and solar installations, cumulative to June 30, 2018



Чили становится центром дешевой возобновляемой энергетики. Google полностью переходит на солнечную и ветровую энергию. В Швеции изобрели умные стекла для окон. В Иране деревни продают электроэнергию государству. Британские ученые изобрели стеклянные кирпичи с солнечными батареями.

Атомная энергетика

Потенциально на достаточно большой срок (на сотни лет) энергоснабжение в мире может обеспечить атомная энергетика, в особенности, при использовании в качестве сырья, помимо урана, также тория. Однако, как отмечается, пик развития атомной энергетики, по-видимому, прошел. На схеме показана выработка электроэнергии в мире на атомных электростанциях в 1990–2016 гг. Доля производства электричества в мире на атомных электростанциях достигла максимума в 1996 г. (17,5 %). В 2016 г. она составила 10,5 %. Абсолютная выработка энергии атомных электростанций уменьшается, начиная с 2006 г.

В 2016 г. введены в эксплуатацию десять реакторов, половина из которых – в Китае. Средний срок их строительства составил 10,6 лет. В первом полугодии 2017 г. начали работу всего два реактора – в Китае и Пакистане (построен также китайскими специалистами). Это первые введенные в эксплуатацию реакторы, строительство которых началось после аварии в Фукусиме.

В 2016 г. в России начата промышленная эксплуатация АЭС БН-800 на 880 МВт элек-

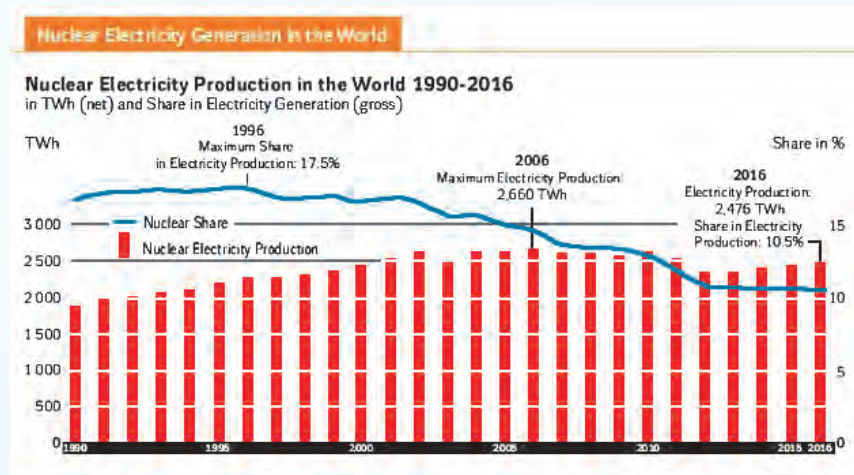
трической мощности. В теории она позволит не только решить проблему с ограниченностью запасов урана, но и проблему ядерных отходов, которые будут перерабатываться на таких же реакторах. Япония только что объявила о невозможности запуска своего реактора на быстрых нейтронах.

В 2015 г. в России произведено 1050 млрд кВт·ч электричества. Из них 195 млрд кВт·ч (18,6 %) от атомных электростанций (27 ГВт). С 2016 по

2030 г. Росатом планирует построить 22 энергоблока АЭС мощностью 22 ГВт. За это время будет выведен из строя 21 энергоблок (13 ГВт). По прогнозу генерального директора концерна «Росэнергоатом» А. Ю. Петрова (2016 г.) доля атомной генерации в РФ к 2030 г. может вырасти до 21 %.

В докладе генерального директора Юкия Аmano на заседании Совета управляющих МАГАТЭ 10 сентября 2018 г. обнародован прогноз развития атомной энергетики в мире. Согласно выводам экспертов агентства строительство в мире в ближайшие годы большого количества новых атомных генерирующих мощностей является обязательным условием для предотвращения изменения климата.

На конец 2017 г. в мире насчитывалось 448 действующих энергоблоков АЭС суммарной мощностью 392 ГВт. В прошлом году они произвели в общей сложности 2503 ТВт·ч электроэнергии, что составляет около 10 % от общего объема производства электроэнергии в мире. Как подчеркивается в докладе МАГАТЭ, суще-



ствуует угроза того, что низкие цены на газ и проводимая во многих странах политика субсидирования «возобновляемых» источников энергии может негативно влиять на программы по развитию атомной энергетики и создает неопределенность в отношении прогнозов.

Согласно оптимистическому прогнозу, суммарная мощность АЭС в мире вырастет к 2030 г. до 511 ГВт (рост на 30 %) и 748 ГВт к 2050 г. (рост на 90 %). Согласно же «низкому» прогнозу мировой потенциал АЭС может к 2030 г. снизиться до 352 ГВт и к 2050 г. стабилизироваться на уровне 356 ГВт. Прогноз исходит из того, что за этот период будет выведено из эксплуатации большое количество энергоблоков: до 2030 г. выведено 139 ГВт и введено только 99 ГВт, а в период 2030–2050 гг. это соотношение составит 186 и 190 ГВт соответственно. По оптимистическому прогнозу доля электроэнергии, производимой АЭС в мире до 2050 г., составит 11,5 %, по «низкому» прогнозу к 2030 г. – 10,3 % и к 2050 г. – 5,6 %.

Появление реальной конкуренции со стороны возобновляемых источников энергии будет способствовать тому, что рост того или иного вида энергетики будет определяться в основном вопросами экономической эффективности.

Перспективы перехода на возобновляемые источники энергии

В марте 2017 г. Международное энергетическое агентство (МЭА) опубликовало работу «Поймать ветер и солнце в сеть». Это руководство для министерств энергетики и регуляторов энергетических рынков. В руководстве основное внимание уделяется задачам и вызовам интеграции ВИЭ. В нем даны примеры, где и как они встречались и даются рекомендации относительно того, как должны действовать новички в плане развития генерации на основе возобновляемых источников энергии.

В работе разбираются распространенные мифы о ВИЭ.

1. Погодой нельзя управлять – выработка солнечных и ветряных электростанций колеблется слишком сильно и непригодна для электроэнергетики.

Здесь упускаются два фактора. Во-первых, спрос на электроэнергию колеблется всегда. Поэтому в энергетических системах уже действуют механизмы, позволяющие справиться с изменчивостью. Когда доля ВИЭ мала, ее колебания «теряются в шуме» колебаний спроса. Во-вторых, по мере добавления в систему все новых



Автономная солнечная установка



Солнечные батареи на крышах домов

электростанций, работающих на основе ВИЭ, краткосрочные колебания генерации установок, расположенных в разных местах, «компенсируют» друг друга. Это означает, что переменчивость становится менее выражена, и серьезные изменения в выработке, как правило, теперь происходят в масштабах часа, а не секунд.

2. Переменчивость ВИЭ заставляет остальные электростанции пересматривать модели деятельности, что приводит к резкому росту системных расходов. Опыт показывает, что традиционные

электростанции технически способны к более «гибкой» работе без существенного увеличения общей стоимости энергосистемы. Использование прогнозов выработки ВИЭ и корректировка графиков выработки в режиме реального времени являются недорогими и эффективными инструментами для смягчения неблагоприятных воздействий.

3. Высокая стоимость развития сетевого хозяйства, связанная с тем, что лучшие солнечные и ветровые ресурсы расположены далеко от центров потребления электричества. Это аргумент из прошлого, и обсуждать его нужно индивидуально, применительно к ситуации каждой энергосистемы и отдельного объекта. Нынешние технологии ВИЭ стремительно дешевеют, поэтому их можно использовать экономически рационально в не самых удачных в плане солнечных или ветровых ресурсов местах.

4. Для развития ВИЭ необходимы накопители энергии. Накопители не нужны на начальных стадиях развития ВИЭ и при разветвленном и эффективно управляемом сетевом хозяйстве. Немецкий опыт показывает, что сети с долей переменчивых ВИЭ в потоках электроэнергии на уровне 50 % в год могут нормально функционировать без каких-либо дополнительных накопителей. Говорить о том, что в системе необходимы накопители для ее бесперебойной работы можно лишь для систем с долей ВИЭ, далеко превышающей 50 %.

В докладе Международного энергетического агентства делается вывод, что вопросы интеграции в энергетическую систему нестабильных возобновляемых источников энергии глубоко изучены и основательно проработаны.

Ученые из Лаппеенрантского технологического университета в Финляндии разработали модель мировой энергетической системы на основе 100 % ВИЭ. Новая и единственная в своем роде разработка демонстрирует, как может работать система, в которой основными энергоносителями являются солнце и ветер.

Эти специалисты давно известны своими исследованиями в области моделирования энергетических систем. Ранее ими было разработано моделирование стопроцентной ВИЭ энергосистемы для Евразии, в том числе России. Используя метеорологические данные за 30 лет (1985–2014 гг.), исследователи смоделировали динамику использования ВИЭ на 12 лет вперед – до 2030 г. Показано, что, несмотря на непредсказуемый характер возобновляемой энергетики, солнце и ветер могут компенсировать по



Характерная картина установленных панелей солнечной электростанции

крайней мере 35 % потребностей европейской энергосистемы без существенного влияния на ее стабильность или цены.

Бурный рост ветровой и солнечной энергетики вселяет надежду, что человечество не окажется перед катастрофой в связи с истощением углеводородных энергоносителей. Дальнейший значительный рост солнечной энергетики следует ожидать при переходе транспорта в больших городах на электромобили. Сейчас транспорт потребляет 65 % добываемой нефти.

Когда доступны разные виды энергии, выбор каждой страной путей развития энергетики определяется в первую очередь экономикой. Существенными являются также вопросы экологии, безопасности и независимости от поставок энергии извне.

НАДЫКТО Борис Андреевич –
главный научный сотрудник ИТМФ
РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук,
лауреат Государственной премии СССР,
заслуженный деятель науки РФ