

КОМБИНИРОВАННЫЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ВИЭ

Сегодня большинство стационарных автономных источников энергоснабжения в зависимости от требуемой мощности создаются преимущественно на базе дизельных или бензиновых двигателей внутреннего сгорания и электрогенераторов, непосредственно работающих на потребителя и позволяющих вырабатывать электроэнергию, тепло и, если необходимо, холод (при дополнительном оснащении их холодильными установками) (рис. 1а.). Достоинствами таких установок являются отработанность технологии и относительно невысокая стоимость оборудования. Вместе с тем, в связи с существенно неравномерными графиками потребления энергии такие установки большую часть времени работают в неноминальном режиме, вследствие чего характеризуются повышенными расходами топлива и относительно низким ресурсом и соответственно высокими затратами на топливо и обслуживание. Следует отметить, что, например, по данным Якутэнерго в 2007 году стоимость 1 кВтч электроэнергии, получаемой от дизельных установок мощностью до 100 кВт в отдаленных районах Якутии, куда доставка топлива осуществляется вертолетами, достигала от 25 до 60 руб./кВтч.

Более эффективными традиционными автономными энергоустановками являются установки, снабженные аккумуляторами электрической энергии (рис. 1б). В этой схеме дизель-генератор автоматически включается в работу на номинальной мощности для периодической подзарядки аккумулятора, а переменное электропитание потребителя осуществляется преимущественно от аккумулятора. Работа установки по такой схеме, по некоторым данным, позволяет до 2-3 раз снизить расход топлива и существенно увеличить ресурс и сроки между очередными обслуживаниями дизель-генератора. Несмотря на значительное удорожание установки, связанное с затратами на аккумуляторы, во многих случаях такие установки оказываются более экономически эффективными, чем установки первого типа¹.

В последние годы ведутся активные разработки автономных энергоустановок, оснащенных наряду с дизель-генератором и аккумуляторной батареей ветроустановками, фотоэлектрическими преобразователями, или их комбинацией (рис. 1с). Такое схемное решение позволяет дополнительно сократить расход топлива^{2,3}.

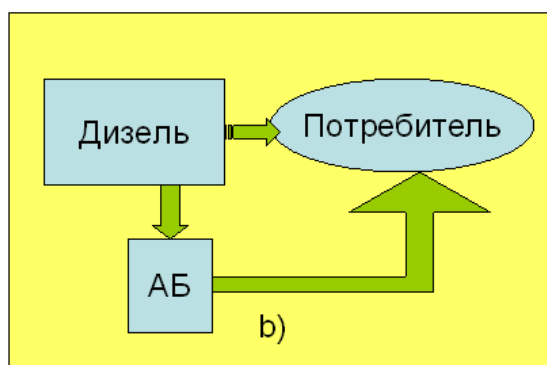
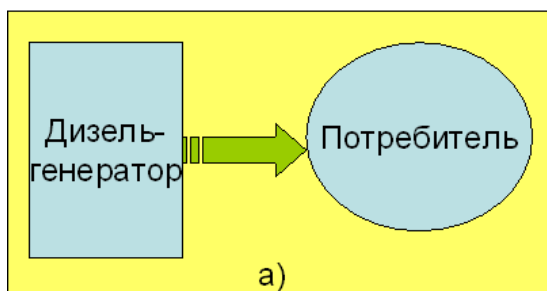
¹ William Isherwood, et.al. Remote power systems with advanced storage technologies for Alaskan villages. Energy 25 (2000) 1005–1020.

² Nayar CV et al. Novel wind/diesel/battery hybrid energy system. Solar Energy 1993;51(1):65–78.

³ M. Asharia,b,*, C.V. Nayara, W.W.L. Keerthipal. Optimum operation strategy and economic analysis of a photovoltaic-diesel-battery-mains hybrid uninterruptible power supply. Renewable Energy 22 (2001), PP. 247-254.

Принципиально новым направлением разработок является создание полностью автономных энергоустановок работающих только на базе фотоэлектрических и ветровых установок или их комбинации (без использования органического топлива) (рис. 1d). В данном разделе приводятся результаты последних исследований именно в этой области.

Традиционные (без ВИЭ)



Новые (с ВИЭ)

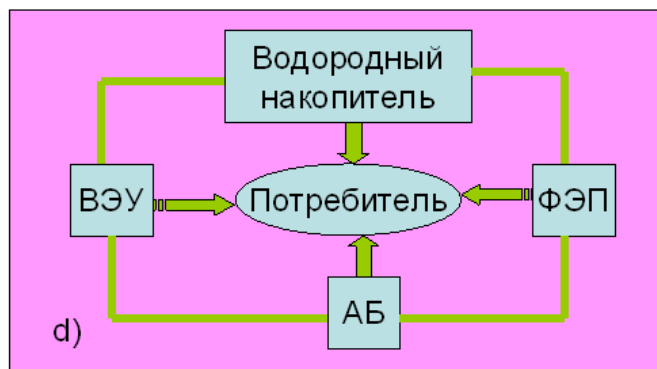
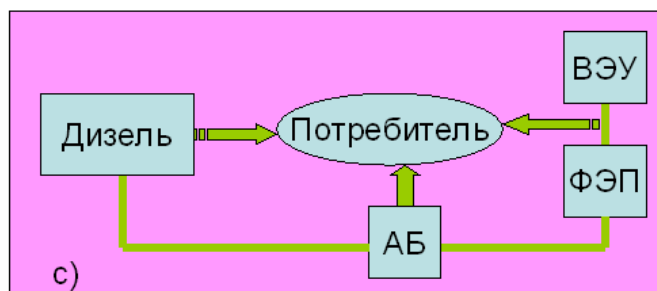


Рисунок 9.1 - Основные типы автономных энергоустановок.

a) и b) – традиционные, c) и d) – новые с ВИЭ

Солнечная энергия, так же как и энергия ветра, являются повсеместно доступными. Однако их непостоянство и сильная зависимость от времени года, времени суток и погодных условий сильно осложняют проблему создания полностью автономных энергосистем, обеспечивающих гарантированное энергоснабжение потребителя. Задача осложняется также тем, что график потребления энергии потребителем тоже, как правило, является неравномерным. В этой связи такие установки требуют использования аккумуляторов электроэнергии, размеры которых и стоимость при мощности установок уже в несколько киловатт могут оказаться чрезмерно большими. Более того, поскольку электрохимические аккумуляторы представляют собой композицию из отдельных элементов относительно небольшой емкости, с увеличением размера батареи число элементов возрастает, а эффективность и надежность их совместной согласованной работы и системы аккумулирования в целом существенно снижается. Это ограничивает возможности наращивания мощности солнечных и ветровых автономных энергоустановок. Имеются проблемы с ресурсом работы аккумуляторных батарей,

ограниченным предельным числом циклов заряда/разряда, и другие. В этой связи до последнего времени предпочтение отдается гибридным энергоустановкам, сочетающим использование возобновляемых источников энергии и традиционных установок на базе двигателей внутреннего сгорания, что обеспечивает экономию топлива и более высокую надежность энергоснабжения, но привносит ранее описанные принципиальные недостатки (необходимость завоза топлива, выбросы, шум, высокие эксплуатационные издержки).

Одним из путей позволяющим избавиться от необходимости гибридизации автономных энергоустановок может стать использование водорода как долгосрочного аккумулятора энергии и промежуточного энергоносителя, что создает возможность существенного улучшения эксплуатационных показателей таких установок.

Принципиальная схема такой автономной энергоустановки на возобновляемых источниках энергии упрощенно может быть изображена в виде, представленном на рис. 2. С целью повышения энергетической эффективности системы автономного энергоснабжения энергия, вырабатываемая первичными источниками энергии, должна напрямую направляться потребителю (путь I). В периоды генерации избыточной для потребителя энергии она должна запасаться системой аккумулирования (путь II). При дефиците энергии, вырабатываемой первичным источником, аккумулированная энергия от вторичных источников должна направляться потребителю, покрывая имеющийся дефицит (путь III).

Система аккумулирования энергии может быть построена на базе накопителя водорода (рис. 3). В установке с водородным накопителем избыток генерируемой электроэнергии направляется на электролиз воды с получением водорода и кислорода. Полученные газы накапливаются в ресиверах. Хранение водорода и кислорода в отличие от аккумулирования электроэнергии в аккумуляторных батареях может осуществляться практически без потерь и сколь угодно долго. При дефиците электроэнергии, вырабатываемой солнечной и/или ветровой установкой, водород и кислород направляются в батарею топливных элементов, производящую недостающее потребителю электричество.

Включение в состав автономной энергоустановки водородного накопителя позволяет обеспечить более надежное и большее по емкости аккумулирование энергии, чем это возможно с электрохимическими аккумуляторами. Вместе с тем, как показывает анализ, полностью отказаться от использования аккумуляторных батарей не представляется возможным. Причина состоит в том, что для обеспечения большого ресурса работы имеющихся на сегодня топливных элементов и электролизеров и соответственно энергоустановки в целом необходимо стабилизировать режимы потребления/отбора

мощности; их эксплуатация в маневренных режимах должна быть ограничена. В этой связи целесообразно создание комбинированных энергоустановок, в которых сочетаются различные вторичные источники электрической энергии, одни из которых, ввиду их высокой энергоемкости (топливные элементы), можно рассматривать как источники энергии, а другие (например, аккумуляторные или конденсаторные накопители) – как источники мощности, обеспечивающие пиковые и переходные режимы потребления мощности нагрузкой. Согласовать режимы работы источников энергии и мощности, входящих в состав автономной энергоустановки, можно с помощью современных высокоэффективных электронных преобразователей и контроллеров. Таким образом, в комбинированных энергоустановках с помощью накопителя водорода решается задача относительно долгосрочного аккумулирования энергии, а с помощью аккумуляторной батареи и/или конденсаторного накопителя - задача краткосрочного аккумулирования и отслеживания переменного графика нагрузки. При этом, в отличие от установок без водородного накопителя, емкость аккумуляторной батареи может быть существенно уменьшена, а пиковая мощность энергоустановки увеличена при одновременном обеспечении ее высокой эксплуатационной надежности.

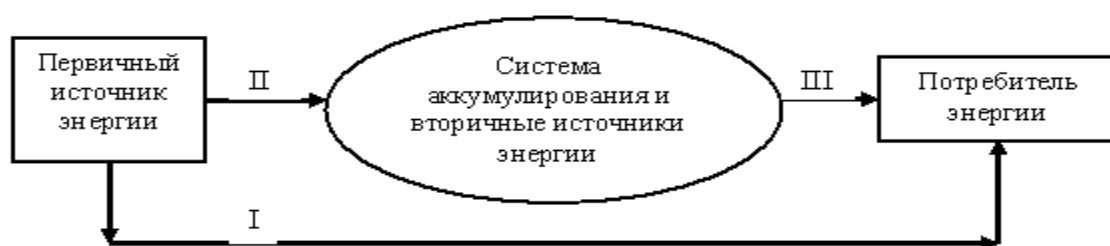


Рис. 2 - Основные компоненты системы автономного энергоснабжения

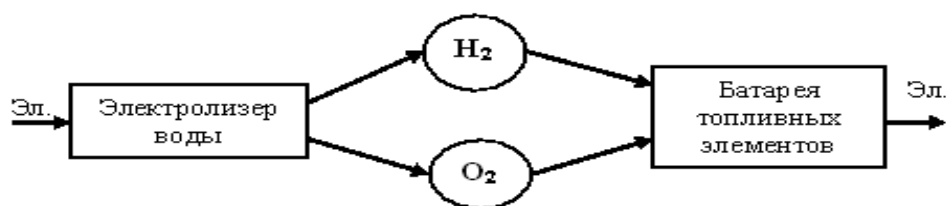
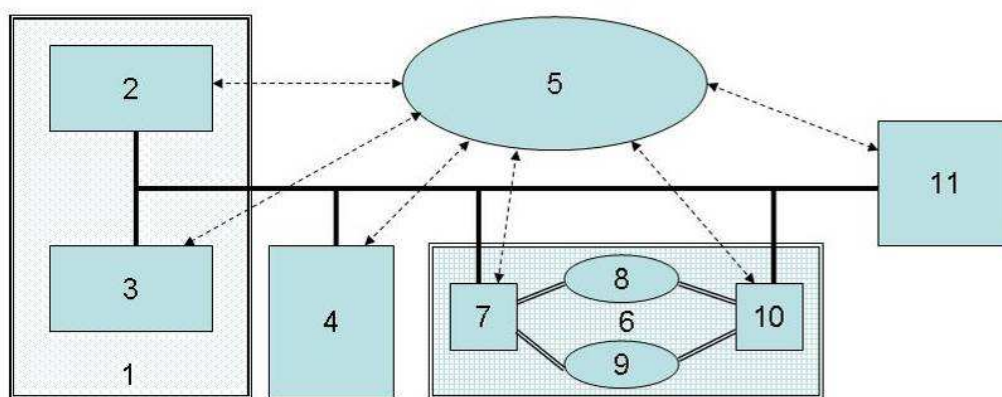


Рис. 3 - Схема водородного накопителя

В интегральном виде обобщенная конфигурация рассматриваемой комбинированной солнечно-ветровой энергоустановки представлена на рис. 4.



Фиг. 1 – Солнечно-ветровая автономная энергоустановка с водородным накопителем.

1 – энергоустановка на возобновляемых источниках энергии, 2 – ветроустановка, 3 – фотоэлектрическая батарея, 4 – аккумуляторная батарея, 5 – система автоматического управления, 6 – водородный накопитель, 7 – электролизер воды, 8 – ресивер водорода, 9 – ресивер кислорода, 10 – батарея топливных элементов, 11 – потребитель

Рис. 4 - Гибридная установка

Ключевой проблемой разработки и создания полностью автономной энергоустановки на возобновляемых источниках энергии является оптимизация конфигурации и состава оборудования, которые обеспечивают гарантированное энергоснабжение заданного потребителя при минимальных затратах. Решение этой проблемы должно базироваться на учете реальных климатических данных места ее предполагаемой эксплуатации, особенностей графика нагрузки и режимных параметров входящих в состав установки компонентов. Принципиально важной является разработка системы автоматического управления, обеспечивающей рациональную логику работы установки, поскольку сочетание в установке первичных и вторичных источников энергии и различных аккумуляторов энергии требует оптимизации алгоритма управления с обеспечением максимальной интегральной эффективности преобразования энергии и ресурса основных узлов установки. Ясно, что поиск оптимальных технических решений при построении эффективных автономных энергоустановок должен базироваться как на экспериментальных исследованиях, так и на построении адекватных математических моделей.

Исследование, разработка и создание комбинированных солнечно-ветровых энергоустановок с планируемой их последующей коммерциализацией является одним из приоритетных направлений разработок Национальной инновационной компании «Новые энергетические проекты», выполняющихся в кооперации с ведущими российскими научными центрами.

Так, в ОИВТ РАН осуществляется комплекс расчетно-теоретических исследований в обоснование оптимальных конфигураций комбинированных солнечно-ветровых

энергоустановок и их состава с учетом реальных климатических условий эксплуатации. В основе реализуемых методик исследований лежат следующие принципы:

- рассматриваются различные конфигурации энергоустановок с различными наборами следующих компонентов: ветроустановка; фотоэлектрический преобразователь; аккумуляторная батарея (краткосрочный аккумулятор), водородный накопитель (долгосрочный аккумулятор), включающий электролизер воды, ресиверы водорода и кислорода, батарея топливных элементов; система автоматического управления компонентами энергоустановки, потребитель (для упрощения задачи на данном этапе рассматривается потребитель постоянной мощностью 1 кВт);

- для каждого из компонентов энергоустановки разрабатываются адекватные математические модели на основе энергетических и материальных балансов с учетом энергетических характеристик максимально приближенных к реальным;

- осуществляется компьютерное динамическое моделирование работы установок в условиях переменных графиков поступления и потребления энергии. Работа установки моделируется в течение 2 лет (для исключения влияния начальных условий на результаты моделирования) с временным шагом расчета 1 час;

- результаты моделирования за 2-ой год эксплуатации энергоустановки статистически обрабатываются с получением обобщенных энергетических характеристик за интересующие интервалы времени (год, полгода, месяц) с отбором вариантов гарантированного энергоснабжения потребителя в течение всего года;

- расчеты выполняются с использованием верифицированных исходных климатических данных для выбранных территорий с географическим разрешением 1×1 градус, основным источником которых служит климатическая база данных NASA SSE;

- отбор оптимальных вариантов состава установок осуществляется на основе критерия минимальной стоимости установки при выполнении условия гарантированного энергоснабжения модельного потребителя. При этом используются современные и перспективные стоимостные показатели оборудования. В результате, для выбранной территории и для каждой из рассматриваемых конфигураций установок определяются оптимальные значения установленных мощностей ветроустановки, ФЭП, емкостей аккумуляторов энергии. Проводится анализ чувствительности стоимости вырабатываемой электроэнергии к изменению основных параметров энергоустановки;

- результаты исследования картографически обрабатываются и представляются в виде набора карт технико-экономических и энергетических показателей.

Рассмотрим некоторые характерные примеры результатов выполненных расчетных исследований.

Рассматривается автономная солнечно-ветровая энергоустановка, работающая на постоянную во времени нагрузку мощностью 1 кВт (переход к потребителям другой мощности может быть осуществлен методом масштабирования).

При проведении стоимостной оптимизации принимается несколько вариантов сочетания удельных стоимостей фотобатарей (или фотоэлектрических приборов, ФЭП), ветроагрегатов (ВЭУ) и аккумуляторных накопителей, отражающих сегодняшний и перспективный уровни стоимостей. В качестве базового рассматривается вариант, в котором удельная стоимость ФЭП принимается равной $750 \text{ \$}/\text{м}^2$, что при КПД ФЭП 15% соответствует примерно $5 \text{ \$}/\text{Вт(пик)}$. Стоимость ВЭУ – $2500 \text{ \$}/\text{кВт}$, электрохимической аккумуляторной батареи – $500 \text{ \$}/\text{кВтч}$. Принятые удельные стоимостные показатели соответствуют современным ценам на рассмотренное оборудование и даже несколько их превышают, чем условно учитывается стоимость дополнительного оборудования (преобразователи, автоматика и т.п.), которое отдельно не рассматривается в рамках данного упрощенного подхода.

В связи с тем, что основным объектом исследования являются энергоустановки гарантированного энергоснабжения потребителя, предполагается, что доля покрытия нагрузки должна быть не менее 0,998 (что соответствует покрытию нагрузки 364 дня в году из 365).

В результате моделирования энергоустановки определяются следующие параметры:

- расчетная себестоимость производимой электроэнергии. Она определяется приближенно путем деления расчетной стоимости автономной энергоустановки на количество потребленной потребителем за 20 лет предполагаемой эксплуатации энергоустановки электроэнергии;

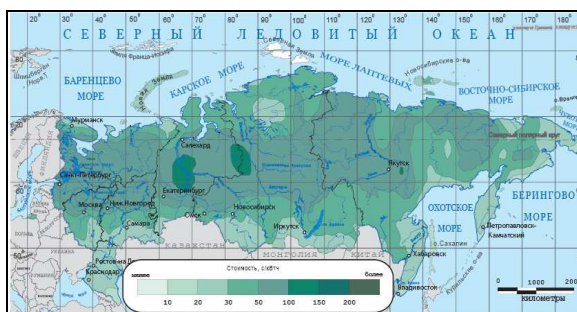
- коэффициент использования первичных источников энергии. Он определяется как отношение отведенной от первичных источников энергии (ФЭП, ВЭУ) к энергии, которую они потенциально могут выработать, и характеризует совершенство схемного решения энергоустановки и, в частности, способность системы аккумулирования к сбору «первичной» энергии.

- расчетная площадь ФЭП, мощность ветроустановки и емкость АКБ, соответствующие оптимальному по стоимости варианту для данной географической точки.

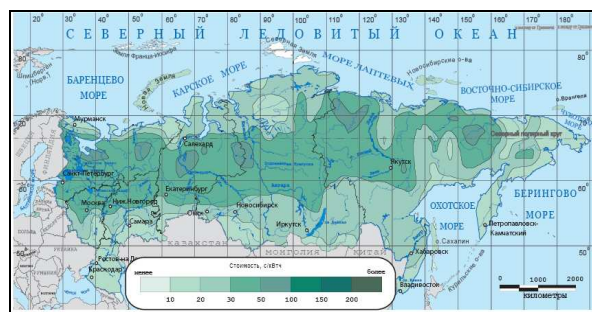
Помимо перечисленных основных параметров в ходе моделирования контролируется доля покрытия нагрузки, а для части вариантов определяется также коэффициент эффективности тракта передачи энергии, представляющий собой отношение энергии, отданной в нагрузку, к энергии, снятой с первичных источников энергии.

Для автономных энергоустановок с водородным накопителем в рассматриваемом случае номинальные мощности электролизера и топливного элемента приняты равными 1 кВт. В связи со значительной неопределенностью в стоимости компонентов водородного накопителя стоимостные расчеты выполняются **без** учета стоимости водородного накопителя, не оказывающей влияния на процедуру оптимизации. При этом рассчитывается «экономия» себестоимости электроэнергии, определяемая как разность этих показателей для вариантов энергоустановки, работающей в одинаковых климатических условиях, «с» и «без» водородного накопителя. Тем самым могут быть оценены предельные удельные капитальные затраты на водородный накопитель, при которых установка с водородным накопителем оказывается равноэкономична с установкой без него.

В качестве примера на рис. 5 представлены карты районирования территории России по расчетной себестоимости электроэнергии, вырабатываемой оптимизированной комбинированной солнечно-ветровой энергоустановкой без (а) и с (б) водородным накопителем (без учета его стоимости).



а)



б)

Рисунок 5 – Расчетная себестоимость электроэнергии, вырабатываемой солнечно-ветровой энергоустановкой, цент/кВтч

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие важные выводы:

- практически на всей территории России с помощью комбинированных солнечно-ветровых энергоустановок принципиально возможно обеспечить круглогодичное гарантированное энергоснабжение рассматриваемого модельного потребителя;

- в зависимости от климатических условий ожидаемая себестоимость электроэнергии по территории России изменяется в довольно широких пределах (от 10 до 100 и выше центов (2,5...25 руб.) за 1 кВтч). Такой широкий диапазон обусловлен особенностями распределений (территориальных и сезонных) ресурсов солнечной и ветровой энергии (см. раздел 8). При недостаточно благоприятном сочетании поступлений солнечной энергии и интенсивности ветровых потоков для гарантированного энергоснабжения приходится увеличивать площадь ФЭП и установленную мощность ВЭУ с одновременным увеличением емкости аккумулятора. Это приводит к увеличению удельных капитальных затрат и соответственно к увеличению себестоимости

электроэнергии. Для иллюстрации данного вывода для рассматриваемого примера на рис. 6-8 представлены карты требуемых для гарантированного энергоснабжения потребителя (в расчете на 1 кВт) площади ФЭП, установленной мощности ВЭУ и емкости АБ соответственно для вариантов с (а) и без (б) водородного накопителя.

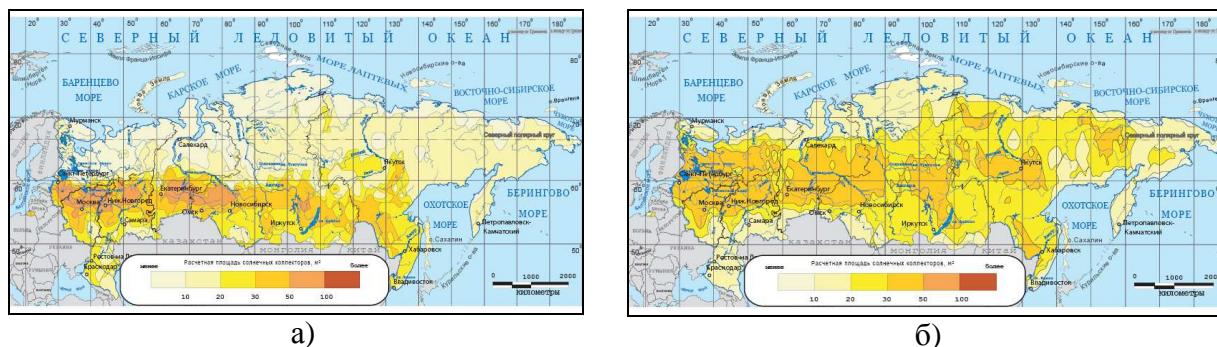


Рис. 6 – Расчетная площадь ФЭП, м²

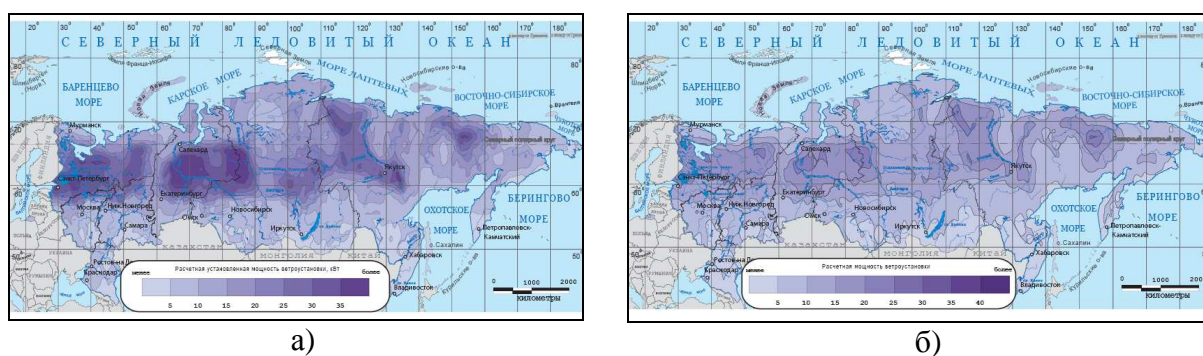


Рис. 7 – Расчетная установленная мощность ВЭУ, кВт

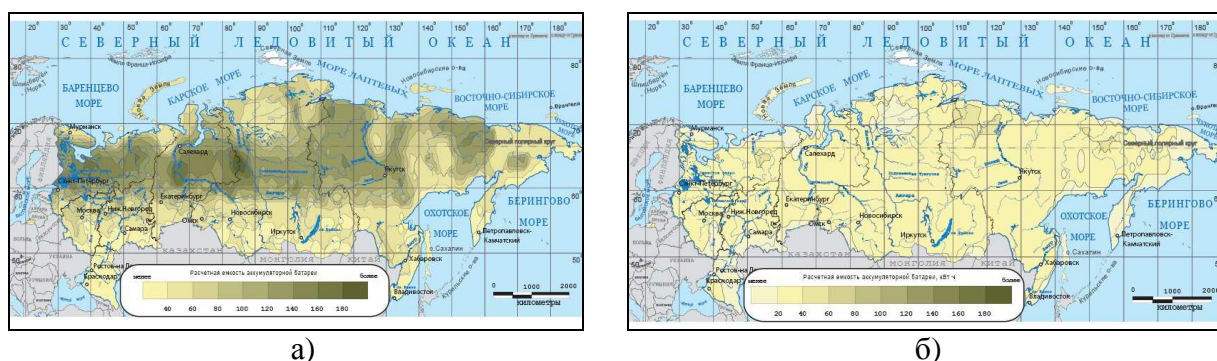


Рис. 8 – Расчетная емкость АБ, кВтч

- наименьшие значения стоимости электроэнергии (10-30 центов (2,5-7,5 руб.) за 1 кВтч) ожидаются в южных и северных районах страны, а также на части Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. Большая часть этих районов не подключена к централизованным сетям энергоснабжения и, следовательно, нуждается в эффективных автономных энергоустановках;

- в вариантах с водородным накопителем стоимость требуемого базового оборудования (ВЭУ, ФЭП, АБ) снижается (карты 6-8 б), чем обеспечивается значительный «запас» для капитальных затрат, требуемых для создания таких накопителей. Оценки показывают, что по себестоимости электроэнергии в варианте

энергоустановки с водородным накопителем экономия в большинстве районов России превышает 10 цент/кВтч, что устанавливает для водородного накопителя достаточно большой предел стоимости более 20000 долларов в расчете на установку, обеспечивающую энергоснабжение потребителя мощностью 1 кВт.

Представленные результаты подтверждают перспективность ведущихся разработок автономных солнечно-ветровых установок, которые в ряде районов страны и уже сегодня могут успешно конкурировать с традиционными энергоустановками на привозном жидком топливе.

Аналогичные исследования проводятся для территорий стран СНГ и некоторых других регионов земного шара.



Рис. 9 – Распределение годовых среднедневных поступлений солнечной энергии по территории России (оптимально ориентированная неподвижная поверхность южной ориентации)

Видно, что территория России разбивается преимущественно на 4 окрашенных разными цветами зоны, причем наиболее «солнечными» районами России оказываются Приморье, юг Иркутской области, Бурятия, Тыва ($4,5 \dots 5$ кВтч/м²·день и выше). Интересно отметить, что высокие суммы солнечной радиации характерны и для некоторых северных районов, лежащих за полярным кругом (Северная Земля). Традиционно считающийся наиболее «солнечным» Северный Кавказ и большая территория Центральной и Восточной Сибири характеризуются одинаковыми суммами приходящей солнечной радиации от 4 до $4,5$ кВтч/м²·день. Важно подчеркнуть то обстоятельство,

что большая часть территории страны от южных до северных границ независимо от широты имеет одинаковые солнечные ресурсы от 3,5 до 4 кВтч/м²день. Лишь западные и восточные «окраины» России характеризуются относительно низкими среднегодовыми поступлениями солнечной радиации от 3 до 3,5 кВтч/м²день.

Для сравнения отметим, что самый «солнечный» район Европы – юг Испании – характеризуется среднегодовым дневным поступлением солнечной радиации 4,7 кВтч/м²день, а юг Германии, где сегодня идет активное внедрение солнечных установок – 3,3 кВтч/м²день.

Как видно из представленной карты, наиболее солнечные регионы России по суммам поступающей солнечной радиации практически не уступают считающимся благоприятными для эффективного использования солнечной энергии европейским странам. Безусловно, Россия характеризуется гораздо более холодным климатом, особенно в зимнее время, что накладывает некоторые ограничения и дополнительные требования к солнечным установкам. Однако представленные выше объективные данные достаточно убедительно опровергают широко бытующее представление о том, что территория России бедна солнечными ресурсами.

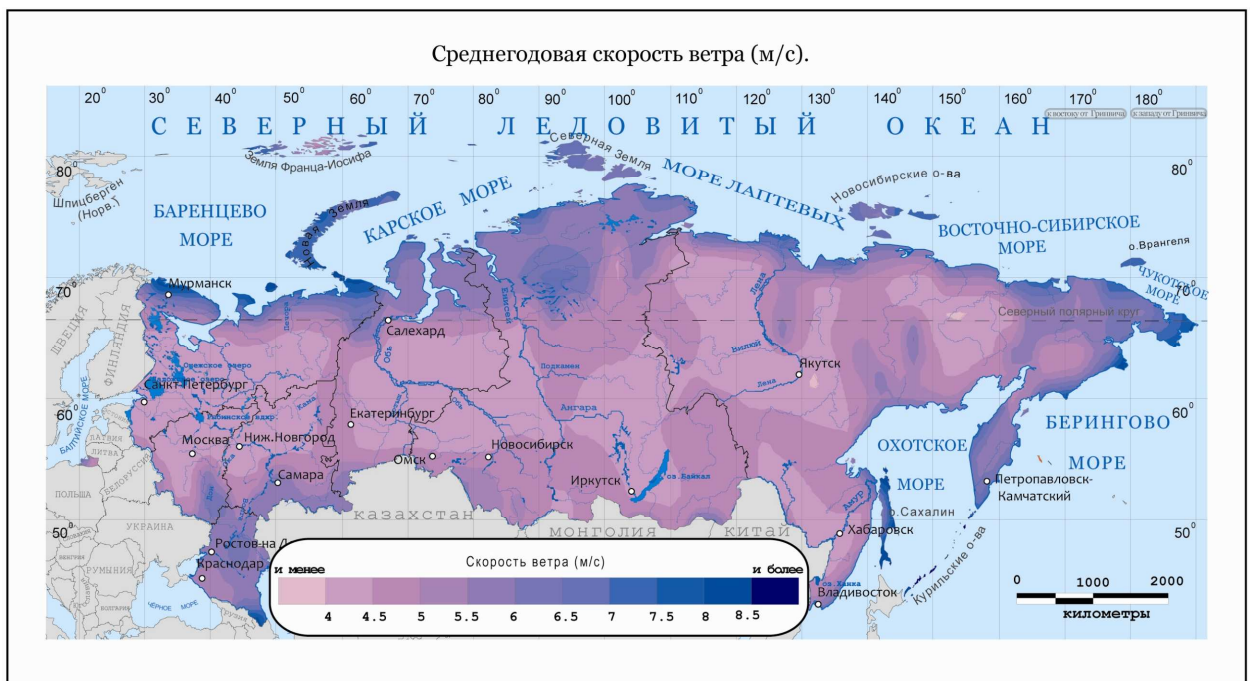


Рис. 10 - Распределение значений среднегодовых скоростей ветра на высоте 10 м по территории России (по данным НАСА)