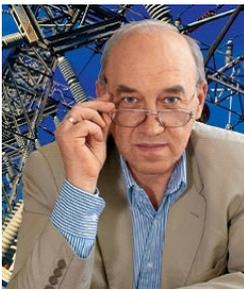


Когенерационные автономные ветроустановки с теплоаккумуляторами

О.С. Попель, А.М. Анисимов

На основе моделирования работы автономной ветроустановки показано, что вследствие несовпадения графиков производства и потребления электроэнергии в зависимости от ветровых условий места эксплуатации от 40 до 80% вырабатываемой установкой электроэнергии не используется потребителем, а, как правило, рассеивается в окружающую среду на балластном сопротивлении. С целью повышения эффективности использования энергии ветра предлагается аккумулировать избытки электроэнергии в твердофазном тепловом аккумуляторе с обеспечением автономного потребителя не только электричеством, но и теплом. На примере модельного потребителя представлены результаты расчетов себестоимости электроэнергии, годовых энергетических балансов автономных энергоустановок для территории России и помесечных балансов для нескольких конкретных мест возможного использования ветроустановок.



Попель Олег Сергеевич, доктор технических наук, заведующий лабораторией возобновляемых источников энергии и энергосбережения Объединенного института высоких температур РАН, заместитель председателя Научного совета Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления Российской Академии Наук по нетрадиционной возобновляемой энергетике, автор более 200 научных публикаций



Анисимов Александр Михайлович, генеральный директор ООО «Энергоресурс-стэ», г. Петрозаводск, инженер-энергетик, специалист в области разработки и производства отопительного оборудования, использующего провальную (ночную) электроэнергию и твердофазные аккумуляторы тепла. Имеет несколько патентов. Опыт руководства горными и энергетическим промышленным предприятием, в том числе работа с 1992 г. по созданию изделий из талькохлорита

Постановка задачи

Разработка эффективных технологий автономного энергоснабжения потребителей с использованием возобновляемых источников энергии является актуальной технической, экономической и социально значимой проблемой. Более 2/3 территории России находится вне систем централизованного энергоснабжения. В этих районах проживает около 20 млн человек. Энергоснабжение таких потребителей за счет привозного топлива и использования дизельных и бензогенераторов становится все более и более затратным. В некоторых местах, например в Якутии, в 2007 году себестоимость электроэнергии от дизель-генераторов мощностью до 100 кВт превысила 25 руб./кВт·ч.

Наличие во многих регионах страны ограничений на подключение к электрическим и газовым сетям приводит к стихийному развитию в стране малой электроэнергетики. В период 2001-2007 гг. ежегодные вводы малых электростанций в стране выросли с 1,4 ГВт в 2001 г. до 3,9 ГВт в 2007 г. При этом ежегодные вводы крупных электростанций в стране за тот же период варьировались в диапазоне 0,6-2,9 ГВт в год. В результате суммарный ввод крупных электростанций в стране за период 2001-2007 гг. составил 9,7 ГВт, а малых – 13,4 ГВт. Рынок активно реагирует на изменение ценовых факторов и появление инфраструктурных ограничений и требует более широкого использования малых энергоустановок.

В настоящее время расширяется применение ветро-дизельных энергоустановок, сочетающих в едином комплексе дизельную и ветровую установки. Такое решение позволяет существенно сократить потребление привозного топлива, однако решает перечисленные выше проблемы не в полной мере. В данной работе рассматривается возможность гарантированного энергоснабжения автономных потребителей с помощью только ветровых установок (дизельный или бензогенератор рассматривается как резервный источник, используемый только в экстренных случаях).

Структурная схема традиционной системы энергоснабжения автономного потребителя на базе ветроустановки изображена на рис. 1. Можно выделить следующие характерные режимы ее работы. При достаточно высоких скоростях ветра вырабатываемая ветроустановкой электроэнергия направляется непосредственно потребителю и, если аккумулятор заряжен не до предела, то и на его подзарядку. При небольших скоростях ветра питание потребителя

дополнительно осуществляется от аккумуляторной батареи. В случае, когда аккумулятор полностью заряжен, а вырабатываемая ветроустановкой электрическая мощность превышает необходимую потребителю, избытки электроэнергии сбрасываются на балластном сопротивлении и в виде тепла рассеиваются в окружающую среду.

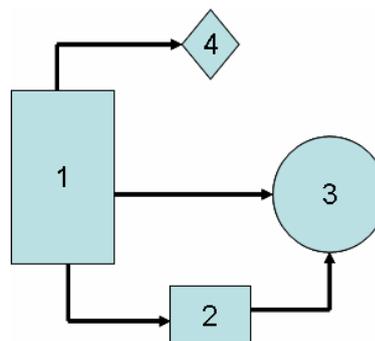


Рис. 1. Традиционная схема электроснабжения автономного потребителя от ветроустановки: 1 – ветроустановка, 2 – электрохимический аккумулятор, 3 – потребитель, 4 – балластное сопротивление

При известных параметрах потребителя номинальная мощность ветроустановки и емкость аккумуляторной батареи выбираются исходя из ветровых условий места предполагаемой эксплуатации установки. Балластное сопротивление рассчитывается на возможность «сброса» максимальной вырабатываемой ветроустановкой электрической мощности.

Анализ показывает, что практически в любой географической точке за счет наращивания мощности ветроустановки и увеличения емкости аккумуляторной батареи с помощью рассматриваемой установки можно добиться гарантированного электроснабжения небольшого автономного потребителя. Однако в районах с недостаточно интенсивными ветровыми потоками или с длительным сезонным ветровым затишьем требуемая мощность ветроустановки и емкость аккумуляторной батареи могут стать столь большими, что экономически создание такой установки оказывается нецелесообразным или даже технически невозможным.

В данной работе для упрощения анализа в качестве потребителя рассматривается постоянная во времени электрическая нагрузка мощностью 1 кВт. При таком подходе переход к потребителю большей мощности может быть осуществлен с использовани-

ем масштабного фактора. Суточная изменчивость графика нагрузки, характерная для реального потребителя, в рамках данной работы не рассматривается, поскольку наиболее существенными для данной задачи является суточная и сезонная изменчивость ветрового потока.

Распределение ветровых ресурсов на территории России представлено на рис. 2 [1-3].

Видно, что во многих районах страны, прежде всего прилегающих к морским акваториям, среднегодовая скорость ветра превышает величину 5 м/с, с которой обычно начинают рассмотрение практических возможностей энергетического использования ветровых потоков.



Рис. 2. Среднегодовая скорость ветра на высоте 50 м на территории России

Целью настоящей работы является расчетное исследование эффективности использования ветровой энергии для автономного энергоснабжения потребителей на территории России. В качестве основного показателя эффективности рассматривается себестоимость электроэнергии, вырабатываемой ветроустановкой с оптимальным соотношением установленной мощности ветроустановки и емкости аккумуляторной батареи при условии гарантированного в течение всего года энергоснабжения модельного потребителя постоянной мощностью 1 кВт. Критерием оптимальности состава ветроустановки служит минимальная себестоимость электроэнергии. Расчет себестоимости электроэнергии упрощенный: она определяется как отношение суммарной стоимости основного оборудования, входящего в состав энергоустановки (ветроагрегат + аккумуляторная батарея), к количеству выработанной за срок службы электроэнергии. Предполагается, что срок службы энергетического оборудования составляет 20 лет. Эксплуатационные издержки не учитываются. Удельные стоимости ветроустановки и аккумуляторной батареи принимаются на уровне сегодняшних цен (базовый вариант: $c_{ВЭУ} = 2500$ долларов за 1 кВт установленной мощности, $c_{АБ} = 500$ долларов за 1 кВт·ч емкости аккумуляторной батареи, что соответствует стоимости современных литий-ионных АБ, характеризующихся в отличие от тради-

ционных свинцовых аккумуляторов повышенным допустимым числом циклов заряда/разряда и возможностью глубокого разряда батареи.

Коэффициент годового покрытия нагрузки принимается равным не менее 0,998, что соответствует покрытию нагрузки 364 дней в году из 365.

В качестве исходных климатических данных используется база данных NASA [4], при этом среднемесячные скорости ветра берутся на высоте 50 м над поверхностью земли.

Следует отметить, что в связи с нелинейной зависимостью мощности ветроустановки от скорости ветра для расчета выработки электроэнергии среднемесячные данные по скорости ветра пригодны мало: необходимо учитывать изменчивость ветра в течение времени. В этой связи в рамках разработанной модели для численных расчетов использовались часовые последовательности скоростей ветра, генерируемые на основе среднемесячных параметров ветра программой динамического моделирования установок на возобновляемых источниках энергии TRNSYS [5, 6]. Таким образом, час за часом осуществлялось численное моделирование работы установки в течение 2-х лет. Для статистической обработки берутся данные второго года эксплуатации, что позволяет отсечь влияние начальных условий (начальный уровень заряда аккумуляторной батареи).

Отбор оптимальных конфигураций ветрокомплекса, соответствующих критерию гарантированного энергоснабжения модельного потребителя при минимальной стоимости энергетического оборудования, осуществляется с помощью специально разработанной оптимизационной процедуры из большого числа вариантов, характеризующихся разными соотношениями мощности ветроустановки и емкости аккумуляторной батареи, для каждой из 3815 географической ячейки территории России размером 1x1 гр.

Генерируемая ветроустановкой электрическая мощность рассчитывалась в соответствии с типичной зависимостью мощности от скорости ветра, изображенной на рис. 3. Для этой зависимости характерными точками являются стартовая скорость $V_{\text{старт}}$ (скорость срабатывания), принимавшаяся равной 3 м/с, номинальная скорость $V_{\text{ном}}$ (9 м/с), при которой ветроустановка выходит на номинальную мощность $N_{\text{ном}}$ и $V_{\text{пред}}$ – максимальная рабочая скорость (25 м/с). На участке между $V_{\text{старт}}$ и $V_{\text{ном}}$ мощность ветроустановки считалась пропорциональной кубу скорости ветра. Принятые в расчетах параметры характерны для широкого спектра ветроустановок различной номинальной мощности.

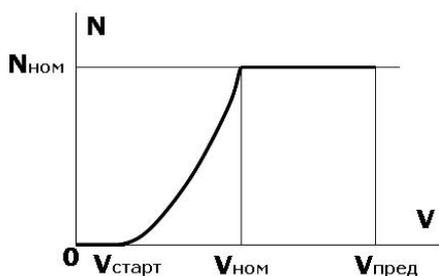


Рис. 3. Типичная характеристика ветроустановки

Разработанная программа моделирования работы ветроустановки в качестве важного компонента включает в себя блок автоматического управления, обеспечивающий управление энергетическими потоками между ветроустановкой, аккумуляторной батареей, нагрузкой и балластным сопротивлением в соответствии с описанным выше алгоритмом.

Одним из ключевых результатов расчетов является доля выработанной ветроустановкой электроэнергии за различные периоды времени, полезно использованная потребителем. Ее величина позволяет судить об энергетической эффективности энергокомплекса.

Ниже приведены некоторые обобщенные результаты выполненных расчетных исследований и сформулированы предложения по повышению эффективности использования ветроустановок для автономного энергоснабжения потребителей в различных регионах России.

Результаты расчетных исследований

Как отмечалось выше, одним из важнейших параметров, характеризующих эффективность использования ветроустановок для гарантированного автономного электроснабжения потребителя, является себестоимость производимой электроэнергии. Несмотря на то, что в рамках настоящей работы расчет величины себестоимости осуществлялся весьма упрощенно, использованный подход позволяет, по крайней мере, оценить порядок величин и, что особенно важно, сопоставить на основе единой методики эффективность применения ветроустановок в различных регионах страны.

На рис. 4 представлена карта распределения по

территории России себестоимостей электроэнергии от автономной ветроустановки, полученного по описанной выше методике.

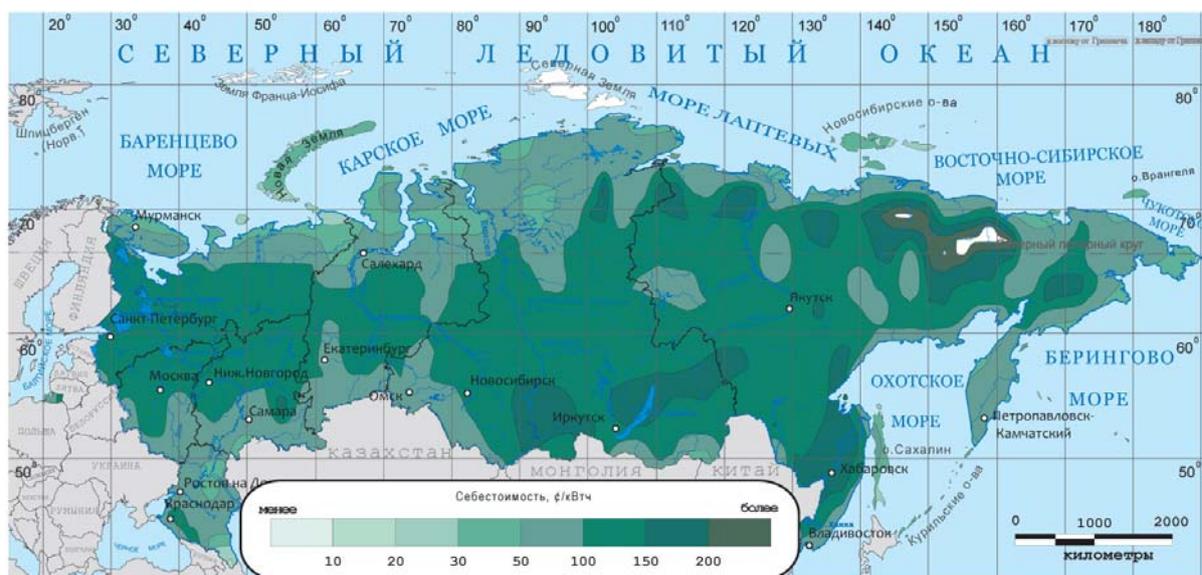


Рис. 4. Себестоимость электроэнергии от автономной ветроустановки, центи/кВт·ч

Для некоторых районов на севере, юге и на востоке страны с наиболее благоприятными ветровыми условиями расчетная себестоимость может составлять менее 30 центов/кВт·ч, или менее 10 руб./кВт·ч. С другой стороны, в центральных районах, где скорости ветра невелики, расчетная себестоимость превышает 1 доллар за кВт·ч, а в некоторых (белые пятна на территории Восточной Сибири) вследствие долгих периодов фактического безветрия обеспечить гарантированное электроснабжение автономных потребителей с помощью ветроустановок оказывается практически невозможным. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что на территории страны имеются весьма благоприятные для использования автономных ветровых установок районы, где можно рассчитывать на вполне экономически разумное их применение, особенно для электроснабжения потребителей, не подключенных к централизованным сетям.

Рассмотрим теперь вопрос о том, насколько эффективно используется электроэнергия, выработан-

ная автономными ветроустановками. Как отмечалось выше, для количественной оценки этой эффективности нами используется показатель, характеризующий долю полезно использованной потребителем электроэнергии от суммарно выработанной за определенный период времени. Повторим, что в связи с существенным несопадением графиков выработки электроэнергии и ее потребления значительную часть электроэнергии оказывается невозможным аккумулировать из-за ограниченности емкости аккумуляторной батареи, и избыток электроэнергии в традиционных установках приходится сбрасывать на балластном сопротивлении.

На рис. 5 представлена карта, наглядно демонстрирующая распределение показателя эффективности по территории России, исходя из годового баланса выработанной ветроустановкой и отданной потребителю электроэнергии. Напомним, что рассматривается энергоустановка оптимальной конфигурации, обеспечивающая гарантированное электроснабжение потребителя постоянной мощностью 1 кВт.

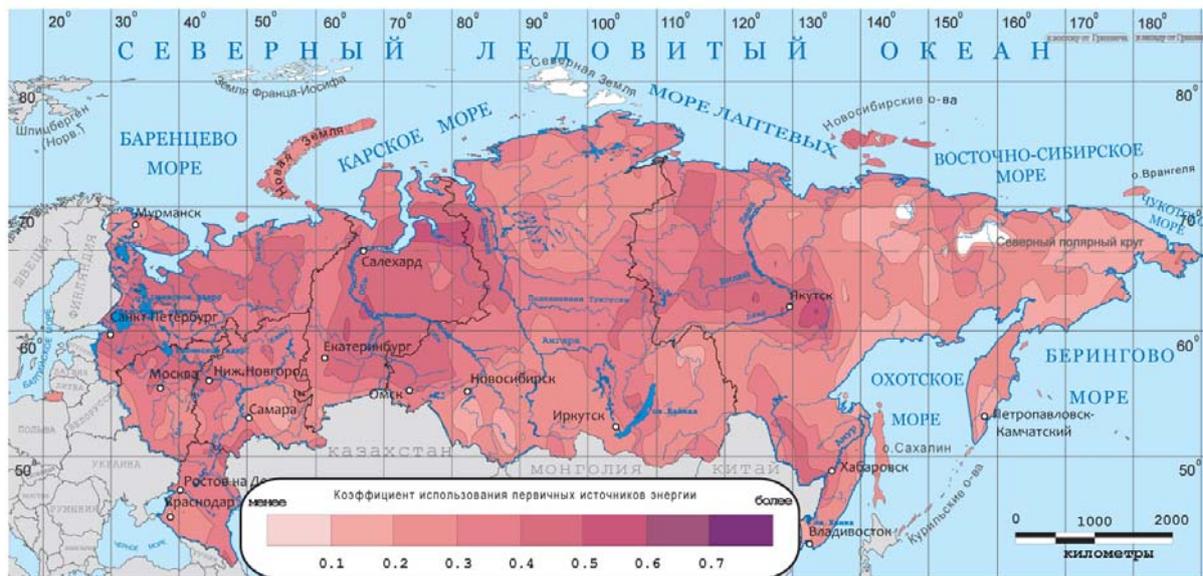


Рис. 5. Годовая доля полезного использования выработанной автономной ветроустановкой электроэнергии

Видно, что рассматриваемый показатель изменяется по территории России от 20 до 60%, что означает, что в годовом разрезе 40-80% выработанной ветроустановкой довольно дорогой электроэнергии вынужденно теряется на балластном сопротивлении, рассеиваясь в окружающую среду.

Более детальная помесечная информация о соотношении неиспользованной и полезно использованной модельным потребителем электроэнергии для нескольких конкретных пунктов, расположенных в различных регионах страны (Махачкала, Ейск, Анадырь, Южно-Сахалинск), приведена на рис. 6.

Для всех рассмотренных пунктов имеет место явно выраженное сезонное изменение данного показателя.

В зимние периоды времени величина неиспользуемой энергии существенно больше, чем в летние месяцы, что обусловлено большей интенсивностью ветров в холодные периоды года. На том же рисунке справа для рассмотренных пунктов с учетом температур наружного воздуха приведены помесечные распределения расчетных значений градусо-дней, характеризующих потенциальную отопительную тепловую нагрузку помещений¹. Легко заметить хорошую качественную корреляцию между рассмотренными показателями эффективности использова-

¹ Градусо-дни рассчитывались, исходя из требуемой температуры в помещении 18° С

ния энергии ветра и потенциальной тепловой нагрузкой. Естественным представляется использование избытков вырабатываемой автономной ветроустановкой электроэнергии для покрытия тепловых на-

грузок потребителей. Ясно, что для этого ветроустановку необходимо снабдить эффективным аккумулятором тепла, утилизирующим избытки генерируемой энергии.

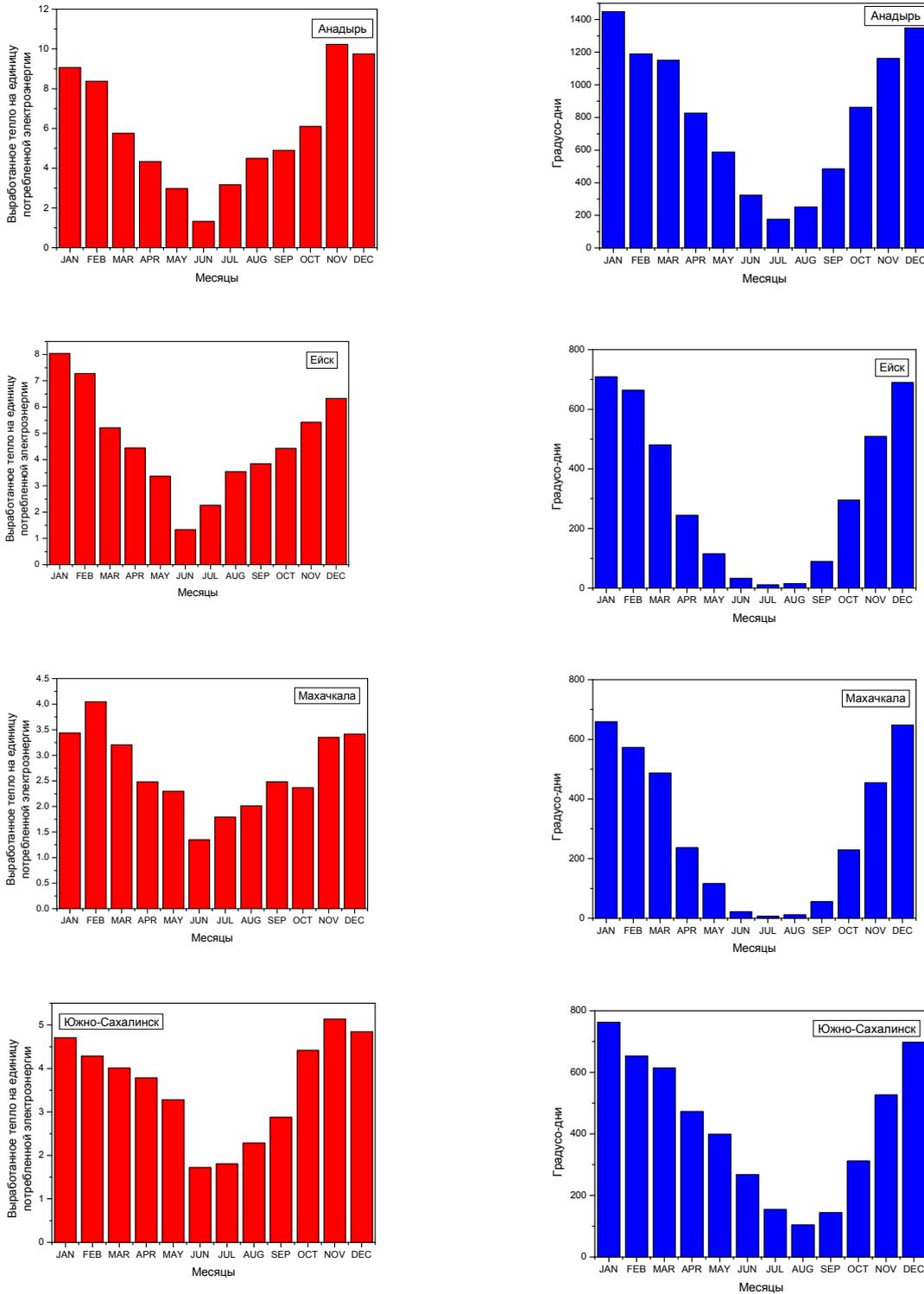


Рис. 6. Расчетные помесачные отношения «избытков» электроэнергии, которые могут быть преобразованы в тепло и аккумулированы в тепловом аккумуляторе, к полезно используемой электрической энергии (слева) и годовые распределения градусо-дней (справа) для некоторых пунктов России

В этом случае принципиальная схема автономной ветроустановки должна иметь вид, представленный на рис. 7. Вместо балластного сопротивления установка должна быть снабжена тепловым аккумулятором, в который встроен электронагреватель, преобразующий избытки вырабатываемой электроэнергии в тепло. Тепловой аккумулятор может быть размещен непосредственно у потребителя, и тепло, аккумулированное в нем, может быть использовано для отопления и горячего водоснабжения с применением известных инженерных решений.

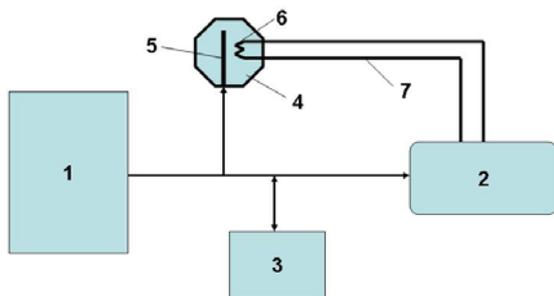


Рис. 7. Схема автономной ветроустановки с аккумулятором тепла: 1 – ветроустановка, 2 – потребитель, 3 – аккумуляторная батарея, 4 – тепловой аккумулятор, 5 – электронагреватель, 6 – теплообменник, 7 – трубопроводы системы теплоснабжения

Основная проблема, стоящая на пути практической реализации предлагаемой схемы комбинированного электро-теплоснабжения автономного потребителя, состоит в выборе конструкции самого теплового аккумулятора. В предлагаемой схеме энергоснабжения могут быть использованы водяные аккумуляторы, аккумуляторы тепла с теплоаккумулирующими материалами на фазовых переходах или твердофазные аккумуляторы. Сравнительный анализ таких конструкций по техническим и экономическим показателям является предметом отдельного исследования. На наш взгляд, по соображениям надежности, простоты обслуживания, технической готовности и технико-экономическим показателям наиболее привлекательными являются твердофазные аккумуляторы тепла, в основе конструкции которых используются природные минералы, допускающие десятки тысяч циклов нагрева до температур в несколько сотен градусов без

изменения механических и прочностных свойств. Хотя удельная теплоемкость таких материалов примерно в 2 раза ниже, чем у воды, но допустимость их разогрева до 500-600° С обеспечивает возможность создания достаточно компактных конструкций, занимающих в несколько раз меньший объем, чем водяные аккумуляторы и фазопереходные аккумуляторы при одинаковой интегральной тепловой емкости. Опыт разработки и создания таких аккумулирующих устройств накоплен компанией «Энергоресурс-стэ», г. Петрозаводск [7].

В настоящее время совместно с компаниями «Сайнмет» (г. Дубна) и РКЦ «Вертикаль» (г. Челябинск) начаты натурные испытания автономных ветроустановок, оснащенных твердофазными аккумуляторами тепла, утилизирующими избытки вырабатываемой ветроустановками электроэнергии. Отработка разрабатываемых конструкций позволит предоставить автономным потребителям новый вид энергетических установок, обеспечивающих их не только электроэнергией, но и удовлетворяющих потребности в тепле.

Список литературы

1. Попель О.С. Перспективы развития возобновляемых источников энергии: обобщенные показатели // Энергия: экономика, техника, экология. 2007. № 3. С. 6-11.
2. Попель О.С. Перспективы развития возобновляемых источников энергии: роль ВИЭ в энергетике // Энергия: экономика, техника, экология. 2007. № 7. С. 2-12.
3. Попель О.С., Туманов В.Л. Возобновляемые источники энергии: состояние и перспективы развития // Альтернативная энергетика и экология. 2007. № 2. С. 135-148.
4. <http://eosweb.larc.nasa.gov>.
5. TRNSYS – The Transient System Simulation Program // <http://sel.me.wisc.edu/TRNSYS/>
6. Hall I., Prairie R., Anderson H., Boes E. Generation of typical meteorological years for 26 SOLMET stations. SAND78-1601. Sandia National Laboratories. Albuquerque. 1978 (<http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/tmy2/overview.html#method>).
7. <http://www.steatit.ru>.