Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

УДК: 621.548, 621.311.24

Анализ аккумуляторов возобновляемой энергии ветра и солнечного излучения

Воронин С.М.[1], Украинцев М.М.[2], Салаев Б.К.[1], Эвиев В.А.[1], Курепина Н.Л.[1], Оконов М.М.[1]

[1]Калмыцкий государственный университет им. Б.Б. Городовикова

[2]Азово-Черноморский инженерный институт «Донской ГАУ»

Аннотация

Проведен анализ аккумуляторов, работающих в автономных ветроэнергетических и солнечных энергоустановках. Оценены перспективы применения аккумуляторов и даны рекомендации по их использованию.

Ключевые слова: АККУМУЛЯТОРЫ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ, ПНЕВМОАККУМУЛЯТОРЫ, ГИРОСКОПЫ, ПРУЖИННЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ, ТЕПЛОВЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ С ФАЗОВЫМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ, ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Широкодоступным возобновляемым источникам энергии (солнечное излучение и ветер) присущ существенный недостаток – они не регулярны и не управляемы. При автономном энергоснабжении это требует их резервирования. Наиболее популярным источником резервирования в настоящее время являются топливные электростанции. Этот резервный источник обеспечивает наибольшую надежность электроснабжения, но такое резервирование порождает некоторые проблемы.

Во-первых, не используются преобразователи возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в период их невостребованного действия. Во-вторых, при малых нагрузках в несколько раз увеличивается удельный расход дорогостоящего углеводородного топлива [1-3], что снижает КПД топливных электростанций и уменьшает их эффективность. Вместе

с тем, аккумулирование невостребованной энергии позволит уменьшить мощность резервной топливной электростанции и уменьшить расход углеводородного топлива. При этом, кроме прямого экономического эффекта, будет снижено отрицательное влияние на экологию [2, 4, 5].

Устранить недостаток резервирования топливными электростанциями способно аккумулирование возобновляемой энергии с последующей отдачей накопленной энергии потребителям. Положительными свойствами аккумулирования являются:

- полное использование ВИЭ;
- предотвращение работы резервных топливных электростанций с пониженным КПД;
- возможность уменьшения мощности резервных топливных электростанций;
- высокое (практически мгновенное) быстродействие включения резерва.

К недостаткам резервного аккумулирования следует отнести неизбежную потерю энергии в цикле «аккумулирование – отдача» из-за КПД аккумуляторов меньше единицы, и сложности аккумулирования некоторых видов ВИЭ.

На основании вышеизложенного ***целью работы*** является поиск эффективных в настоящее время и перспективных вариантов применения аккумулирования возобновляемой энергии. Достичь поставленную цель предполагается путем научного анализа аккумуляторов энергии и процессов аккумулирования. Анализ проводится с учетом вида энергии (ветер – механическая энергия, солнечное излучение – тепловая и электромагнитная энергия).

Энергия ветра.

Энергия ветра является кинетической энергией поступательно движущейся воздушной массы, которая в ветроустановке преобразуется в кинетическую энергию вращательного движения ветроколеса. Далее энергия ветроколеса передается либо на генератор (ветроэлектростанция), либо на насос (водоподъемная ветроустановка) [3, 6]. Передача энергии на иные рабочие механизмы, например, мельничные жернова, в настоящее время не применяется.

Использование энергии ветра для водоподъема обуславливает применение гидроаккумуляторов в виде ветроустановки с гидроаккумулятором (рис. 1).

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

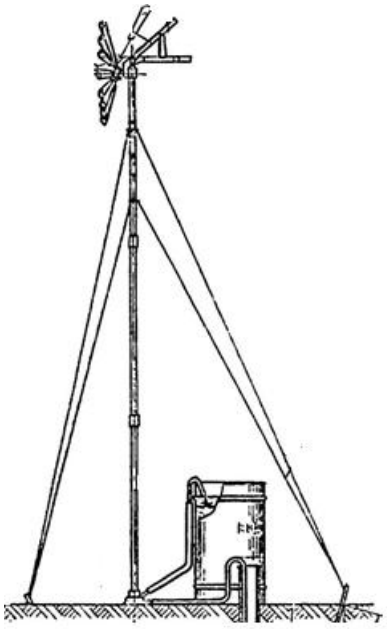


Рис. 1. Водоподъемная ветроустановка «Ромашка» с гидроаккумулятором

Водоподъемные ветроустановки изначально предполагают использование емкости для накопления воды [3], поэтому дополнительных затрат на устройство гидроаккумулятора не требуется. Для обеспечения необходимого напора емкость с водой обычно располагают на некоторой высоте, не менее двух метров. В этом случае эффективность гидроаккумулятора можно повысить путем установки мини генератора на выходе из распределительного водопровода. Это позволит при потреблении воды вырабатывать электроэнергию постоянного тока и аккумулировать ее в электрохимическом аккумуляторе. Впоследствии накопленная таким образом электроэнергия может использоваться для электроснабжения небольших потребителей постоянного тока, например, дежурное освещение, а при установке инвертора напряжений, и для потребителей переменного тока. Такое дополнение гидроаккумулятора будет особенно полезно, если для водоподъема используется электронасос, питаемый от ветроэлектростанции, так как в этом случае не потребуется дополнительная установка инвертора напряжения, аккумуляторных батарей, контролера заряда и другого электрооборудования.

Ветроустановки небольших (до 10 кВт) ветряных электростанций работают в условиях изменчивости скорости ветра в широком диапазоне 4 – 15м/с, где начало интервала несколько превышает скорость трогания, а конец интервала соответствует устойчивости при буре [3, 7]. В таких условиях трудно обеспечить стабильное напряжение,

необходимое потребителям энергии. Поэтому небольшие ветроэлектростанции снабжаются электрохимическими аккумуляторами, работающими в буферном режиме (рис. 2, 3).

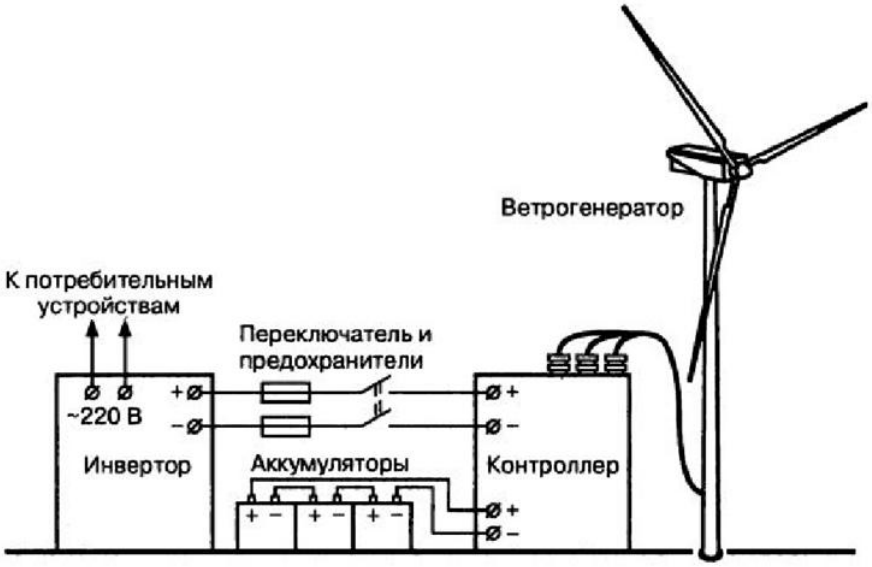


Рис. 2. Ветроэлектростанция с электроаккумуляторным резервом

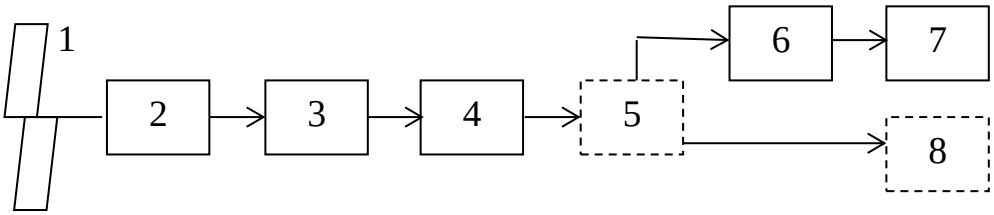


Рис. 3. Блок-схема автономной ветроэлектростанции

Примечание: 1 – ветроколесо, 2- генератор постоянного тока, 3 – контролер заряда-разряда, 4 – аккумуляторная батарея, 5 – распределительное устройство, 6 - инвертор напряжения, 7 – потребители переменного тока, 8 – потребители постоянного тока.

Электрохимические аккумуляторы менее требовательны к устойчивости напряжения заряда, а стабилизация напряжения заряда в нужных пределах достигается путем применения несложных контролеров заряда-разряда.

Емкость аккумуляторов для автономных систем электроснабжения определяется по известным методикам [1, 8, 9]. Тип и модель аккумулятора выбираются по критериям оптимальности (надежность электроснабжения, себестоимость электроэнергии, срок службы, сложность эксплуатации и др.), которые формируются заказчиком ветроэлектростанции. Характеристики современных аккумуляторов, необходимых для оптимального выбора, приведены в таблице 1.

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

Таблица 1. Характеристики электрохимических аккумуляторов

Характеристики	Аккумуляторы					
	Щелочные	Свинцово-кислотные			Литий-ионные	
	Ni-MH	Стартерные	VRLA (AGM)	TPPL (AGM)	Литий-фосфатные	Литий-титанатные
Номинальное напряжение банки, В	1,2	2,0	2,0	2,0	3,2	2,4
Удельная энергия, Вт.ч/кг	50 – 80	30 – 40	45 – 50	45 – 50	90 – 120	120 – 180
Температура окружающей среды, ºС	-40…+60	-40…+60	-40…+60	-40…+90	-30…+55	-40…+55
Количество циклов до 50% разряда	500 – 1000	150	450	650	2000	6000
Безопасность эксплуатации	высокая	средняя	высокая	высокая	требуется система контроля	требуется система контроля
Саморазряд, проц./месяц	20 – 30	5	2	1	3 – 5	3 – 5
Периодичность контроля, мес.	3 – 4	3 – 4	6	6	постоянно (система контроля)	постоянно (система контроля)
Примерная цена (на 55 А·ч), тыс. руб.	5	7 – 9	10 – 12	20	60	120
Средний срок службы, лет	5 – 7	5 – 6	8 – 12	12 - 15	8 – 12	10 – 15

Энергию вращательного движения ветроколеса возможно аккумулировать и другими аккумуляторами, среди которых теоретически интерес могут представлять пневматические аккумуляторы, гироскопические аккумуляторы (маховики), пружинные аккумуляторы [9-11]. Но практическое их применение менее эффективно, чем рассмотренные аккумуляторы (поднятая емкость с водой и электрохимические аккумуляторы). Причинами являются следующие факторы.

Пневматические аккумуляторы предполагают закачивать и хранить воздух в ресивере под давлением 1,5 – 2 МПа. Это, во-первых, потребует применения компрессора, что значительно усложнит систему энергоснабжения, а во-вторых, при таком давлении стенки ресивера должны быть в 10 – 20 раз толще, чем у бака-аккумулятора воды. Кроме того, при таком давлении исключается применение полимерных материалов, что допустимо

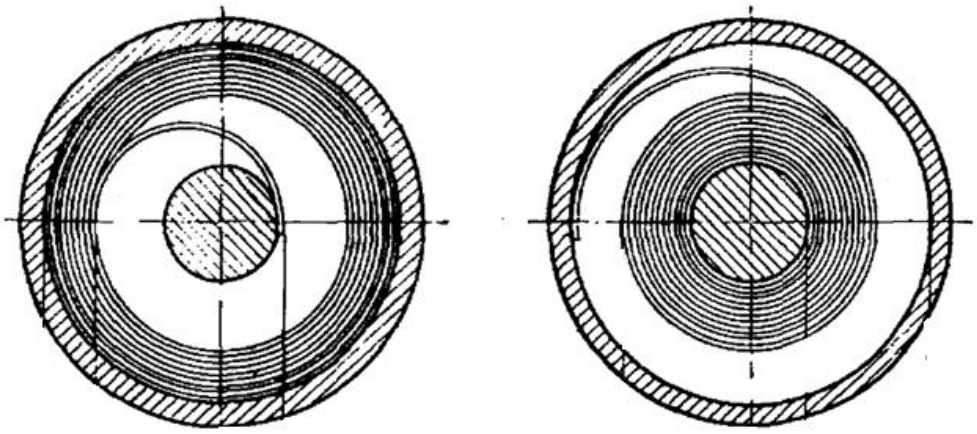
для бака-аккумулятора воды. В силу этого, пневматические аккумуляторы могут быть эффективны только при наличии пневмоинструмента, но который практически не используется в сельском хозяйстве и быту.

Гироскопические аккумуляторы (маховики) имеют несомненные достоинства – они наиболее экологичны и не требуют преобразования энергии вращательного движения ветроколеса в другие виды энергии, например, поступательного движения воды (гидроаккумуляторы) или электроэнергию (электрохимические аккумуляторы). Однако маховики не способны удерживать накопленную энергию и начинают отдавать ее сразу после прекращения действия ветра. Естественно, что в период отдачи энергии потенциальные потребители могут не нуждаться в ней, что не только снижает эффективность маховиков-аккумуляторов, но, в некоторой части, делает бесполезной их работу. Кроме того, следует отметить еще один недостаток – опасность их разрушения при высоких скоростях вращения [12].

С учетом этих особенностей маховики в ветроустановках применяются в виде массивных рассекателей, улучшающих коэффициент использования энергии ветра и компенсирующих неравномерность его скорости (порывы и провалы ветра). Такие рассекатели выполняются в виде массивных конусных тел, размещаются перед ветроколесом со стороны ветра, и рассчитываются и изготавливаются предприятиями-производителями ветроустановок.

Удерживать накопленную энергию способны пружинные аккумуляторы (рис. 4).

В период ветра пружина закручивается и фиксируется в заведенном состоянии. Впоследствии, при возникновении потребности в энергии, пружина освобождается и отдает накопленную энергию [12]. Для увеличения времени хранения энергии и уменьшения габаритов профессором Н.В. Гулиа предлагается выполнять пружинные аккумуляторы многоступенчатыми, состоящими из нескольких последовательно закручиваемых пружин [12]. Таким образом, пружинные аккумуляторы способны устранить важнейший недостаток гироскопических аккумуляторов – обеспечить длительное хранение накопленной энергии. Тем не менее, по непонятным пока причинам они не нашли сколь-нибудь заметного применения в ветроэнергетических установках. Можно предположить, что препятствием являются пока все-таки большие габариты и малая удельная энергоемкость (кВт·ч/кг).



1 2

Рис. 4. Пружинный аккумулятор

Примечание: 1 – исходное состояние; 2 – заведенное состояние.

Энергия солнечного излучения.

Электромагнитная энергия солнечного излучения легко преобразуется в фотоэлектрических преобразователях (ФЭП) в электроэнергию постоянного тока, которая также легко может накапливаться в электрохимических аккумуляторах. Это позволяет создавать системы автономного электроснабжения аналогичные автономным ветроэлектростанциям (рис. 5).

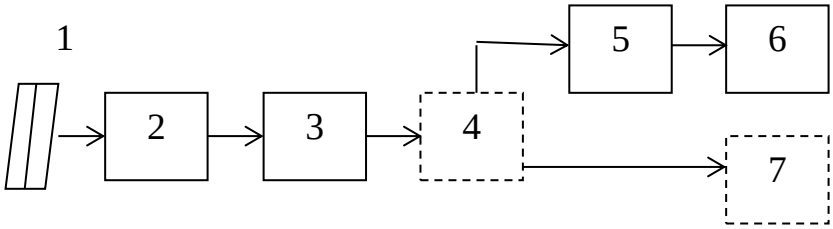


Рис. 5. Блок-схема автономной солнечной электростанции

Примечание: 1 – фотоэлектрический преобразователь, 2 – контролер заряда-разряда, 3 – аккумуляторная батарея, 4 – распределительное устройство, 5 - инвертор напряжения, 6 – потребители переменного тока, 7 – потребители постоянного тока.

Для выбора электрохимических аккумуляторов в автономных солнечных электростанциях можно использовать рекомендации, сформулированные для ветроэлектростанций, пользуясь таблицей 1.

Кроме выработки электроэнергии, солнечное излучение может применяться и для производства тепла, которое в автономных системах используется для горячего водоснабжения и, реже, для отопления (подогрева).

Так как солнечная энергия поступает не регулярно, причем, совершенно отсутствует

в ночное время, то, естественно, требуется ее аккумулирование. Принцип работы обычных тепловых аккумуляторов основан на нагреве тела с последующей отдачей теплоты теплоносителю [3, 13, 14]. В качестве аккумулирующего вещества в обычных тепловых аккумуляторах применяется либо жидкость (вода, масло и т.п.), либо твердые тела (металл, камень и т.п.). Особенностью и недостатком таких тепловых аккумуляторов является то, что при прекращении поступления тепла от Солнца, теплота сразу начинает отдаваться теплоносителю, то есть, без учета потребности в теплоте. С этой точки зрения обычные тепловые аккумуляторы аналогичны по своему использованию с маховиками для ветроустановок.

Для обеспечения хранения накопленной тепловой энергии применятся тепловые аккумуляторы с фазовыми превращениями теплонакопителя из твердого состояния в жидкое и обратно [3, 14]. Такие аккумуляторы содержат вещество, температура плавления которого близка к необходимой температуре теплоносителя. Аккумулятор представляет собой герметичную одну или несколько капсул с фазопереходным веществом и помещается в бак-аккумулятор двухконтурной системы горячего водоснабжения (рис. 6). Таким образом, вещество изолируется от прямого соприкосновения с теплоносителем и водой в баке-аккумуляторе, но обеспечивается тепловой контакт между фазопереходным веществом аккумулятора и потребляемой водой.

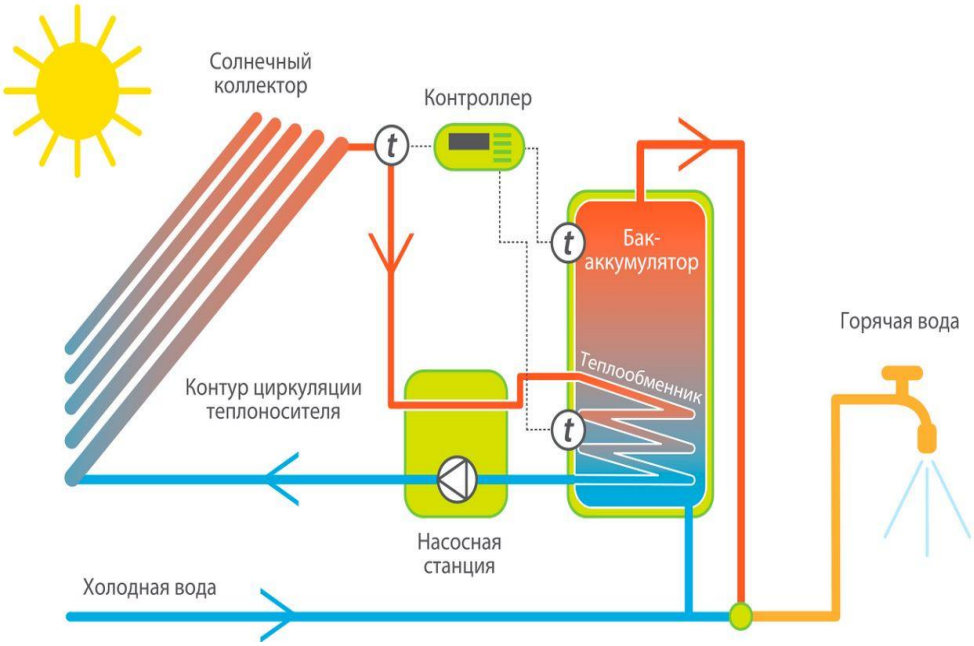


Рис. 6. Двухконтурная система солнечного горячего водоснабжения

При достижении температуры воды в баке-аккумуляторе температуры плавления вещества теплового аккумулятора, оно начинает плавиться. При этом вся получаемая теплота идет на его плавление, температура фазопереходного вещества не увеличивается, соответственно не увеличивается и температура окружающей среды (нагреваемой воды). При последующем недостаточном количестве теплоты (период прекращения поступления солнечной энергии) фазопереходное вещество начинает из жидкого состояния переходить в твердое состояние («кристализоваться»). В этот период тепловой аккумулятор отдает теплоту в окружающую среду (воду в баке-аккумуляторе), поддерживая ее температуру на уровне температуры плавления фазопереходного вещества.

На рис. 7 показан характер графика нагрева и охлаждения воды в баке-аккумуляторе. Таким образом, тепловой аккумулятор с фазопереходным веществом обеспечивает поддержание температуры воды в баке-аккумуляторе и после прекращения поступления солнечной тепловой энергии.

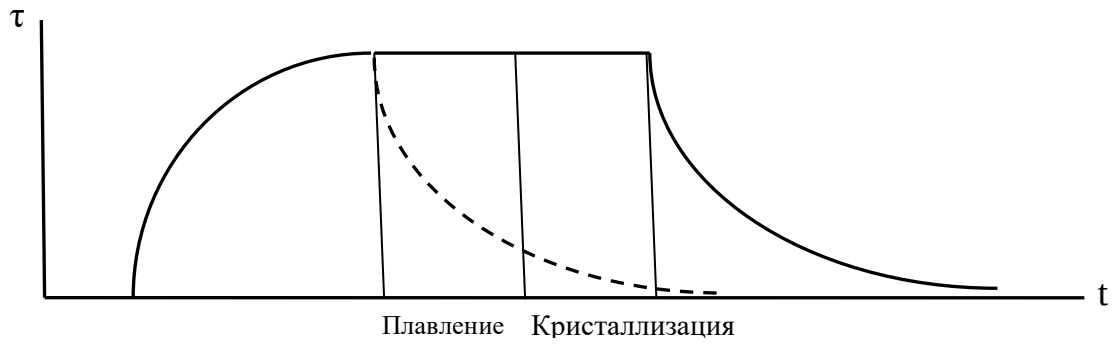


Рис. 7. Аккумулирование теплоты при фазовом переходе

Рассмотрим факторы, сдерживающие применение тепловых аккумуляторов с фазовым переходом.

1. В случае разгерметизации капсул с фазопереходным веществом возникает опасность применения горячей воды. Помещение капсул в контур циркуляции теплоносителя уменьшает такую опасность, но объем первичного контура может оказаться недостаточным для размещения капсул с теплоаккумулирующим веществом.

2. Существуют трудности с подбором фазопереходного вещества с нужной температурой плавления. Кроме того, известные подходящие вещества с такой температурой плавления обладаю низкой теплопроводностью, что приводит к замедлению

процесса плавления по всему объему вещества.

3. При плавлении изменяется объем вещества, что порождает трудности его герметичного капсулирования.

Однако, отмеченные недостатки не являются непреодолимыми. Так, в таблице 2 приводится перечень химических веществ, которые могут соответствовать требуемой температуре воды при горячем водоснабжении.

Таблица 2. Характеристики рекомендуемых веществ для фазопереходных тепловых аккумуляторов

Вещество	Формула	Температура плавления, °С	Коэффициент плавления, кДж/кг
1. Нафталин-1 амин	$C_{10}H_7NH_2$	50	151
2. Стеарин Т32	$C_{57}H_{110}O_6$	53	201
3. Стеарин Т18	$C_{57}H_{110}O_6$	58	201
4. Стеарин Т10	$C_{57}H_{110}O_6$	59	201
5. Калий металлический	К	63,5	60
6. Стеарин Т3	$C_{57}H_{110}O_6$	65	201
7. Парафин	C_nH_{2n+2}.	45 - 65	150

Выводы:

В водоподъемных ветроустановках наиболее целесообразно применять бак-аккумулятор воды, поднятый над землей на высоту не менее двух метров. Для повышения эффективности на выходе из распределительного водопровода рекомендуется устанавливать мини-генератор для зарядки электрохимических аккумуляторов. Гироскопические аккумуляторы (маховики) целесообразно применять только для компенсации порывов и провалов ветра, использование маховиков для длительного хранения накопленной энергии в ветроустановках неэффективно. Пневматические аккумуляторы неэффективны, если нет потребителей сжатого воздуха (пневмоинструментов) из-за большой металлоемкости, а также потребности в компрессоре. Пружинные аккумуляторы в настоящее время малоэффективны и-за малой энергоемкости.

В автономных ветроэлектростанциях и солнечных электростанциях на ФЭП рекомендуется применять электрохимические аккумуляторы.

В автономных системах горячего водоснабжения на основе солнечных коллекторов перспективно применять тепловые аккумуляторы с фазопереходным материалом.

Список использованных источников:

1. Автономное электроснабжение объектов на основе возобновляемых источников энергии / М. М. Украинцев, П. Т. Корчагин, С. М. Воронин, И. В. Юдаев // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17, № 1(63). – С. 482-492. – DOI 10.21177/1998-4502-2025-17-1-482-492. – EDN DHBCJV.

2. Условия эффективного применения возобновляемых источников энергии в России / И. В. Юдаев, С. М. Воронин, Н. Г. Очиров [и др.] // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2023. – № 4(73). – С. 146-156. – DOI 10.24412/2078-1318-2023-4-146-156. – EDN AJTGGI.

3. Воронин, С. М. Формирование автономных систем электроснабжения сельскохозяйственных объектов на возобновляемых источниках энергии : монография / С. М. Воронин ; С. М. Воронин ; М-во сельского хоз-ва Российской Федерации, Департамент науч.-технологической политики и образования, Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Азово-Черноморская гос. агроинженерная акад.". – Зерноград : ФГОУ ВПО АЧГАА, 2010. – 302 с. – EDN QMLGAT.

4. Воронин, С. М. Автономные системы электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии для сельских объектов / С. М. Воронин, М. М. Украинцев // Вестник аграрной науки Дона. – 2022. – Т. 15, № 4(60). – С. 82-94. – DOI 10.55618/20756704_2022_15_4_82-94. – EDN EKCWBB.

5. Перспективы применения возобновляемых источников энергии на средних и крупных сельскохозяйственных производственных предприятиях / С. М. Воронин, М. М. Украинцев, В. А. Эвиев, Н. Л. Курепина // Вестник аграрной науки Дона. – 2024. – Т. 17, № 4(68). – С. 69-82. – DOI 10.55618/20756704_2024_17_4_69-82. – EDN VKJTTM.

6. Возобновляемые источники электроэнергии / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, Р. А. Сулейманов [и др.]. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет, 2012. – 272 с. – ISBN 978-5-94672-581-1. – EDN QCEJJJ.

7. Воронин, С. М. Эффективное использование ветроэнергетики в сельском хозяйстве России / С. М. Воронин, М. М. Украинцев // Вестник аграрной науки Дона. – 2021. – № 4(56). – С. 55-63. – EDN QUGMMR.

8. Крюков А.Н. Аккумуляторы. // Рязанский государственный радиотехнический университет. - Рязань РГРТУ 2023. 48 с.

9. Современные электрохимические системы аккумулирования энергии / Т. Л. Кулова, И. И. Николаев, В. Н. Фатеев, А. Ш. Алиев // Kimya Problemleri. – 2018. – Т. 16, № 1. – С. 9-34. – EDN YTXKQG.

10. Петров Д. В. Перспективы использования пневматических аккумуляторов в ветроэнергетических установках / Д. В. Петров, В. И. Маругин, А. Е. Рыжков // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2018. – № 6(69). – С. 35-40. – DOI 10.37493/2307-907X-2018-69-6-35-40. – EDN YWPRNR.

11. Андреев, С. А. Аккумулирование энергии в маломощных гелиосистемах автономного электроснабжения / С. А. Андреев, В. И. Загинайлов, Д. В. Шибаров // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2017. – № 5(81). – С. 70-76. – EDN ZRIZKJ.

12. Гулиа Н.В. Накопители энергии // Академия наук СССР. Серия «Наука и технический прогресс» - М.: Наука. 1980. 152 с.

13. Амер, А. Э. Выбор материалов с фазовым переходом с использованием метода анализа иерархий (МАИ) / А. Э. Амер, К. Рахмани, В. А. Лебедев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 6-1(96). – С. 35-48. – DOI 10.23670/IRJ.2020.96.6.006. – EDN SDFIPN.

14. Применение микрокапсулированных теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом в строительстве / Ф. Ресснер, О. Б. Рудаков, Ю. С. Альбинская [и др.] // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2012. – № 5. – С. 64-70. – EDN PCQKAB.

==========

Цитирование: Воронин С.М., Украинцев М.М., Салаев Б.К., Эвиев В.А., Курепина Н.Л., Оконов М.М. Анализ аккумуляторов возобновляемой энергии ветра и солнечного излучения [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2025. – № 5. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2025/5/st_516.pdf DOI: https://doi.org/10.51419/202155516.