

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ
В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 330.15

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_1_71

**Альтернативные источники энергии для автономного энергоснабжения
удаленных объектов сельского хозяйства и лесного комплекса**

Ольга Анатольевна Куницкая^{1✉}, Александр Владимирович Помигуев²,
Дмитрий Николаевич Афоничев³, Владимир Игоревич Григорьев⁴,
Ирина Николаевна Дмитриева⁵, Глеб Владимирович Григорьев⁶

¹Арктический государственный агротехнологический университет, Якутск, Россия

²Филиал ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации в г. Сызрани, Сызрань, Россия

³Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия

^{5, 6}Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова,
Санкт-Петербург, Россия

¹ola.ola07@mail.ru✉

Аннотация. Альтернативная энергетика в настоящее время является актуальным направлением научных исследований и опытно-конструкторских разработок. Прежде всего ее развитие связано с экологической проблемой – борьбой с глобальным потеплением. Принято считать, что экономическая эффективность альтернативных источников энергии без учета их экологической эффективности уступает традиционным источникам энергии. Однако при необходимости обеспечения энергией удаленных, рассредоточенных потребителей, традиционные дизельные генераторы или привод от вала отбора мощности трактора могут оказаться значительно дороже, чем рассмотренные в статье альтернативные варианты энергоснабжения. В странах со значительным количеством небольших хозяйств, разбросанных на значительной территории, не имеющих доступа к централизованным электрическим сетям, автономные источники энергии имеют широкое распространение. По самым скромным подсчетам в России на сегодняшний день заброшено около 50 млн га земель сельскохозяйственного назначения, которые постепенно возвращаются к использованию в сельском хозяйстве, но в местах их расположения уже нет централизованного электроснабжения в связи с вымиранием сопутствующих населенных пунктов (деревень и сел). При переработке сельскохозяйственной продукции образуются отходы биомассы, которые могут быть успешно использованы в качестве энергоносителя. Технические средства солнечной энергетике, значительно развившиеся за последние годы, также могут являться весомой энергетической составляющей автономного энергоснабжения. И, наконец, технические средства микрогидроэлектростанций, которые предназначены для преобразования кинетической энергии водного потока в электрическую, позволяют получать в теплое время года необходимую для автономного энергоснабжения электрическую энергию. Под термином «микро» подразумевается, что данная гидроэлектростанция устанавливается на малых водных объектах, технологических протоках или перепадах высот систем водоподготовки.

Ключевые слова: автономное энергоснабжение, газогенерирующие системы, солнечные электростанции, микрогидроэлектростанции, энергия малых рек, турбина

Для цитирования: Куницкая О.А., Помигуев А.В., Афоничев Д.Н., Григорьев В.И., Дмитриева И.Н., Григорьев Г.В. Альтернативные источники энергии для автономного энергоснабжения удаленных объектов сельского хозяйства и лесного комплекса // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15, № 1(72). С. 71–81. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_71-81.

ELECTROTECHNOLOGIES AND ELECTRIC EQUIPMENT
IN AGRICULTURE (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

**Alternative energy sources for autonomous power supply
of remote facilities in agriculture and forestry**

Olga A. Kunitskaya^{1✉}, Aleksander V. Pomiguyev², Dmitry N. Afonichev³, Vladimir I. Grigoriev⁴,
Irina N. Dmitrieva⁵, Gleb V. Grigoriev⁶

¹Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, Russia

²Branch of the Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation in Syzran, Syzran, Russia

³Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

⁴Saint Petersburg State Economic University, Saint Petersburg, Russia

^{5, 6}Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Saint Petersburg, Russia

¹ola.ola07@mail.ru[✉]

Abstract. Alternative energy is currently an essential area of scientific research and experimental works. Its development is primarily associated with the environmental problem of global warming. It is generally accepted that the economic efficiency of alternative energy sources, without taking into account their environmental efficiency, is inferior to traditional energy sources. However, if it is necessary to provide energy to remote, geographically dispersed consumers, then traditional diesel generators or a tractor power take-off drive can be much more expensive than the alternative power supply options discussed in this article. In countries with a large number of small farms scattered over great areas without the access to centralized electrical networks, autonomous energy sources are widespread. According to the most conservative estimates, about 50 million hectares of agricultural land have been abandoned in Russia by now, but they are gradually returning to agricultural use. However, there is no longer a centralized power supply in their locations due to the extinction of adjacent settlements (villages and rural communities). When processing agricultural products, biomass waste is generated, which can be successfully used as an energy carrier. Technical means of solar energy, which have developed significantly in recent years, can also be a significant energy component of autonomous power supply. Finally, the technical means of micro-hydroelectric power plants, which are designed to convert the kinetic energy of water flow into electrical energy, make it possible to obtain the electrical energy necessary for autonomous energy supply in the warm season. The term "micro" means that this hydroelectric power plant is built on small water bodies, technological channels or altitude differences of water treatment systems.

Key words: autonomous power supply, gas generating systems, solar power plants, micro-hydroelectric power plants, small river energy, turbine

For citation: Kunitskaya O.A., Pomiguyev A.V., Afonichev D.N., Grigoriev V.I., Dmitrieva I.N., Grigoriev G.V. Alternative energy sources for autonomous power supply of remote facilities in agriculture and forestry. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2022;15(1):71-81. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_71-81.

Введение

Различные системы автономного энергоснабжения активно используются во многих странах мира для обеспечения работы удаленных объектов сельского хозяйства, лесного комплекса и других отраслей [1, 2, 4–8, 10, 11, 14]. Они используют местные природные источники энергии [2, 10, 13]. Опыт показывает, что наиболее перспективными вариантами альтернативных автономных источников тепловой и электрической энергии являются газогенерирующие системы, солнечные электростанции (СЭС), а также микрогидроэлектростанции (микроГЭС) [1, 2, 4–10, 12, 13].

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета.

Материалы и методы

Изучены конструкции и рабочие процессы альтернативных автономных источников тепловой и электрической энергии (газогенерирующих систем, СЭС, микроГЭС) с целью определения оптимальных условий их применения.

Результаты и их обсуждение

Газогенерирующие системы. В XXI в. в сфере газификации топлива для получения возобновляемых энергоресурсов произошло качественное изменение ситуации: экономически оправдан резкий переход от единичных пилотных установок к массовой реализации коммерческих проектов.

В настоящее время рентабельность переработки некоторых видов сырья в России составляет:

- бурый уголь – 75–90%;
- торф (влажность 30%) – 45–50%;
- древесные и сельскохозяйственные отходы – 70–80%;
- бытовые отходы – 50–60% [14].

Основа процесса газификации – термохимическое преобразование твердого и жидкого исходного сырья в газовый или жидкий продукт, который транспортируется и сжигается для извлечения тепловой энергии с целью ее преобразования в механическую или электрическую энергию. Газогенераторные комплексы по назначению используются в двух направлениях. Простейшие генераторы, даже с низким КПД, обладают достаточно высокой энергоэффективностью (750 Вт на 1 кг топлива). При переработке сельскохозяйственных отходов возникает второе направление, при котором следует применять комбинированные газогенераторы, оборудованные анаэробным компонентом (вторая ступень). В этом случае энергетический потенциал обрабатываемого сырья используется более эффективно. На второй ступени газогенератора можно производить тепло- и электрическую энергию, а также синтетическое топливо. Генераторы этого типа имеют наибольший потенциал для использования при переработке отходов животноводства, но обладают некоторыми техническими недостатками в работе отдельных узлов. Отмеченные недостатки препятствуют промышленному использованию газификаторов в настоящее время [15–18].

По принципу работы газогенераторы делятся на следующие типы: прямого действия, поперечного и обратного. Использование газогенератора в сочетании с системой обратной связи создает значительный экономический эффект. Затраты при использовании брикетов примерно в 15 раз меньше, чем при использовании дизельного топлива. Более того, промышленные отходы могут применяться в качестве сырья для производства топливных брикетов, то есть это решение обладает ресурсом дополнительного «суперэффекта», когда выработка энергии сопровождается утилизацией отходов. Трудно переоценить такую выгоду, поскольку задача поддержания экологического баланса и эффективной глубокой переработки отходов является одной из наиболее актуальных в настоящее время. По сути, эта технология используется для создания процесса с завершённым циклом переработки отходов производства. Основной особенностью газогенератора является система автоматической оптимизации теплового режима камеры газификации и фурменный пояс камеры газификации, изготовленный методом литья из металлокерамики, в состав которой входят ингибиторы, инициирующие образование водорода и метана. При этом рабочий ресурс фурменного пояса увеличивается почти в три раза.

Газогенератор может быть использован для утилизации сельскохозяйственных и промышленных отходов, а также шлама очистных сооружений, при замене классического топлива (местный уголь, мазут, торф, природный газ) на синтез-газ, используемый для получения тепловой и электрической энергии [18]. Сырьевым ресурсом для работы газогенератора на твердом топливе являются брикеты, в том числе из сельскохозяйственных отходов с влажностью не более 30%. Размер брикетов от 10 до 100 мм (без определенной формы).

В комплекте с газогенератором присутствует система очистки газа. Дополнительным оборудованием для работы комплекса является линия измельчения, сушки и брикетирования, газопоршневая установка. Газ, полученный при высокотемпературной газификации, принудительно направляется в зону регенерации, где он превращается в генераторный газ. Затем производится очистка, охлаждение и транспортировка. Вся агрегатированная конструкция может быть как стационарного, так и мобильного исполнения. Система может работать круглосуточно, в автоматическом режиме и дистанционно обслуживается одним оператором в смену. Управление осуществляется в автоматическом или, при необходимости, ручном режимах. Модельный ряд представлен в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительная техническая характеристика газогенераторов (производство РФ)

Параметры	Модель				
	ГТГ-100	ГТГ-150	ГТГ-200	ГТГ-500	ГТГ-1000
Электрическая мощность, кВт·ч	30	45	60	160	330
Суммарная тепловая мощность реактора-газификатора, МВт	0,122	0,183	0,244	0,610	1,22
Выработка газа с калорийностью 1250–1000 ккал/м ³ , м ³ /ч	70–85	100–130	140–170	360–430	720–860
Расход сырья, кг/ч:					
- биомасса	41	62	82	210	380–440
- лузга подсолнечника и шелуха риса, опилки и щепа	35	52	70	175	330–370
- иловые осадки очистных сооружений	38	57	76	163	350–420
- торфяные брикеты, бурые угли	34	51	68	170	320–360
Габаритные размеры, м	5×1,1×3,5	6×1,4×4	8,5×3,5×5	10,5×5×6,1	12×6,5×6
Масса, кг	3400	4950	5300	6100	7500
Утилизируемое при охлаждении газа технологическое тепло в виде горячей воды, Гкал/ч	0,018	0,026	0,038	0,095	0,19
Утилизируемое тепло в виде горячей воды от работы газопоршневой электростанции, Гкал/ч	0,04	0,06	0,08	0,22	0,43
Усредненный выход газа из 1 кг топлива, м ³ /кг	1,8–2,3	1,8–2,3	1,8–2,3	1,8–2,3	1,8–2,3
Энергетическая отдача газа из 1 кг топлива, ккал/кг	от 1900 до 2300	от 1900 до 2450	от 1900 до 2600	от 1900 до 2750	от 1900 до 2750
Энергоотдача по технологическому теплу из 1 кг топлива, ккал/кг	550	550	550	550	550
Суммарная энергоотдача, ккал/кг	от 2450 до 2850	от 2450 до 3000	от 2450 до 3150	от 2450 до 3300	от 2450 до 3300
Энергетический КПД реактора по газу, %	65	68	71	75	75

Химический состав генераторного газа:

- угарный газ (CO) – 32–34%;
- азот (N₂) – 32–36%;
- метан (CH₄) – 5–8%;
- углекислый газ (CO₂) – 2–5%;
- водород (H₂) – 12–18%;
- сероводород (H₂S) – до 0,01%;
- оксид азота (NO) – до 0,015%.

При преобразовании органических веществ в газ и жидкое топливо реактор газификации может состоять из двух отдельных камер: одна – для удаления влаги, другая – для газификации. Поскольку избыточное содержание влаги на начальном этапе снижает энергоэффективность установки, то конструктивное исполнение реактора обеспечивает выход продукта, в котором содержание воды снижено до 1,0–1,5%, а удельная теплота сгорания увеличена на 15–20%.

Для производственного участка переработки отходов и генерации энергии (тепловой и электрической) требуется разная площадь в зависимости от мощности электрогенерирующей установки (табл. 2), при этом площадь склада для сырья из расчета месячной нагрузки энергопотребления может варьировать в пределах от 200 до 1000 м².

Таблица 2. Требуемая площадь для производственного участка переработки отходов и генерации энергии в зависимости от мощности электрогенерирующей установки

Параметры	Мощность электрогенерирующей установки, кВт		
	100	300	500
Высота и диаметр газификатора, м	3,0×0,6	4,0×0,7	5,0×0,9
Площадь, занимаемая участком подготовки сырья и газификатором, м ²	25	45	90
Площадь, занимаемая электрогенерирующей установкой, м ²	30	60	120
Требуемая площадь, м ²	55	105	210

Солнечные электростанции. Бурный прогресс в технологии производства фотоэлектрических модулей (ФЭМ), а также наблюдаемый в последнее десятилетие прогресс в производстве систем накопления электроэнергии (СНЭ) и связанное с этим значительное снижение удельной стоимости электроэнергии, вырабатываемой солнечными электростанциями (СЭС), привели к тому, что СЭС стали вполне реальным альтернативным источником электроэнергии, особенно в изолированных энергосистемах. С 2012 г. установленная мощность ФЭМ в России выросла с 0,1 до 1,726 МВт.

Пока что говорить о СЭС как о полноценном и достаточном источнике электроэнергии не приходится в силу их нестабильности и значительных затрат на аккумуляторные батареи. Поэтому в настоящее время в изолированных энергосистемах применяются автономные гибридные электростанции, имеющие в своем составе:

- основной источник – дизель-электрические установки (ДЭУ);
- дополнительный источник – гелиоэлектрические установки (ГЭУ);
- опционально – СНЭ, объединенные общей системой управления.

В настоящее время получили распространение автономные гибридные электростанции (АГЭС) двух типов:

- стационарные большой мощности;
- мини АГЭС относительно небольшой мощности.

Стационарные АГЭС предполагают отдельную площадку под размещение ГЭУ и существенные затраты на строительные-монтажные работы для их установки. Мини АГЭС, как правило, создаются на базе блок-контейнеров, содержащих внутри все необходимые устройства, включая ДЭУ, и являющихся опорной конструкцией для установки ГЭУ. Обычно мощность мини АГЭС не превышает 10 кВт.

Стоимость электроэнергии, выработанной ДЭУ, определяется стоимостью дизельного топлива, включая стоимость его доставки, а также стоимостью эксплуатации ДЭУ, хранения дизельного топлива. Очевидно, что составляющие себестоимости такой электроэнергии имеют тенденцию только к повышению.

Основное оборудование, входящее в состав ГЭУ, имеет тенденцию к снижению относительной стоимости. При этом стоимость затрат на выполнение работ с применением даже небольшого количества техники имеет существенную постоянную составляющую, зависящую от доступности площадки строительства. По этой причине реализация СЭС с циклом строительства относительно малой мощности может оказаться за рамками экономической целесообразности. В этом отношении действует прямая зависимость: чем больше установленная мощность СЭС (с учетом объемов потребления), тем больше экономический эффект от ее работы. Точные данные о стоимости реализации АГЭС могут быть получены в результате разработки проектного решения с учетом всех индивидуальных условий, выбора оборудования ГЭУ и СНЭ, определения их оптимальных параметров. Имея эти данные, а также точные данные по стоимости электроэнергии, получаемой от ДЭУ, несложно определить сроки окупаемости реализации АГЭС.

При реализации мини АГЭС отсутствуют затраты на строительство и на проектирование, поэтому их стоимость определяется только стоимостью оборудования, его доставки и незначительными затратами на монтаж на месте развертывания. Точная стоимость реализации мини АГЭС может быть рассчитана после определения всех индивидуальных параметров и конкретных условий эксплуатации.

Микрогидроэлектростанции. На территории России протекает большое количество малых рек, ручьев, от которых при помощи микрогидроэлектростанций (микроГЭС) можно получать дешевую энергию для энергоснабжения удаленных от центральной электросети потребителей. Краткие сведения о малых реках нашей страны приведены в таблице 3.

Таблица 3. Краткие сведения о малых реках и их энергетический потенциал

Показатель	Значение
Длина малой реки, км	до 100
Площадь водосбора малой реки, км ²	до 2000
Количество малых рек	2,5·10 ⁶
Объем стока малых рек от стока всех рек, %	49
Энергетический потенциал малых рек, млрд кВт·ч	382
Использование энергетического потенциала малых рек, млрд кВт·ч	2,2

Из таблицы 3 видно, что энергетический потенциал малых рек в России используется всего на 0,6%.

Вырабатываемая микроГЭС мощность определяется сочетанием двух факторов:

- напором воды, поступающей на лопасти гидротурбины, которая приводит в действие вырабатывающий электроэнергию генератор;
- расходом воды, то есть объемом воды, поступающим на турбину в единицу времени (обычно расчет идет в секунду).

Основным показателем эффективности использования микроГЭС является скорость движения водного потока. Если скорость течения реки меньше 1 м/с, то для увеличения скорости потока необходимо сделать обводной канал переменного сечения [12].

К преимуществам использования микроГЭС следует отнести такие ее характеристики, как: работа в любое время суток и при любой погоде (ветрогенераторы и солнечные батареи ограничены по этим показателям); возможность установки на малой по глубине реке; бесшумная работа и отсутствие загрязнения водной среды; экологическая безопасность оборудования; низкая стоимость получаемой электроэнергии; простота и надежность применяемого оборудования; неисчерпаемость используемых для выработки энергии ресурсов.

К недостаткам использования микроГЭС относят: невозможность работы в период замерзания малой реки и ограничение по минимальным скоростям течения реки, что требует внедрения конструкций быстротоков, а это дополнительные финансовые вложения; относительная опасность для обитателей водной фауны, так как вращающиеся лопасти турбин в скоростных потоках могут представлять угрозу для рыб.

Безнапорные микроГЭС разделяются на три группы: гирляндные, погружные и наплавные [3].

Различают четыре типа турбин микроГЭС:

- осевые;
- радиально-лопастные;
- ковшовые;
- поворотные-лопастные.

Поток воды в осевой турбине микроГЭС движется вдоль оси турбины, попадая на ее лопасти. Этот принцип получения электрической энергии используют гирляндные ГЭС. В рабочем колесе радиально-лопастной турбины поток воды сначала движется радиально от периферии к центру, а затем в осевом направлении вращения – на выход из рабочего колеса. Третья группа – это ковшовые турбины, в этой конструкции вода поступает через сопла по касательной к окружности, проходящей через середину ковша. Проходя через сопло, она сужается в своем сечении, и образующаяся струя воды с большой скоростью ударяет о лопатку турбины, что приводит к вращению рабочего колеса. Это наиболее часто встречающаяся сегодня конструкция турбины, которая внедряется при проектировании микроГЭС.

Электрогенерирующая установка каждой проектируемой микроГЭС должна состоять из гидротурбины, генератора и системы автоматического управления, в которую входят блок управления турбиной, блок балластной нагрузки, стабилизатор напряжения и банк накопления энергии в виде аккумуляторной батареи (АКБ).

Каждая из названных выше конструкций гидротурбин соединяется валом с генератором для выработки переменного тока. Функции блока управления гидротурбиной – обеспечение пуска и остановки гидроагрегата, синхронизация его работы с общей энергосистемой, контроль за режимами работы и аварийная остановка микроГЭС.

К основным составным элементам микроГЭС относятся блок балластной нагрузки и АКБ. Блок балластной нагрузки предназначен для рассеивания неиспользуемой в данный отрезок времени мощности микроГЭС, что сохраняет работоспособность электрогенератора и систем контроля и управления. Стабилизатор предназначен для управления зарядом АКБ и преобразования напряжения.

К группе погружных микроГЭС относятся пропеллерные гидротурбины. Это имеющий вертикальный ротор подводный «ветряк», который, в отличие от воздушного, имеет лопасти минимальной ширины (всего 2 см), что обеспечивает минимальное сопротивление и максимальную скорость вращения. Эту конструкцию применяют при скорости потока 0,8–2,0 м/с. К группе погружных микроГЭС относятся пропеллерные гидротурбины, выпускаемые в Санкт-Петербурге АО «МНТО ИНСЭТ». Их мощность достигает 15 кВт, но для них необходимы организация подпора воды от 2 до 14 м и значительные расходы воды.

Наиболее простой в изготовлении, дешевой в установке и эксплуатации в расчете на 1 кВт вырабатываемой электроэнергии является гирляндная микроГЭС. Требования к водному объекту для ее установки также предельно просты: глубина должна быть более 25 см, а скорость течения – от 1,0 м/с. Каждая из веток гирляндной микроГЭС состоит из легких турбин (гидровингроторы). Они нанизываются на трос, который перебрасывается между двумя берегами реки. Такая система называется поперечной гирляндной микроГЭС. Каждый гидровингротор состоит из двух смещенных относительно друг друга полуцилиндров. При погружении гидровингротора в поток воды из-за разности гидравлических давлений на его поверхности относительно оси вращения создается крутящий момент. Поперечные гирляндные микроГЭС бывают двух видов: 1) гирлянда Савониуса; 2) гирлянда Бирюкова. Один конец троса закрепляется в опорном подшипнике, а второй вращает ротор генератора. Трос выполняет роль вала, вращательное движение которого передается к генератору.

Гидровингротор оказывает лобовое сопротивление потоку, из-за этого трос гирлянды натягивается и выгибается в направлении движения воды в реке. Гидровингроторы крепятся к тросу попарно. Каждая пара имеет свой узел крепления, и в каждой паре один гидровингротор развернут по отношению к другому на 90° для создания равномерного вращения троса, а следовательно, и вала генератора.

Ниже приведены основные формулы для расчета мощности одногирляндной микроГЭС.

1. Мощность поперечной турбины $N_{\text{ит}}$ (кВт) определяется по формуле

$$N_{\text{ит}} = 0,5DLv^3\eta, \quad (1)$$

где D – диаметр ротора турбины, м;

L – длина ротора турбины, м;

v – скорость течения воды, м/с;

η – КПД турбины (0,45 для турбин с профилем Бирюкова).

Для расчета мощности гирлянды по вырабатываемой электроэнергии нужно учесть КПД редуктора и КПД генератора, умножив их на число турбин в гирлянде. Обычно КПД не превышает 50%.

2. Скорость вращения гирлянды n (с⁻¹) при установившейся нагрузке определяется по формуле

$$n = \frac{v}{D}. \quad (2)$$

3. Крутящий момент M_K (кН·м) определяется по формуле

$$M_K = \frac{N_{\text{ит}}}{n}. \quad (3)$$

4. Лобовое давление со стороны потока на турбину P (кН) равно

$$P = CDLv^2, \quad (4)$$

где C – коэффициент лобового сопротивления поперечных турбин, принимается $C = 0,65$ на рабочем режиме и $C = 0,85$ на режиме торможения.

Подбор диаметра троса d можно осуществить исходя из соотношения, приведенного в работе [3].

Окончательно мощность N , которую вырабатывает гирляндная микроГЭС, можно определить по следующей формуле:

$$N = 0,5DLv^3\eta K, \quad (5)$$

где K – число элементов в гирлянде.

Для установки гирлянды необходимо учитывать следующие особенности конструкции.

1. Роторы на тросе закрепляются попарно со смещением роторов каждой последующей пары на 90° относительно друг друга для обеспечения равномерного вращения.

2. Направление вращения троса выбирается так, чтобы его нити работали только на скручивание.

3. Заборники турбин устанавливаются по отношению к потоку по двум вариантам:
- выше троса, когда гирлянда работает «на всплытие» и при вращении держится на поверхности воды (используется в весенне-летний период на любой реке);
- ниже троса, когда гирлянда прижимается ко дну, но его не касается (используется в зимний период времени подо льдом и на судоходных реках).

4. Опущенная в воду гирлянда развивает значительный крутящий момент, поэтому при переброске гирлянды через поток нельзя допускать касания воды провисшими частями гирлянды.

Если река имеет небольшую ширину и одна ветка гирлянды не может достичь требуемой мощности, то устанавливают ряды гирлянд последовательно (так называемая многогирляндная микроГЭС), но принцип расчета гирлянды остается неизменным.

Выводы

Рассмотренные системы альтернативных источников автономного энергоснабжения для определенных природно-производственных условий являются конкурентоспособными по себестоимости получаемой энергии, капиталовложениям и экологическому эффекту традиционным источникам автономной генерации.

Современные технические решения по получению тепловой и электрической энергии в установках газификации, оборудованных термоэмиссионными и термоэлектрическими элементами, позволяют эффективно вырабатывать электрическую энергию, а также перерабатывать отходы основного производства сельскохозяйственных предприятий.

В отличие от систем, основанных на использовании газогенераторов, солнечные электростанции и микроГЭС могут эффективно работать только в теплый период года.

Во многих случаях у сельскохозяйственных предприятий именно на теплый период приходится пики потребления электрической энергии, поэтому в период максимального потребления энергии можно совмещать использование рассмотренных вариантов ее получения.

Список источников

1. Афоничев Д.Н., Кекух И.А. Малые электростанции в системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей // Современные научно-практические решения XXI века: материалы международной научно-практической конференции. Ч. 1. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2016. С. 116–121.
2. Афоничев Д.Н., Кекух И.А., Хромых Н.Ю. Использование местных природных источников энергии // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции. Международный молодежный научный форум и школа «Актуальные вопросы использования возобновляемых природных полимерных ресурсов и регенеративной энергетики. 2017». Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», 2017. № 5(31). С. 427–432.
3. Блинов Б.С. Гирляндная ГЭС. Москва: Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. 64 с.
4. Воронов Р.В., Марков О.Б., Григорьев И.В. и др. Математическая модель модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 5(371). С. 125–134. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.125.
5. Григорьева О.И., Гринько О.И., Давтян А.Б. и др. Технология получения воды в лесу при помощи иглофильтров // Повышение эффективности управления устойчивым развитием лесопромышленного комплекса: материалы всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», 2020. С. 444–449.
6. Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Лесные плантации для сырьевого обеспечения деревоперерабатывающих предприятий // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы третьей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск: ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет». 2017. С. 59–61.
7. Григорьева О.И. Перспективные средства борьбы с сорной растительностью с использованием электрической энергии // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы второй международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», 2017. С. 56–59.
8. Григорьев В.И., Нуген В.Л., Низамов Р.М. и др. Политика социалистической Республики Вьетнам по развитию сельских районов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16, № 1(61). С. 112–118. DOI: 10.12737/2073-0462-2021-112-118.
9. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Вернер Н.Н. Системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова». 2017. Т. 5, № 5(31). С. 438–443.
10. Земсков В.И. Возобновляемые источники энергии в АПК. Санкт-Петербург: Лань, 2014. 368 с.
11. Марков О.Б., Воронов Р.В., Давтян А.Б. и др. Математическая модель выбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. № 1. С. 16–26.
12. Пономаренко А.С. Классификация и перспективы минигидроэлектростанций // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 89. С. 790–799.

13. Попель О.С. Возобновляемые источники энергии: роль и место в современной и перспективной энергетике // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества имени Д.И. Менделеева). 2008. № 6. С. 95–106.
14. Тамби А.А., Морковина С.С., Григорьев И.В. и др. Развитие циркулярной экономики в России: рынок биотоплива // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 4(36). С. 173–185. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/19.
15. Asadullah M. Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 29. Pp. 201–215.
16. Gas Technology Institute campus generating on-site power // Power Engineering. 2003. Vol. 107, no. 1. P. 50.
17. Molino A., Chianese S., Musmarra D. Biomass gasification technology: The state of the art overview // Journal of Energy Chemistry. 2016. Vol. 25(1). Pp. 10–25. DOI:10.1016/j.jechem.2015.11.005.
18. Panwar N.L., Kaushik S.C., Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2011. Vol. 15, no. 3. Pp. 1513–1524.

References

1. Afonichev D.N., Kekukh I.A. Malye elektrostantsii v sistemakh elektrosnabzheniya sel'skokhozyajstvennykh potrebitelej [Small power plants in power supply systems for agricultural consumers]. Sovremennye nauchno-prakticheskie resheniya XXI veka: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. Chast' 1 [Modern scientific and practical solutions of the XXI century: Proceedings of International Scientific and Practical Conference. Part 1]. Voronezh: Voronezh State Agrarian University Press; 2016:116-121. (In Russ.).
2. Afonichev D.N., Kekukh I.A., Khromykh N.Yu. Ispol'zovanie mestnykh prirodnykh istochnikov energii [Use of local natural energy sources]. Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika: sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoj zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Mezhdunarodnyy molodezhnyy nauchnyy forum i shkola "Aktual'nye voprosy ispol'zovaniya vozobnovlyaemykh prirodnykh polimernykh resursov i regenerativnoy energetiki" [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice: collection of scientific papers of international correspondence scientific and practical conference. International youth scientific forum and school "Topical issues of the use of renewable natural polymer resources and regenerative energy"]. Voronezh: Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. 2017;5(31):427-432. (In Russ.).
3. Blinov B.S. Girlyandnaya GES [Run-of-river hydroelectric power station]. Moscow: Leningrad: Gosenergoizdat; 1962. 64 p. (In Russ.).
4. Voronov R.V., Markov O.B., Grigoriev I.V., et al. Matematicheskaya model' modul'nogo printsipa podbora sistemy mashin dlya sozdaniya i ekspluatatsii lesnykh plantatsij [Mathematical model of the modular approach for selection of a system of machines for creation and operation of forest plantations]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Lesnoy Zhurnal = Bulletin of Higher Educational Institutions. Forestry Journal (Russian Forestry Journal). 2019;5(371):125-134. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.125. (In Russ.).
5. Grigorieva O.I., Grin'ko O.I., Davtyan A.B., et al. Tekhnologiya polucheniya vody v lesu pri pomoshchi iglofil'trov [Technology of obtaining water in the forest using needle filters]. Povyshenie effektivnosti upravleniya ustojchivym razvitiem lesopromyshlennogo kompleksa: materialy vserossijskoj nauchnoj konferentsii, posvyashchennoj 90-letiyu Voronezhskogo gosudarstvennogo lesotekhnicheskogo universiteta imeni G.F. Morozova [Enhancement of managerial efficiency of sustainable development of the forest-industry complex: proceedings of the All-Russian Scientific conference dedicated to the 90th anniversary of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. Voronezh: Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov; 2020:444-449. (In Russ.).
6. Grigorieva O.I., Nguen F.Z. Lesnye plantatsii dlya syr'evogo obespecheniya derevopererabatyvayushchikh predpriyatij [Forest plantations for the raw material supply of wood processing enterprises]. Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy tret'ej Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Enhancement of efficiency of the forest complex: proceedings of the third All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation]. Petrozavodsk: Petrozavodsk State University Press; 2017:59-61. (In Russ.).
7. Grigorieva O.I. Perspektivnye sredstva bor'by s sornoj rastitel'nost'yu s ispol'zovaniem elektricheskoy energii [Promising means of weed control using electric energy]. Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie: materialy vtoroj mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Forests of Russia: politics, industry, science, education: proceedings of the second international scientific and technical conference]. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; 2017:56-59. (In Russ.).
8. Grigoriev V.I., Nugen V.L., Nizamov R.M., et al. Politika socialisticheskoy Respubliki V'etnam po razvitiyu sel'skikh rajonov [Policy of the Socialist Republic of Vietnam on rural development]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2021;16(1):112-118. DOI: 10.12737/2073-0462-2021-112-118. (In Russ.).
9. Grigoriev I.V., Grigorieva O.I., Verner N.N. Sistemy mashin dlya sozdaniya i ekspluatatsii lesnykh plantatsij [Machine systems for the creation of forest plantations and their exploitation]. Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika: sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoj zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice: collection of research papers of international virtual scientific & practical conference]. Voronezh: Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. 2017;5(5):438-443. (In Russ.).

10. Zemskov V.I. Vozobnovlyaemye istochniki energii v APK [Renewable energy sources in the Agro-Industrial Complex]. Saint-Petersburg: Lan' Press; 2014. 368 p. (In Russ.).
11. Markov O.B., Voronov R.V., Davtyan A.B., et al. Matematicheskaya model' vybora sistemy mashin dlya sozdaniya i ekspluatatsii lesnykh plantatsij [Mathematical model for selecting a system of machines for creating and operating forest plantations]. *Derevoobrabatvyvayushchaya promyshlennost' = Woodworking Industry*. 2021;(1):16-26. (In Russ.).
12. Ponomarenko A.S. Klassifikatsiya i perspektivy minigidroelektrostantsij [Classification and perspectives of mini hydropower stations]. *Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2013;(89):790-799. (In Russ.).
13. Popel' O.S. Vozobnovlyaemye istochniki energii: rol' i mesto v sovremennoj i perspektivnoj energetike [Renewable energy sources: role and place in modern and promising energetics]. *Rossijskij khimicheskij zhurnal (Zhurnal Rossijskogo khimicheskogo obshchestva imeni D.I. Mendeleeva) = Russian Journal of General Chemistry (Journal of the Russian Chemical Society named after D.I. Mendeleev)*. 2008;(6):95-106. (In Russ.).
14. Tambi A.A., Morkovina S.S., Grigoriev I.V., et al. Razvitie tsirkulyarnoj ekonomiki v Rossii: rynek biotopliva [Development of circular economy in Russia: biofuel market]. *Lesotekhnicheskij Zhurnal = Lesotekhnicheskij Zhurnal*. 2019;9(4):173-185. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/19 (In Russ.).
15. Asadullah M. Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2014;29:201–215.
16. Gas Technology Institute campus generating on-site power. *Power Engineering*. 2003;107(1):50.
17. Molino A., Chianese S., Musmarra D. Biomass gasification technology: The state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry*. 2016;25(1):10-25. DOI:10.1016/j.jechem.2015.11.005.
18. Panwar N.L., Kaushik S.C., Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2011;15(3):1513-1524.

Информация об авторах

О.А. Куницкая – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», ola.ola07@mail.ru.

А.В. Помигуев – преподаватель 1-й кафедры тактики и общевойсковых дисциплин филиала ФГКВУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации в г. Сызрани, pomiguev.ias@yandex.ru.

Д.Н. Афоничев – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и автоматизации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», dmafonichev@yandex.ru.

В.И. Григорьев – обучающийся, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный экономический университет», vmomr@mail.ru.

И.Н. Дмитриева – кандидат технических наук, доцент кафедры водных ресурсов и гидравлики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», in2907@mail.ru.

Г.В. Григорьев – кандидат технических наук, доцент кафедры водных ресурсов и гидравлики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», vtl-lta@mail.ru.

Information about the authors

O.A. Kunitskaya, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Technology and Equipment of the Forest Complex, Arctic State Agrotechnological University, ola.ola07@mail.ru.

A.V. Pomiguyev, Lecturer of the 1st Dept. of Tactics and General Military Disciplines, Branch of the Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation in Syzran, pomiguyev.ias@yandex.ru.

D.N. Afonichev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, dmafonichev@yandex.ru.

V.I. Grigoriev, Student, Saint Petersburg State Economic University, vmomr@mail.ru.

I.N. Dmitrieva, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Water Resources and Hydraulics, Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, in2907@mail.ru.

G.V. Grigoriev, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Water Resources and Hydraulics, Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, vtl-lta@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 14.11.2021; одобрена после рецензирования 22.12.2021; принята к публикации 20.01.2022.

The article was submitted 14.11.2021; approved after revision 22.12.2021; accepted for publication 20.01.2022.

© Куницкая О.А., Помигуев А.В., Афоничев Д.Н., Григорьев В.И., Дмитриева И.Н., Григорьев Г.В., 2022