

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 62: 621.311, 004.942

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ВЫРАБОТКУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНЫМИ МОДУЛЯМИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Статья поступила в редакцию 13.05.2019, в окончательной варианте – 25.05.2019.

Теруков Евгений Иванович, ООО «Научно-технический центр тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе», 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 28,

доктор технических наук, e-mail: <eug.terukov@mail.ioffe.ru>

Андроников Дмитрий Александрович, ООО «Научно-технический центр тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе», 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 28,

кандидат физико-математических наук, e-mail: d.andronikov@hevelsolar.com

Малевский Дмитрий Андреевич, ООО «Научно-технический центр тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе», 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 28,

научный сотрудник, e-mail: <dmalevsky@scell.ioffe.ru>

Зайнутдинов Рустем Ахтямович, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

кандидат технических наук, e-mail: rzain@gmail.com

Ключарев Антон Юрьевич, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

кандидат технических наук, e-mail: key_a@mail.ru,

Братышев Сергей Николаевич, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

аспирант, e-mail: sera.brat@mail.ru

Ильичев Владимир Геннадьевич, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

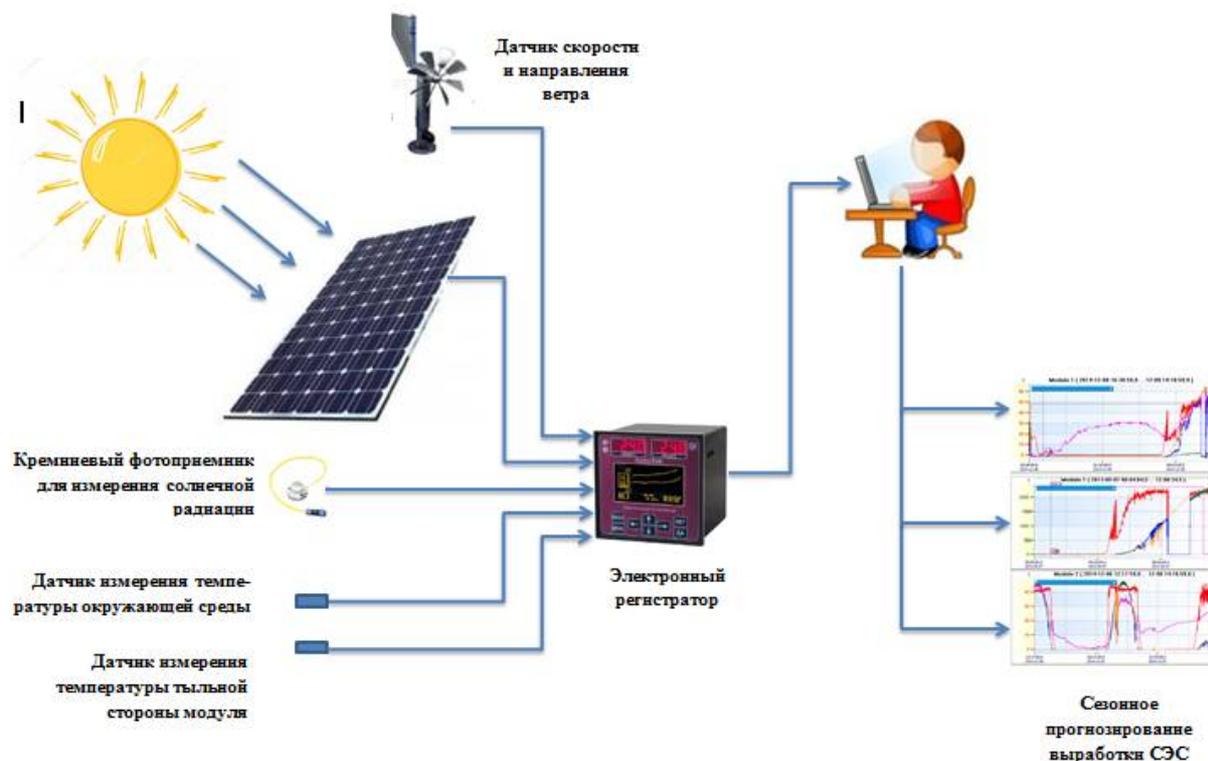
магистрант, e-mail: vova201428@yandex.ru

Проведено экспериментальное исследование влияния метеорологических факторов на выработку электроэнергии солнечными модулями в климатических условиях Астраханской области. Исследование выполнено с использованием пилотной тестовой фотоэлектрической системы, разработанной и изготовленной научно-техническим центром тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по заказу компании «Хевел». Тестовая фотоэлектрическая система осуществляет сбор следующих данных: выработку электроэнергии микроморфным и кристаллическим солнечными модулями; значение прихода солнечной радиации на приемную площадку; температуру тыльной стороны каждого солнечного модуля; температуру воздуха в тени; скорость и направление ветра. Для обеспечения удаленного доступа к тестовой фотоэлектрической системе и для передачи накопленных данных на центральный сервер осуществлено подключение к телекоммуникационным сетям с выделением в системе «внешнего» фиксированного IP-адреса (к сети Internet, передача данных через сотовые сети с помощью 3G-модема). Массив экспериментальных данных, полученных с помощью тестовой фотоэлектрической системы в течение года, был разделен соответственно ряду сезонов, отличающихся постоянством метеоусловий. Разработаны регрессионные модели комплексного влияния совокупности метеорологических факторов: солнечной радиации, скорости ветра и температуры окружающей среды на энерговыработку солнечного модуля. Согласно расчетам в MS EXCEL, полученные модели адекватны по критерию Фишера с уровнем значимости 0,01, и все коэффициенты являются значимыми по уровню значимости 0,05. Показано, что учет температуры окружающей среды и параметров ветра на основе предлагаемой регрессионной модели позволит повысить точность прогнозирования выработки электроэнергии солнечным модулем. Приращения прогнозных значений выработки электрической энергии солнечными модулями при учете

температуры окружающей среды и параметров ветра в климатических условиях Астраханской области могут достигать 10–12 %. Предложенные регрессионные модели будут использованы при разработке программы оперативного и краткосрочного прогноза выработки электрической энергии сетевыми солнечными электростанциями, действующими, проектируемыми или строящимися в Астраханской области

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, распределенная энергетика, солнечный модуль, солнечные электростанции, информационно-управляющие системы, информационные технологии, фотоэлектрическая система

Графическая аннотация (Graphical annotation)



**PILOT STUDY OF INFLUENCE OF METEOROLOGICAL FACTORS
ON POWER GENERATION BY SOLAR MODULES
IN CLIMATIC CONDITIONS OF THE ASTRAKHAN REGION**

Terukov Evgeny I., “Research and Development Center of Thin-film Technologies in Energetics at FTI of A.F. Ioffe” JSC, 28 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 194064, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), e-mail: <eug.terukov@mail.ioffe.ru>

Andronikov Dmitry A., “Research and Development Center of Thin-film Technologies in Energetics at FTI of A.F. Ioffe” JSC, 28 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 194064, Russian Federation,

Cand. Sci. (Physics and Mathematics), e-mail: d.andronikov@hevelsolar.com

Malevsky Dmitry Andreevich, “Research and Development Center of Thin-film Technologies in Energetics at FTI of A.F. Ioffe” JSC, 28 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 194064, Russian Federation,

Researcher, e-mail: <dmalevsky@scell.ioffe.ru>

Zaynutdinov Rustem A., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), e-mail: rzain@gmail.com

Klyucharev Anton Yu., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), e-mail: key_a@mail.ru,

Bratyshev Sergey N., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

post-graduate student, e-mail: sera.brat@mail.ru

Ilyichev Vladimir G., Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

graduate student, e-mail: vova201428@yandex.ru

The pilot study of influence of meteorological factors on power generation by solar modules in climatic conditions of the Astrakhan region is conducted. Research is executed with use of the pilot test photo-electric system developed and made by scientific and technological center of thin-film technologies in an energy at FTI of A.F. Ioffe by request of the Hevel company. Test photo-electric system carries out collecting the following data: power generation mikromorfny and crystal solar modules; value of arrival of solar radiation on a reception platform; temperature of the back of each solar module; air temperature in a shadow; speed and direction of a wind. For ensuring remote access, for transfer of the saved-up data on the centralized server connection to telecommunication networks with allocation to system of the "external" fixed IP address is carried out (to the Internet network, data transmission through cellular networks by means of 3G of the modem). The mass of the experimental data obtained by means of test photo-electric system within a year was divided in compliance with a number of the seasons differing in constancy of meteoconditions. Regression models of complex influence of set of meteorological factors are developed: solar radiation, speed of a wind and ambient temperature on power development of the solar module. According to calculations in MSEXCEL, the received models are adequate by Fischer's criterion with a significance value 0,01 and all coefficients are significant on a significance value 0,05. It is shown that the accounting of ambient temperature and parameters of a wind on the basis of offered regression will allow to increase the accuracy of forecasting of power generation by the solar module. Increments of expected values of development of electric energy solar modules at the accounting of ambient temperature and parameters of a wind in climatic conditions of the Astrakhan region can reach 10–12 %. The offered regression model will be used for the operational and short-term forecast of development of electric energy by network solar power stations in the Astrakhan region.

Keywords: renewables, the distributed power, the solar module, solar power stations, management information systems, information technologies, photo-electric system

Введение. В настоящее время прослеживается мировой тренд децентрализации энергетики. Уход многих потребителей от исключительно централизованного энергоснабжения – общемировая тенденция. Для удовлетворения их потребностей в последние годы разработан целый ряд эффективных энерготехнологий, которые позволяют потребителям электроэнергии создавать собственные генерирующие установки, успешно конкурирующие с централизованным производством электроэнергии.

При распределенной генерации появляется возможность более эффективно использовать локальные энергетические ресурсы. В концепцию распределенной генерации хорошо вписывается распределенный характер выработки энергии с применением возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Распределенная генерация и возобновляемая энергетика сегодня являются основными направлениями развития энергетики во всем мире, они играют существенную роль в повышении надежности и качества поставляемой потребителям электроэнергии [7, 8, 23, 24]. Отсутствие потенциальной опасности техногенных катастроф в возобновляемой энергетике является положительным аргументом с позиции укрепления энергетической безопасности на локальных территориях [1].

В климатических условиях Астраханской области наиболее перспективным является развитие солнечной энергетики [2, 10, 12, 15, 25]. Наблюдается рост установленной мощности солнечных и ветровых электростанций, работающих параллельно с Единой энергетической системой России [2, 12, 14]. Соответственно, усиливается фактор неопределенности количества энергии, выдаваемой сетевыми солнечными и ветровыми электростанциями в электрическую сеть [4, 20, 21, 22]. Резерв, требуемый для покрытия этой неопределенности, должен быть наименьшим [19]. Следовательно, прогноз выработки энергии солнечными электростанциями становится важным инструментом в управлении работой энергосистем и рынков электроэнергии, включая локальные рынки. Поэтому задача оперативного, краткосрочного и долгосрочного планирования выработки мощности солнечными электростанциями становится крайне актуальной. Однако эти вопросы в существующей литературе исследованы недостаточно полно. Поэтому целью данной работы была попытка устранить этот недостаток путем экспериментального исследования энерговыработки солнечных модулей в климатических условиях Астраханской области.

Общая характеристика проблематики работы. В настоящее время известно несколько подходов для получения прогноза мощности ВИЭ, причем эти подходы реализованы в виде программных и программно-технических комплексов [3, 16, 17, 18]. Системные операторы и энергокомпании, как правило, используют несколько комплексов (несколько поставщиков прогнозов) одновременно, опытным путем выясняя, какой комплекс или поставщик предоставляет прогнозы с минимальной погрешностью по мощности ВИЭ.

Основным фактором в определении возможного количества солнечной энергии, которая будет поступать на пластины солнечных модулей, являются метеорологические данные (условия). Как правило, метеорологические данные включают в себя информацию о солнечной активности (глобальное излучение, прямое, диффузное), а также о преобладающих направлениях ветра и его скорости, облачном покрове, о количестве осадков и т.д. Безусловно, главным фактором служит информация о солнечной активности. Построение прогноза с учетом всех видов метеорологических данных представляет собой сложную научную задачу. По этой причине, как правило, известные модели не могут охватить все виды метеорологических данных. В целом ряде работ прогнозирование выработки электроэнергии солнечными модулями осуществляется на основе усредненной солнечной инсоляции и угла наклона солнечного модуля для определенных географических зон. Известны работы, посвященные исследованию влияния

температуры модуля на эффективность его работы [5, 11, 26], при этом влияние остальных метеорологических факторов практически не учитывается. В работе [9] проведено исследование влияния температуры и влажности на энергетические характеристики кремниевой солнечной батареи в условиях Западной Сибири. Модель прогнозирования выработки электроэнергии, предложенная в работе [9], опирается на определение ряда параметров солнечной батареи в лабораторных условиях. Это затрудняет ее использование для оперативного и краткосрочного прогнозирования выработки электроэнергии на сетевой солнечной электростанции.

Обоснование целесообразности использованного подхода. Известные теоретические исследования, как правило, дают оценку влияния какого-либо одного фактора на эффективность выработки электрической энергии солнечными модулями. В связи с внедрением сетевых солнечных электростанций становится актуальной задача прогнозирования выработки с учетом всех возможных факторов. Поэтому целесообразность предлагаемого в настоящей работе экспериментального исследования комплексного влияния совокупности метеорологических факторов на выработку электроэнергии солнечными модулями в климатических условиях Астраханской области является обоснованной. Исследование проводится с применением пилотной тестовой фотоэлектрической системы (ТФЭС).

22 января 2013 г. Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе» и ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет» заключили соглашение о сотрудничестве в области возобновляемой солнечной энергетики путем создания системы мониторинга солнечной инсоляции в Астраханской области, совместного участия в научно-практических исследованиях и подготовке высококвалифицированных кадров в сфере возобновляемых источников энергии.

В рамках этого соглашения 8 мая 2013 г. в Астраханской области на крыше одного из учебных корпусов Астраханского государственного университета была установлена пилотная ТФЭС. Она состоит из двух фотоэлектрических модулей (ФЭМ), произведенных по разной технологии: кристаллического – мощностью 225 Вт и микроморфного – мощностью 125 Вт. Также система включает в себя термощкаф с контрольно-измерительной аппаратурой (рис. 1).

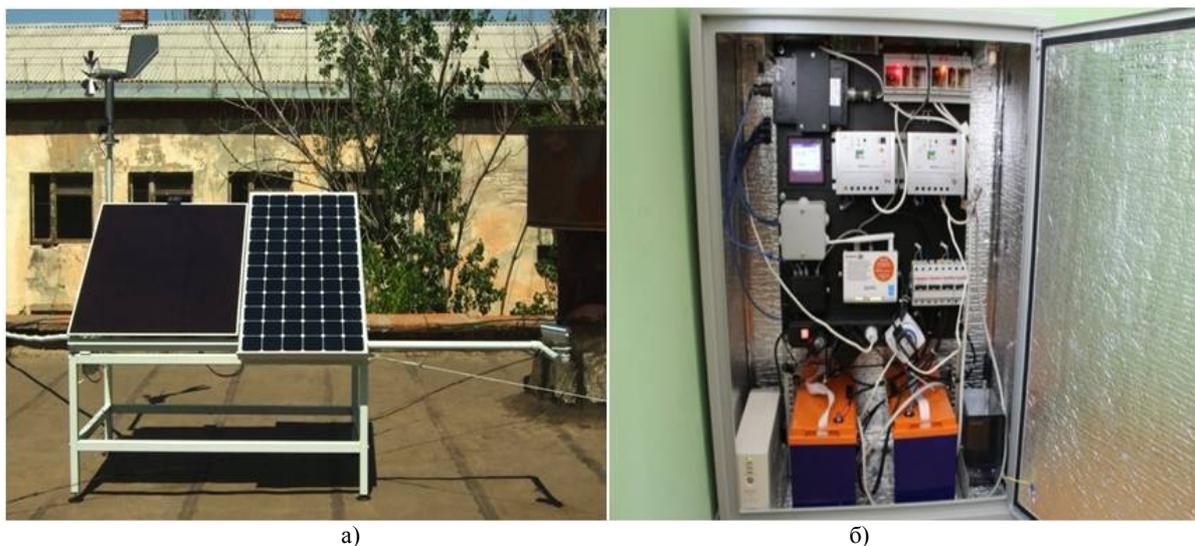


Рисунок 1 – Тестовая фотоэлектрическая система: а) фотоэлектрические модули; б) термощкаф с контрольно-измерительной аппаратурой

ТФЭС разработана и изготовлена научно-техническим центром тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по заказу компании «Хевел» – первого в России предприятия, изготавливающего тонкопленочные фотоэлектрические модули с применением аморфного кремния. Эта компания находится в стратегическом партнерстве с ООО «Авелар Солар Технолоджи».

Назначение ТФЭС – получить достоверные данные о целесообразности использования солнечных модулей в реальных погодных условиях Астраханской области. Система осуществляет сбор следующих данных:

- выработку электроэнергии микроморфным и кристаллическим солнечными модулями;
- значение прихода солнечной радиации на приемную площадку (угол наклона данной площадки соответствует углу наклона солнечных модулей – 31 градус);
- температуру тыльной стороны каждого солнечного модуля;

- температуру воздуха в тени;
- скорость и направление ветра.

Детальная характеристика тестовой фотоэлектрической системы. Структурная схема ТФЭС приведена на рисунке 2.

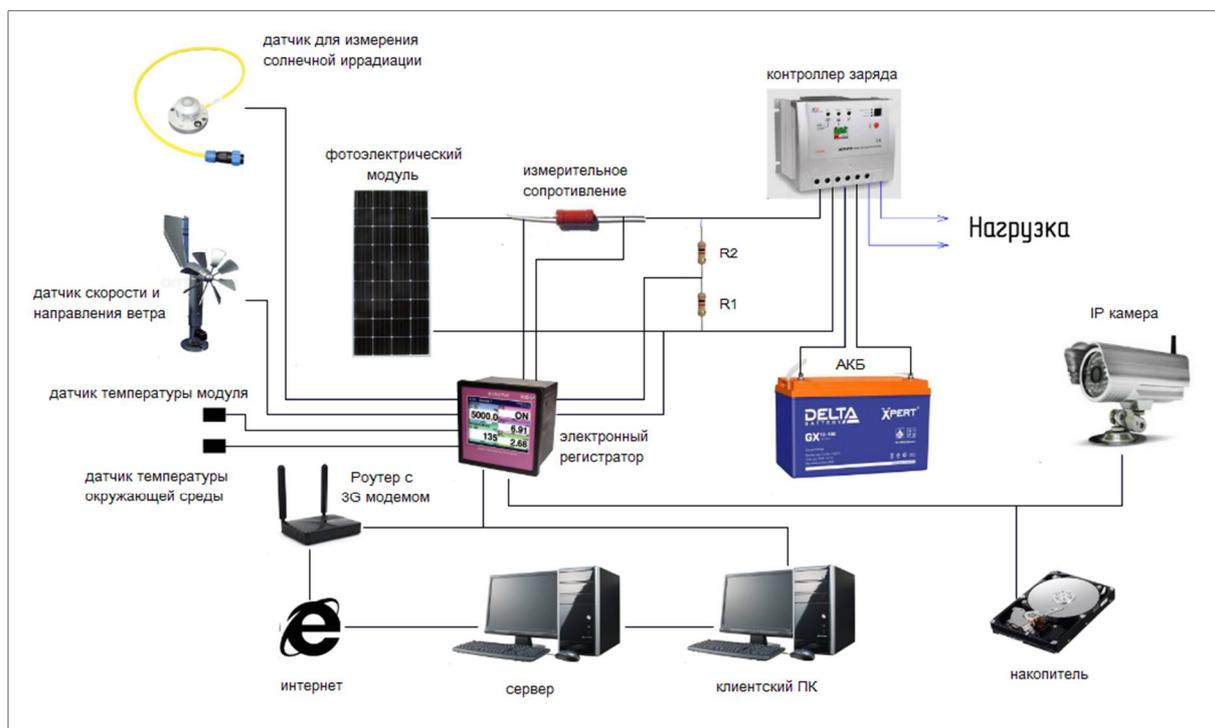


Рисунок 2 – Структурная схема тестовой фотоэлектрической системы

ТФЭС обеспечивает круглосуточный сбор, хранение данных о мощностных, температурных характеристиках, уровне солнечной радиации, а также доступ к этим данным посредством подключения к сети Internet. Отбор энергии от фотоэлектрического модуля обеспечивается системой, состоящей из контроллера заряда с удержанием точки максимальной мощности, аккумулятора и электрической нагрузки. Система позволяет производить круглогодичное измерение характеристик фотоэлектрических модулей, работающих в естественных условиях.

Для удаленного визуального наблюдения система оснащается IP-камерой, сохраняющей фотографии системы на подключенный к системе твердотельный жесткий диск. Система рассчитана на автономное хранение полученных данных (данных системы мониторинга и фотоснимков), собранных в течение одного года. Измерение сигналов производится с точностью не хуже чем 0,2 % в диапазоне напряжений 0–100 Вольт и в диапазоне токов 0–10 Ампер.

Для обеспечения круглогодичной регистрации данных управляющий блок размещается в помещении (термошкафе) с постоянной температурой. Расстояние (длина кабеля) от помещения (термошкафа) с системой сбора данных до солнечной системы не должно превышать 20 метров.

Для обеспечения удаленного доступа к системе сбора данных и для передачи накопленных данных на центральный сервер осуществлено подключение системы к телекоммуникационным сетям с выделением в системе «внешнего» фиксированного IP-адреса (к сети Internet, передача данных через сотовые сети с помощью 3G-модема).

Доступ к данным осуществляется через web-сервер с ограничением доступа к данным по имени пользователя/пароллю. Также возможен доступ непосредственно с клиентского персонального компьютера для контроля работы системы (например, контроль уровня заряда АКБ, других сервисных параметров системы).

Каждые 15–30 секунд сервер опрашивает все системы и собирает текущие измеряемые данные. В случае временного обрыва канала связи с какой-либо системой сервер проводит синхронизацию данных за время отсутствия связи (после восстановления связи).

Непосредственный контроль за работой тестовой системы осуществляется силами сотрудников Научно-образовательного центра «Альтернативная энергетика» Астраханского государственного университета. Внешний вид опорной конструкции и обозначения компонентов ТФЭС представлены на рисунке 3. Комплектность системы ТФЭС представлена в таблице 1.

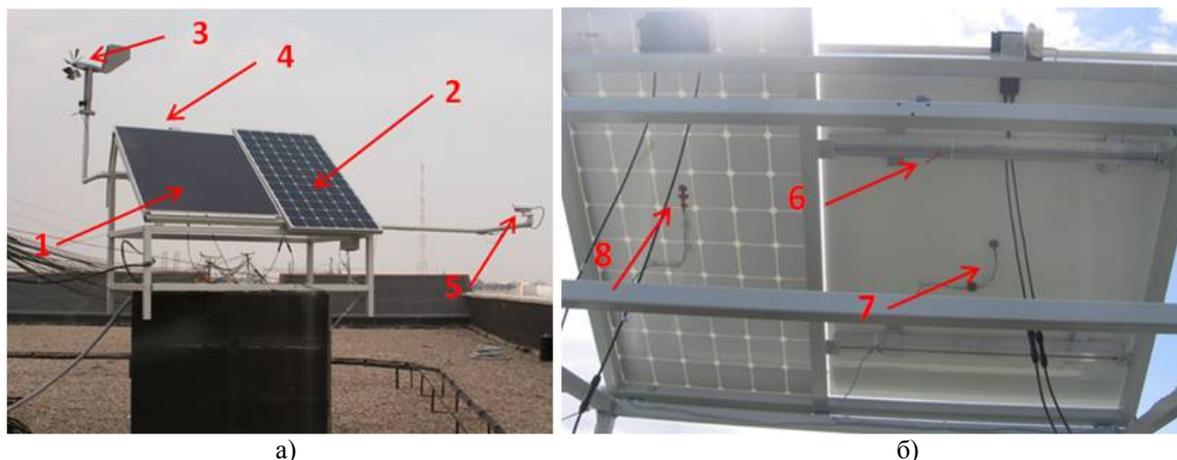


Рисунок 3 – а – внешний вид опорной конструкции ТФЭС с размещенными на ней ФЭМ; б – вид задней поверхности ФЭМ. Обозначения: 1 – ФЭМ 1; 2 – ФЭМ 2; 3 – датчик скорости и направления ветра; 4 – датчик солнечной радиации; 5 – камера наблюдения; 6 – температурный датчик окружающей среды; 7 – температурный датчик задней поверхности ФЭМ 1; 8 – температурный датчик ФЭМ 2

Таблица 1 – Комплектность ТФЭС

Тип, название	Количество, шт.	Назначение
Поддержание солнечных модулей в точке максимальной мощности		
Тонкопленочный солнечный модуль Pramac Luce 125 Вт	1	Объект мониторинга
Кристаллический кремниевый солнечный TSM-210SB Телеком-СТВ 223 Вт	1	Объект мониторинга
Контроллер заряда EPSolar Tracer MPPT 2210 (максимальное напряжение холостого хода 100 В)	1	Управление зарядом и разрядом аккумуляторной батареи. Удержание точки максимальной мощности
Контроллер заряда EPSolar Tracer MPPT 2215 (максимальное напряжение холостого хода 150 В)	1	Управление зарядом и разрядом аккумуляторной батареи. Удержание точки максимальной мощности
АКБ, Delta GX12-100 (гелевая, необслуживаемая, 100 Ач, 12 В)	2	Накопление энергии
Измерение и накопление параметров солнечных модулей и параметров среды		
Плата измерительных сопротивлений	1	Измерение тока и напряжения, вырабатываемого фотоэлектрическим модулем
Электрическая нагрузка	2	Разряд АКБ, необходима для управляемого разряда аккумуляторной батареи
Датчик скорости и направления ветра М-127 с устройством согласования УСТ 0-5 «Гидрометприбор»	1	Измерение скорости и направления ветра
Кремниевый фотоприемник SOL1 с шунтирующим сопротивлением	1	Измерение уровня солнечной иррадиации
Температурные датчики Pt100. 701-102ВAB-V00	3	Измерение температуры окружающей среды и задних поверхностей модулей
Измерительный блок «ПАРАГРАФ PL2», с дополнительными модулями: ACM, UI4, RT4	1	Проведение измерения. Хранение и передача информации
Передача данных		
Роутер для подключения к интернету с поддержкой 3G-модема Zyxel Keenetic	1	Передача данных мониторинга в сеть Интернет
3G-модем Huawei E173	1	Передача данных мониторинга в сеть Интернет
Сетевой коммутатор D-Link 1005	1	Коммутация устройств регистрации и записи данных (регистратор «Параграф PL-2», IP-камера, сетевой жесткий диск D-Link 320 Share Center)
Видеонаблюдение		
IP-видеокамера в уличном исполнении FOSCAM FI8904W	1	Удаленное видеонаблюдение за системой мониторинга
Сетевой диск D-Link 320D Share Center	1	Накопление данных видеонаблюдения

Продолжение таблицы 1

Защита измерительного и коммуникационного оборудования		
Термобокс IProm THM-55-100.80.30-111500	1	Термостабилизация измерительного и коммуникационного оборудования
Источник бесперебойного питания APC 500VA	1	Обеспечение бесперебойного питания системы измерения, накопления и передачи данных на случай аварийного отключения электрической сети
Прочее		
Корпусные изделия, разъёмы, кабели		

Содержимое термощкафа, входящего в состав ТФЭС, с обозначениями размещенных в нем компонентов системы, представлено на рисунке 4.

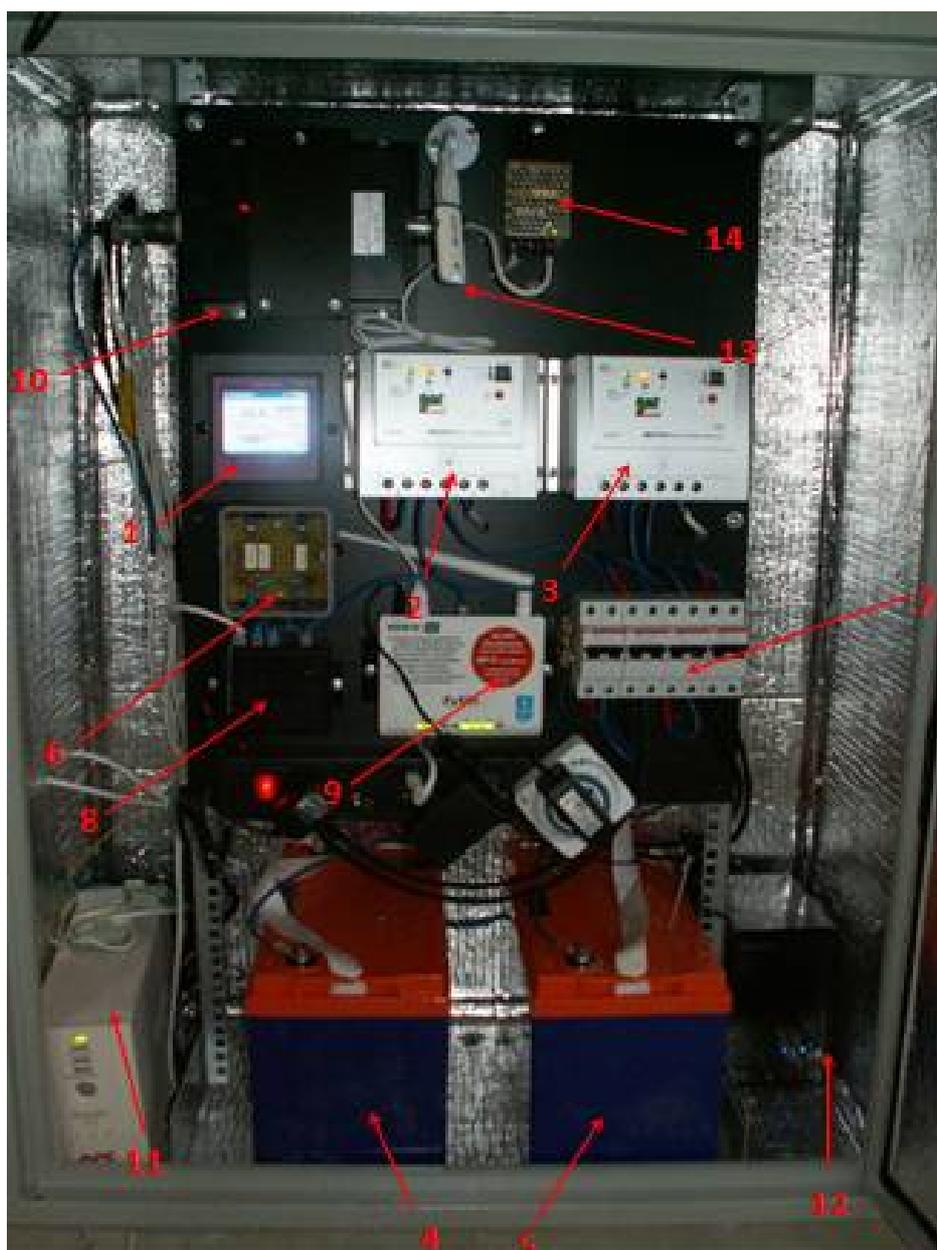


Рисунок 4 – Термошкаф с компонентами системы управления, регистрации и передачи данных. Обозначения: 1 – электронный регистратор данных; 2 – контроллера заряда АКБ ФЭМ 1; 3 – контроллера заряда АКБ ФЭМ 2; 4 – АКБ ФЭМ 1; 5 – АКБ – ФЭМ 2; 6 – измерительная плата; 7 – предохранительные автоматы; 8 – сетевой коммутатор; 9 – роутер с поддержкой 3G-модема; 10 – устройство согласования сигнала датчика ветра; 11 – блок бесперебойного питания, 12 – сетевой диск; 13 – 3G-модем; 14 – блок питания устройства согласования сигнала датчика ветра

Основные эксплуатационные характеристики фотоэлектрических модулей Pramac Luce и TCM-210SB, входящих в состав ТФЭС, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные эксплуатационные характеристики фотоэлектрических модулей Pramac Luce и TCM-210SB, входящих в состав ТФЭС

Параметр	Pramac Luce	TCM-210SB
Номинальная мощность	125 Вт	227 Вт
Напряжение холостого хода	71 В	44 В
Рабочее напряжение	56 В	37,6 В
Рабочий ток	2,23 А	6,04 А
КПД	8,74 %	17,65 %
Площадь поверхности	1,43 м ²	1,286 м ²
Масса	20 кг	15 кг

Солнечные панели Pramac MCRH P7 125 Вт производятся по технологии тонкопленочного нанесения покрытия из аморфного и микроморфного кремния, или как еще принято называть данную технологию Тандемный Аморфный и Микрокристаллический Кремний (a-Si/μc-Si). Солнечные панели Pramac MCRH P7, изготовленные по тонкопленочной технологии, имеют ряд преимуществ по сравнению с классической технологией производства солнечных батарей из моно- или поликристаллического кремния. Одним из главных преимуществ тонкопленочной технологии является низкая стоимость производства и, как следствие, низкая цена солнечных батарей, а также возможность интеграции в фасадные конструкции зданий без потери их эстетического вида. Конструкция панели безрамная, осветленное стекло с тандемным покрытием a-Si/μc-Si и задним защитным закаленным стеклом. Солнечные панели Pramac MCRH P7 могут работать в температурном диапазоне от -40 С до +85 С.

Исследования с применением описанной тестовой фотоэлектрической системы проводятся авторами с 2013 г. Так, в 2015 г. была опубликована статья о сравнении энерговыработки упомянутых выше двух типов солнечных модулей. Авторами статьи выступили сотрудники Научно-образовательного центра «Альтернативная энергетика» Астраханского государственного университета и сотрудники Научно-технического центра тонкопленочных технологий в энергетике при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе [6].

Регрессионная модель энерговыработки солнечного модуля. Регрессионная модель комплексного влияния совокупности метеорологических факторов (солнечной радиации, скорости ветра и температуры окружающей среды на энерговыработку) была построена на примере солнечного модуля Pramac MCRH P7, изготовленного по тонкопленочной технологии. Фрагмент базы экспериментальных данных представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Фрагмент базы экспериментальных данных

Дата и время	Скорость ветра [м/с]	Направление ветра [°]	Солнечная радиация [Вт/м ²]	Температура окружающей среды [°C]	Вырабатываемая мощность исследуемого объекта [мВт]
02.07.2013 10:30	3,86	64,08	540,8046	21,57	68853,5441
02.07.2013 10:32	6,58	64,512	482,1839	21,57	61685,3918
02.07.2013 10:34	4,44	93,672	471,2644	22,68	59975,4742
02.07.2013 10:36	5,08	88,272	457,4713	22,37	58284,6454
02.07.2013 10:38	3,9	83,088	440,8046	22,58	55946,7467
02.07.2013 10:40	5,09	82,08	477,5862	22,09	60562,2152
02.07.2013 10:42	3,03	71,352	493,6782	22,58	62956,0895
02.07.2013 10:44	5	55,656	449,4253	22,29	57567,7595
02.07.2013 10:46	3,95	83,16	504,023	21,98	64580,3128
02.07.2013 10:48	2,44	80,352	513,7931	22,78	65387,2648
02.07.2013 10:50	5,34	71,784	566,6667	21,98	73219,7227

Продолжение таблицы 3

02.07.2013 10:52	3,29	62,64	655,7471	22,58	84058,0838
02.07.2013 10:54	4,09	100,152	650	22,78	83387,7345
02.07.2013 10:56	5,19	77,76	567,2414	22,89	72476,2324
02.07.2013 10:58	5,3	77,472	527,0115	22,78	66830,4903

Как видно из таблицы 3, экспериментальные данные фиксируются через каждые 2 минуты. Соответственно, объем базы данных достаточно велик. Это позволяет использовать статистические подходы для оценки степени влияния различных метеорологических факторов на выработку электроэнергии солнечным модулем.

Рассмотрим построение экспериментальной модели выработки электроэнергии солнечным модулем. В качестве факторов воздействия определим величины солнечной радиации, температуру окружающей среды и скорость ветра.

Будем искать функцию отклика (регрессионную модель) в виде:

$$P = b + a_1V + a_2I + a_3T, \quad (1)$$

где P , мВт – мощность модуля; V , м/с – скорость ветра; I , Вт/м² – солнечная радиация; T , °С – температура окружающей среды.

Коэффициенты b, a_1, a_2, a_3 уравнения множественной линейной регрессии определяются методом наименьших квадратов, реализованным в пакете «Анализ данных» MS EXCEL.

Массив экспериментальных данных, полученных с помощью ТФЭС в течение периода с мая 2013 г. по февраль 2014 г., был разделен на ряд сезонов, отличающихся для г. Астрахани постоянством метеоусловий [13].

Таблица 4 – Диапазоны изменения факторов воздействия

Скорость ветра $V, м/с$		Солнечная радиация $I, Вт/м^2$		Температура T, C^o	
min	max	min	max	min	max
Весенне-летний сезон (май-июнь)					
0	52	51	1212	12,67	38,58
Летний сезон (июль-август)					
0	52	51	1298	17	41
Летне-осенний сезон (август-октябрь)					
0	52	51	1257	12	34
Зимний сезон (декабрь-февраль)					
0	8,9	51	897,1	-27	7

В результате анализа экспериментальных данных были построены следующие модели выработки электроэнергии.

Весенне-летний сезон (май-июнь):

$$P = 10194,6 - 4,5V + 109,1I - 179,7T. \quad (2)$$

Летний сезон (июль-август)

$$P = 9691 + 13,3V + 105,4I - 161,1T. \quad (3)$$

Летне-осенний сезон (август-октябрь):

$$P = 2501,8 - 54,1V + 109,8I + 51,4T. \quad (4)$$

Зимний сезон (декабрь-февраль):

$$P = 610,4 + 89,5V + 110I - 51T. \quad (5)$$

Согласно расчетам, выполненным в MS EXCEL, полученные модели адекватны по критерию Фишера с уровнем значимости 0,01, и все коэффициенты являются значимыми по уровню значимости 0,05.

Прогноз выработки электрической энергии. На основе разработанных регрессионных моделей были получены графики прогнозной выработки электрической энергии с учетом влияния температуры окружающей среды (рис. 5) и скорости ветра (рис. 6).

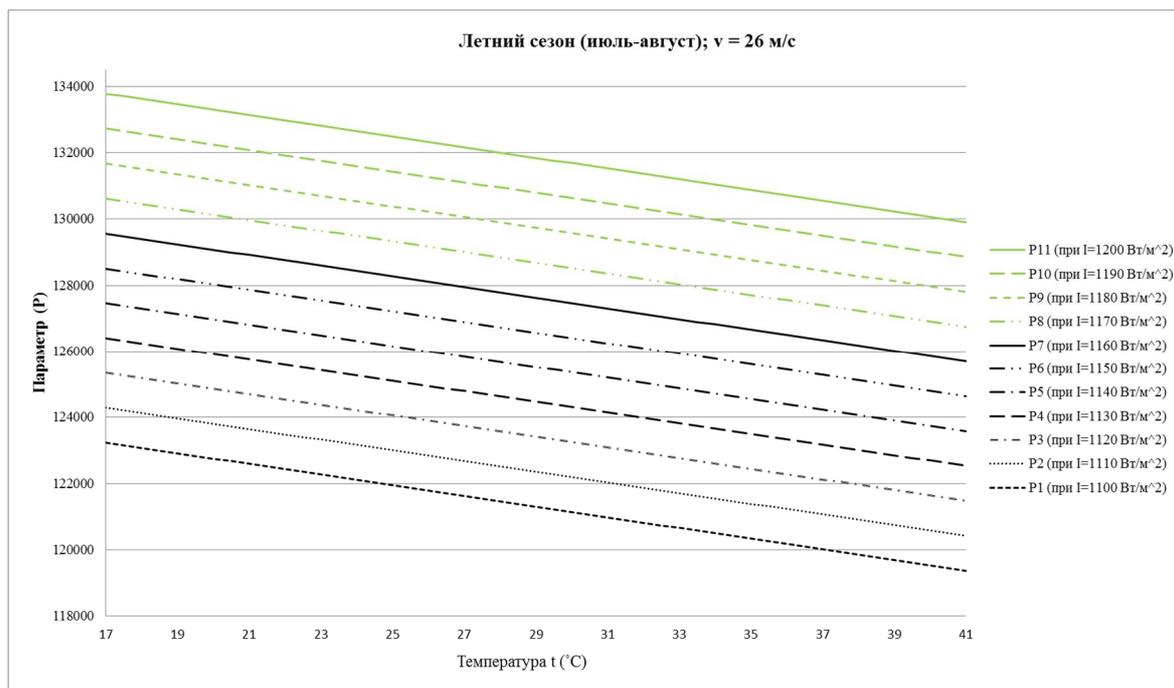


Рисунок 5 – Прогнозная выработка электрической энергии в летний сезон с учетом влияния температуры окружающей среды

На основе разработанной регрессионной модели показано, что мощность, вырабатываемая солнечным модулем P_{гитас} MСРН P7, с ростом температуры окружающей среды:

- в весенне-летнем сезоне (май-июнь) снижается на 3,3–3,6 %;
- в летнем сезоне (июль-август) снижается на 2,9–3,13 %;
- в летне-осеннем сезоне (август-октябрь) возрастает на 0,84–0,92 %;
- в зимнем сезоне (декабрь-февраль) снижается на 1,7–1,9 %.

Снижение выработки с ростом температуры окружающей среды не противоречит известному положению о снижении КПД солнечных модулей с повышением температуры.

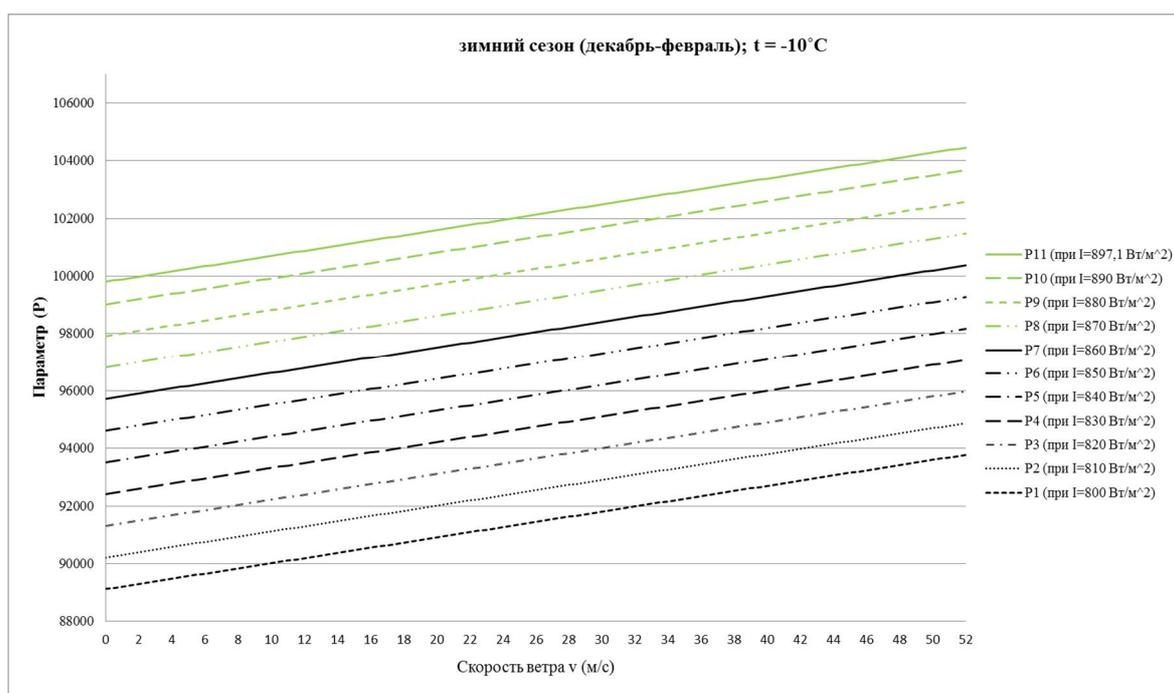


Рисунок 6 – Прогнозная выработка электрической энергии в зимнем сезоне с учетом влияния скорости ветра

На основе разработанной регрессионной модели показано, что мощность, вырабатываемая солнечным модулем Pramac MCRH P7, с ростом скорости ветра:

- в весенне-летнем сезоне (май-июнь) снижается на 0,17–0,18 %;
- в летнем сезоне (июль-август) увеличивается на 0,52–0,57 %;
- в летне-осеннем сезоне (август-октябрь) снижается на 2,07–2,26 %;
- в зимнем сезоне (декабрь-февраль) возрастает на 4,6–5,2 %.

Влияние роста скорости ветра на выработку электроэнергии солнечным модулем неоднозначно: возможно как снижение, так и возрастание выработки. Увеличение выработки с ростом скорости ветра можно объяснить улучшением теплоотвода и, соответственно, повышением КПД.

Заключение.

1. Распределенная генерация и возобновляемая энергетика сегодня являются основными направлениями развития энергетики во всем мире, играют существенную роль в повышении надежности и качества поставляемой электроэнергии. Прогноз выработки солнечных электростанций становится важным инструментом в работе единой энергетической системы страны и рынков электроэнергии. Поэтому задача оперативного, краткосрочного и долгосрочного планирования выработки мощности солнечными электростанциями становится крайне актуальной.

2. Проведено экспериментальное исследование влияния метеорологических факторов на выработку электроэнергии солнечными модулями в климатических условиях Астраханской области.

3. Исследование было выполнено с использованием пилотной ТФЭС, разработанной и изготовленной Научно-техническим центром тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по заказу компании «Хевел».

4. На основе базы экспериментальных данных получена регрессионная модель, в которой выработка электроэнергии солнечным модулем определяется не только значением солнечной радиации, но и температурой окружающей среды и скоростью ветра.

5. Предложенная регрессионная модель показала, что не только солнечная инсоляция, но и температура окружающей среды, а также параметры ветра оказывают существенное влияние на выработку электроэнергии солнечными модулями. Согласно полученным количественным данным, приращение прогнозных значений выработки электрической энергии солнечными электростанциями при учете температуры окружающей среды и параметров ветра в климатических условиях Астраханской области могут достигать 10–12 %.

Разработанные регрессионные модели будут положены в основу программы оперативного и краткосрочного прогноза выработки электрической энергии сетевыми солнечными электростанциями, действующими, проектируемыми или строящимися в Астраханской области.

Библиографический список

1. Антипин С. А. Развитие ВИЭ как фактор освоения мало заселенных территорий / С. А. Антипин, Л. Х. Зайнутдинова // Альтернативная энергетика в регионах России : материалы молодежной научной конференции «АЭР-2018» (г. Астрахань, 5–7 декабря 2018 г.) / под науч. ред. д-ра пед. наук, проф. Л. Х. Зайнутдиновой и д-ра техн. наук, проф. М. Г. Тягунова. – Астрахань : Издатель: Сорокин Роман Васильевич, 2018. – С. 227–233.
2. Боровских Б. А. Увеличение мощности солнечной электростанции «Заводская» до 30 МВт (ПС 110 кВ Володаровка) / Б. А. Боровских, Р. А. Зайнутдинов // Альтернативная энергетика в регионах России : материалы молодежной научной конференции «АЭР-2018» (г. Астрахань, 5–7 декабря 2018 г.) / под науч. ред. д-ра пед. наук, проф. Л. Х. Зайнутдиновой и д-ра техн. наук, проф. М. Г. Тягунова. – Астрахань : Издатель: Сорокин Роман Васильевич, 2018. – С. 55–59.
3. Возможности алгоритмической реализации краткосрочного прогнозирования выработки солнечных электростанций / Д. А. Снегирев [и др.] // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. – 2017. - № 1. – С. 236–239.
4. Гуревич Ю. Е. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией : монография / Ю. Е. Гуревич, П. В. Илюшин. – Н. Новгород : НИУ РАНХиГС, 2018. – 280 с.
5. Джумаев А. Я. Анализ влияния температуры на рабочий режим фотоэлектрической станции / А. Я. Джумаев // Технические науки – от теории к практике : сб. ст. по матер. XLVI Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск : СибАК, 2015. – № 5 (42).
6. Зайнутдинов Р. А. Исследование энерговыработки солнечных модулей с применением тестовой фотоэлектрической системы / Р. А. Зайнутдинов, А. В. Обухов, Д. А. Андроников, Д. А. Малевский, Е. И. Теруков // Фёдоровские чтения – 2015 : XLV Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 11–13 ноября 2015 г.). – Москва : Издательский дом МЭИ, 2015. – С. 259–265.
7. Зайнутдинов Р. А. Трехэтапная модель внедрения систем с возобновляемыми источниками энергии в муниципальных образованиях региона (на примере Астраханской области) / Р. А. Зайнутдинов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2017. – № 4 (40). – С. 125–135.
8. Киушкина В. Р. Возобновляемые источники энергии в распределенной генерации малой энергетики / В. Р. Киушкина // Молодой ученый. – 2016. - № 26 (130). – С. 45–47.
9. Козлов А. В. Контроль влияния параметров атмосферы на энергетические характеристики кремниевой солнечной батареи : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. В. Козлов. – Томск, 2008. – 12 с.

10. Курылев С. А. Основы применения солнечных электростанций в составе судовых энергетических установок / С. А. Курылев, Р. А. Зайнутдинов // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. Качество – Безопасность – Диагностика. – 2017. – С. 595–600.
11. Лысова А. С. Исследование влияния температуры на эффективность солнечных модулей / А. С. Лысова, А. Г. Васьков // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018 : мат-лы IX Междунар. молод. науч.-техн. конф. (Казань, 1–5 октября 2018 г.) : в 3 т. – Казань : Казанский гос. энерг. ун-т, 2018. – Т. 3. – С. 103–106.
12. Мустафин А. Б. Подключение солнечной электростанции по сети 10 кВ / А. Б. Мустафин, Р. А. Зайнутдинов // Альтернативная энергетика в регионах России : материалы молодежной научной конференции «АЭР-2018» (г. Астрахань, 5–7 декабря 2018 г.) / под науч. ред. д-ра пед. наук, проф. Л. Х. Зайнутдиновой и д-ра техн. наук, проф. М. Г. Тягунова. – Астрахань : Издатель: Сорокин Роман Васильевич, 2018. – С. 106–110.
13. Научно-прикладной справочник по климату СССР. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1990. – Вып. 13. – 724 с.
14. Обухова Н. В. Режимы работы Сакмарской солнечной электростанции Оренбургской энергосистемы / Н. В. Обухова, К. И. Башкатова, А. О. Егоров // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018 : матер. IX Междунар. молод. науч.-техн. конф. (Казань, 1–5 октября 2018 г.) : в 3 т. – Казань : Казанский гос. энерг. ун-т, 2018. – Т. 3. – С. 139–142.
15. Попов В. В. Проектирование сетевой солнечной электростанции для повышения эффективности электроснабжения административного здания / В. В. Попов, Р. А. Зайнутдинов // Альтернативная энергетика в регионах России : Материалы молодежной научной конференции «АЭР-2018» (г. Астрахань, 5–7 декабря 2018 г.) / под науч. ред. д-ра пед. наук, проф. Л. Х. Зайнутдиновой и д-ра техн. наук, проф. М. Г. Тягунова. – Астрахань : Издатель: Сорокин Роман Васильевич, 2018. – С. 110–115.
16. Проблемы мониторинга солнечных энергетических систем в России / Т. С. Габдрахманова [и др.] // Вестник Южно-уральского государственного университета. – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 54–60.
17. Прогнозирование работы солнечной электростанции. – Режим доступа: <https://rentechno.ua/blog/solar-pv-forecast.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
18. Промышленное моделирование солнечных электростанций. – Режим доступа: <https://rentechno.ua/blog/production-modeling-pv.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
19. Самойленко В. О. Прогноз особенностей развития малой генерации методами экономико-географического районирования на примере Свердловской области / В. О. Самойленко, С. А. Ерошенко // Промышленность. Энергетика. ЖКХ. – 2015. – № 6. – С. 46–48.
20. Сейт Р. И. Возможности инверторного оборудования солнечных электростанций в части интеграции с ЕЭС. Опыт внедрения автоматических функций / Р. И. Сейт, А. Д. Хафизов // Альтернативная энергетика в регионах России : материалы молодежной научной конференции «АЭР-2018» (г. Астрахань, 5–7 декабря 2018 г.) / под науч. ред. д-ра пед. наук, проф. Л. Х. Зайнутдиновой и д-ра техн. наук, проф. М. Г. Тягунова. – Астрахань : Издатель: Сорокин Роман Васильевич, 2018. – С. 136–146.
21. Снегирев Д. А. Особенности прогнозирования выработки электроэнергии солнечными электростанциями / Д. А. Снегирев, Р. Т. Валиев, С. А. Ерошенко, А. И. Хальясмаа // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017 : матер. VIII Междунар. молод. науч.-техн. конф. (Самара, 2–6 окт. 2017 г.). – Самара : Самарский гос. тех. ун-т, 2017. – С. 139–142.
22. Трачук И. В. Технологии распределенной генерации: эмпирические оценки факторов применения / И. В. Трачук, Н. В. Линдер // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2018. – № 1. – С. 32–48.
23. Тягунов М. Г. Развитие энергетики возобновляемых источников на основе типовых гибридных комплексов в распределенных энергосистемах / М. Г. Тягунов // Инноватика и экспертиза : научные труды. – 2012. – № 2. – С. 91–97.
24. Тягунов М. Г. Особенности работы установок на основе возобновляемых источников энергии в изолированных энергосистемах / М. Г. Тягунов // Альтернативная энергетика в регионах России : материалы молодежной научной конференции «АЭР-2018» (г. Астрахань, 5–7 декабря 2018 г.) / под науч. ред. д-ра пед. наук, проф. Л. Х. Зайнутдиновой и д-ра техн. наук, проф. М. Г. Тягунова. – Астрахань : Издатель: Сорокин Роман Васильевич, 2018. – С. 40–44.
25. Юдаев И. В. Солнечная электроэнергетика Юга России. Имеющийся потенциал. Эксплуатируемые объекты. Перспективы развития / И. В. Юдаев, Ю. Даус // Альтернативная энергетика в регионах России : материалы молодежной научной конференции «АЭР-2018» (г. Астрахань, 5–7 декабря 2018 г.) / под науч. ред. д-ра пед. наук, проф. Л. Х. Зайнутдиновой и д-ра техн. наук, проф. М. Г. Тягунова. – Астрахань : Издатель: Сорокин Роман Васильевич, 2018. – С. 45–49.
26. Юрченко А. В. Статистическая модель кремниевых солнечных батарей, работающих под воздействием природных и аппаратных факторов / А. В. Юрченко, А. В. Волгин, А. В. Козлов // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – № 4. – С. 142–148.

References

1. Antipin S. A., Zaynutdinova L. Kh. Razvitiye VIE kak faktor osvoyeniya malo zaselennykh territoriy [Development of RES as development factor few populated]. *Alternativnaya energetika v regionakh Rossii : materialy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «AER-2018»* [Alternative energetics in the regions of Russia : Proceedings of the Youth Scientific Conference "AER-2018"]. Astrakhan, December 5–7, 2018. Ed. by Dr. Ped. Sciences, Prof. L. Kh. Zaynutdinova and Dr. Techn. Sciences, Prof. M. G. Tyagunov. Astrakhan, Izdatel: Sorokin Roman Vasilyevich Publ., 2018, pp. 227–233.
2. Borovskikh B. A., Zaynutdinov R. A. Uvelicheniye moshchnosti solnechnoy elektrostantsii «Zavodskaya» do 30 MVt (PS 110 kV Volodarovka) [Increase in power of a solar power station «Factory» to 30 MW (PS of 110 KV of Volodarovk)]. *Alternativnaya energetika v regionakh Rossii : materialy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «AER-2018»* [Alternative energetics in the regions of Russia : Proceedings of the Youth Scientific Conference "AER-2018"]. Astrakhan, December 5–7, 2018. Ed. by Dr. Ped. Sciences, Prof. L. Kh. Zaynutdinova and Dr. Techn. Sciences, Prof. M. G. Tyagunov. Astrakhan, Izdatel: Sorokin Roman Vasilyevich Publ., 2018, pp. 55–59.

3. A. Snegirev et al. Vozmozhnosti algoritmicheskoy realizatsii kratkosrochnogo prognozirovaniya vyrabotki solnechnykh elektrostantsiy [Opportunities for algorithmic implementation of short-term forecasting of solar power generation]. *Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh* [All-Russian Scientific Conference on Control Problems in Technical Systems], 2017, no. 1, pp. 236–239.
4. Gurevich Yu. Ye., Ilyushin P. V. *Osobennosti raschetov rezhimov v energorayonakh s raspredelennoy generatsiyey: monografiya* [Features of mode calculations in energy districts with distributed generation: monograph]. N. Novgorod, Nizhny Novgorod Institute of Management – Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation Publ., 2018. 280 p.
5. Dzhumayev A. Ya. Analiz vliyaniya temperatury na rabochiy rezhim fotoelektricheskoy stantsii [Analysis of the effect of temperature on the operating mode of a photovoltaic station]. *Tekhnicheskkiye nauki – ot teorii k praktike: sbornik statey po materialam XLVI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Technical Sciences – from theory to practice: Proceedings of Materials XLVI International scientific-practical conference]. Novosibirsk, SibAK Publ., 2015, no. 5 (42).
6. Zaynutdinov R. A., Obukhov A. V., Andronikov D. A., Malevskiy D. A., Terukov Ye. I. Issledovaniye energovyrabotki solnechnykh moduley s primeneniym testovoy fotoelektricheskoy sistemy [Study of the power generation of solar modules using a test photovoltaic system]. *Fedorovskiy chteniya – 2015: XLV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s elementami nauchnoy shkoly* [Fedorov Readings – 2015: XLV International Research and Practice Conference with elements of a scientific school]. Moscow, November 11–13, 2015. Moscow, MEI Publ., 2015, pp. 259–265.
7. Zaynutdinov R. A. Trekhstapnaya model vnedreniya sistem s vozobnovlyayemyimi istochnikami energii v munitsipal'nykh obrazovaniyakh regiona (na primere Astrakhanskoj oblasti) [Three-stage model of implementing systems, based on usage of the renewable energy sources, in regional municipalities (by the example of the Astrakhan region)]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2017, no. 4 (40), pp. 125–135.
8. Kiushkina V. R. Vozobnovlyayemyye istochniki energii v raspredelennoy generatsii maloy energetiki [Renewable energy sources in distributed generation of small energy]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2016, no. 26 (130), pp. 45–47.
9. Kozlov A. V. *Kontrol vliyaniya parametrov atmosfery na energeticheskiye kharakteristiki kremniyevoy solnechnoy batarei* [Controlling the effects of atmospheric parameters on the energy characteristics of a silicon solar cell]. Tomsk, 2008. 12 p.
10. Kurylev S. A., Zaynutdinov R. A. Osnovy primeneniya solnechnykh elektrostantsiy v sostave sudovykh energeticheskikh ustanovok [Fundamentals of application of solar power plants as part of ship power plants]. *Innovatsionnyye, informatsionnyye i kommunikatsionnyye tekhnologii. Kachestvo – Bezopasnost – Diagnostika* [Innovation, information and communication technologies. Quality – Safety – Diagnostics], 2017, pp. 595–600.
11. Lysova A. S., Vaskov A. G. Issledovaniye vliyaniya temperatury na effektivnost solnechnykh moduley [Investigation of the temperature influence on the solar modules efficiency]. *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2018: materialy IX Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Power industry through the eyes of young people – 2018: Materials IX International Young Scientific and Technical Conference], in 3 vol. Kazan, October 1–5, 2018. Kazan, Kazan State Energy University Publ., 2018, vol. 3, pp. 103–106.
12. Mustafin A. B., Zaynutdinov R. A. Podklyucheniye solnechnoy elektrostantsii po seti 10 kV [Connection of a solar power plant on a network of 10 kV]. *Alternativnaya energetika v regionakh Rossii: materialy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «AER-2018»* [Alternative energetics in the regions of Russia: Proceedings of the Youth Scientific Conference "AER-2018"]. Astrakhan, December 5–7, 2018. Ed. by Dr. Ped. Sciences, Prof. L. Kh. Zainutdinova and Dr. Techn. Sciences, Prof. M. G. Tyagunov. Astrakhan, Izdatel: Sorokin Roman Vasilyevich Publ., 2018, pp. 227–233.
13. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR* [Applied scientific reference book on USSR Climate]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1990, issue 13. 724 p.
14. Obukhova N. V., Bashkatova K. I., Yegorov A. O. Rezhimy raboty Sakmarskoj solnechnoy elektrostantsii Orenburgskoy energosistemy [Operation modes of Sakmarskaya solar power plant in Orenburg power system]. *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2018: materialy IX Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Power industry through the eyes of young people – 2018: Materials IX International Young Scientific and Technical Conference], in 3 vol. Kazan, October 1–5, 2018. Kazan, Kazan State Energy University Publ., 2018, vol. 3, pp. 139–142.]
15. Popov V. V., Zaynutdinov R. A. Proyektirovaniye setevoy solnechnoy elektrostantsii dlya povysheniya effektivnosti elektrosnabzheniya administrativnogo zdaniya [Design of a network solar power station for increase of efficiency of power supply of an office building]. *Alternativnaya energetika v regionakh Rossii: materialy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «AER-2018»* [Alternative energetics in the regions of Russia: Proceedings of the Youth Scientific Conference "AER-2018"]. Astrakhan, December 5–7, 2018. Ed. by Dr. Ped. Sciences, Prof. L. Kh. Zainutdinova and Dr. Techn. Sciences, Prof. M. G. Tyagunov. Astrakhan, Izdatel: Sorokin Roman Vasilyevich Publ., 2018, pp. 110–115.
16. Gabderakhmanova T. S. et al. Problemy monitoringa solnechnykh energeticheskikh sistem v Rossii [Problems of monitoring solar energy systems in Russia]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of South Ural State University], 2015, vol. 15, no. 4, pp. 54–60.
17. *Prognozirovaniye raboty solnechnoy elektrostantsii* [Prediction of the solar power station]. Available at: <https://rentechno.ua/blog/solar-pv-forecast.html>.
18. *Promyshlennoye modelirovaniye solnechnykh elektrostantsiy* [Industrial modeling of solar power plants]. Available at: <https://rentechno.ua/blog/production-modeling-pv.html>.
19. Samoylenko V. O. Obespecheniye balansov moshchnosti i energii elektroenergeticheskikh sistem s raspredelennoy generatsiyey [Ensuring the balances of power and energy of electric power systems with distributed generation]. Ekaterinburg, 2017. 207 p.
20. Seyt R. I., Khafizov A. D. Vozmozhnosti invertornogo oborudovaniya solnechnykh elektrostantsiy v chasti integratsii s YEES. Opyt vnedreniya avtomaticheskikh funktsiy [Possibilities of the inverter equipment of solar power plants in terms of integration with the UES. Experience of introducing automatic functions]. *Alternativnaya energetika v regionakh*

Rossii : materialy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «AER-2018» [Alternative energetics in the regions of Russia : Proceedings of the Youth Scientific Conference "AER-2018"]. Astrakhan, December 5–7, 2018. Ed. by Dr. Ped. Sciences, Prof. L. Kh. Zainutdinova and Dr. Techn. Sciences, Prof. M. G. Tyagunov. Astrakhan, Izdatel: Sorokin Roman Vasilyevich Publ., 2018, pp. 110–115.

21. Snegirev D. A., Valiyev R. T., Yeroshenko S. A., Khalyasmaa A. I. Osobennosti prognozirovaniya vyrabotki elektroenerгии solnechnymi elektrostantsiyami [Features of Forecasting the Generation of Electricity by Solar Power Plants]. *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2018 : materialy VIII Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Power industry through the eyes of young people – 2018 : Materials VII International Young Scientific and Technical Conference], Samara, 2 – 6 okt. 2017 g. Samara, Samara State Technical University, 2017, pp. 139–142.

22. Trachuk I. V., Linder N. V. Tekhnologii raspredelennoy generatsii: empiricheskiye otsenki faktorov primeneniya [Distributed generation technologies: empirical evaluation of application]. *Strategicheskiye resheniya i risk-menedzhment* [Strategic solutions and risk management], 2018, no. 1, pp. 32–48.

23. Tyagunov M. G. Razvitiye energetiki vozobnovlyayemykh istochnikov na osnove tipovykh gibridnykh kompleksov v raspredelennykh energosistemakh [Development of renewable energy sources based on typical hybrid complexes in distributed power systems]. *Innovatika i ekspertiza : nauchnyye trudy* [Innovatika and expertise : scientific works], 2012, no. 2, pp. 91–97.

24. Tyagunov M. G. Osobennosti raboty ustanovok na osnove vozobnovlyayemykh istochnikov energii v izolirovannykh energosistemakh [Features of work of installations on the basis on renewables in the isolated power supply systems]. *Alternativnaya energetika v regionakh Rossii : materialy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «AER-2018»* [Alternative energetics in the regions of Russia : Proceedings of the Youth Scientific Conference "AER-2018"]. Astrakhan, December 5–7, 2018. Ed. by Dr. Ped. Sciences, Prof. L. Kh. Zainutdinova and Dr. Techn. Sciences, Prof. M. G. Tyagunov. Astrakhan, Izdatel: Sorokin Roman Vasilyevich Publ., 2018, pp. 40–44.]

25. Yudayev I. V., Daus YU. Solnechnaya elektroenergetika Yuga Rossii, imeyushchiysya potentsia, ekspluatiruyemye ob"yekty, perspektivy razvitiya [Solar power industry of the South of Russia; the available potential, the operated objects, development prospects]. *Alternativnaya energetika v regionakh Rossii : materialy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «AER-2018»* [Alternative energetics in the regions of Russia : Proceedings of the Youth Scientific Conference "AER-2018"]. Astrakhan, December 5–7, 2018. Ed. by Dr. Ped. Sciences, Prof. L. Kh. Zainutdinova and Dr. Techn. Sciences, Prof. M. G. Tyagunov. Astrakhan, Izdatel: Sorokin Roman Vasilyevich Publ., 2018, pp. 45–49.]

26. Yurchenko A. V., Volgin A. V., Kozlov A. V. Statisticheskaya model kremniyevykh solnechnykh batarey, rabotayushchikh pod vozdeystviyem prirodnykh i apparatnykh faktorov [Statistical model of silicon solar cells operating under the influence of natural and hardware factors]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University], 2009, no. 4, pp.142–148.