

DOI 10.54398/20741707\_2022\_2\_127  
УДК 62: 621.311 + 004.942

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ СУДНА ТИПА КАТАМАРАН**

*Статья поступила в редакцию 09.03.2022, в окончательном варианте – 28.04.2022.*

**Шуришев Илья Борисович**, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

магистрант, ORCID: 0000-0003-1803-974X, e-mail: piece114@mail.ru

**Зайнутдинова Лариса Хасановна**, Астраханский государственный университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а,

доктор педагогических наук, кандидат технических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-7013-9716, e-mail: lzain@mail.ru

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

аспирант, ORCID: 0000-0002-2579-0403, e-mail: vova201428@yandex.ru

Новые подходы к реализации стратегий энергетической и судостроительной отраслей создают условия для технологического развития альтернативных источников энергии на водном транспорте. Проведен анализ опыта эксплуатации солнечной электростанции катамарана «Эковолна». Представлена структурная схема солнечной электростанции. Разработана наглядная схема, визуализирующая картину и виды возникших дефектов. В результате использования эмпирического метода научного исследования выявлено, что основной причиной выхода из строя солнечных модулей катамарана «Эковолна» является перегрев фотоэлектрических ячеек и, как следствие, быстрая деградация материала. На основе экспериментов, проведенных с применением тестовой фотоэлектрической системы, установлено, что в полдень температура солнечных модулей в климатических условиях Астрахани достигает высоких температур, более 70 градусов Цельсия. Разработана система водяного охлаждения солнечных модулей, не требующая каких-либо сосудов для хранения рабочей жидкости, так как в качестве хладагента предложено использование заборной воды. Предложена комплектация компонентов солнечной электростанции. Проведен расчёт выработки электроэнергии солнечной электростанции с применением специализированной программы «RealSolar». Показано, что выработка электроэнергии за счет солнечных модулей полностью перекрывает затраты энергии на электропривод катамарана в период с мая по август. С помощью программы Polysun дана оценка снижения выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу. Предлагаемый проект солнечной электростанции катамарана позволит сократить выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу на 7171,5 кг в год.

**Ключевые слова:** альтернативные источники энергии, солнечная электростанция, энергоэффективность, солнечный модуль, контроллер, аккумулятор, охлаждение солнечных модулей, водный транспорт

## **IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF A CATAMARAN-TYPE SOLAR POWER PLANT**

*The article was received by the editorial board on 09.03.2022, in the final version – 28.04.2022.*

**Shurshov Ilya B.**, Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, master student, ORCID: 0000-0003-1803-974X, e-mail: piece114@mail.ru

**Zaynutdinova Larisa Kh.**, Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation,

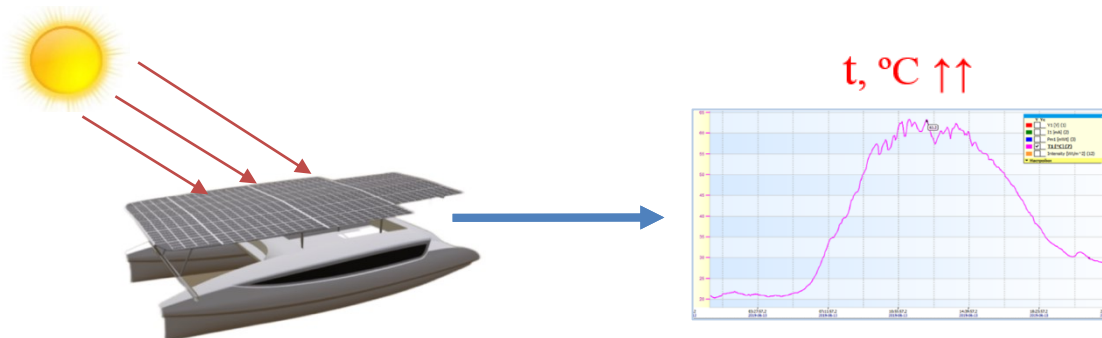
Doct. Sci. (Pedagogy), Cand. Sci. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0002-7013-9716, e-mail: lzain@mail.ru

**Ilyichev Vladimir G.**, Astrakhan State University, 20a Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, postgraduate student, ORCID: 0000-0002-2579-0403, e-mail: vova201428@yandex.ru

New approaches to implementing strategies of energy and shipbuilding industries forge conditions for the technological development of alternative energy sources in water transport. The operating experience of the solar power plant for "Eco-wave" ("Ekovolna") catamaran was analyzed. A block diagram of a solar power plant was presented. A visual scheme was developed that visualizes the picture and types of defects that arose. As a result, it was revealed that the key reason for the failure of the solar modules of "Ekovolna" catamaran is the overheating of photovoltaic cells. This leads to rapid degradation of the material. Based on experiments conducted using a test photovoltaic system, it was found that at noon the temperature of solar modules in the climatic conditions of Astrakhan reaches high temperatures, i.e. more than 70 °C. A water-cooling system for solar modules was developed that does not require any vessels for storing the working fluid, since the use of seawater as a refrigerant was suggested. A complete set of components for a solar power plant was proposed. Electricity generation of a solar power plant using RealSolar software was calculated. Generation of electricity was shown to completely cover the energy costs for the electric drive of the catamaran in the period from May to August due to solar modules. With Polysun software, the reduction of CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere was assessed. The proposed catamaran solar power plant project is expected to reduce CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere by 7171.5 kg per year.

**Keywords:** alternative energy sources, solar power plant, energy efficiency, solar module, controller, battery, solar modules cooling, water transport

## Graphical annotation (Графическая аннотация)



**Введение.** Использование возобновляемых источников энергии становится все более популярным в связи с увеличением численности населения и экологическими проблемами. Согласно сведениям, приведенным в работе [1], на 01.01.2020 г. установленная мощность фотоэнергетики в мире составляет 627 ГВт, а ветроэнергетики – 651 ГВт. В России к 01.01.2020 г. установленная мощность фотоэлектрических станций достигла 1395 МВт, а ветроэнергетических станций – 670 МВт. В России, в силу совокупности географических, климатических условий и территориальной распределенности производственной инфраструктуры, темпы развития солнечной энергетики превышают темпы роста ветроэнергетики. Солнечная энергия является одним из наиболее перспективных видов возобновляемых источников энергии, что привлекает к работе в этой сфере многих исследователей по всему миру. Однако вопросы использования солнечной энергетики на водном транспорте пока еще изучены в меньшей степени.

Конвенция по предотвращению загрязнения моря сбросами отходов и других материалов 1972 г. с изменениями 1978 г. требует ежегодного снижения вредных выбросов с судов. Наиболее актуально загрязнение водной среды и атмосферного воздуха. В последние годы, наряду с классическим судостроением, намечается проектирование и строительство судов, для энергообеспечения которых используются возобновляемые источники энергии. Наиболее перспективно применение фотоэлектрических электростанций, поскольку их применение позволит уменьшить загрязнение атмосферы и аквасферы выбросами от дизелей; снизить расходы на горючесмазочные материалы; обеспечить энергонезависимость, что особенно важно в аварийных ситуациях. В мире уже известны некоторые отдельные проекты энергоэффективных судов с применением фотоэлектрических систем для частичного замещения выработки электроэнергии дизель-генераторами, что, безусловно, способствует снижению расхода топлива и моторного масла, а следовательно, и уменьшению загрязнения окружающей среды. Появляются суда, в ходе экспериментальных испытаний которых энергообеспечение полностью осуществляется за счёт солнечной энергии. В работах [2, 3] показано, что при благоприятных погодных условиях (с высоким уровнем солнечной радиации) на малотоннажных судах уже сегодня может достигаться достаточная энерговооруженность.

**Общая характеристика проблематики работы.** Новые стратегии энергетической и судостроительной отраслей создают условия для технологического развития возобновляемых источников энергии на водном транспорте. Известен опыт успешного пилотного похода отечественного катамарана «Эковолна» от Балтики до Каспия. В мае 2018 г. катамаран «Эковолна» стартовал в Санкт-Петербурге, а первого сентября 2018 г. катамаран торжественно встречали в Астрахани. Протяженность речного пути от Балтийского до Каспийского моря составила 5987 км. Этот путь удалось пройти за счет использования только одной солнечной энергии. Горючее топливо не применялось. Эта экспедиция показала необходимость и возможность исследований эффективности применения на судах солнечных панелей разных типов, конструкций и разных видов оборудования солнечных электростанций. Вторая навигация состоялась в июле 2019 г. и проходила по маршруту Астрахань – Ростов – Астрахань в условиях высоких температур окружающей среды. К сожалению, вторая навигация сопровождалась существенным снижением выработки солнечной электростанции. Для анализа возникшей проблемы в настоящей работе применены методы эмпирического научного исследования.

Целью настоящего проекта является разработка энергоэффективной солнечной электростанции для электроснабжения судна типа катамаран, эксплуатирующегося в регионах с высокими температурами окружающей среды.

**Анализ влияния температуры окружающей среды и нагрева солнечных модулей на выработку электроэнергии солнечной электростанции катамарана (обоснование целесообразности использованного подхода).** Для достижения поставленной цели во главу угла мы поставили анализ влияния температуры окружающей среды и нагрева солнечных модулей на выработку электроэнергии солнечной электростанции.

Производители заявляют значительные сроки службы солнечных модулей, до 25 лет. Однако по истечении двух лет эксплуатации генерация электроэнергии солнечной электростанцией катамарана «Эковолна» заметно снизилась. Это наблюдение послужило толчком к проведению анализа сложившейся

ситуации и разработке предложений по повышению энергоэффективности солнечной электростанции судна типа катамаран.

Было рассмотрено, как именно солнечные модули подключались между собой и как они были связаны с остальным оборудованием. Обследование технического состояния станции производилось в следующем порядке: измерены напряжения на всех солнечных панелях; выявлены панели с просадками напряжения; установлено исчезновение генерации одной из панелей. На некоторых панелях напряжение превышало номинальное значение холостого хода (~  $25 \pm 0,5$  В). На рисунке 1 представлена схема расположения солнечных панелей на крыше катамарана, показана привязка групп панелей к соответствующим контроллерам, а степень выявленных дефектов отражена в цвете.

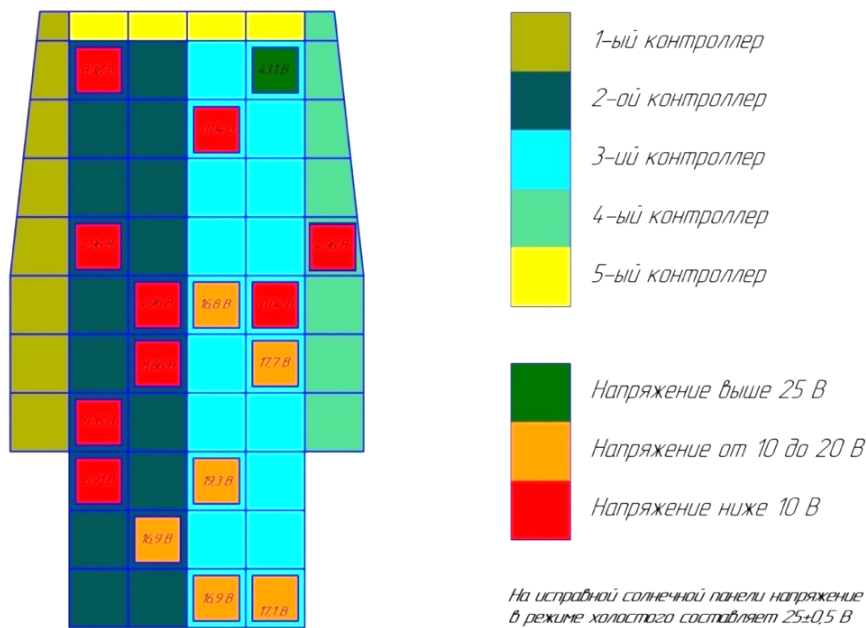


Рисунок 1 – Группы солнечных панелей на крыше катамарана. Напряжение холостого хода дефектных панелей

В работе аккумуляторов, инверторов, батарейного монитора неисправностей не обнаружено. На аккумуляторах выдавалось напряжение в пределах 3,28 В.

В результате проведенного нами обследования было выявлено, что основной причиной выхода из строя солнечных модулей катамарана «Эковолна» является перегрев фотоэлектрических ячеек и, как следствие, быстрая деградация материала. Наибольшая деградация произошла в 2019 г., когда катамаран эксплуатировался в условиях южного региона в чрезвычайно жаркое время. В 2018 г., когда путь катамарана проходил большей частью по северной и центральной частям России, нарушений в работе солнечной электростанции не наблюдалось.

Известно, что на производительность солнечных модулей сильно влияет температура [4, 5]. Исследования, проведенные в работе [6], показали существенное влияние температуры на вольтамперные характеристики фотоэлектрического модуля (рис. 2).

Из графика, представленного на рисунке 2, видно, что с ростом температуры происходит смещение точки максимальной мощности. Рост температуры приводит к снижению напряжения холостого хода и к снижению максимально достижимого значения выходной мощности (рис. 3).

Для оценки снижения выработки фотоэлектрических модулей принято использовать понятие температурного коэффициента. Этот коэффициент показывает, на сколько процентов снижается эффективность фотоэлектрического модуля при возрастании температуры на один градус. Производители солнечных панелей определяют коэффициент полезного действия фотоэлектрического модуля при температуре +25 °C и эталонном значении освещенности на плоскости 1000 Вт/кв.м.

Значения температурного коэффициента номинальной мощности фотоэлектрических модулей разных типов, как правило, лежат в диапазоне от –0,2 до –0,6 %.

В климатических условиях Астраханской области в летний период собственная температура фотоэлектрического модуля может достигать высоких значений (до плюс 70 °C). Это значит, что снижение отдаваемой мощности составит порядка 20 %. Следовательно, соблюдение тепловых режимов оказывает существенное влияние на энергоэффективность солнечных панелей.

Особенности эксплуатации солнечных энергоустановок в различных климатических условиях рассмотрены в работе [7] Тепловые характеристики гибридной солнечной установки представлены в работе [8]. Влияние температуры на эффективность работы солнечного модуля рассмотрено также в работе [9].

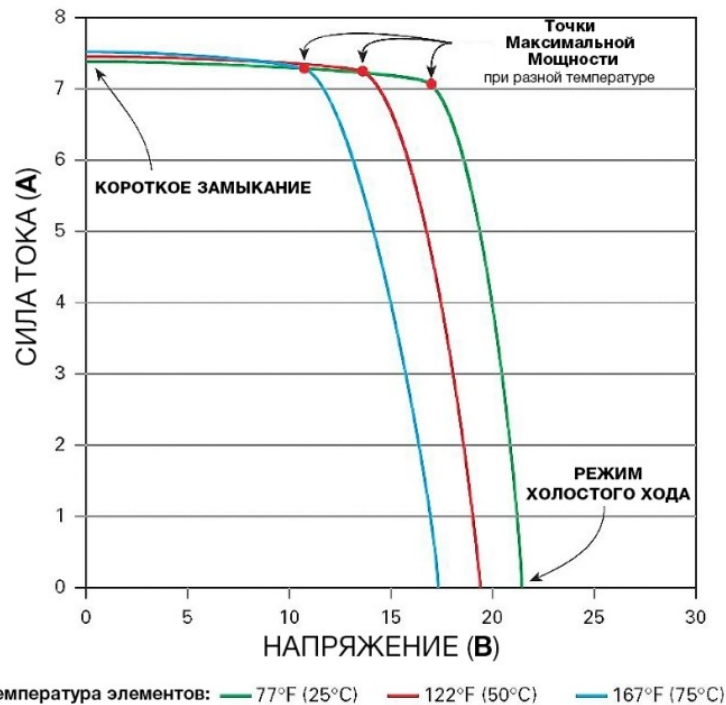


Рисунок 2 – Вольтамперные характеристики фотоэлектрического модуля. Положение точки максимальной мощности в зависимости от температуры [6]

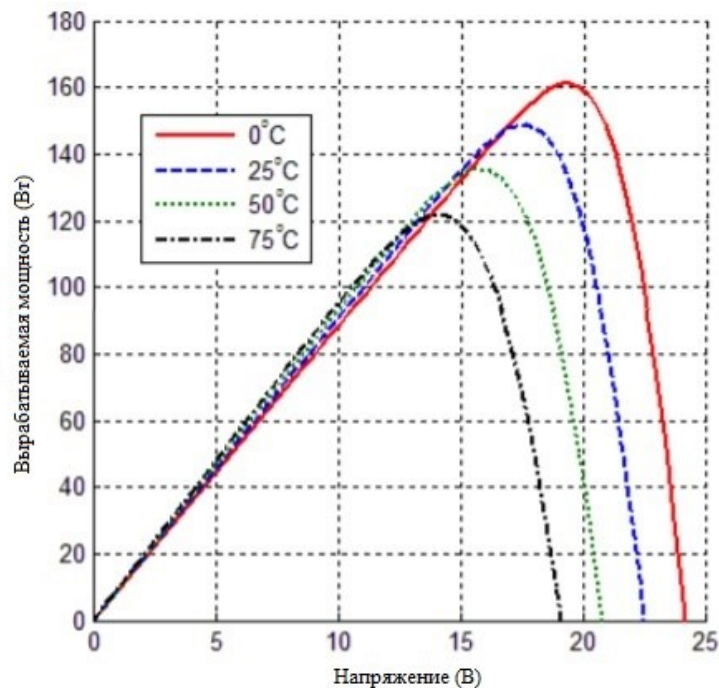


Рисунок 3– Зависимость выходной мощности фотоэлектрического модуля от нагрузки и от температуры [6]

Согласно нашим экспериментам, проведенным с применением имеющейся в нашем распоряжении тестовой фотоэлектрической системы [10], в полдень температура солнечных модулей в условиях Астрахани на солнце достигает высоких температур, более 70 градусов Цельсия (рис. 4).

В связи с высокими температурами окружающей среды исследование эффективности солнечных модулей в климатических условиях Астраханской области, несомненно, актуально. В работе [11] мы убедились в достаточной эффективности сетевой солнечной электростанции офисного здания. В работе [12],

используя нашу пилотную тестовую фотоэлектрическую систему, мы показали, что деградация солнечных модулей при условии их просторного размещения и хорошего естественного воздушного охлаждения может быть сравнительно небольшой.

Однако, как мы уже отмечали выше, деградация солнечных модулей системы электроснабжения катамарана «Эковолна», испытанной в жарких климатических условиях Астраханской области, оказалась существенной.

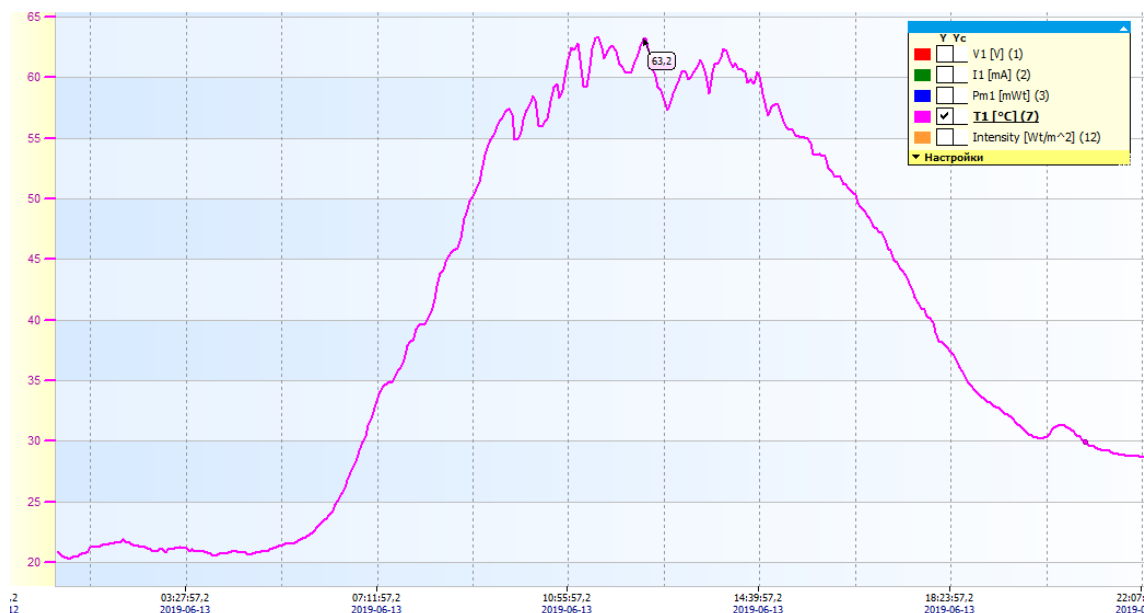


Рисунок 4 – График температуры модуля в течение дня (Астрахань, 2019-06-13)

**Выбор солнечных модулей.** Достаточно важным моментом в модернизации системы электроснабжения катамарана «Эковолна» является подбор солнечных модулей. Обоснованием этого являются экстремально высокие температуры воздуха и уровни инсоляции в летний период на территории Астраханской области. Также необходимо учитывать специфику использования солнечных модулей. Так как они устанавливаются на крыше судна, то с каждым килограммом изменяется коэффициент остойчивости.

Ранее на катамаране были установлены солнечные панели Nevel 5 Busbar. Поскольку эти модули показали себя неустойчивыми к перегреву, было принято решение провести сравнение более современных модулей и обосновать переход к другому типу модулей. В итоге мы выбрали экспериментальные модули от НТЦ ТПТ с характеристиками, представленными в таблице 1.

Таблица 1– Характеристики модулей НТЦ ТПТ

Характеристика	Значение
Длина	1035 ± 10 мм
Ширина	995 ± 5 мм
Ток короткого замыкания	Isc = 8,79 А
Напряжение холостого хода	Voc = 26,18 В
Ток в рабочей точке	Impp = 8,21 А
Напряжение в рабочей точке	Vmpp = 21,71 В
Мощность в рабочей точке	Pmpp = 178,2 Вт

Упомянутые модули специально разрабатывались для использования на судах, в их конструкции учтена возможность длительного перегрева до температур более чем 70 градусов Цельсия. Вместо 40 старых центральных модулей мы сможем установить 48 новых модулей и получим при этом дополнительные 640 Вт. Также предлагаем заменить старые боковые модули на новые и дополнительно добавить по 3 с каждой стороны, таким образом удастся увеличить выработку на 510 Вт. Нам удастся поднять мощность с 10590 до 11740 Вт, увеличение составит 1150 Вт. Исходное и новое расположение солнечных модулей на крыше катамарана приведено на рисунке 5.

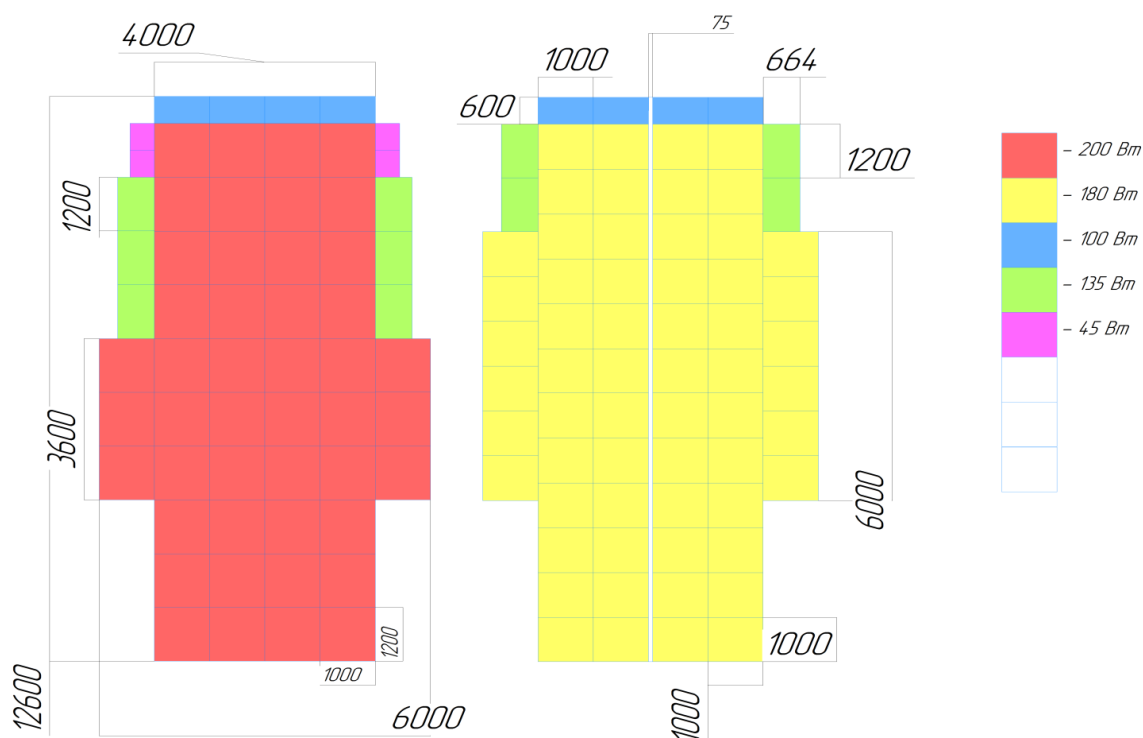


Рисунок 5 – Исходное (слева) и новое (справа) расположение солнечных модулей на крыше катамарана

Таким образом, благодаря подбору новых солнечных модулей и их новой компоновке мы получили возможность увеличения мощности солнечной станции до 11,7 кВт.

**Выбор контроллера.** Современные реалии диктуют нам выбор контроллера. Поскольку в площади расположения солнечных модулей мы ограничены площадью крыши катамарана и понятиями безопасности судоходства, то у нас не остаётся выбора, как использовать именно MPPT-контроллер, обеспечивающий максимум мощности, отдаваемой нагрузке. Нами был выбран контроллер VENUS-M4860N китайской компании Helios (характеристики представлены в таблице 2)

Таблица 2 – Характеристики контроллера VENUS-M4860N

Характеристика	Значение
Модель №.	VENUS-M4860N
Напряжение аккумуляторной системы	12V/24V/36V/48V Auto (FLD/GEL/SLD) Manual (Li/User)
Потери холостого хода	12ma (12V), 10ma (24V), 8ma (36V), 6ma (48V)
Максимальное входное напряжение солнечной батареи	<150V
Номинальный ток заряда солнечной батареи	100A
Максимальная входная мощность солнечной энергии	1800W/12V 2600W/24V 3200W/36V 6400W/48V
Максимальный выходной ток нагрузки	25A
Рабочая Температура	-35°C ~ +45°C
Защита IP	IP32
Вес	5.0 kg
Размер контроллера	280*210*90 mm

Особенностью контроллера VENUS-M4860N является то, что производитель изначально закладывает завышенные номинальные значения электронных компонентов, что позволяет снизить нагрев самого контроллера. Также эти контроллеры можно назвать «умными», ибо к ним можно подключиться по блютузу. Кроме того, они сохраняют информацию о выработке, входном и выходном напряжении и многие другие показания, что будет полезно при проведении научных исследований. В перспективе нас интересует исследование влияния температуры модулей на выработку электроэнергии. Поскольку мы планируем в дальнейшем проводить сравнение выработки одной половины модулей, работающих с водяным охлаждением, с выработкой другой половины модулей, работающих без охлаждения, то мы устанавливаем отдельные контроллеры на каждую половину крыши.

**Выбор аккумуляторов.** В общедоступных и даже специализированных источниках нет однозначных рекомендаций по выбору аккумуляторов для судов. Многие суда на альтернативных источниках энергии используют литий-железо-фосфатные аккумуляторы, но также есть примеры применения литий-ионных, литий-полимерных и никель-металлогидридных аккумуляторов. В результате безуспешного поиска готового ответа на вопрос, нами было решено провести оценку применимости к нашему объекту наиболее распространённых видов аккумуляторов. Характеристики разных видов аккумуляторов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики аккумуляторов

Характеристики	NiCd	NiMH	Lead Acid	Li-ion	Li-ion polymer	LiFePo4
Плотность энергии (Вт*час/кг)	45–80	60–120	25–40	110...270	100–130	90–160
Внутреннее сопротивление, мОм	100–200 6V	200–300 6V	< 100 12V	150–250 7,2V	200–300 7,2V	150–250 7,2V
Время быстрого заряда	1 час	2–4 часа	8–16 часов	2–4 часа	2–4 часа	2–4 часа
Рабочая температура	–40–60 °C	–20–60 °C	–40–40 °C	–20–60 °C	–20–60 °C	–30–55 °C
Время жизни (до 80 % от номинальной емкости)	1500	300–500	200–300	500–1000	300–500	500–1000
Чувствительность к перезаряду	средняя	высокая	низкая	очень высокая	высокая	высокая
Примерная стоимость	50\$	60\$	25\$	100\$	100\$	100\$

Все приведенные виды аккумуляторов имеют свои достоинства и нашли свою нишу использования. В случае нашего объекта, являющегося водным прогулочным-транспортным средством, применение никель-кадмиевых (NiCd) аккумуляторов нежелательно ввиду того, что они содержат токсичные материалы. Никель-металлогидридные (NiMH) аккумуляторы имеют малое время жизни. Герметичные свинцово-кислотные (SLA) имеют слишком большой вес.

В исходном варианте на катамаране «Эковолна» были установлены литий-железо-фосфатные аккумуляторы Лиотех LT-LYP(LFP)380 в количестве 64 штук. Поскольку масса данных батарей слишком велика, было принято решение заменить их на более энергоёмкие литий-ионные аккумуляторы, имеющие меньший вес.

Проанализировав рынок литий-ионных аккумуляторов, мы пришли к решению использовать аккумуляторные батареи с автомобиля «Тесла» (основные характеристики представлены в таблице 4).

Таким образом, подобраны современные и надёжные компоненты для энергосистемы судна:

- солнечные панели НТЦ ТПТ (68 шт.);
- контроллеры Helios Venus (4 шт.);
- аккумуляторы Tesla 4680 (22 шт.).

Разработанная структурная схема солнечной электростанции катамарана представлена на рисунке 6.

Перечень оборудования разработанной СЭС:

1. Солнечные панели:

- экспериментальные модули от НТЦ ТПТ 180 Вт – 60 шт.;

Солнечные панели Hevel Solar:

- мощностью 135 Вт – 4 шт.;
- мощностью 100 Вт – 4 шт.

2. МРРТ-контроллер VENUS-M4860N – 4 шт.

3. Инвертор МАП «DOMINATOR» 48/220 9 кВт – 2 шт.

4. Аккумуляторная батарея с автомобиля «Тесла» – 22 шт.
5. BMS-Микроарт – 16 шт.
6. Аккумуляторная батарея VARTA Silver Dynamic 110Ah 920A – 1 шт.
7. Зарядное устройство «Вымпел 325» – 1 шт.
8. MPPT-контроллер EPSolar 2215R Tracer – 1 шт.
9. Монитор батарейный Victron Energy BMV-700 – 1 шт.

Таблица 4 – Характеристики аккумуляторной батареи «Тесла»

Характеристики при 25 °С (*)	
Номинальная емкость, А·ч	287
Номинальное напряжение, В	24,7
Удельная энергия по массе, Вт·ч/кг	228
Рекомендованные режимы эксплуатации	
Заряд при температуре, °С	от 0 до +30
Разряд при температуре, °С	от –30 до +50
Предельные рабочие режимы	
Максимальное напряжение заряда, В	30,1
Минимальное напряжение на аккумуляторе, В	19,3
Заряд при температуре, °С	от –10 до +30
Разряд при температуре, °С	от –40 до +55
Хранение при температуре, °С	от 0 до +30
Ресурс, заряд/разряд при глубине разрядки до 80 %, циклов	6000

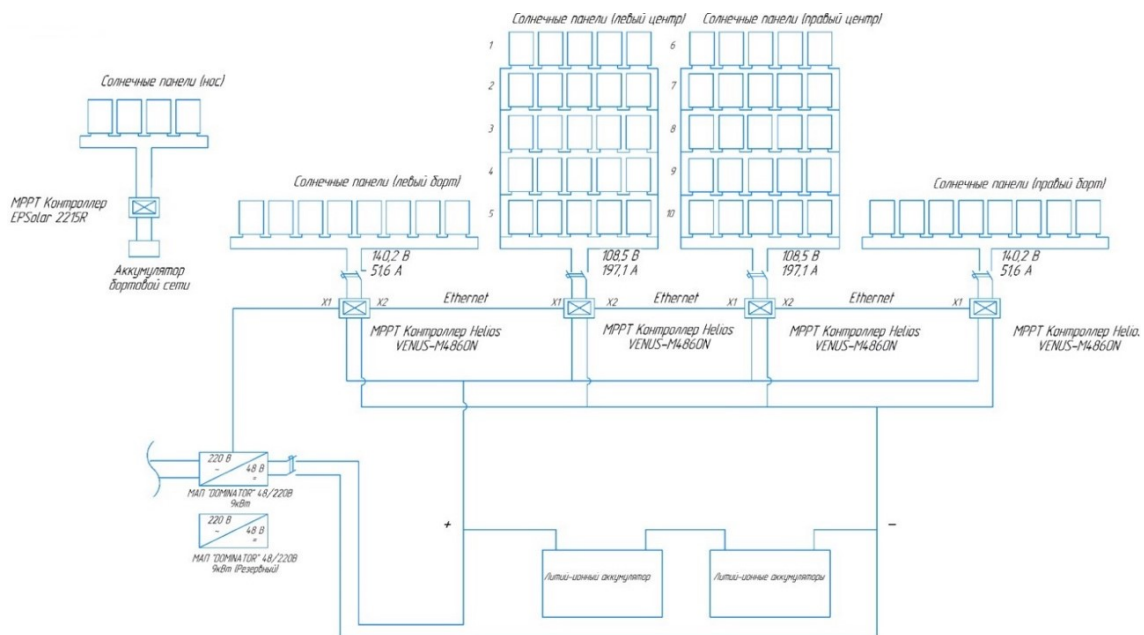


Рисунок 6 – Структурная схема солнечной электростанции катамарана



**Разработка системы охлаждения солнечных модулей.** С целью повышения эффективности работы фотоэлектрической станции судна типа катамаран нами была поставлена задача разработки системы охлаждения солнечных модулей. Известны пассивные и активные методы охлаждения фотоэлектрических модулей. Пассивное охлаждение – это технология, при которой снижение температуры фотоэлектрического модуля осуществляется без дополнительного энергопотребления. При активном охлаждении отвод тепла осуществляется с использованием устройств для нагнетания воздуха или подачи воды на панели, что требует некоторых энергозатрат.

Большой вклад в изучение вопросов снижения температуры поверхности солнечных модулей с целью повышения их энергоэффективности внесен сотрудниками Южно-Уральского государственного университета [13]. Эта научная школа отдает предпочтение пассивным технологиям охлаждения. Существенная зависимость энерговыработки фотоэлектрических модулей от температуры поверхности модуля представлена также в работе [14].

Принято считать, что воздушное охлаждение менее эффективно для извлечения тепловой энергии из фотоэлектрического модуля в жарких регионах. Водяное охлаждение при высоких температурах работает лучше и позволяет более эффективно использовать рекуперацию отработанного тепла. В работе [15] проводится сравнение эффективности непрерывного и периодического водяного охлаждения. В лабораторных условиях [16] проведено экспериментальное сравнение энергоэффективности двух модулей, один из которых подвергался непрерывному водяному охлаждению. Повышение выработки электроэнергии при подаче потока охлаждающей воды через переднюю часть модуля показано в работе [17]. Охлаждение фотоэлектрического модуля путем полного погружения в воду [18], конечно же, эффективна в плане выработки, но сильно усложняет условия эксплуатации и, по-видимому, в дальнейшем приведет к сокращению срока службы модуля. В лабораторных условиях исследование эффективности водяного охлаждения проведено в работе [19]. Анализ известных работ показал, что нет одного-единственного оптимального решения для охлаждения солнечных модулей. Выбор решения зависит от ряда факторов: от расположения системы, используемой фотоэлектрической технологии, структуры ячеек и погодных условий [20, 21]. Поэтому выбор той или иной системы охлаждения солнечных модулей должен приниматься с учетом специфики конкретных объектов.

Изучив опыт различных лабораторий и научно-исследовательских центров, мы пришли к выводу, что наиболее целесообразной и оптимальной в случае солнечной электростанции водного судна типа катамаран будет система активного охлаждения солнечных панелей с использованием забортной воды. Однократная подача и дальнейшее испарение воды может намного больше отвести тепла, чем воздушное или же иные пассивные виды охлаждения.

Нами разработана следующая система охлаждения солнечных панелей на крыше катамарана. На рисунке 7 показан принцип действия системы, а на рисунке 8 – структурная схема.

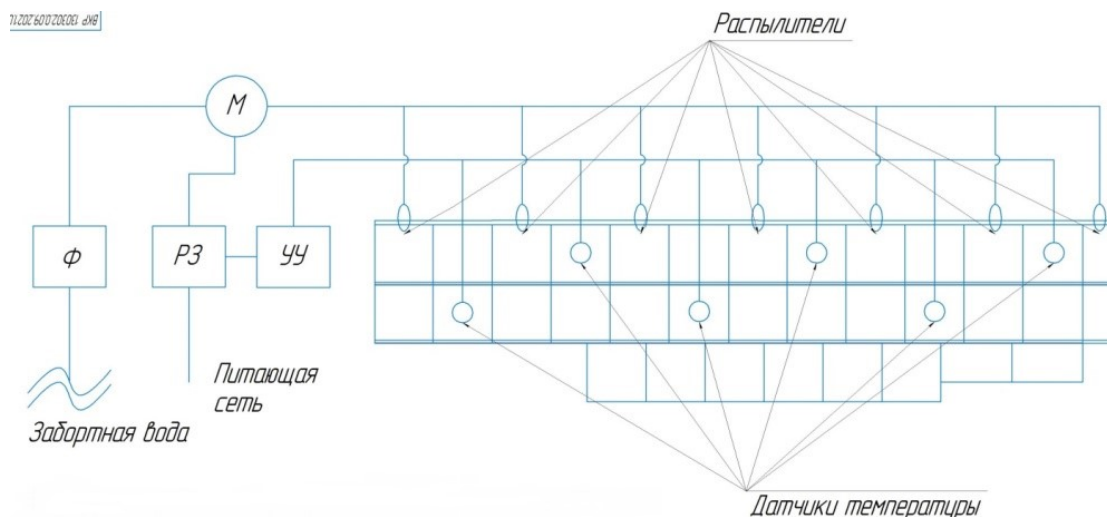


Рисунок 7 – Графическое представление принципа действия системы охлаждения солнечных панелей

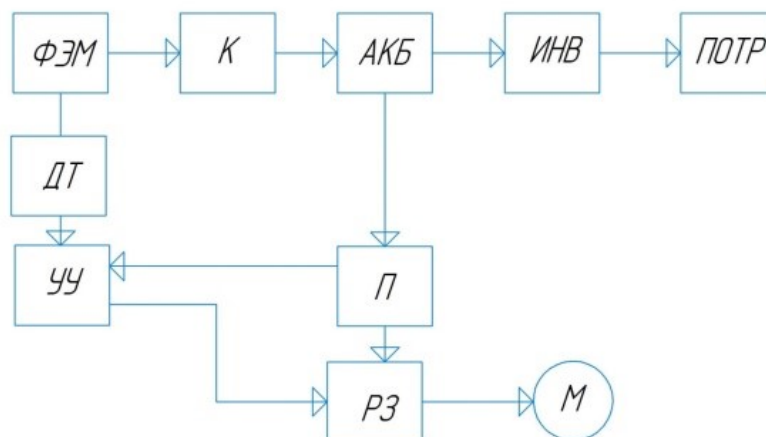


Рисунок 8 – Структурная схема системы охлаждения: ФЭМ – фотоэлектрические модули; к – контроллер; акб – аккумуляторные батареи; инв – инвертор; потр – потребитель; дт – датчики температуры; уу – управляющее устройство; п – преобразователь; рз – реле замыкающее; м – мотор (электронасос); ф – фильтр (заборной воды)

Электрическая энергия, выработанная фотоэлектрическими модулями (ФЭМ), поступает на контроллер (К) и сохраняется в аккумуляторах (АКБ). Далее с аккумулятора электричество поступает на преобразователь (П), который передаёт его на управляющее устройство (УУ) и реле замыкания (РЗ). В свою очередь, управляющее устройство получает сигналы с датчиков температуры, которые крепятся к тыльной стороне солнечных панелей. При достижении температуры выше  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  управляющее устройство замыкает реле и питание приходит на мотор электронасоса (М). Закачанная заборная вода проходит фильтрацию и распыляется с помощью распылителя.

#### Расчет мощности и подбор электронасоса

Площадь всех солнечных модулей на крыше катамарана  $65,6\text{ м}^2$ .

Толщина водяной плёнки не более  $1\text{ мм} = 0,001\text{ м}$ .

Объём воды, покрывающей крышу,  $65,6 \cdot 0,001 = 0,0656\text{ м}^3$ .

Полный объём воды  $0,0656\text{ м}^3$  на крыше. Также раз в день необходимо полностью прокачать систему, включая трубу, объём которой  $0,3\text{ м}^3$ .

Опытным путём на основе эксперимента на тестовой фотоэлектрической станции было определено, что достаточные интервалы включения насоса системы охлаждения составляют каждые 5 минут из 25 минут. То есть полный цикл срабатывания системы составляет 25 минут, из которых в течение 5 минут идёт распыление воды.

Из графика, представленного на рисунке 4, можно сделать заключение, что температура больше  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  держится около 10 часов в день, следовательно, это тот период, в который и надо охлаждать модули. Исходя из цикла работа – отдых, сможем подсчитать, сколько часов в течение этого дня проработает насос.

$$10\text{ ч} \cdot 60/25 = 24\text{ цикла.}$$

Тогда время работы насоса в течение дня составит 2 часа ( $24 \cdot 5 = 120$  минут).

Предложено использование струйного центробежного самовсасывающего насоса Calpeda NGX 2/80, технические характеристики которого приведены в таблице 5. Насос подходит для чистой воды и жидкостей небольшой загрязнённости.

Таблица 5 – Характеристики насоса Calpeda NGX 2/80

Производительность мин., $\text{м}^3/\text{ч}$	0,3
Производительность макс., $\text{м}^3/\text{ч}$	3,2
Напор мин., м	18
Напор макс., м	43
Мощность, кВт	0,55
Напряжение, В	380

Потребление электроэнергии насосом за весь жаркий июньский день составит:

$$550\text{ Вт} \cdot 2\text{ ч} = 1100\text{ Вт}\cdot\text{ч} = 1,1\text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

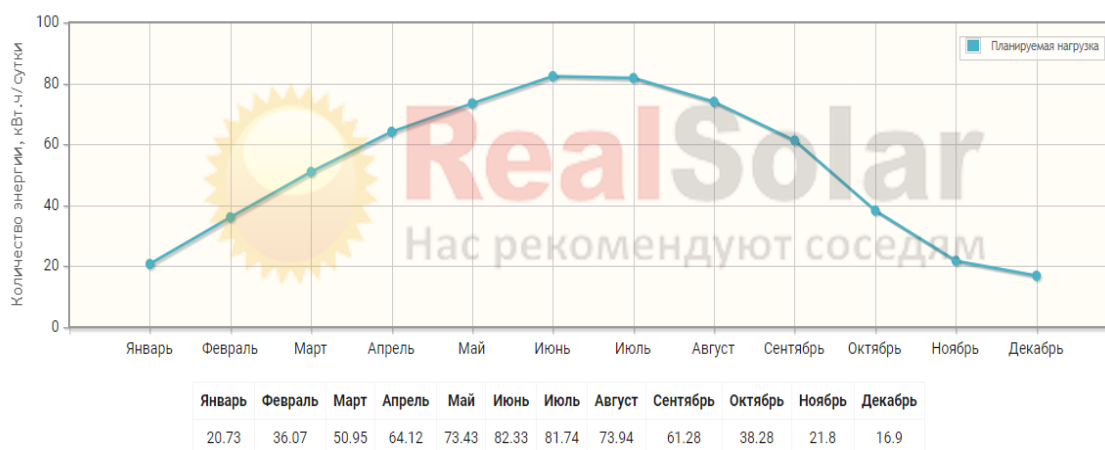
Как уже отмечалось выше, КПД фотоэлектрического модуля зависит от его температуры. Согласно нашим расчетам, выработка электроэнергии от солнечной станции, состоящей из 68 солнечных модулей, при инсоляции  $I = 1000\text{ Вт}/\text{м}^2$ , температуре  $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , за 5 часов будет равна  $E = 58,5\text{ кВт}\cdot\text{ч}$ . При температуре  $t = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$  выработка за 5 часов снизится на 19,5 % и составит  $47,095\text{ кВт}\cdot\text{ч}$ . Снижение выработки

составит 11,4 кВт·ч. Использование системы охлаждения позволит избежать этого снижения. При этом электропотребление насоса системы охлаждения (1,1 кВт·ч) на порядок ниже. Таким образом, примененные системы охлаждения энергетически эффективно.

Внедрение предложенной системы активного охлаждения позволит избежать снижения выработки в условиях высоких температур окружающей среды, поможет избежать перегрева, снизит деградацию фотоэлектрических ячеек и, что особенно важно, увеличит срок службы солнечных модулей.

Очевидными плюсами предложенной системы охлаждения являются её малый габарит и, как следствие, малый вес. Поскольку в качестве охлаждающей жидкости используется забортная вода, то данной системе не требуется какой-либо резервуар (сосуд) для хранения рабочей жидкости, что, в свою очередь, положительно сказывается на характеристиках и ходкости судна.

**Расчет выработки электроэнергии.** Для расчёта выработки электроэнергии солнечной электростанции нами была применена специализированная программа «RealSolar». Эта программа предоставляет и использует для расчетов данные солнечной инсоляции в любой точке земного шара. Точность местоположения составляет 0,1 градус долготы и широты. Также есть возможность выбирать модель и количество солнечных батарей. Есть возможность задать произвольный (необходимый) угол наклона солнечных панелей. Расчетные значения выработки энергии солнечной электростанции, полученные с помощью этой программы, представлены на рисунке 9. Среднегодовое значение выработки электроэнергии составляет 56,10 кВт·часов в сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год – 20466,13 кВт·ч.



Среднегодовая выработка электроэнергии: 56.10 кВт·ч/сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год: 20466.13 кВт·ч.

Рисунок 9 – Выработка электроэнергии солнечной электростанцией

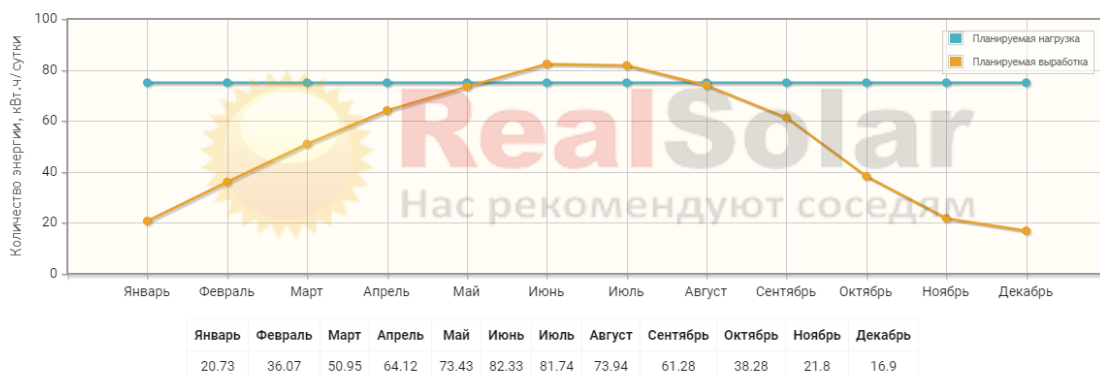
На рисунке 10 показан помесячный график выработки электроэнергии солнечной электростанцией и график планируемой нагрузки при непрерывной работе электропривода в номинальном режиме в течение 5 часов в сутки в климатических условиях Астраханской области.

Угол наклона: 5

Другой прибор 1 Шт × 15000 Вт × 5 часов в сутки 75.00 кВт·ч/сутки

Средняя нагрузка: 75.00 кВт·ч/сутки

4 Выработка солнечной электростанции по месяцам  
Оцените по графикам - достаточно ли вам энергии которую выработают солнечные батареи



Среднегодовая выработка электроэнергии: 56.10 кВт·ч/сутки. Суммарная выработка электроэнергии за год: 20466.13 кВт·ч.

Рисунок 10 – Графики выработки и нагрузки (время непрерывной работы электропривода при номинальной мощности 5 часов в сутки)

Таким образом, выработка электроэнергии за счет солнечных модулей полностью перекрывает затраты энергии на электропривод катамарана в период с мая по август, что вполне приемлемо для прогулочного судна и для целей проведения натуральных научных исследований.

**Экология.** Благодаря предложенной системе охлаждения эффективность работы фотоэлектрических модулей и срок их службы повысятся, что сделает применение солнечных электростанций для электроснабжения судов более привлекательным. А это, в свою очередь, будет способствовать улучшению экологичности водного транспорта.

В настоящее время, когда электроэнергия на судах вырабатывается преимущественно с помощью дизель-генераторов, имеют место заметные токсичные выбросы, ухудшающие экологическую обстановку, что особенно заметно при работе водного транспорта вблизи городов и населенных пунктов.

В нашем случае научно-исследовательское и прогулочное судно типа катамаран может доставлять заказчиков в особо охраняемые природные зоны Астраханской области, в связи с чем минимизация выбросов от дизель-генератора является весьма актуальной.

Как известно, применение солнечных электростанций не приводит к загрязнению воздушной среды. Постепенный переход к возобновляемым источникам позволит улучшить нынешнее экологическое состояние в регионе.

На водном транспорте частично решить экологические проблемы можно переходом от традиционной энергетики к возобновляемым источникам энергии, и в первую очередь к солнечной энергетике.

С помощью программы Polysun удалось вычислить, что предлагаемый проект солнечной электростанции катамарана позволит сократить выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу на 7171,5 кг в год.

**Заключение.** Показана актуальность технологического развития альтернативных источников энергии на водном транспорте. Изучен опыт экспедиции «Эковолна» в аспекте энергообеспечения катамарана на основе солнечных модулей. В первую навигацию, проходившую с мая по август 2018 г. в климатических условиях северной и центральной России, эффективность работы солнечной электростанции сомнений не вызвала. Вторая навигация состоялась в июле 2019 г. и проходила по маршруту Астрахань – Ростов – Астрахань в условиях высоких температур окружающей среды. Вторая навигация сопровождалась существенным снижением выработки солнечной электростанции.

В результате проведенного обследования было выявлено, что основной причиной выхода из строя солнечных модулей катамарана «Эковолна» является перегрев фотоэлектрических ячеек и, как следствие, быстрая деградация материала.

Согласно экспериментальным данным, полученным нами с применением тестовой фотоэлектрической системы, в полдень температура солнечных модулей в условиях Астрахани на солнце достигает высоких температур, более 70 градусов Цельсия.

Разработана система водяного охлаждения солнечных модулей, не требующая каких-либо сосудов для хранения рабочей жидкости, так как в качестве хладагента предложено использование заборной воды. Соответственно, снижаются габариты и вес системы охлаждения, что немаловажно в условиях водного транспорта. Внедрение предложенной системы активного охлаждения позволит избежать снижения выработки в условиях высоких температур окружающей среды (порядка 20 %), поможет избежать перегрева, снизит деградацию фотоэлектрических ячеек, увеличит срок службы солнечных модулей.

Подобраны современные и надёжные компоненты: солнечные панели НТЦ ТПТ (68 шт.), контроллеры Helios Venus (4 шт.), аккумуляторы Tesla 4680 (22 шт.). В результате удалось повысить мощность солнечной электростанции с 10590 до 11740 Вт.

Проведен расчёт выработки электроэнергии солнечной электростанции с применением специализированной программы «RealSolar». Суммарная годовая выработка электроэнергии разработанной солнечной электростанции в условиях Астраханской области составит 20466, 13 кВт·ч.

Показано, что выработка электроэнергии за счет солнечных модулей полностью перекрывает затраты энергии на электропривод катамарана в период с мая по август, что вполне приемлемо для прогулочного судна и для проведения натуральных научных исследований.

С помощью программы Polysun удалось вычислить, что предлагаемый проект солнечной электростанции катамарана позволит сократить выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу на 7171,5 кг в год. Постепенный переход к возобновляемым источникам на водном транспорте позволит улучшить экологическое состояние в регионе.

#### Библиографический список

1. Бутузов, В. А. Российская возобновляемая энергетика / В. А. Бутузов, П. П. Безруких, В. В. Елистратов // Энергетик. – 2021. – № 9. – С. 25–32.
2. Курьлев, С. А. Основы применения солнечных электростанций в составе судовых энергетических установок / С. А. Курьлев, Р. А. Зайнутдинов // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. – 2017. – № 1. – С. 595–600.
3. Курьлев, А. С. Технологическое развитие энергоэффективных судов с альтернативными источниками энергии / А. С. Курьлев, Р. А. Зайнутдинов, С. А. Курьлев // Промышленная энергетика. – 2019. – № 7. – С. 54–60.
4. Yogesh S., Bijjargi. Cooling techniques for photovoltaic module for improving its conversion efficiency: A review / Yogesh S. Bijjargi, S. S. Kale and K. A. Shaikh // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – July – August 2016. – Vol. 7, issue 4. – P. 22–28.

5. Кирпичникова, И. М. Построение энергетических характеристик солнечных модулей с учетом условий окружающей среды / И. М. Кирпичникова, И. Б. Махсумов // Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 34. – С. 56–74.
6. Hikmet, Esen. Cooled and uncooled photovoltaic panels modeling by using genetic expression programming / Hikmet Esen, Abdullah Kapıcıoğlu, Onur Ozsolak // International Journal of Innovative Engineering Applications. – 2017. – Vol. 1, no. 1. – P. 13–22.
7. Кирпичникова, И. М. Особенности эксплуатации солнечных энергоустановок в различных климатических условиях / И. М. Кирпичникова // Энергоэффективность. Ценология. Экология и энергобезопасность : материалы научной конференции / под науч. ред. Л. Х. Зайнутдиновой, М. Г. Тягунова. – 2020. – С. 46–55.
8. Шохзода, Б. Т. Тепловые характеристики гибридной солнечной установки / Б. Т. Шохзода, 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. 295–299.
9. Шохзода, Б. Т. Оценка влияния рабочей температуры поверхности солнечного модуля с голографическим концентратором на эффективность его работы / Б. Т. Шохзода, М. Г. Тягунов // Вестник МЭИ. – 2019. – № 4. – С. 50–59.
10. Теруков, Е. И. Экспериментальное исследование влияния метеорологических факторов на выработку электроэнергии солнечными модулями в климатических условиях Астраханской области / Е. И. Теруков, Д. А. Андроников, Д. А. Малевский, Р. А. Зайнутдинов, А. Ю. Ключарев, С. Н. Братышев, В. Г. Ильичев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2019. – № 2 (46). – С. 180–193.
11. Rustem, Zaynutdinov. Performance Evaluation of On-Grid Solar Power Stations in a Office Building in the Climatic Conditions of Astrakhan Region / Rustem Zaynutdinov, Larisa Zaynutdinova, Vladimir Ilyichev // Proceedings ICOECS 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. – 2019. – P. 535–538. – ISBN: 978-1-7281-1728-7.
12. Larisa, Zaynutdinova. Experimental study into degradation of a single-crystal silicon photovoltaic module in the climatic conditions of Astrakhan region / Larisa Zaynutdinova, Rustem Zaynutdinov, Vladimir Ilyichev, Ilya Shurshev // Proceedings ICOECS 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. – 2020. – P. 111–114. – ISBN: 978-1-7281-9115-7.
13. Кирпичникова, И. М. Повышение энергетической эффективности работы солнечных модулей за счет снижения температуры поверхности / И. М. Кирпичникова, И. Махсумов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 2. – С. 489–499.
14. Adnan, Ahmed Siddique. Effects of Surface Temperature Variations on Output Power of Three Commercial Photovoltaic Modules / Adnan Ahmed Siddique, Akram Mohiuddin Syed Mohammed Nahri // International Journal of Engineering Research. – 2016. – Vol. 5, № 11.
15. Ali M., Rasham. Experimental and Numerical Investigation of Photo-Voltaic Module Performance via Continuous and Intermittent Water Cooling Techniques / Ali M. Rasham, Hussein K. Jobair, Akram A. Abood Alkazzar // International Journal of Mechanical Engineering & Technology (IJMET). – 2015. – № 6 (7). – P. 87–98.
16. Patil, M. Experimental Investigation of Enhancing the Energy Conversion Efficiency of Solar PV Cell by Water Cooling Mechanism / M. Patil, A. Sidramappa, R. Angadi // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 376. – P. 14.
17. Krauter, S. Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels / S. Krauter // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2004. – Vol. 82, № 1–2. – P. 131–137.
18. Mehrotra, S. Performance of a solar panel with water immersion cooling technique / S. Mehrotra, P. Rawat, M. Debbarma, K. Sudhakar, // International Journal of Science, Environment and Technology. – 2014. – Vol. 3, № 3. – P. 1161–1172. – ISSN 2278-3687 (O).
19. Irwan Y. Indoor Test Performance of PV Panel through Water Cooling Method / Y. Irwan et al. // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 79. – P. 604–611.
20. Teo, H. G. An active cooling system for photovoltaic modules / H. G. Teo, P. S. Lee et al. // Applied Energy. – 2012. – Vol. 90. – P. 309–315.
21. Y. S. Bijjargi, Kale S.S, Shaikh K.A, Cooling techniques for photovoltaic module for improving its conversion efficiency: a review. / Y. S. Bijjargi, S. S. Kale, K. A. Shaikh. – July–August 2016. – Vol. 7, issue 4. – P. 22–28.

#### References

1. Butuzov, V. A., Bezrukhih, P. P., Elistratov, V. V. Rossiyskaya vozobnovlyаемая энергетика [Russian renewable energy]. *Energetik* [Power engineering specialist], 2021, no. 9, pp. 25–32.
2. Kurylev, S. A. Zaynutdinov, R. A. Osnovy primeneniya solnechnykh elektrostantsiy v sostave sudovykh energeticheskikh ustanovok [Fundamentals of using solar power plants as part of marine power plants]. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii* [Innovative, information and communication technologies], 2017, no. 1, pp. 595–600.
3. Kurylev, S. A., Zaynutdinov, R. A., Kurylev, S. A. Tekhnologicheskoe razvitie energoeffektivnykh sudov s alternativnymi istochnikami energii [Technological development of energy-efficient vessels with alternative energy sources]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energetics], 2019, no. 7, pp. 54–60.
4. Yogesh S., Bijjargi, Kale, S. S. and Shaikh, K. A. Cooling techniques for photovoltaic module for improving its conversion efficiency: A review. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 2016, vol. 7, issue 4, pp. 22–28.
5. Kirpichnikova, I. M. Postroenie energeticheskikh kharakteristik solnechnykh moduley s uchetom usloviy okruzhayushchey sredy [Construction of energy characteristics of solar modules taking into account environmental conditions]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of Perm State Technical University. Electrical engineering, information technology and control systems], 2020, no. 34, pp. 56–74.
6. Esen, H., Kapıcıoğlu, A., Ozsolak, O. Cooled and uncooled photovoltaic panels modeling by using genetic expression programming. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 2017, no. 1, pp. 13–22.
7. Kirpichnikova, I. M. Osobennosti ekspluatatsii solnechnykh energoustanovok v razlichnykh klimaticheskikh usloviyakh [Features of solar power plants operation in various climatic conditions]. *Energoeffektivnost. Tsenologiya. Ekologiya*

*i energobezопасnost : materialy nauchnoy konferentsii* [Energy efficiency. Cenology. Ecology and Energy Security : materials of the scientific conference], 2020, pp. 46–55.

8. Shohzoda, B. T., Tyagunov, M. G. Teplovye kharakteristiki gibridnoy solnechnoy ustanovki [Thermal characteristics of a hybrid solar installation]. *Alternativnaya energetika v regionakh Rossii : materialy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «AER-2018»* [Alternative energy in the regions of Russia : materials of the youth scientific conference "AER-2018"], 2018, pp. 295–299.

9. Shohzoda, B. T., Tyagunov, M. G. Otsenka vliyaniya rabochey temperatury poverkhnosti solnechnogo modulya s golograficheskimi kontsentratormi na effektivnost ego raboty [Evaluating the effect of the operating temperature of the solar module surface with a holographic concentrator on its efficiency]. *Vestnik MEI* [Bulletin of MEI], 2019, no. 4, pp. 50–59.

10. Terukov, E. I., Andronikov, D. A., Malevskiy, D. A., Zaynutdinov, R. A., Klyucharev, A. Yu., Bratyshev, S. N., Ilichev, V. G. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya meteorologicheskikh faktorov na vyrabotku elektroenergii solnechnymi moduliyami v klimaticheskikh usloviyakh Astrakhanskoj oblasti [Experimental study of the influence of meteorological factors on the generation of electricity by solar modules in the climatic conditions of the Astrakhan region]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2019, no. 2 (46), pp. 180–193.

11. Zaynutdinov, R., Zaynutdinova, L., Ilyichev, V. Performance Evaluation of On-Grid Solar Power Stations in an Office Building in the Climatic Conditions of Astrakhan Region. *Proceedings ICOECS 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems*, 2019, pp. 535–538.

12. Zaynutdinova, L., Zaynutdinov, R., Ilyichev, V., Shurshev, I. Experimental study into degradation of a single-crystal silicon photovoltaic module in the climatic conditions of Astrakhan region. *Proceedings ICOECS 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems*, 2020, pp. 111–114.

13. Kirpichnikova, I. M. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti raboty solnechnykh moduley za schet snizheniya temperatury poverkhnosti [Increasing the energy efficiency of solar modules by reducing the surface temperature]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical sciences], 2020, vol. 2, pp. 489–499.

14. Siddique, A. A., Nahri, A. M. S. M. Effects of Surface Temperature Variations on Output Power of Three Commercial Photovoltaic Modules. *International Journal of Engineering Research*, 2016, vol. 5, no. 11.

15. Rasham, A. M., Jobair, H. K., Alkhazzar, A. A. A. Experimental and Numerical Investigation of Photo-Voltaic Module Performance via Continuous and Intermittent Water Cooling Techniques. *International Journal of Mechanical Engineering & Technology (IJMET)*, 2015, no. 6 (7), pp. 87–98.

16. Patil, M., Sidramappa, A., Angadi, R. Experimental Investigation of Enhancing the Energy Conversion Efficiency of Solar PV Cell by Water Cooling Mechanism. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 376, p. 14.

17. Krauter, S. Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2004, vol. 82, no. 1–2, pp. 131–137.

18. Mehrotra, S., Rawat, P., Debbarma, M., Sudhakar, K. Performance of a solar panel with water immersion cooling technique. *International Journal of Science, Environment*, 2014, vol. 3, no. 3, pp. 1161–1172.

19. Irwan, Y. et al. Indoor Test Performance of PV Panel through Water Cooling Method. *Energy Procedia*, 2015, vol. 79, pp. 604–611.

20. Teo, H. G., Lee, P. S. et al. An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*, 2012, vol. 90, pp. 309–315.

21. Bijjargi, Y. S., Kale, S. S., Shaikh, K. A. Cooling techniques for photovoltaic module for improving its conversion efficiency: a review, 2016, vol. 7, issue 4, pp. 22–28.