

Вестник Курганской ГСХА. 2024. № 3 (51). С. 78–85.  
Vestnik Kurganskoj GSNA. 2024; 3(51): 78–85.

Научная статья  
УДК 502.174.3

EDN: ZEKCDU

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ВЫРАБОТКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МОДУЛЯМИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ БИО-ВЕГЕТАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

Максим Юрьевич Попов<sup>1✉</sup>, Наталья Николаевна Грачева<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Донской государственный аграрный университет, Персиановский, Россия

<sup>1</sup> 19maxim95@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5551-9422>

<sup>2</sup> 79286051374@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3699-7255>

**Аннотация.** Энергоснабжение культивационных сооружений является важным фактором при его проектировании. Основным источником энергии в био-вегетарии является инсоляция, которая выступает в роли энергоносителя. Так, для генерации электрической энергии на био-вегетационном комплексе смонтированы фотоэлектрические модули (ФЭМ), использование которых позволит снизить затраты при круглогодичной эксплуатации био-вегетария. В статье приведена схема автономной солнечной электростанции, принцип ее работы, выделены факторы, влияющие на количество генерируемой электроэнергии. Составлена матрица планирования исследования с закодированными факторами и описан ход экспериментального исследования, проводимого на фотоэлектрических модулях Solar Panel Model HVL-320/HJT, установленных под различными углами наклона относительно горизонта. Определение оптимального угла наклона позволяет генерировать больше электрической энергии. Установлено, что для наилучшей генерации фотоэлектрический модуль должен располагаться перпендикулярно солнечному лучу. В результате проведенных исследований получены зависимости напряжения и тока, температурные характеристики поверхности панелей. Определен минимально необходимый уровень инсоляции. Проведены статистический анализ и обработка экспериментальных данных выработки электрической энергии фотоэлектрическими модулями при различных углах наклона относительно горизонта и статической фиксации на поверхности био-вегетария. Панели установлены на несущей конструкции био-вегетария, ориентированы на юг. Составлено уравнение регрессии и поверхности отклика. Полученные зависимости свидетельствуют о суммарной выработке электрической энергии (за 9 часов 41 кВт·ч) при выбранном рабочем напряжении 48 В, установлено 14 блоков аккумуляторной батареи суммарной ёмкостью 800 А·ч или 34,65 кВт·ч. Суммарная среднегодовая выработка солнечной электростанции 38 кВт·ч/сутки. Установлено, что наиболее эффективным углом наклона для статической фиксации фотоэлектрического модуля является 60–70°.

**Ключевые слова:** фотоэлектрический модуль, автономное функционирование, био-вегетационный комплекс, угол наклона модуля, система энергоснабжения, электрическая энергия.

**Для цитирования:** Попов М.Ю., Грачева Н.Н. Результаты экспериментов по выработке электрической энергии фотоэлектрическими модулями для автономного энергоснабжения био-вегетационного комплекса // Вестник Курганской ГСХА. 2024. № 3(51). С. 78–85. EDN: ZEKCDU.

### Scientific article

## EXPERIMENT RESULTS ON ELECTRIC ENERGY GENERATION BY PHOTOVOLTAIC MODULES FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLY OF THE BIO-VEGETATION COMPLEX

Maxim Yu. Popov<sup>1✉</sup>, Natalya N. Gracheva<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Don state agrarian university, Persianovsky, Russia

<sup>1</sup> 19maxim95@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5551-9422>

<sup>2</sup> 79286051374@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3699-7255>

**Abstract.** The energy supply of cultivation facilities is an important factor for its design engineering. The main source of energy in the bio-vegetarium is solar insolation, which acts as an energy source material. Thus, to generate electric energy, photovoltaic modules (PVM) have been installed at the bio-vegetation complex, the use of which will reduce costs during year-round operation of the bio-vegetarium. The article presents the diagram of an autonomous solar power plant, it defines the principle of its operation; the factors affecting the amount of electricity generated. A research planning matrix with encoded factors has been developed and the course of an experimental study is described conducted on Solar Panel Model HVL-320/HJT photovoltaic modules installed at various angles to the horizon. Determination of the optimal tilt angle allows for generating more electrical energy. It is established that for better generation, the photovoltaic module must be positioned perpendicular to the sun's ray. As a result of the conducted research, the dependences of voltage and current, panel surface temperature characteristics were obtained. A minimum required level of insolation has been determined. Statistical analysis and processing of experimental data on electrical energy generation by photovoltaic modules at various angles to the horizon and static fixation on the surface of the bio-vegetarium have been carried out. The panels are mounted on the load-bearing structure of the bio-vegetarium, they are oriented to the south. The equations of regression

and response surface have been derived. The obtained dependences indicate the total generation of electric energy (41 kWh in 9 hours), at the selected operating voltage of 48 V, 14 battery units are installed with a total capacity of 800 Ah or 34.65 kWh. The total average annual output of a solar power plant is 38 kWh/day. It is established that the most effective angle of inclination for static fixation of a photovoltaic module is 60°-70°.

**Keywords:** photovoltaic module, autonomous operation, bio-vegetation complex, module tilt angle, power supply system, electrical energy.

**For citation:** Popov M.Yu., Gracheva N.N. Experiment results on electric energy generation by photovoltaic modules for autonomous power supply of the bio-vegetation complex. Vestnik Kurganskoj GSHA. 2024; 3(51): 78–85. EDN: ZEKCDU. (In Russ).

**Введение.** Для круглогодичного обеспечения населения свежей овощной продукцией используют ее выращивание в отдельно стоящих малогабаритных культивационных сооружениях, которые можно размещать на приусадебных, садовых участках или примыкающих к жилью землях. Введение овощей в рацион человека снижает риск ожирения, сердечно-сосудистых заболеваний, высокого кровяного давления и психических расстройств.

Реализовать всесезонное выращивание свежей овощной продукции возможно при организации бесперебойного обеспечения специализированных сооружений тепловой и электрической энергией, грамотное использование которой позволит создать необходимые условия температурно-влажностного и светового режима для круглогодичного возделывания растений.

Зачастую выращиванием овощной продукции в закрытом грунте занимаются предприятия малых форм собственности, для которых решение вопроса повышения эффективности использования энергоресурсов является острой необходимостью снижения себестоимости производимой продукции [1–3]. В связи с этим, рассматривая всевозможные варианты энергообеспечения технологических процессов, при выращивании овощей защищенного грунта зачастую используют местные возобновляемые ресурсы, среди которых основным является солнечная радиация, достигающая поверхности Земли [4–6]. Южные регионы страны отличаются потенциалом солнечной энергии и возможностью с минимальными затратами реализовать выращивание таких овощей.

Основным элементом системы электроснабжения, функционирующей на основе солнечной лучистой энергии, являются фотоэлектрические модули (ФЭМ), производство которых в настоящее время налажено практически во всех промышленно развитых странах. На рынках нашей страны сегодня можно встретить ФЭМ, произведенные как в России, так и за рубежом, различных типов и модификаций, с широкой линейкой мощностей. Предлагаются сформированные продавцом схемные решения автономных и сетевых станций, а также имеется возможность конкретному потребителю создать свою структуру, подобрав для этого необходимые технические элементы:

- 1 фотоэлектрические модули;
- 2 электрический инвертор;
- 3 блок аккумуляторных батарей (АКБ);
- 4 коммутационно-защитная аппаратура;
- 5 двунаправленный прибор учета электрической энергии;
- 6 кабели и коннекторы и элементы крепежа для ФЭМ.

С практической и научной точек зрения представляет интерес анализа выработки электрической энергии ФЭМ, интегрированными в конструкцию сооружения защищенного грунта [7–9].

В Ростовской области в г. Зернограде произведен монтаж био-вегетационного комплекса, энергоснабжение которого осуществляется от солнечной электростанции.

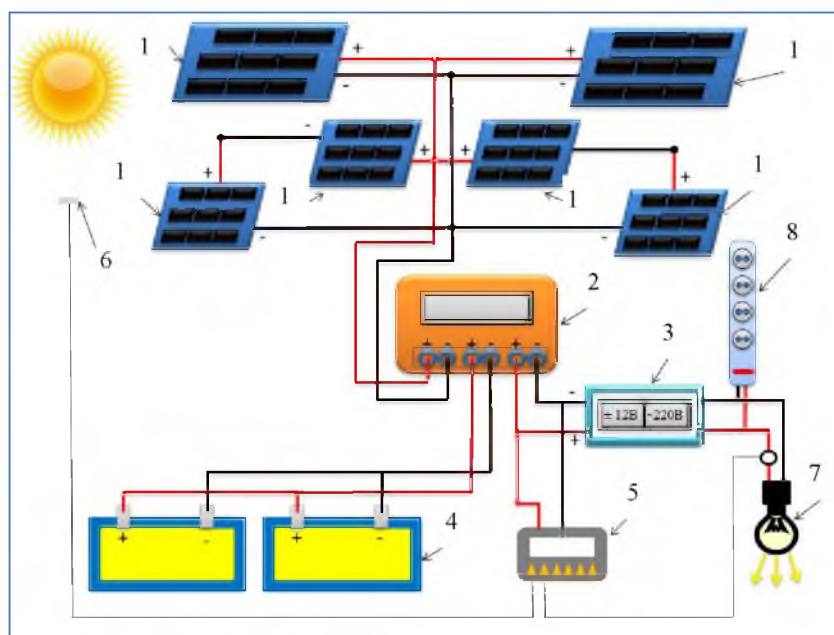
**Целью исследования** являлось экспериментальное подтверждение необходимого количества вырабатываемой электрической энергии ФЭМ для обеспечения био-вегетационного комплекса при автономном функционировании в течение года.

Задачи исследования: 1. Определить номинальную мощность солнечной электростанции для обеспечения круглогодичного выращивания зеленой продукции в био-вегетаририи. 2. Экспериментально определить оптимальный угол наклона ФЭМ для статической фиксации, снять вольт-амперные характеристики и установить наилучший период генерации электрической энергии.

**Материалы и методы.** Конструкция био-вегетационного комплекса в отношении механической прочности является более надежной, так как северная утепленная стена выступает дополнительной опорой при размещении фотоэлектрических модулей в самой высокой точке сооружения [5; 6; 10].

Подобное размещение фотоэлектрических модулей позволяет смонтировать систему генерации электрической энергии, которая при движении солнца способна статично максимально утилизировать лучистую энергию в разные периоды года светлого времени суток. Генерирующие мощности ФЭМ собраны в последовательно-параллельное соединение, которое объединено с контроллером заряда аккумуляторных батарей (АКБ) и с инвертором (рисунок 1).

В таблице 1 приведены электрические характеристики солнечного модуля HVL-320/HJT.



1 – ФЭМ Solar Panel Model HVL-320/HJT; 2 – контроллер заряда АКБ; 3 – инвертор 36В – 220В мощностью 14 кВт; 4 – литий-ионные аккумуляторы; 5 – микроконтроллер ПР-200; 6 – датчик освещенности; 7 – система освещения био-вегетационного комплекса; 8 – контактная группа подключения нагрузки  
Рисунок 1 – Автономная система электроснабжения био-вегетационного комплекса

В ходе планирования эксперимента определены основополагающие факторы, которые непосредственно влияют на уровень освещенности ФЭМ, Е клк, а также на угол подъема ФЭМ,  $\alpha^\circ$ . За константу принят эквивалент электрической нагрузки на базе силовых резисторов, кОм (таблица 2).

Количество солнечных лучей, поступающих на поверхность ФЭМ и светопрозрачную поверхность теплицы, напрямую зависит от движения солнца. Для максимальной генерации солнечные лучи должны перпендикулярно попадать на поверхность ФЭМ, что не всегда возможно,

так как положение солнца в течение дня меняется и от этого зависит количество генерируемой электроэнергии.

Одним из ключевых факторов низкой производительности является затенение ФЭМ, например, несущей конструкцией, садовыми постройками или кронами деревьев, что приводит к снижению генерируемой электроэнергии. Кроме того, важную роль играет период года, поскольку в летние месяцы солнечная активность высокая, а зимой она значительно снижается [11; 12].

Во время исследования проводили снятие по-

Таблица 1 – Электрические характеристики солнечного модуля HVL-320/HJT

Электрические характеристики при стандартных условиях испытаний: освещенность – 1000 Вт/м <sup>2</sup> , атмосферная масса – AM1.5, температура модуля – 25°C	
Допустимое отклонение номинальной мощности ( $\Delta P_{max}$ )	0/+5 %
Ток в рабочей точке $P_{max}$ ( $I_{p\ max}$ )	8.83 А
Ток короткого замыкания ( $I_{sc}$ )	9.33 А
Напряжение холостого хода ( $V_{oc}$ )	43.97 В
Технология модуля	Гетероструктурная
Напряжение в рабочей точке $P_{max}$ ( $V_n$ )	36.28 В

Таблица 2 – Независимые значимые факторы исследования

№ п/п	Угол наклона ФЭМ относительно горизонта, $\alpha^\circ$	Освещенность ФЭМ, Е, клк
1	28	10
2	36	25
3	66	40

казаний освещённости, напряжения, тока в трехкратной повторности с периодичность один час.

На основании характеристик ФЭМ были определены факторы и уровни варьирования, которые представлены на рисунке 2.

Для снятия электрических величин в качестве постоянной нагрузки приняты силовые резисторы.

Система электроснабжения био-вегетационного комплекса включает в себя возможность применения резервного электропитания за счет

применения АКБ. Накопление электрической энергии происходит в литий-ионных аккумуляторах АКБ 800 А·ч (14 шт), или 34,65 кВт·ч, что позволяет сделать электроснабжение комплекса автономным.

Измерения проводились в светлое время суток с 9:00 до 17:00, шаг измерений составлял 7 дней, оценивались такие показатели, как освещенность E, кЛк; напряжение U, В; электрический ток I, А; генерируемая мощность P, Вт; температура

Factor	Factor Name	Low Value	Low Label	Center Value	Center Label	High Value	High Label
A (1)	ANG	-1,00000	Low	0,00	CenterPt	1,000000	High
B (2)	E	-1,00000	Low	0,00	CenterPt	1,000000	High

Рисунок 2 – Матрица планирования эксперимента с факторами в кодированном виде

Var. X & Var. Y	Mean	Std.Dv.	r(X,Y)	rI	t	p	N	Constant dep: Y	Slope dep: Y	Constant dep: X	Slope dep: X
E	25,84656	15,96482									
U	13,70789	7,65230	,900826	,811487	27,68087	0,000000	180	2,54771	,431786	,08433	1,879372
ANG	43,63333	16,54174									
U	13,70789	7,65230	-,222480	,049497	-3,04456	,002684	180	18,19865	-,102920	50,22584	-,480928

Рисунок 3 – Результаты корреляционного анализа связи генерируемого напряжения с инсоляцией и углом наклона ФЭМ

Var. X & Var. Y	Mean	Std.Dv.	r(X,Y)	rI	t	p	N	Constant dep: Y	Slope dep: Y	Constant dep: X	Slope dep: X
ANG	43,63333	16,54174									
E	25,84656	15,96482	-,073806	,005447	-,987391	,324791	180	28,95465	-,071232	45,60991	-,076473

Рисунок 4 – Корреляционный анализ зависимости инсоляции и угла наклона поверхности ФЭМ

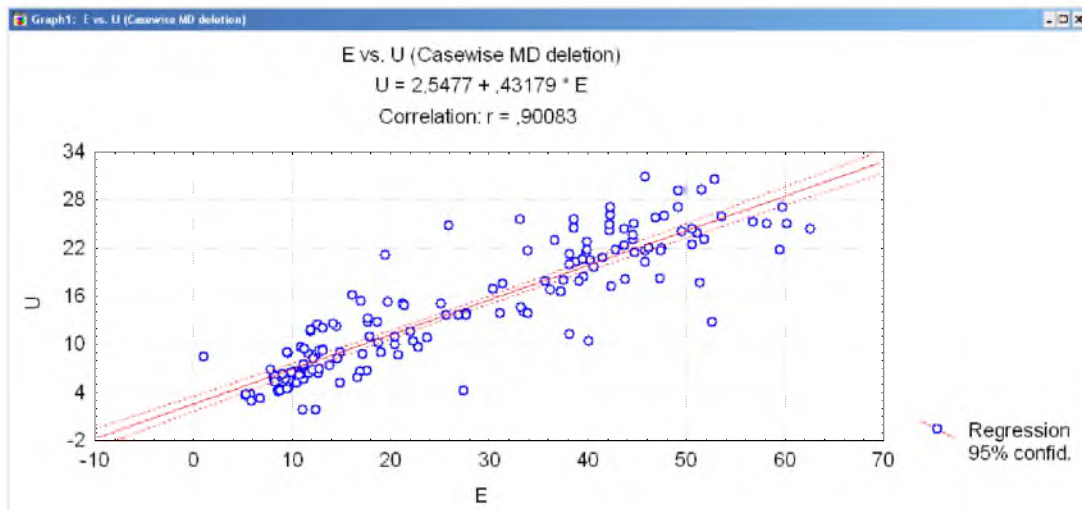


Рисунок 5 – Регрессионная оценка напряжения относительно освещенности, коэффициент регрессии равен 95 %

поверхности ФЭМ  $t$  пан.; температуры резисторов  $t$  рез. и радиаторов охлаждения резисторов  $t$  рад. Измерения освещенности производились люксметром. Измерения напряжения и тока проводились цифровыми амперметром и вольтметром, а температуры – цифровым пирометром [13–15].

**Результаты исследований и их обсуждение.** В результате анализа полученных экспериментальных данных установлена высокая зависимость между генерируемым напряжением и солнечной инсоляцией, регистрируемой на поверхности ФЭМ, и углом наклона модуля (рисунок 3).

Тесноту связей между солнечной инсоляцией и углом наклона поверхности ФЭМ описывает корреляционный анализ, представленный на рисунках 4 и 5.

В качестве целевой функции взято  $U$  – генерируемое напряжение,  $V$ . Факторы, влияющие на целевую функцию,  $E$  – освещенность,  $k\Gamma$  и  $ANG$  – угол наклона ФЭМ [15]. Результаты регрессионного анализа представлены на рисунке 6.

На основании результатов регрессионного анализа составлено уравнение регрессии:

$$U = 13,21 + 0,61 \times E - 0,51 \times ANG - 0,003 \times E^2 + 0,005 \times ANG^2. \quad (1)$$

С помощью регрессионного анализа было установлено, что все значения коэффициентов в уравнении являются значимыми.

Значение коэффициента Стьюдента для коэффициентов уравнения находятся в столбце  $t(175)$ : для  $b_0$  –  $t_{b_0} = 2,99$ , для  $b_1$  –  $t_{b_1} = 8,98$  и т. д. Теоретическое значение критерия Стьюдента для степени свободы  $dfv = 175$  и уровня значимости  $\alpha = 5\%$  равно  $t_{05}(175) = 1,654$ . Для всех коэффициентов уравнения регрессии выполняется условие  $|t_{bi}| > t_{05}(175)$ , следовательно, все коэффициенты полученного регрессионного уравнения значимы [15].

Согласно данным, представленным на рисунке 6, критерий Фишера  $F(4,175) = 241,36$ . Фактически теоретическая функция  $F_{05}(4,175)$  имеет

Regression Summary for Dependent Variable: U						
Continue...						
R= ,92008314 RI= ,84655298 Adjusted RI= ,84304562						
F(4,175)=241,36 p<0,0000 Std.Error of estimate: 3,0316						
N=180	BETA	St. Err. of BETA	B	St. Err. of B	t(175)	p-level
Intercpt			13,20784	4,410272	2,99479	,003145
E	1,28079	,142659	,61391	,068380	8,97800	,000000
ANG	-1,11284	,439904	-,51481	,203502	-2,52974	,012298
V1**2	-,40405	,142540	-,00320	,001130	-2,83462	,005128
V2**2	,96935	,440021	,00462	,002096	2,20295	,028904

Рисунок 6 – Результаты регрессионного анализа

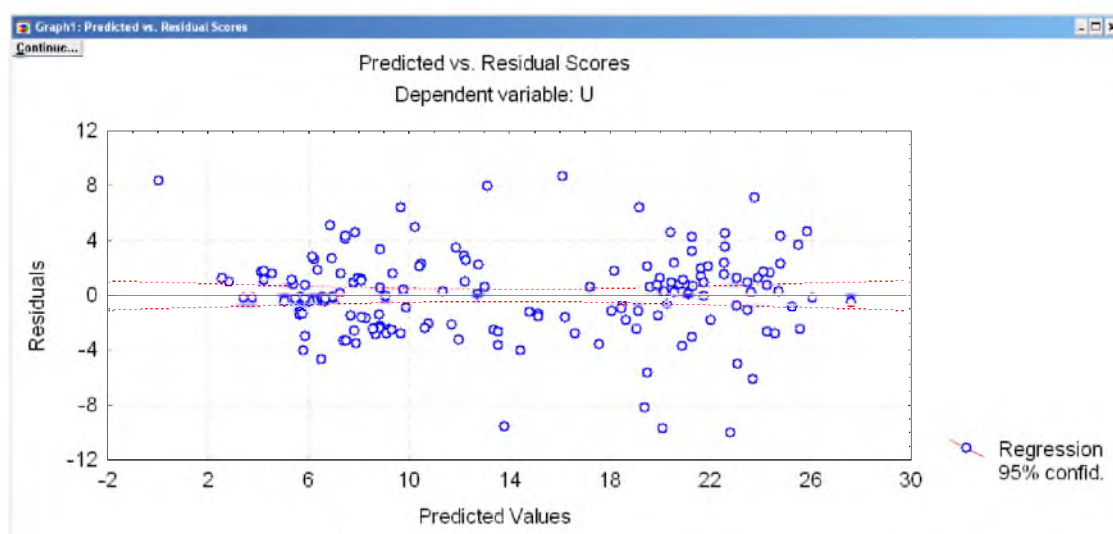


Рисунок 7 – График зависимости остатков регрессионного уравнения и значения зависимой переменной

значение 2,42. Делая сравнение, можно увидеть разницу между критериями Фишера:  $F > F_{05}$ . Это означает, что между фактором и откликом существует взаимосвязь.

Оценим качество полученной регрессионной модели. Коэффициент детерминации  $R^2=0,85$ , следовательно, 85 % значений функции отклика объяснимы значениями фактора. Вычисленный  $R^2 > 0,8$ , следовательно, полученная регрессионная модель может использоваться для прогноза [15]. Анализируя рисунок 7, мы установили, что облако рассеивания имеет неясную конфигурацию, это свидетельствует об отсутствии связи между остатками регрессионного уравнения и значениями зависимой переменной. Регрессионная модель адекватно характеризует полученные экспериментальные исследования.

При анализе функции отклика (рисунок 8) установлено, что при освещенности от 10 до 20 кЛк на поверхности ФЭМ генерация электрической энергии составляет от 0,48 до 0,88 кВт·ч. При повышении уровня освещенности от 20 до 40 кЛк генерация электрической энергии увеличится от 1,36 до 3,2 кВт·ч. При уровне освещенности от 40 до 60 кЛк, генерация электрической энергии будет в пределах от 3,84 до 5,12 кВт·ч, при наклоне модуля от 25° до 40° относительно горизонта. В ходе проведения эксперимента было установлено, что выработка электрической энергии ФЭМ за период активного освещения (9 часов) достигала 41 кВт·ч. Для увеличения производства

электроэнергии на 6–8 % необходимо изменить угол наклона ФЭМ до 60°–70°, что будет более эффективным решением для статической фиксации модуля.

**Заключение.** Для энергоснабжения био-вегетария (площадью 32 м<sup>2</sup>), используется солнечная электростанция номинальной мощностью 12 кВт. Выбрано рабочее напряжение 48 В, 14 блоков аккумуляторной батареи суммарной ёмкостью 800 А·ч, или 34,65 кВт·ч. Суммарная среднегодовая выработка солнечной электростанции 38 кВт·ч/сутки.

Экспериментально установлено, что суммарная выработка электроэнергии в осенний период года за 9 часов солнечной инсоляции при углах наклона поверхности фотоэлектрических модулей от 60° до 70° относительно горизонта составляет 41 кВт·ч, чего достаточно для эффективного функционирования био-вегетария зимой в автономном режиме в течение года.

Среднегодовая выработка энергии фотоэлектрической системой равна 38 кВт·ч/сутки, и она эффективно используется на зарядку в течение 8 часов аккумуляторных батарей – 4,3 кВт·ч. В среднем в ночной период времени суток для нагрева теплоносителя теплового аккумулятора требуется 2 кВт·ч (14 часов); на досвечивание растений – 0,5 кВт·ч (6 часов); для подъёма воды из скважины, работы циркуляционных насосов контуров теплоснабжения и микрокапельный полив – 0,3 кВт·ч (14 часов).

3D Surface Plot (NEW\_F-U\_100-200\_ALL-2.STA 5v\*180c)

$$z = 13,21 + 0,61 \cdot x - 0,51 \cdot y - 0,003 \cdot x^2 + 0,005 \cdot y^2$$

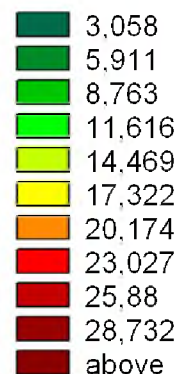
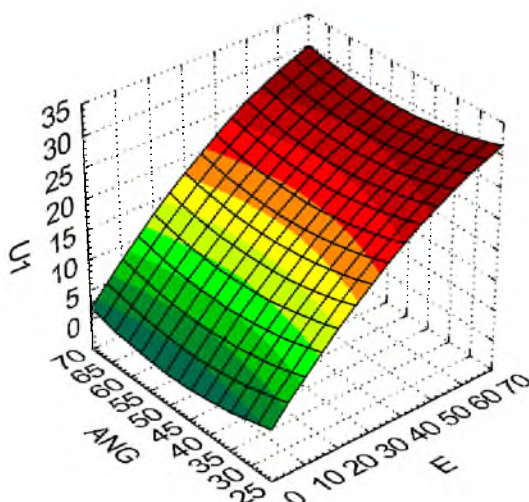


Рисунок 8 – Значения функции отклика

## Список источников

1. Интеллектуальный фотоэлектрический модуль для распределенной энергетики / Б.М. Антонов [и др.] // *Электричество*. 2019. № 7. С. 4-10. DOI: 10.24160/0013-5380-2019-7-4-10. EDN: NNQUGL.
2. Хомутов С.О., Полищук В.И., Сташко В.И. Исследование основных режимов работы и элементов конструкции фотоэлектрических систем для построения микромощной солнечной электростанции // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019. Т. 330. № 1. С. 153-164. DOI: 10.18799/24131830/2019/1/61. EDN: YXRGLR.
3. Ghenai Ch., Bettayeb M. Design and optimization of grid-tied and off-grid solar PV systems for super-efficient electrical appliances // *Energy Efficiency*. 2020. Vol. 13. No. 2. P. 291-305. DOI: 10.1007/s12053-019-09773-3. EDN: ZTJSLW.
4. Солнечный трекер с системой самораскрытия / Г.Н. Рявкин [и др.] // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2021. Т. 21. № 1. С. 82-89. DOI: 10.14529/power210109. EDN: CZGFZH.
5. Карамов Д.Н. Математическое моделирование солнечной радиации с использованием многолетних метеорологических рядов, находящихся в открытом доступе // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017. Т. 328. № 6. С. 28-37. EDN: ZCIDNN.
6. Даус Ю.В., Юдаев И.В. Технико-экономическая оценка применения фотоэлектрической системы для электроснабжения объекта АПК // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2023. Т. 18. № 1 (69). С. 52-59. DOI: 10.12737/2073-0462-2023-52-59. EDN: DTUANS.
7. Babaev B.D., Panchenko V., Kharchenko V.V. Calculation of Receipt of Renewable Energy Resources and Operation Modes of Power Plants // *Research Anthology on Clean Energy Management and Solutions*. 2021. P. 1777-1795.
8. Panchenko V., Izmailov A., Kharchenko V., Lobachevskiy Y. Photovoltaic Solar Modules of Different Types and Designs for Energy Supply // *Research Anthology on Clean Energy Management and Solutions*. 2021. P. 731-752.
9. Оськин С.В., Григораш О.В., Коломейцев А.Э. Обоснование применения солнечных электростанций на предприятиях АПК // *Техника и оборудование для села*. 2024. № 2 (320). С. 37-42. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-2-37-42. EDN: UNVEFR.
10. Ветро-солнечные электростанции фермерских хозяйств / О.В. Григораш [и др.] // *Техника и оборудование для села*. 2023. № 3 (309). С. 36-40. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-3-36-40. EDN: VVCFUB.
11. Митрофанов С.В. Выбор оптимального угла наклона солнечных панелей для размещения их в произвольном регионе // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2023. Т. 23. № 1. С. 5-11. DOI: 10.14529/power230101. EDN: ZDAYFE.
12. Расчёт оптимального угла наклона для выработки максимальной энергии от солнечной панели с использованием моделей ясного неба и интенсивности падающих лучей / М.А. Захид [и др.] // *Светотехника*. 2020. № 5. С. 67-72. EDN: DMGXPO.
13. Даус Ю.В., Панченко В.А., Слюсарь М.О. Аналитический обзор типов потерь энергии на фотоэлектрических станциях // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2024. № 3 (75). С. 396-403. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-03-45. EDN: ODITBR.
14. Ouammi A., Achour Y., Zejli D., Dagdougui H. Optimal operation scheduling for a smart greenhouse integrated microgrid // *Energy for Sustainable Development*. 2020. Vol. 58. P. 129-137.
15. Попов М.Ю. Повышение эффективности энергоснабжения малогабаритных теплиц: дис. ... канд. техн. наук: 4.3.2.: утв. 25.08.2023. Зерноград, 2023. 161 с.

## References

1. Antonov B.M. et al. Intellektual'nyi fotoelektricheskii modul' dlya raspredelennoi energetiki [Intelligent PV module for distributed energy]. *Elektrichestvo*. 2019; (7): 4-10. DOI: 10.24160/0013-5380-2019-7-4-10. EDN: NNQUGL. (In Russ).
2. Khomutov S.O., Polischuk V.I., Stashko V.I. Issledovanie osnovnykh rezhimov raboty i elementov konstruksii fotoelektricheskikh sistem dlya postroeniya mikromoshchnoi solnechnoi elektrostantsii [Study of the main operating modes and design elements of photovoltaic systems for the construction of a micro-power solar power plant]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2019; 330(1): 153-164. DOI: 10.18799/24131830/2019/1/61. EDN: YXRGLR. (In Russ).
3. Ghenai Ch., Bettayeb M. Design and optimization of grid-tied and off-grid solar PV systems for super-efficient electrical appliances. *Energy Efficiency*. 2020: 13(2): 291-305. DOI: 10.1007/s12053-019-09773-3. EDN: ZTJSLW.
4. Ryavkin G.N. et al. Solnechnyi treker s sistemoi samoraskrytiya [Solar tracker with self-open-

ing system]. *Bulletin of south ural state university. Series: Power engineering*. 2021; 21(1): 82-89. DOI: 10.14529/power210109. EDN: CZGFZH. (In Russ).

5. Karamov D.N. Matematicheskoe modelirovanie solnechnoi radiatsii s ispol'zovaniem mnogoletnikh meteorologicheskikh ryadov, nakhodyashchikhsya v otkrytom dostupe [Mathematical modeling of solar radiation using multi-year meteorological series in the public domain]. *Bulletin of the tomsk polytechnic university. Geo assets engineering*. 2017; 328(6): 28-37. EDN: ZCIDNN. (In Russ).

6. Daus Yu.V., Yudaev I.V. Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka primeneniya fotoelektricheskoi sistemy dlya elektrosnabzheniya ob'ekta APK [Technical and economic assessment of the use of a photovoltaic system for power supply of an agricultural facility]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2023. T. 18. № 1 (69). С. 52-59. DOI: 10.12737/2073-0462-2023-52-59. EDN: DTUANS. (In Russ).

7. Babaev B.D., Panchenko V., Kharchenko V.V. Calculation of Receipt of Renewable Energy Resources and Operation Modes of Power Plants. *Research Anthology on Clean Energy Management and Solutions*. 2021; 1777-1795.

8. Panchenko V., Izmailov A., Kharchenko V., Lobachevskiy Y. Photovoltaic Solar Modules of Different Types and Designs for Energy Supply. *Research Anthology on Clean Energy Management and Solutions*. 2021; 731-752.

9. Oskin S.V., Grigorash O.V., Kolomeytsev A.E. Obosnovanie primeneniya solnechnykh elektrostantsii na predpriyatiyakh APK [Justification for the use of solar power plants in agricultural enterprises]. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024; 2(320): 37-42. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-2-37-42. EDN: UNVEFR. (In Russ).

10. Grigorash O.V. et al. Vetro-solnechnye elektrostantsii fermerskikh khozyaistv [Wind-solar power plants for farms]. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023; 3(309): 36-40. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-3-36-40. EDN: VVCFUB. (In Russ).

11. Mitrofanov S.V. Vybora optimal'nogo ugla naklona solnechnykh panelei dlya razmeshcheniya ikh v proizvod'nom regione [Selecting the optimal angle of inclination of solar panels for their placement in any region]. *Bulletin of south ural state university. Series: Power engineering*. 2023; 23(1): 5-11. DOI: 10.14529/power230101. EDN: ZDAYFE. (In Russ).

12. Zakhid M.A. et al. Raschet optimal'nogo ugla naklona dlya vyrabotki maksimal'noi energii ot solnechnoi paneli s ispol'zovaniem modelei yasnogo

neba i intensivnosti padayushchikh luchej [Calculating the optimal tilt angle for maximum energy production from a solar panel using clear sky models and incident ray intensity]. *Svetotekhnika*. 2020; (5): 67-72. EDN: DMGXPO. (In Russ).

13. Daus Yu.V., Panchenko V.A., Slyusar M.O. Analiticheskii obzor tipov poter' energii na fotoelektricheskikh stantsiyakh [Analytical review of energy loss types in photovoltaic power plants]. *Proceedings of lower volga agro-university complex: science and higher education*. 2024; 3(75): 396-403. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-03-45. EDN: ODITBR. (In Russ).

14. Ouammi A., Achour Y., Zejli D., Dagdougui H. Optimal operation scheduling for a smart greenhouse integrated microgrid. *Energy for Sustainable Development*. 2020; 58: 129-137.

15. Popov M.Yu. Povyshenie effektivnosti energosnabzheniya malogabaritnykh teplits [Improving the efficiency of energy supply for small greenhouses]. [Dissertation]. Zernograd; 2023: 161. (In Russ).

#### Информация об авторах

М.Ю. Попов – кандидат технических наук; AuthorID: 1063389.

Н.Н. Грачева – кандидат технических наук; AuthorID: 676644.

#### Information about the author

M.Yu. Popov – Candidate of Technical Sciences; AuthorID: 1063389.

N.N. Gracheva – Candidate of Technical Sciences; AuthorID: 676644.

Статья поступила в редакцию 15.09.2024; одобрена после рецензирования 03.10.2024; принята к публикации 03.10.2024.

The article was submitted 15.09.2024; approved after reviewing 03.10.2024; accepted for publication 03.10.2024.