

Научная статья  
УДК 620.9:635.64:58

## НОВЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОКУЛЬТУРЫ

<sup>1</sup>Александр Николаевич Васькин, <sup>2</sup>Елена Николаевна Ракутько

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия

<sup>2</sup> Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** В ходе исследования изучалась рассада томата сорта Фламинго F1, которая была выращена при фотонной интенсивности, равной  $140 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Разработанная модель растения, учитывающая динамику изменения площади каждого листа и его массы, может быть использована для анализа энерготехнологических процессов с учетом прикладной теории энергосбережения. Исследования показали, что наибольшая продуктивность фотосинтеза весом и по субстанции наблюдается при применении натриевых ламп. В то же время, использование светодиодов приводит к наименьшей производительности. Тесная отрицательная связь между содержанием хлорофилла в листьях и энергоэффективностью фотосинтеза обнаружена при использовании светодиодов и люминесцентных ламп. Это свидетельствует о возможном отрицательном влиянии увеличения содержания хлорофилла на энергоэффективность фотосинтеза. Следовательно, результативность процесса фотосинтеза подвержена существенным изменениям в зависимости от содержания хлорофилла в листьях при использовании различных типов источников света. Эти результаты могут быть важными при выборе оптимального источника света для обеспечения оптимальных условий для фотосинтеза растений. Поэтому, необходимо учитывать не только интенсивность света, но и содержание хлорофилла в листьях при проектировании систем освещения для растений.

**Ключевые слова:** прикладная теория энергосбережения; рассада; томат; площадь листа; продуктивность; энергоёмкость; фотосинтез; спектр.

**Для цитирования:** Васькин А.Н., Ракутько Е.Н. Новый подход к определению энергоэффективности светокультуры // Вестник Брянской ГСХА. 2024. № 6 (106). С. 71-77.

### Original article

## NEW APPROACH TO DEFINITION THE ENERGY EFFICIENCY OF LIGHT CULTURE

<sup>1</sup> Aleksandr N. Vas'kin, <sup>2</sup> Elena N. Rakut'ko

<sup>1</sup> Bryansk State Agrarian University, Bryansk Region, Kokino, Russia

<sup>2</sup> Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production (IAEP) - branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Center of VIM, Saint-Petersburg, Russia

**Abstract.** During the researches, seedlings of Flamingo F1 tomato were studied, which were grown at a photon intensity equal to  $140 \text{ micromoles.m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . The developed plant model, which takes into account the dynamics of changes in the area of each leaf and its mass, can be used to analyze energy technological processes taking into account the applied theory of energy saving. Researches have shown that the highest productivity of photosynthesis by weight and substance is observed when using sodium lamps. At the same time, the use of LEDs results in the lowest productivity. A close negative relationship between chlorophyll content in leaves and the energy efficiency of photosynthesis was found when using LEDs and fluorescent lamps. This indicates a possible negative effect of increasing chlorophyll content on the energy efficiency of photosynthesis. Consequently, the efficiency of the photosynthesis process is subject to significant changes depending on the chlorophyll content in the leaves when using different types of light sources. These results may be important when choosing the optimal light source to ensure optimal conditions for plant photosynthesis. Therefore, it is necessary to take into account not only the light intensity, but also the chlorophyll content of the leaves when designing lighting systems for plants.

**Key words:** applied theory of energy saving; seedlings; tomato; leaf area; productivity; energy capacity; photosynthesis; spectrum.

**For citation:** Vaskin A.N., Rakutko E.N. New approach to definition the energy efficiency of light culture // Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2024. 6 (106). 71-77.

**Введение.** При искусственном облучении энергетический процесс выращивания растений характеризуется высокой интенсивностью. Сначала значительное количество энергии используется для создания оптимальных условий, необходимых для проведения фотосинтеза. Этот процесс включает

сложные химические реакции по поглощению, преобразованию и использованию световой энергии [1]. Хлорофилл, который является основным фотосинтетическим пигментом, играет важную роль в образовании органических веществ из углекислого газа и воды.

В ходе процесса фотосинтеза лист, основной орган, ответственный за ассимиляцию, испытывает воздействие оптического излучения (ОИ), что способствует образованию органических веществ, необходимых для жизнедеятельности растения [2]. Проведение анализа накопления органической массы на поверхности листа за определенный временной период позволяет оценить эффективность фотосинтеза и общую продуктивность данного процесса.

**Метод исследования.** В работах А. А. Ничипоровича подробно рассмотрены вопросы фотосинтетической деятельности растений в посевах, связанные с формированием хозяйственного урожая и его долей в общей массе всех органов растения. Основное поглощение солнечной радиации происходит в листьях верхних ярусов ценоза, где содержится максимальное количество хлорофилла. Этот показатель отражает количество углекислого газа, который ассимилируется весовой единицей хлорофилла за определенное время [3].

Одним из критериев эффективности светокультурного процесса является энергоёмкость, позволяющая оценить энергетическую эффективность использования света растениями. Исследования в этой области позволяют оптимизировать процессы фотосинтеза и повысить общую продуктивность [4].

Иерархическая структура сельскохозяйственных биоэнергетических систем в исследовании проектируемых технологических, экономических и экологических параметров предполагает применение теоретической модели энергетического объекта или процесса. Это относится к области прикладной теории энергосбережения в энерготехнологических процессах (ПТЭЭП) и изображена на рисунке 1, а. [5].

В ходе исследования проводится энергетический анализ светокультуры, где объектом анализа является биологический объект (БО) - растение. Основным параметром исследуемого объекта является энергоёмкость, которая определяется как отношение поступающей энергии  $Q$  к продукции  $P$ , получаемой на выходе. Потери энергии  $\Delta Q$  также учитываются в процессе анализа [6]. При этом процесс развивается под влиянием определенных факторов  $X$ . Энергоёмкость определяется согласно определенной математической формуле

$$\varepsilon_x = \frac{Q}{P} \tag{1}$$

Соответственно единицам измерения входных и выходных параметров, размерность энергоёмкости может быть различной. В терминологии физики энергии, существует определенная связь между входными и выходными величинами, которая определяет размерность энергоёмкости [7]. Понимание этой связи позволяет более точно оценивать и анализировать энергетические процессы в различных системах (рис. 1,б). Исследования в области энергетики и физики часто требуют анализа размерности энергоёмкости, что приобретает важное значение.

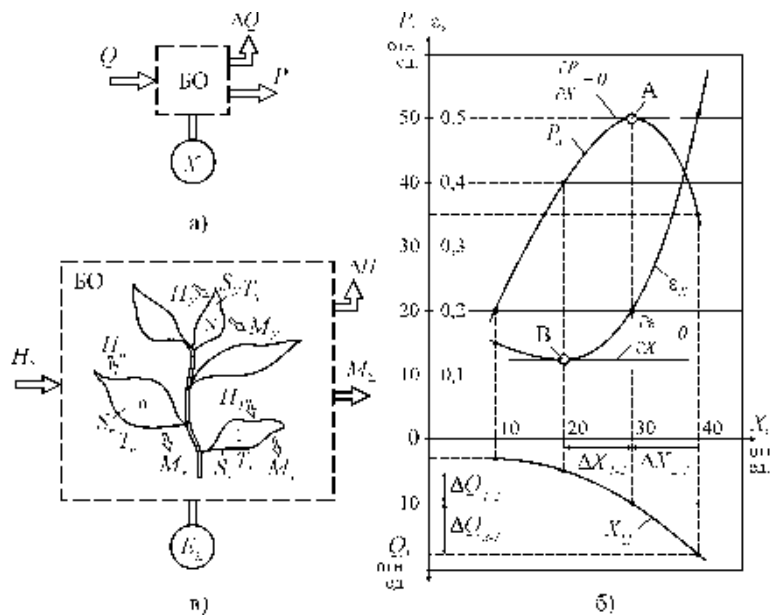


Рисунок 1 - К анализу продуктивности и энергоэффективности фотосинтеза

При увеличении интенсивности энергетического воздействия  $Q$  на биологический объект происходит нелинейное изменение формируемого фактора  $X_Q = f(Q)$ . Для достижения сходного приращения фактора  $\Delta X$  необходимо увеличивать интенсивность воздействия  $\Delta Q$  (т.е. при  $\Delta X_{2-3} = \Delta X_{1-2}$ ,  $\Delta Q_{2-3} > \Delta Q_{1-2}$ ) что определяет кривизну данной функции  $d^2 X / dQ^2 < 0$ . Таким образом, наблюдается взаимосвязь между величиной формируемого фактора и интенсивностью энергетического воздействия  $P_X = f(X)$ . Увеличение приращений интенсивности наблюдается в процессах, где возникает увеличение потерь энергии при увеличении интенсивности воздействия. Данное явление определяет кривизну функции  $d^2 P / dX^2 < 0$ , описывающей данный процесс.

Кривую  $\varepsilon_X = f(X)$  получают вычислением значения энергоёмкости по формуле (1), используя значения  $Q$  и  $P$  при различных значениях  $X$ .

Совокупность функций  $P_X$ ,  $X_Q$  и  $\varepsilon_X$  является вариантами модели  $Q \rightarrow X \rightarrow P$ .

Отметим, что оптимум продуктивности БО соответствует точке «А» (максимум на кривой  $P_X$ ). В этой точке соблюдается равенство

$$\frac{\partial P}{\partial X} = 0 \quad (2)$$

Однако с точки зрения энергозатрат оптимальным является режим, соответствующий точке «В» (минимум энергоёмкости процесса на кривой  $\varepsilon_X$ ). Для этой точки справедливо

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial X} = 0 \quad (3)$$

Как правило, при этом  $P_B < P_A$ , т.е. энергосберегающий режим проведения процесса может не являться оптимальным по продуктивности.

В пределах плана эксперимента исследуется модель листа растения, изображенного на рисунке 1, в. Основной функцией листа является процесс синтеза органических соединений из неорганических веществ под воздействием фотосинтеза. Растение обладает плоской формой, что способствует эффективному захвату света для процесса фотосинтеза. Вода достигает листьев через ветвистую систему сосудов, в то время как углекислый газ поступает через устьица. Размер и время активности ассимилирующей поверхности, а также параметры излучения, включая его спектр, оказывают прямое воздействие на рост и развитие растения.

Значение фотонной облученности, моль·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, определяется по формуле

$$E_\Sigma = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\lambda E_\lambda}{\hbar c N_A} \quad (4)$$

где  $E_\lambda$  – облученность на длине волны  $\lambda$ , Вт·м<sup>-2</sup>;

$\hbar$  – постоянная Планка,  $\hbar = 6,624 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;

$c$  – скорость света,  $c = 3 \cdot 10^8$  м·с<sup>-1</sup>;

$N_A$  – число Авогадро,  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>.

$\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – диапазон ФАР (400–780 нм).

Универсальный метод моделирования ТПО основан на модели растения (Р), которая учитывает массу сырого (или сухого) вещества  $M_\Sigma$ , площадь n-го листа  $S_n$  и его массу  $M_n$  в момент времени  $T_n$ . Данный подход применяется для всех видов растений, что делает модель реализации ТПО универсальным инструментом. Таким образом, данная модель учитывает особенности различных видов растений, позволяя проводить более точное и обширное моделирование фотосинтеза и других процессов, связанных с ростом и развитием растений.

Исследование включает в себя регистрацию количества листьев на растениях, выращенных под различными типами излучения в определенные временные интервалы. Затем полученные данные аппроксимируются с помощью соответствующих математических уравнений

$$n = \alpha \ln(T) - \beta \quad (5)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – постоянные для данного типа ИИ коэффициенты.

Из уравнений (5) находят время появления  $n$ -го листа, сут.

$$T_n = \exp\left(\frac{n + \beta}{\alpha}\right) \quad (6)$$

«Возраст»  $n$ -го листа на день окончания эксперимента  $T^k$

$$T_n^B = T^k - T_n \quad (7)$$

Величину ПФС  $n$ -го листа,  $\text{г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ , определяют по формуле

$$\text{ПФС}_n = \frac{M_n}{S_n T_n^B} \quad (8)$$

где  $M_n$  – сырая масса или масса сухого вещества для  $n$ -го листа, г;

$S_n$  – площадь  $n$ -го листа,  $\text{м}^2$ ;

Величину ЭФС  $n$ -го листа определяют по формуле

$$\text{ЭФС}_n = \frac{H_n}{M_n} \quad (9)$$

где  $H_n$  – доза облучения, которая при известной функциональной зависимости изменения площади листа от времени  $S_n(T)$ , описывается формулой

$$H_n = E_\Sigma \int_0^{T_n^o} S_n(T) dT \quad (10)$$

где  $E_\Sigma$  – фотонная облученность растений.

$T_n^o$  – время действия облучения на  $n$ -й лист, с, определяют по формуле

$$T_n^o = 3600 \cdot \Phi\Pi \cdot T_n^B \quad (11)$$

где  $\Phi\Pi$  – фотопериод, ч.

Выражение для расчета дозы, учитывающее изменение площади листа с течением времени после его появления на стебле принимает вид:

$$H_n = \frac{1}{2} E_\Sigma S_n T_n^o \quad (12)$$

С учетом приведенных выше выражений, для  $n$ -го листа величины ПФС,  $\text{г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ , и ЭФС,  $\text{моль}\cdot\text{г}^{-1}$ , связаны выражением

$$\text{ЭФС}_n = \frac{k^\Phi}{\text{ПФС}_n} \quad (13)$$

где  $k^\Phi$  – постоянный коэффициент,  $k^\Phi = \frac{1}{2} E_\Sigma \cdot 3600 \cdot \Phi\Pi$ ,  $\text{моль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ .

Для всего растения, среднее значение ЭФС

$$\overline{\text{ЭФС}} = \frac{H_\Sigma}{M_\Sigma} = \frac{\sum_{n=1}^N H_n}{\sum_{n=1}^N M_n} \quad (14)$$

Тогда среднее значение ПФС

$$\overline{\text{ПФС}} = \frac{k^\Phi}{\overline{\text{ЭФС}}} \quad (15)$$

**Результаты и обсуждение.** Для подтверждения изложенных теоретических положений были использованы экспериментальные данные полученные ранее в лаборатории энергоэкологии светокультуры ИАЭП – ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Для апробации разработанного метода использовались различные типы световых источников, включая светодиодные (СД), люминесцентные (ЛЛ) и натриевые (НА) лампы. Рассада выращивалась в специально оборудованной световой комнате, чтобы определить эффективность каждого типа освещения для данного сорта помидоров. С учетом потребностей томатов были

оптимизированы спектральные характеристики каждого из типов ламп. Спектр ЛЛ равномерно распределял энергию в различных диапазонах, в то время как спектр НА ламп содержал максимум в красно-желтой области. Для измерения спектральной облученности  $E_\lambda$  использовался специальный прибор ТКА ВД/04, затем результаты пересчитывались в фотонную облученность. В ходе эксперимента на 42-й день были проанализированы значения коэффициентов энергоэффективности фотосинтеза (ЭФС) и продуктивности фотосинтеза (ПФС) для каждого индивидуального листа рассады. Для поддержания уровня фотонной облученности  $E_\Sigma$  на отметке  $140 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  использовалось регулирование высоты подвеса источников света над растениями. Коэффициент  $k^\Phi$ , определяющий количество поглощенных растениями фотонов в единицу времени, составил  $3,528 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ .

Особое внимание уделяется величинам облученности ФАР и освещенности, которые значительно отличаются друг от друга. Это различие объясняется не только выравниванием фотонной облученности, но и различиями в спектральном составе излучения. Таким образом, даже при схожей общей облученности, радиационная среда может иметь различный характер из-за различий в спектральной характеристике излучения. Таблица 1 содержит подробные данные о параметрах радиационной среды, оказывающей влияние на растения.

Таблица 1 - Параметры радиационной среды растений

Показатель	ИИ		
	СД	ЛЛ	НА
Фотонная облученность $E_\Sigma$ , $\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	140,0	140,0	140,0
Облученность ФАР, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$	29,1	30,56	28,40
Освещенность, лк	7800	13400	16100
Состав потока по соотношению энергии (%) в спектральных диапазонах ФАР, %			
синий (400...500 нм)	19,3	32,1	7,2
зеленый (500...600 нм)	24,3	33,6	52,8
красный (600...700 нм)	56,4	34,3	40,0

На рисунке 2 показан внешний вид рассады, выращенной под различными ИИ.



СД



ЛЛ



НА

Рисунок 2 - Внешний вид рассады, выращенной под различными ИИ

Листья томата, согласно ботанической классификации, являются непарноперисторассеченными, состоящими из долей, долек и небольших долек. Из-за такой структуры определение площади листа может оказаться затруднительным. Для анализа данной проблемы использовался фитопланиметр, включающий в себя механическую часть и веб-камеру, подключенную к компьютеру (рис. 3). Изображения, полученные с веб-камеры, были обработаны при помощи программы "AreaS" (рис. 4) в соответствии с методикой, разработанной А.Н. Пермяковым и соавторами.



Рисунок 3 - Фитопланиметр

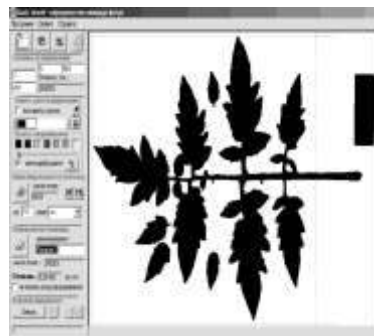


Рисунок 4 - Окно программы определения площади

При выполнении исследования было проведено определение содержания хлорофилла в листьях с использованием прибора ССМ-200, который измеряет показатель в относительных единицах

CCI (Chlorophyll Content Index). С целью повышения точности и достоверности результатов исследования был произведен несколько этапов измерений листьев. Вначале каждый лист был измерен пять раз для последующего расчета среднего значения коэффициента цветового индекса (CCI). После этого проводилось определение массы листьев с использованием весов модели ВЛ-500. Для определения содержания сухого вещества листья были выдержаны при температуре 105 градусов Цельсия в сушильном шкафу.

В таблице 2 приведены ключевые параметры, характеризующие процесс фотосинтеза у различных видов растений, выращиваемых с использованием различных типов искусственного интеллекта.

Таблица 2 - Интегральные параметры продуктивности и энергоэффективности фотосинтеза

Показатель	ИИ		
	СД	ЛЛ	НА
Суммарная площадь поверхности листьев $S_{\Sigma}$ , см <sup>2</sup>	669,9±33,5	1187,3±59,4	1111,7±55,6
Общая масса, г			
листьев $M_{сыр}$	14,11±0,71	25,27±1,26	27,07±1,33
сухого вещества $M_{сух}$	1,37±0,06	1,62±0,07	3,15±0,14
Доза облучения $H_{\Sigma}$ , моль	4,62±0,23	7,68±0,37	7,22±0,28
Среднее значение CCI, отн.ед.	11,2±0,4	16,9±0,6	14,6±0,7
Средняя ЭФС, моль г <sup>-1</sup>			
по сырой массе $\overline{ЭФС}_{сыр}$	0,33±0,02	0,30±0,02	0,27±0,01
по сухому веществу $\overline{ЭФС}_{сух}$	3,37±0,17	4,73±0,24	2,29±0,09
Средняя ПФС, г м <sup>-2</sup> сут <sup>-1</sup>			
по сырой массе $\overline{ПФС}_{сыр}$	10,77±0,43	11,61±0,58	13,23±0,65
по сухому веществу $\overline{ПФС}_{сух}$	1,05±0,04	0,75±0,03	1,54±0,07

Исследование показало, что растения выращенные под различными источниками света имели различный уровень площади листовой поверхности и дозы потока излучения. Например, наибольшая суммарная площадь листьев и доза потока излучения были зафиксированы у растений под ЛЛ лампами, в то время как наименьшие значения были у растений выращенных под СД. Количество хлорофилла в листьях также соответствовало этой же закономерности.

Кроме того, растения под НА лампами имели наибольшую общую массу листьев и количество сухого вещества, в то время как растения под СД показали наименьшие значения массы.

Для определения взаимосвязи между показателями содержания хлорофилла в листьях растений и параметрами ПФС и ЭФС был проведен корреляционный анализ. Полученные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты корреляционного анализа

Коэффициент корреляции	ИИ		
	СД	ЛЛ	НА
между CCI и ПФС			
по сырой массе $R_{сыр}$	-0,124	-0,699	0,192
по сухому веществу $R_{сух}$	-0,120	-0,694	0,125
между CCI и ЭФС			
по сырой массе $R_{сыр}$	-0,305	0,639	-0,398
по сухому веществу $R_{сух}$	-0,754	0,017	-0,600

**Заключение.** Наиболее тесная отрицательная корреляция выявлена между содержанием хлорофилла в листьях и энергоэффективностью процесса фотосинтеза сухого вещества при использовании СД.

Модель растения, разработанная с использованием принципов ПТЭЭТП, учитывает динамику изменения площади каждого листа и его массы в процессе выращивания. Это обеспечило возможность провести анализ энергетической эффективности фотосинтеза.

В рамках нового подхода к изучению энергетической эффективности процесса фотосинтеза основным показателем является энергетическая емкость. Для определения данного параметра применяется соотношение между количеством энергии, поступающей на листья, и массой продукции фотосинтеза. Полученные результаты свидетельствуют о том, что эффективность фотосинтеза обратно пропорциональна его энергоемкости.

Влияние спектрального состава потока излучения на энергетическую эффективность фотосинтеза и использование углеродного и светового питания при выращивании рассады томата было исследовано с использованием предложенной методики обработки экспериментальных данных. Результаты исследования подтверждают значимость данного фактора для процессов фотосинтеза.

#### Список источников

1. Ракутько Е.Н., Медведев Г.В., Ракутько С.А. Применение отражательных свойств листа растения в агроэкомониторинге // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2023. № 3 (72). С. 99-107.
2. Мишанов А.П., Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Цифровой светодиодный светильник с регулируемым спектром // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2022. № 1 (66). С. 125-134.
3. Ракутько С.А., Васькин А.Н., Ракутько Е.Н. Применение морфо-цветометрического анализа в биоиндикации экосистем // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2022. № 3 (67). С. 445-458.
4. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Мишанов А.П. Влияние параметров световой среды на содержание хлорофилла в листьях рассады томата и их оптические свойства // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2021. № 60. С. 64.
5. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Оценка равномерности поверхностного распределения потока излучения как фактора энергоэффективности светокультуры инженерные технологии и системы // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 3. С. 470-486.
6. Васькин А.Н., Ракутько Е.Н. Оценка сравнительных показателей спектрального состава светодиодных и люминесцентных источников оптического излучения // Вестник Брянской ГСХА. 2024. № 3 (103). С. 73-79.
7. Васькин А.Н., Ракутько С.А. Расчет параметров радиационной среды от светодиодного фито-облучателя // Вестник Брянской ГСХА. 2023. № 5 (99). С. 67-74.

#### Информация об авторах:

**А.Н. Васькин** – старший преподаватель кафедры автоматизи, физики и математики, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, vaskin32@mail.ru.

**Е.Н. Ракутько** – научный сотрудник Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

#### Information about the authors:

**A.N. Vas'kin** - Senior lecturer of the Department of Automation, Physics and Mathematics, Bryansk State Agrarian University, vaskin32@mail.ru.

**E.N. Rakut'ko** - research associate at the Institute of Agricultural Engineering and Environmental Problems of Agricultural Production (IEEP) – branch of FSBSI FSAC VIM.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 29.10.2024; одобрена после рецензирования 08.11.2024, принята к публикации 28.11.2024.

The article was submitted 29.10.2024; approved after reviewing 08.11.2024; accepted for publication 28.11.2024.

© Васькин А.Н., Ракутько Е.Н.