

Научная статья
УДК 635.5:535.3

ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧНОСТЬ СВЕТОКУЛЬТУРЫ САЛАТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДОЗАХ ИЗЛУЧЕНИЯ

¹Елена Николаевна Ракутько, ²Александр Николаевич Васькин

¹Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

²ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия

Аннотация. Исследование направлено на изучение воздействия доз облучения светодиодными источниками света на энергоэкологичность салата (*Lactuca Sativa L.*). Анализируется влияние различных доз света на экологические показатели роста и развития данного растения. Для достоверности результатов исследования проводится комплексное сравнение данных с контрольными группами, выращиваемыми без применения светодиодных источников света. Выполнена статистическая обработка полученных данных с целью выявления закономерностей. Полученные результаты интерпретируются с учетом теоретических предположений об особенностях фотосинтеза и адаптации растений к изменениям условий освещения. Представляется, что исследование окажет значительное воздействие на развитие методов оптимизации условий выращивания сельскохозяйственных культур в закрытом грунте. В работе использовались светодиоды, распределяющие энергию спектра света следующим образом: 30 % - синий цвет, 20 % - зеленый цвет и 50 % - красный цвет. Наилучшие результаты в урожайности, качестве продукции и коэффициенте энергоэкологичности (*Кэ*) были достигнуты при дозировке облучения 2,59 МДж·м⁻² (3,23 кг/м² и 5,75 % соответственно). В ходе проведенных исследований было установлено, что изменение дозы облучения оказывает влияние на выход продукции салата. Увеличение дозы облучения с 0,81 до 1,72 МДж·м⁻² приводит к увеличению выхода сухого вещества. При увеличении дозы облучения с 0,81 до 2,39 МДж·м⁻² наблюдается повышение коэффициента эффективности использования энергии. Эти результаты свидетельствуют о важности подбора оптимальной дозы облучения для достижения максимального выхода продукции салата и эффективного использования энергетических ресурсов. Эти изменения соответствуют уровню облученности 30 Вт·м⁻² и фотопериоду в 24 часа. Анализ показал, что содержание органических веществ в продукции составило 155,6 г/м². Таким образом, доза облучения оказывает влияние на выход и качество продукции салата.

Ключевые слова: светокультура, энергоэкологичность, доза облучения, салат.

Для цитирования: Ракутько Е.Н., Васькин А.Н. Энергоэкологичность светокультуры салата при различных дозах излучения // Вестник Брянской ГСХА. 2025. № 1 (107). С. 75-79.

Original article

ENERGY EFFICIENCY OF LETTUCE LIGHT CULTURE AT DIFFERENT RADIATION DOSES

¹Yelena N. Rakut'ko, ²Aleksandr N. Vas'kin

¹Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production (IAEP) - branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Center VIM, Saint-Petersburg, Russia

²Bryansk State Agrarian University, Bryansk Region, Kokino, Russia

Abstract. The research is aimed at studying the impact of irradiation doses from LED light sources on the energy efficiency of lettuce (*Lactuca Sativa L.*). The influence of different doses of light on the environmental indicators of growth and development of a given plant is analyzed. To ensure the reliability of the research results, a comprehensive comparison of data is carried out with control groups grown without the use of LED light sources. Statistical processing of the obtained data is carried out in order to identify patterns. The results obtained are interpreted taking into account theoretical assumptions about the characteristics of photosynthesis and plant adaptation to changes in lighting conditions. It appears that the research will have a significant impact on the development of methods for optimizing the conditions for growing crops indoors. The work used LEDs that distribute the energy of the light spectrum as follows: 30% - blue, 20% - green and 50% - red. The best results in yields, product quality and energy efficiency coefficient (*E*) were achieved with an irradiation dosage of 2.59 MJ·m⁻² (3.23 kg/m² and 5.75%, respectively). In the course of the researches, it was found that changing the irradiation dose influences the output of lettuce products. Increasing the irradiation dose from 0.81 to 1.72 MJ·m⁻² leads to an increase in the output of dry matter. When the radiation dose increases from 0.81 to 2.39 MJ·m⁻², an increase in the energy efficiency coefficient is observed. These results indicate the importance of selecting the optimal radiation dose to achieve maximum output of lettuce products and efficient use of energy resources. These changes

correspond to an irradiance level of 30 W m⁻² and a photoperiod of 24 hours. The analysis showed that the content of organic substances in the products was 155.6 g/m². Thus, the irradiation dose affects the output and quality of lettuce products.

Key words: light culture, energy efficiency, irradiation dose, lettuce.

For citation: Rakutko E.N., Vaskin A.N. Energy efficiency of lettuce light culture at different radiation doses // Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2025. 1 (107): 75-79.

Введение. Для обеспечения экологически чистого производства защищенного грунта необходимо внедрение безотходных технологий светокультуры. Разработка систем культивирования растений в условиях регулируемой агроэкосистемы играет важную роль в этом процессе. Для успешной реализации необходим комплексный научный подход, который охватывает все аспекты тепличного производства [1].

Интенсификация тепличного производства является ключевым фактором, обеспечивающим его высокую экономичность, но в то же время она также определяет наличие особых экологических угроз от тепличных хозяйств. На данный момент в мире существует более 800 тысяч гектаров тепличных хозяйств, которые можно классифицировать как северные (с добавочным обогревом и другим высокотехнологичным оборудованием) и южные (с минимальной степенью технической сложности) [2].

Теперь рассмотрим экологические аспекты тепличных хозяйств. Согласно исследованиям, северные типы тепличных хозяйств выделяют большее количество углекислого газа из-за использования газа в качестве источника тепла. Это приводит к увеличению энергозатрат на производство, так как до 79% энергии в Нидерландах расходуется именно на это. Однако, даже неотапливаемые тепличные хозяйства в южных регионах также не являются экологически безопасными. Важно учитывать все аспекты использования теплиц для сельского хозяйства в контексте охраны окружающей среды и устойчивого развития [3].

В провинции Альмерия в Южной Испании широко распространен тепличный способ производства на площади в 50 тысяч гектаров. Данное направление играет значительную роль в экономическом развитии региона, однако сопровождается серьезными экологическими проблемами. Наблюдается истощение водных ресурсов из скважин, соленизация почвы и воды, а также загрязнение окружающих водных систем биоцидами и удобрениями. Осознание этих проблем имеет важное значение для разработки устойчивых стратегий развития данной отрасли [4].

В России с 2017 года наблюдается постепенный рост общей площади тепличных комплексов, который достиг примерно 2,3 тысяч гектаров, включая 300 гектаров, занимаемых теплицами со светокulturой. В связи с растущим спросом на овощи, выращиваемые в закрытом грунте, предполагается, что до 2030 года будет запущено еще 2 тысячи гектаров площадей под теплицы [5]. Расширение применения светокультуры требует специального внимания к вопросам управления физиологическими процессами растений с использованием оптического излучения (ОИ) в качестве ключевого фактора. Существующий опыт применения искусственного освещения в сельском хозяйстве, особенно в светокulturе, хотя и обширен, требует дальнейшей оптимизации. Этот тип освещения позволяет создавать условия для круглогодичного производства высококачественной сельскохозяйственной продукции, повышая при этом урожайность и сокращая время выращивания. В свете современных технологий и научных разработок, задача оптимизации светового режима в с/х становится все более актуальной.

Снижение нерациональных потерь в процессе выращивания растений в светокulturе позволяет повысить коэффициент эффективности производства. Изменение режимов облучения и спектрального состава источников излучения способствует увеличению этой эффективности. Для комплексной оценки эффективности применяемых инноваций необходимо учитывать появление новых источников облучения и внесение изменений в технологию облучения. Только через научно обоснованные подходы можно корректно провести анализ результатов использования нововведений. Улучшение систем досвечивания растений можно достигнуть с помощью новых технологий, включающих использование светодиодных облучателей [6].

Исследования, проводимые в лаборатории энергоэффективных электротехнологий ИАЭП, направлены на разработку нового направления - энергоэкологии светокультуры. В рамках данных исследований изучается проблема повышения энергоэффективности производства с использованием иерархической информационной модели искусственной биоэнергетической системы (ИБЭС).

В рамках исследования энергоэффективности производства используется модель, позволяющая не только оценить данное понятие, но и проанализировать влияние на окружающую среду. При этом критерии оценки воздействия производства на окружающую среду определяются по входным и выходным потокам энергии на различных этапах энерготехнологических процессов, проводимых в рамках искусственной биоэнергетической системы [7].

Цель работы: Изучение воздействия различных доз облучения светодиодными облучателями на показатели энергоэкологичности в процессе выращивания салата.

Материал и методика исследований. Исследования проводили в закрытом помещении без доступа солнечного света на натурной модели ИБЭС [8]. Сорт салата Афицион был использован в качестве выращиваемой культуры. Исследование включало в себя анализ входящего потока вещества M_n , поступающего к растениям и включающего в себя как потоки потерь вещества M_k , так и вещества, содержащиеся в растении ΔM . Поток энергии ОИ Q_n , генерируемый облучательной установкой, представлял собой совокупность потоков - эффективно использованного при облучении Q_k , а также потерь в процессе ΔQ .

В замкнутом цикле для выращивания салата методом гидропоники с рециркуляцией питательного раствора были использованы различные светодиодные облучатели с различным спектром света, включая красный, зеленый и синий. Такой подход позволил изучить влияние различных цветов света на рост и развитие растений. Каждый спектр света имел определенную интенсивность, которая тщательно контролировалась в ходе эксперимента. Проведенные исследования позволили получить новые данные о влиянии светового спектра на процессы фотосинтеза и общую продуктивность растений в условиях гидропоники. Облучатели собственной конструкции были установлены на алюминиевом радиаторе и базировались на светодиодах марки LED STAR-3W. В соответствии с оптимальным спектром для растений энергия была распределена следующим образом: 30% - синий, 20% - зеленый и 50% - красный. Различную интенсивность освещения достигали путем изменения количества светодиодов в установке. Высота установки облучателей над растениями была одинаковой для всех вариантов и составляла 30 см.

Исследование по выращиванию салата с использованием агроперлита предполагает предварительную обработку горячей водой. Для повышения качества семян салата, они подвергались замачиванию в специальном растворе эпина. Выращивание сеянцев салата в горшочках с агроперлитом на этапе развития одного настоящего листочка является стандартной практикой для производства салатных культур. Пересаживание сеянцев в культивационные короба с постоянной циркуляцией питательного раствора проводилось на 14-16 день после всходов, когда развился второй настоящий лист. Питательный раствор, содержащий основные элементы мг/л⁻¹: N_{общ} - 160; фосфор - 140; калий - 158; кальций - 110; магний - 40, обеспечивал рН – 5,83 и ЕС – 1,73 мСм/см⁻¹.

Процедура коррекции рН питательного раствора с применением 10% раствора азотной кислоты проводилась ежедневно. Окружающая среда характеризовалась следующим образом: температура воздуха находилась в диапазоне 20-22°C, влажность воздуха составляла 55-60%, скорость движения воздуха - 0,2-0,3 м/с⁻¹. Предшествующие исследования демонстрировали потенциал данной методики в отношении выращивания салата в условиях контролируемой среды.

Для оценки экологичности продукции был проведен анализ содержания нитратов в листьях салата. Сравнение результатов проводилось с установленным стандартом качества. В ходе исследования было установлено, что содержание нитратов в листьях салата находится в пределах нормы, установленной для безопасного употребления продукции. Таким образом, можно говорить о высоком качестве продукции и ее экологичности. Данное исследование является важным шагом в обеспечении безопасности пищевых продуктов для потребителей. Его результаты могут быть использованы при разработке и контроле производства сельскохозяйственной продукции.

Коэффициент экологичности определяли по формуле:

$$K_M = \frac{M_{\text{норм}} - M_{\text{факт}}}{M_{\text{факт}}} \quad (1)$$

где $M_{\text{норм}}$ - допустимое содержание нитратного азота, мг/кг,

$M_{\text{факт}}$ - фактическое содержание нитратного азота в листьях салата, мг/кг.

Коэффициент энергоэффективности при выращивании салата в МДж/г-определяли по формуле:

$$K_Q = \frac{H}{G_{\text{сух}}} \quad (2)$$

где H - суточная доза облучения в области ФАР, МДж·м⁻²;

$G_{\text{сух}}$ - выход сухого вещества, г·м⁻².

Энергоэффективность и экологичность производства можно оценить с использованием коэффициента $K_{\text{Э}}$, МДж·г⁻¹. Для его расчета используется формула:

$$K_{\text{Э}} = K_M K_Q \quad (3)$$

Суточную дозу облучения в МДж/м² ФАР рассчитывали по формуле:

$$H = 3,6 \cdot 10^{-3} ET, \quad (4)$$

где E - облученность поверхности на уровне растений, Вт м^{-2} ,

T - фотопериод, ч.

Суточная доза облучения в вариантах опыта при уровнях облученности E : 12,5; 15; 20; 30 Вт м^{-2} и фотопериодах T : 10; 15; 20; 24 ч составила: 0,81; 0,9; 1,08; 1,44; 1,62; 1,72 и 2,59 МДж м^{-2} ФАР.

Результаты исследований и их обсуждение. Исследование воздействия различных доз облучения семян салата радиационными источниками включало испытания, направленные на анализ урожайности и содержания сухого вещества в полученных урожаях. Исследование коэффициента изменчивости массы салата в различных вариантах эксперимента подтвердило его относительную стабильность в диапазоне от 4,91 до 8,73 %. Эти данные свидетельствуют о равномерности данного параметра. Анализ показал, что относительная ошибка выборочного среднего веса салата составила от 2,17 до 3,88 %. Эти результаты подтверждают приемлемость исследования.

В результате проведенного исследования были получены данные по содержанию сухого вещества в салате, которые позволили вычислить относительную ошибку и коэффициент вариации. Установлено, что при облучении салата дозой 2,59 МДж м^{-2} ФАР достигается максимальная урожайность в размере 3,23 кг м^{-2} . Одновременно отмечено увеличение содержания сухого вещества в продукции на 5,75 %, а выход сухого вещества при 1 МДж ФАР составил 71,78 г.

Урожайность связана с пониженной активностью ассимилирующей поверхности листьев, когда дозы облучения колебались в диапазоне 0,81...1,72 МДж м^{-2} ФАР. При этом выход сухого вещества увеличивался с увеличением дозы облучения на 64,85-75,03 г на каждый 1 МДж ФАР. Содержание золы и органического вещества увеличивалось с увеличением дозы облучения. Содержание органического вещества в продукции составило 155,6 г м^{-2} (табл. 1).

Таблица 1 - Показатели качества продукции салата при разных дозах облучения

Доза облучения ФАР, МДж м^{-2}	Выход сухого вещества, МДж г^{-1}	Зола, % от сырой массы	Содерж. органического вещества, г м^{-2}	Содерж. нитратного N, мг кг^{-1}
0,81	64,85	0,27	41,04	3761,7
0,90	60,87	0,32	40,84	3865,0
1,08	87,87	0,41	75,06	3495,0
1,44	67,20	0,43	78,24	3352,2
1,62	66,63	0,49	91,81	3092,0
1,72	75,03	0,69	97,91	3525,0
2,59	71,78	0,52	155,66	3077,8

Оценка потока питательных веществ в продукции производилась на основе нитратов. Содержание нитратного азота в продукте колебалось в диапазоне от 3092 до 3077,8 мг кг^{-1} в различных условиях эксперимента. Эти изменения были связаны с воздействием различных доз облучения, которые составляли 1,62 и 2,59 МДж м^{-2} ФАР при радиации 30 Вт ч м^{-2} и различных фотопериодах - 15 и 24 часа соответственно. В ходе всех вариантов эксперимента было установлено, что концентрация нитратного азота в продукции соответствует предъявляемым санитарным требованиям.

На рисунке 1 показана зависимость коэффициента энергоэкологичности от дозы облучения.

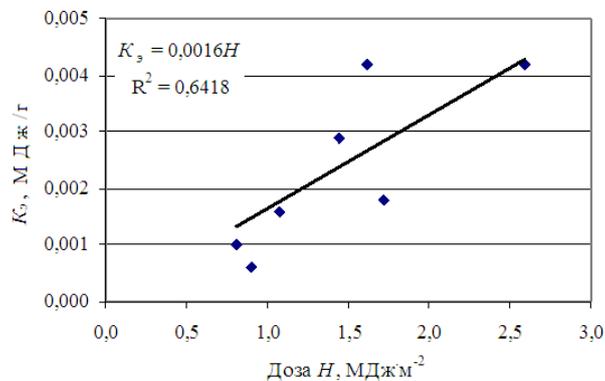


Рисунок 1 - Зависимость коэффициента энергоэкологичности от дозы облучения

При увеличении $K_э$ наблюдается четко выраженная тенденция к увеличению H . Обнаруженная закономерность может быть описана линейной моделью, выражаемой $K_э = 0,0016H$. Значение коэффициента детерминации R^2 равно 0,6418.

Заключение. В результате эксперимента было установлено, что оптимальные условия для роста и качества салата достигаются при отсутствии естественного освещения в интервале от 12,5 до 30 Вт·м⁻² и при продолжительности светового дня от 10 до 24 часов. Показатели урожайности и качества салата были наилучшими при экспозиции на уровне 2,59 МДж·м⁻² ФАР, что привело к выходу в 3,23 кг·м⁻² и содержанию влаги в растении на уровне 5,75%.

Проведенные исследования привели к выводу, что количество органических веществ в продукции составило 155,6 г·м⁻². Также использование концепции интегрального биоэкологического синтеза позволило осуществить анализ распределения потоков вещества и энергии, и оценить экологическую и энергоэффективность данной системы.

Исследование влияния дозы облучения на коэффициент ФАР показало, что увеличение дозы с 0,81 до 2,39 МДж·м⁻² сопровождается ростом коэффициента с 0,001 до 0,0042 МДж/г. Это свидетельствует о повышении коэффициента энергоэкологичности при увеличении дозы облучения. Максимальные значения коэффициента достигаются при дозах 1,62 и 2,59 МДж·м⁻², что подтверждает обнаруженную тенденцию. Однако, в целом, учитывая другие факторы, более предпочтительным является вариант облучения на уровне 2,39 МДж·м⁻².

Список источников

1. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Аюпов М.Р. Применение комбинированного облучения в светокультуре [обоснование спектрального состава светодиодного облучателя-корректора дополнительно к натриевым лампам] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14, № 2. С. 46-52.
2. Wainwright H. Environmental Impact of Production Horticulture // Horticulture: Plants for people and places, Volume 1, Edition: Frist, Chapter: Chapter 15, Publisher: Springer, Editors: Geoffrey R. Dixon, David E. Aldous, Pp. 503-522.
3. Ракутько С.А., Гулин С.В. Применение метода конечных отношений к энергетическому анализу этапов технологического процесса облучения в оптических электротехнологиях // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2024. № 1 (75). С. 141-150.
4. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Сравнительная оценка эффективности источников излучения по энергоёмкости фотосинтеза // Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 2 (12). С. 50-54.
5. Васькин А.Н., Ракутько С.А. Расчет параметров радиационной среды от светодиодного фитооблучателя // Вестник Брянской ГСХА. 2023. № 5 (99). С. 67-74.
6. Васькин А.Н., Никитин А.М., Ракутько Е.Н. Исследование эффективности использования энергии в процессе облучения растений // Вестник Брянской ГСХА. 2023. № 6 (100). С. 74-79.
7. Иерархическая информационная модель искусственной биоэнергетической системы: пат. 2562421 Рос. Федерация С2 / Ракутько С.А.; заяв. 29.01.2014; опубл. 10.09.2015.
8. Оценка энергоэкологичности светокультуры салата с использованием натурной модели искусственной биоэнергетической системы / А.П. Мишанов, А.Е. Маркова, С.А. Ракутько, Е.Н. Ракутько // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2017. № 91. С. 36-45.

Информация об авторах:

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

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

Information about the authors:

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

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

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 18.11.2024; одобрена после рецензирования 27.01.2025, принята к публикации 29.01.2025.

The article was submitted 18.11.2024; approved after reviewing 27.01.2025; accepted for publication 29.01.2025.

© Ракутько Е.Н., Васькин А.Н.