

УДК 631.172 : 574.46

**МЕТОДИКА ЭНЕРГОЭКОАУДИТА СВЕТОКУЛЬТУРЫ САЛАТА
(LACTUCA SATIVA L.)****¹Ракутько С.А., ²Васькин А.Н., ³Горбатенко Н.А., ³Забодаев Д.П.**¹*ФГБНУ «Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства» (ИАЭП)», Санкт-Петербург, e-mail: sergej1964@yandex.ru;*²*ФГБОУ «Брянский государственный аграрный университет», Брянск;*³*ФГБОУ «Мурманский государственный технический университет», Мурманск*

Рассмотрены вопросы энергоэффективности и экологичности при выращивании растений в условиях светокультуры. Раскрыты основные подходы энергоэкологии светокультуры как нового научного направления. Предложена методика энергоэкологического обследования светокультуры, направленная на получение достоверной информации о динамике потоков продуктов фотосинтеза в растениях, выращиваемых в заданных условиях окружающей среды под действием потока излучения с заданными качественными и количественными показателями. Об уровне энергоэкологичности светокультуры судят по форме кривой годографа, построенного в координатах приращений массы сухого вещества, накопленного в листьях растения, и дозы фотонного потока оптического излучения, потребленной растением в течение периода выращивания. Исследовали энергоэкологичность светокультуры салата, выращиваемого под натриевыми и индукционными лампами. Выявлены конкретные закономерности влияния различия в спектральном составе потока энергии на различия в потоках получаемого в процессе фотосинтеза вещества для светокультуры салата. Эксперимент показал, что энергоэкологичность светокультуры в существенной мере зависит от типа применяемого источника излучения.

Ключевые слова: энергоэкологичность, энергоэкоаудит, светокультура, салат**THE TECHNIQUE OF ENERGY AND ECOLOGICAL ESTIMATION OF LETTUCE
(LACTUCA SATIVA L.) PLANT LIGHTING****¹Rakutko S.A., ²Vaskin A.N., ³Gorbatenko N.A., ³Zabodaev D.P.**¹*Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP), St. Petersburg, e-mail: sergej1964@yandex.ru;*²*Bryansk State Agrarian University, Bryansk;*³*Murmansk State Technical University, Murmansk*

The paper deals with the issues of energy and environmental efficiency of plant cultivation under indoor plant lighting as a new scientific field and outlines the main approaches to address these issues. The technique of energy and ecological estimation of indoor plant lighting is offered with the aim to obtain reliable information on the dynamics of the flow of photosynthesis products in plants grown under specified environmental conditions under the radiation flux with predetermined qualitative and quantitative characteristics. The level of energy and ecological efficiency of indoor plant lighting is estimated by the hodograph curve shape. The points of this curve are plotted in the coordinates of increments of dry matter, accumulated in plant leaves, and the increments of optical radiation flow dose up-taken by plants during the growing period. The energy and ecological efficiency (EEE) of lettuce grown under sodium and induction lamps were studied. It is shown that the difference in the light quality of the energy flux results in differences in the matter streams produced during photosynthesis. The experiment proved that the level of indoor plant lighting EEE essentially depends on the type of irradiation source.

Keywords: energy and ecological efficiency, energy and ecological estimation, indoor plant lighting, lettuce

Сельское хозяйство представляет собой достаточно энергоемкую отрасль. Ее отличие от промышленности объясняется наличием в производственном процессе биоэнергетической составляющей – земли, растений, животных, которая, с одной стороны, выступает как потребитель энергии, а с другой – как ее производитель в виде новых энергоносителей (продовольствия и побочных продуктов) [1]. С другой стороны, энергоэффективное производство требует внедрения современных специальных энергоэкологических технологий. В условиях инновационного развития АПК актуальным становится обеспечение энергосбережения

и повышения энергоэффективности. Оценка экологичности хозяйственных систем возможно путем структурно-динамического анализа, исследующего конкретные взаимосвязи структурных и динамических форм развития многофакторных систем на фактическом материале при помощи мер динамики и структурных формирований разного уровня общности [2].

Достоверная картина энергоэффективности и экологичности технологических процессов может быть получена путем проведения энергоэкоаудита.

Светокультура – технологический процесс выращивания растений с целью по-

лучения урожая в сооружениях с контролируемыми экологическими факторами с применением дополнительного к естественному облучения от источников света либо только с применением источников света. Важнейшим процессом, протекающим в зеленом листе растения, является фотосинтез, который заключается в формировании потока органического вещества под действием потока энергии оптического излучения (фотонов) в области фотосинтетически активной радиации (ФАР).

Энергоэффективность светокультуры – использование меньшего количества энергии для достижения того же уровня продуктивности фотосинтеза при существующем уровне развития технического и технологического обеспечения светокультуры и соблюдении требований к охране окружающей среды. Показателем энергоэффективности является доля потока энергии, используемой для получения полезной продукции, от общего количества затрачиваемой энергии.

Энергоаудит (энергетическое обследование) светокультуры – измерительная процедура определения численных показателей, характеризующих распределение потоков энергии, производимая в целях обеспечения нормируемых параметров микроклимата и режимов технологического процесса выращивания растений.

Экологичность светокультуры – измеряемые и (или) оцениваемые свойства процесса выращивания растений в контролируемых условиях, представляющие его естественную или намеренно обеспеченную способность при данном способе его проведения оказывать воздействие на окружающую среду лишь в допустимых пределах.

Экоаудит (экологическое обследование) светокультуры – оценка соблюдения нормативных требований в области охраны окружающей среды и получения экологически чистой продукции.

Энергоэкологичность светокультуры характеризует взаимосвязь потока энергии оптического излучения и потоков продуктов фотосинтеза в растениях [3].

Комплексный показатель энергоэкологичности светокультуры учитывает входные и выходные потоки вещества и энергии.

Энергоэкоаудит (комплексное энергоэкологическое обследование) светокультуры – применение инструментальных и дистанционных методов измерения, вычислительных процедур по получению достоверной информации о динамике потоков продуктов фотосинтеза в растениях, выращиваемых в заданных условиях окружающей среды под действием потока излучения с заданными качественными и количествен-

ными показателями, проводимых для оценке эффективности и последующей оптимизации культивационного процесса [4].

Растение является постоянно растущим и развивающимся биологическим объектом. При энергоэкоаудите недостаточно выявить только итоговые параметры растения, например, его биометрию (массу и размеры). Необходимо в наглядном и информативном виде отразить жизненный путь, «траекторию» роста и развития растения, от момента появления всходов до товарного растения. Эта траектория должна количественно характеризовать потоки продуктов фотосинтеза, вызванные воздействием на растение потока оптического излучения.

Основным ассимилирующим органом, в котором под действием оптического излучения образуются органические вещества, служащие структурно – энергетическим материалом для всего растения, является лист. Потоки вещества и энергии являются предметом изучения энергоэкологии светокультуры [5].

Объективным способом оценки энергоэкологичности светокультуры является энергоэкоаудит. В процессе энергоэкоаудита экспериментально получают данные об изменении содержания сухого вещества, накапливаемого в листьях растения в течение периода выращивания под влиянием дозы фотонного потока оптического излучения, потребленной растением в период выращивания [6].

Важным является не только получение достоверной информации о потоках вещества, синтезированного под действием энергии фотонного потока оптического излучения, но и ее представление в наглядном, информативном и легко интерпретируемом виде. Для этих целей наиболее удобно графическое отображение взаимосвязи влияния дополнительной дозы фотонного потока излучения на приращение количества синтезированного в листе растения сухого вещества в различные моменты времени периода выращивания растения.

Цель работы – представление результатов исследований по изучению энергоэкологичности светокультуры салата, выращиваемого в стационарных условиях.

Материалы и методы исследования

В лаборатории энергоэффективных электро-технологий ИАЭП (Санкт-Петербург) производили энергоэкоаудит светокультуры салата сорта Афицион, выращиваемого в культивационной установке [7]. Параметры микроклимата и режим выращивания поддерживали оптимальными согласно нормативам. Салат (*Lactuca sativa L.*) был выбран в данном исследовании по причине его быстрого роста и чувствительности к спектру ОИ [8]. Посев семян салата

был произведен 11.11.2015 г. в ящик с подготовленным торфом. Полные всходы появились 13.11.2015 г. Первый настоящий лист сформирован 19.11.2015 г., после чего произвели распикировку по три растения на каждый пластиковый контейнер с торфом (массой 280–290 г) и выставили контейнеры под облучение. Массовое появление второго настоящего листа (более 70%) наблюдалось 21.11.2015 г., третьего листа – 25.11.2015 г., четвертого листа – 28.11.2015 г. в возрасте 16 дней. Биометрические показатели начали измерять с 18-го дня после пикировки.

Исследования проводились в лабораторном помещении без естественного освещения площадью 18 м² с температурой воздуха +20–+22 °С; влажностью 55–60% и подвижностью воздуха 0,05–0,25 м/с. Влажность субстрата в контейнерах поддерживали в пределах 70–75% дозированным поливом водой с температурой 24–25 °С. Подкормку рассады проводили периодически 0,1–0,15% растворами удобрений K_2HPO_4 , MgSO_4 и KNO_3 .

Сравнительный эксперимент проводили в двух зонах помещения, разделенных светонепроницаемой ширмой. Растения салата на рабочих столах под облучателями располагали на площади, неравномерность облучения по которой составляла не более 20%. Первоначально было размещено по 20 контейнеров с растениями. Облучение производили круглосуточно (фотопериод $\Phi\Pi = 24$ ч). В процессе эксперимента в обеих зонах поддерживали одинаковый уровень освещенности (10 кЛк) изменением высоты подвеса облучателей над верхушками растений. Перспективным типом источников излучения для светокультуры являются люминесцентные безэлектродные (индукционные) лампы (ИЛ), спектр излучения которых можно задавать составом применяемого люминофора. В первой зоне использовали облучатель собственной конструкции на базе ИЛ мощностью 400 Вт, размещенный на высоте 1,17 м.

Натриевые лампы (НА) обладают высокой энергоэффективностью, значительным сроком службы и излучают в широком диапазоне спектра, удовлетворяющем требования многих видов растений, поэтому во второй зоне использовали НА лампу той же мощности в облучателе ЖСП 30, размещенном на высоте 1,07 м.

Периодически отбирали экземпляры растений, измеряли содержание сухого вещества и площади листьев. Строили (в относительных единицах) зависимость дозы фотонного потока оптического излуче-

ния, потребленной растением в период выращивания $H = f(t)$ и кривую изменения содержания сухого вещества, накапливаемого в листьях растения в течение периода выращивания $M = f(t)$, показанные на рисунке, а. Строили кривые зависимости приращений массы сухого вещества $dM = f(t)$ и дозы, полученной растением $dH = f(t)$, показанные на рисунке, б. Строили годограф $dH = f(dM)$, показанный на рисунке, в. Поскольку годограф построен для светокультуры с оптимальными условиями выращивания, его принимали за эталонный. При выращивании салата в других условиях по отклонению годографа, полученного при энергоэкоаудите от эталонного, полученного в нормированных условиях, судили об энергоэкологичности светокультуры.

Годограф, полученный для растений, выращиваемых в стандартных, наиболее оптимальных условиях, является эталонным. Любые отклонения в условиях выращивания растений (температура, микроклимат, питание, облучение) в течение периода выращивания растений оказывают влияние на процесс фотосинтеза и фотоморфогенеза. Особенно важно выявить влияние отклонения дозы фотонного потока оптического излучения на накопление сухого вещества. Такие отклонения, произошедшие за период выращивания растений, находят свое отражение в изменении формы годографа по сравнению с эталонным. Построив по полученным экспериментальным данным кривую годографа, по степени отклонения этой кривой от эталонной можно судить об энергоэкологичности светокультуры.

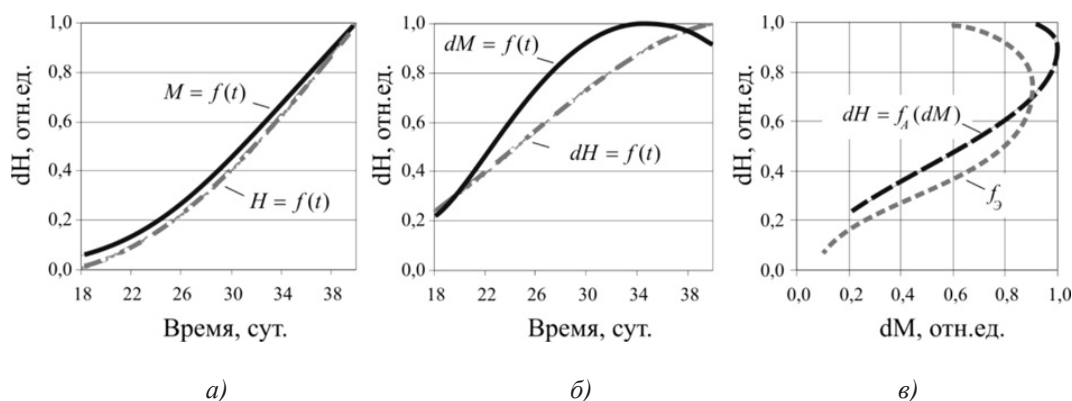
Численно степень отклонения кривых можно оценить по величине нормированной суммы квадратов разностей

$$HCKP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(\Delta M_i - \Delta M_i^*)^2 + (\Delta H_i - \Delta H_i^*)^2}, \quad (1)$$

где n – количество пар точек для сравнения годографов; ΔM_i , ΔH_i – значения приращений массы сухого вещества и дозы фотонного потока излучения для сравниваемого годографа;

ΔM_i^* , ΔH_i^* – значения приращений массы сухого вещества и дозы фотонного потока излучения для эталонного годографа.

Чем меньше значение принимает величина $HCKP$, тем меньше сравниваемый годограф отличается от эталонного. Тем самым данная величина является критерием энергоэкологичности при сравнении вариантов в целях оптимизации культивационного процесса [9].



К построению годографа взаимосвязи потоков вещества и энергии (пояснения в тексте)

Интегральные показатели светокультуры

Показатель	ИС		Δ, %
	НА	ИЛ	
Фотонная облученность, мкмоль·м ⁻² ·с ⁻¹	85,89	102,31	19,1
Суммарная площадь листьев на растении*, см ²	793,56	716,39	– 9,7
Сырая масса листьев*, г	24,35	22,75	– 6,6
Количество сухого вещества*, г	1,66	1,46	– 12,5
Доза облучения*, моль	4,44	4,71	6,1
Продуктивность фотосинтеза по сырой массе, г·сут ⁻¹ ·м ⁻²	1,39	1,37	– 1,7
Продуктивность фотосинтеза по сухому веществу, мг·сут ⁻¹ ·м ⁻²	20,35	21,34	4,9
Энергоемкость фотосинтеза по сырой массе, моль·г ⁻¹	0,18	0,21	13,6
Энергоемкость фотосинтеза по сухому веществу, моль·г ⁻¹	2,67	3,24	21,2
НСКР годографов, отн.ед.	0,0016	0,0039	–

Примечание. * на одно растение.

**Результаты исследования
и их обсуждение**

Интегральные показатели светокультуры для растений салата в возрасте 39 дней приведены в таблице.

Итак, создаваемые условия облучения от применяемых в эксперименте источников характеризуются существенной разницей как в спектре, так и по интегральной облученности. При одинаковой освещенности, задаваемой в световой системе единиц, в зоне выращивания растений под ИЛ формируется фотонная облученность на 19,1% больше, чем под НА.

Такие различия в потоках энергии ОИ, при прочих равных экологических условиях выращивания, повлияли на различия в потоках синтезируемого в процессе фотосинтеза вещества. За счет большей фотонной облученности доза, воспринимаемая листьями салата, при использовании ИЛ на 6,1% больше, чем под НА, несмотря на то, что суммарная площадь листьев меньше почти на 10%. При этом величина продуктивности фотосинтеза по сухому веществу больше почти на 5%, а сырая масса листьев и количество сухого вещества меньше соответственно на 6,6% и 12,5%. Зависимость продуктивности фотосинтеза по сырой массе от типа ИС практически отсутствует. Однако энергоемкость фотосинтеза по сырой массе и сухому веществу при использовании ИЛ существенно выше, чем при использовании НА (соответственно на 13,6% и 21,2%).

При этом близость кривой годографа к эталонной при использовании НА больше, чем при использовании ИЛ, что говорит о большей энергоэкологичности светокультуры с применением этих источников света.

Заключение

Результаты экспериментов позволили выявить закономерности роста и энергетики процесса облучения для светокультуры салата, выращиваемой в стационарных условиях, а так

же отработать методику оценки энергоэкологичности (энергоэкоаудита) светокультуры.

В условиях востребованности строительства новых тепличных комбинатов и реконструкции уже существующих, роста тарифов, постоянного сокращения запасов природных энергоресурсов и необходимости снижения вредных выбросов в окружающую среду, применение энергетического аудита позволит оперативно и эффективно решать эти задачи.

Список литературы

1. Возмилов А.Г., Каримов В.Н., Сажин В.Н. Энергетическая оценка производства сельскохозяйственной продукции // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – № 12. – С. 3–5.
2. Литовка О.П., Дедов Л.А., Павлов К.В., Федоров М.М. Структурно-динамический подход к исследованию эколого-экономических систем // Экономика промышленности. – 2005. – т. 29. – № 3. – С. 52–63.
3. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Основы энергоэкологии светокультуры как актуального научного направления // IX Межд. научно-практич. конф. «Аграрная наука – сельскому хозяйству» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет», 2016. – С. 421–423.
4. Ракутько С.А. Оценка экологичности и энергоэффективности предприятия АПК с помощью иерархической модели искусственной биоэнергетической системы // Региональная экология. – 2015. – № 6 (41). – С. 58–66.
5. Ракутько С.А. Научные основы энергоэкологии светокультуры / Сб. статей межд. науч.-практ. конф. «Вавиловские чтения – 2015». – Саратов, Буква, 2015. – С. 228–229.
6. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Васькин А.Н., Капошхо Д.А. Энергоэкологическое обследование светокультуры салата (*Lactuca Sativa L.*) на конвейерной линии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 6-1. – С. 27–31; URL: <http://applied-research.ru/ru/article/view?id=9543> (дата обращения: 04.06.2016).
7. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Васькин А.Н. Энергоэффективность использования потока излучения листьями салата (*Lactuca sativa L.*) при облучении индукционными лампами // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2016. – № 42. – С. 382–389.
8. Васькин А.Н., Ракутько Е.Н. Вопросы экологичности и энергоэффективности светокультуры на примере салата (*Lactuca sativa L.*) // Всероссийская научно-практич. конф. «Молодежная наука 2016: технологии, инновации», 14-18 марта 2016 г. В 3 ч. Ч. 1. – Пермь: Изд-во ИПЦ «Прокрость», 2016. – С. 141–144.
9. Rakutko S., Rakutko E., Kaposhko D., Vaskin A. Monitoring technique of energy and ecological efficiency of indoor plant lighting. 15th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development» 25-27.05.2016. – p. 95–101; URL: <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2016/Papers/N016.pdf> (дата обращения: 09.06.2016).