

УДК 631.172 : 574.46

ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ СВЕТОКУЛЬТУРЫ САЛАТА (*LACTUCA SATIVA* L.) НА КОНВЕЙЕРНОЙ ЛИНИИ

¹Ракутько С.А., ¹Ракутько Е.Н., ²Васькин А.Н., ²Капошко Д.А.

¹ФГБНУ «Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства» (ИАЭП), Санкт-Петербург, e-mail: sergej1964@yandex.ru;

²ФГБОУ «Брянский государственный аграрный университет», Брянск

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. Методика апробирована для салатного отделения ЗАО Агрофирмы «Выборжец» (Санкт-Петербург). Для исследуемых условий продуктивность фотосинтеза по сухой массе составила 25,12 мгсут⁻¹м⁻², энергоёмкость фотосинтеза – 4,48 мольг⁻¹. Полученная кривая годографа может быть принята за образцовую при оценке энергоэкологичности выращивания салата в различных условиях.

Ключевые слова: светокультура, гидропоника, салат, энергоэкологичность, кривая роста, годограф

ENERGY AND ECOLOGICAL ESTIMATION OF LETTUCE (*LACTUCA SATIVA* L.) FLOW-LINE CULTIVATION IN INDOOR PLANT LIGHTING

¹Rakutko S.A., ¹Rakutko E.N., ²Vaskin A.N., ²Kaposhko D.A.

¹Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP), St. Petersburg, e-mail: sergej1964@yandex.ru;

²Bryansk State Agrarian University, Bryansk

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 technique was tested in the lettuce growing section of the greenhouse complex «Vyborzec» (St. Petersburg). For conditions under investigation the photosynthesis productivity on dry basis was found to be 25,12 mg day⁻¹ m⁻², the photosynthesis energy-output ratio was 4,48 mol g⁻¹. The resulting hodograph may be taken as a reference in the assessment of energy and ecological efficiency of lettuce growing under different conditions.

Keywords: indoor plant cultivation, hydroponics, lettuce, energy and ecological efficiency, growth curve, hodograph

Общемировой тенденцией последнего времени является рассмотрение проблем энергоэффективности и экологии технологических процессов в тесной взаимосвязи. Этому способствуют необходимость обеспечения энергосбережения, ужесточение экологических норм и повышение требований к качеству готовой продукции. Достижения фундаментальных наук позволяют разработать энергоэффективные агротехнологии с минимальным негативным воздействием на окружающую среду [1].

Оптическое излучение (ОИ) выступает главным первичным источником энергии для формирования продуктивности растений, которая зависит от всех параметров излучения и в первую очередь – от его спектрального состава [2]. Важнейшим

процессом, протекающем 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).

Важнейший вид технологического процесса в аграрном секторе – светокультура, т.е. выращивание растений с целью получения урожая в сооружениях с контролируемыми экологическими факторами с применением дополнительного к естественному облучения от источников света либо только с применением источников света [3]. Энергоэффективность светокультуры заключается в использовании меньшего количества энергии для достижения того же уровня

продуктивности фотосинтеза при существующем уровне развития технического и технологического обеспечения производства и соблюдении требований к охране окружающей среды. Численно энергоэффективность характеризуется долей потока энергии, используемой для получения полезной продукции, от общего количества затрачиваемой энергии. Измерительной процедурой определения численных показателей, характеризующих распределение потоков энергии, производимой в целях обеспечения нормируемых параметров микроклимата и режимов технологического процесса выращивания растений является энергоаудит (энергетическое обследование) светокультуры.

Под экологичностью светокультуры понимаются 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. Оценка соблюдения нормативных требований в области охраны окружающей среды и получения экологически чистой продукции производится в ходе эоаудита (экологического обследования) светокультуры.

В лаборатории энергоэффективных электротехнологий ИАЭП (Санкт-Петербург) на стыке физиологии растений, физики (светотехники) и экологии разработаны основы нового комплексного научного направления – энергоэкологии светокультуры [4]. Сформулированы теоретические основы и накоплен практический опыт энергоэкологического анализа и проектирования тепличных облучательных установок [5] на основе разработанной иерархической модели искусственной биоэнергетической системы (ИБЭС) как совокупности технических и энергетических устройств, технологических процессов и аппаратов, биологических объектов (растений), применяемых в светокультуре для обеспечения требуемых технологических операций по получению готовой продукции.

Особенность энергоэкологии светокультуры как научного направления заключается в рассмотрении параметров энергоэффективности и экологичности с позиций прикладной теории энергосбережения в энерготехнологических процессах (ПТЭТП), объектом изучения которой являются закономерности потоков субстанции (вещества и энергии) в ИБЭС [6]. В качестве системного интегративного критерия оптимальности выступает энергоэкологичность, распространяемая при декомпози-

ции на локальные критерии оптимальности в соответствующих задачах оптимизации отдельных иерархических уровней модели. На основе полученных теоретических представлений разработаны практические приемы проектирования и оценки эффективности отдельных энергосберегающих мероприятий [7], обоснованы энергоэкологичные режимы работы облучательных установок и алгоритмы управления их энергоэффективностью и экологичностью [8, 9]. Энергоэкологичность светокультуры характеризует взаимосвязь потока энергии ОИ и потоков продуктов фотосинтеза, образуемых в растениях. Комплексный показатель энергоэкологичности светокультуры учитывает входные и выходные потоки вещества и энергии [10].

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

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 количественными показателями, проводимых для оценки эффективности и последующей оптимизации культивационного процесса.

Известен способ комплексного энергоэкологического обследования энергетических и промышленных объектов, включающий измерение энергопроизводственных и экологопроизводственных показателей, отражающих потоки вещества и энергии, определение и комплексную оценку коэффициентов энергоэффективности и экологической обстановки на объекте, разработку комплекса мер, одновременно обеспечивающих снижение фактического расхода энергоресурсов и уменьшение удельного количества выбросов на единицу продукции [11]. Недостатком способа является использование линейных регрессионных зависимостей потоков вещества и энергии от производительности, которыми невозможно описать динамику роста растения, а так же раздельный учет энергопроизводственных и экологопроизводственных показателей.

Цель работы – представление результатов производственных исследований по изучению энергоэкологичности светокультуры салата, выращиваемого на конвейерной линии.

Материалы и методы исследования

Салат (*Lactuca sativa* L.) пользуется большой популярностью у потребителей. Ценность и качество салата зависят от условий его выращивания. Зимний период не благоприятен для выращивания растений по причине недостатка солнечного света и неудовлетворительной освещенности – важнейшего фактора, определяющего рост растения. По этой причине при выращивании салата необходимо использовать дополнительное облучение [12]. В Европе ежегодно производят около 3 млн т салата, причем площади под салатом постоянно растут. Для России необходимо производство салата на уровне 15 тыс. т в год на площади 700–800 га. Климат не позволяет производить салат круглогодично в открытом грунте [13]. Технология выращивания салата гидропонным методом наиболее передовая, интенсивная и экологически чистая.

Исследования проводили в салатном отделении ЗАО Агрофирмы «Выборжец» (г. Санкт-Петербург). В салатном отделении размещено две конвейерных линии типа DGS (Danish Greenhouse Supply). Размеры линии: длина 110 м, ширина 18 м. Облучательная установка выполнена на облучателях ЖСП 64-600-002 с ЭПРА. Высота подвеса 2,5 м. Всего в отделении размещено 40 рядов по 8 шт в ряду. Средняя освещенность в зоне выращивания растений составляет 10 клк, фотонная облученность 140 мкмоль с⁻¹ м⁻². Температура воздуха поддерживается на уровне 20 °С, влажность 51–53 %, скорость 0,25–0,6 м с⁻¹. В начале салатной линии горшечки с 10-ти дневной рассадой по три растения в каждом выставляются на лотки. По мере роста растений желоба, в которых расположены горшечки, продвигаются вдоль конвейерной линии. Общую длину конвейера $L = 110$ м от начального лотка разделили на $m = 5$ интервалов, получив шесть точек для измерения вдоль конвейера, включая первый и последний лотки (шаг между точками составляет $\Delta l = L/m = 22$ м. Период выращивания как время, в течение которого начальный лоток перемещается до конца конвейера, составляет $T_B = 20$ дней. Скорость движения конвейера $v = L/T_B = 5,5$ м с⁻¹. Расстояния от начала линии до точек для измерений l_i составляют 0; 22; 44; 66; 88 и 110 м. Растения в точках имеют возраст T_n соответственно 10; 14; 18; 24; 26 и 30 дней.

Горшечки с салатом рандомизированно отбирали с лотков вдоль их длины в количестве по 3 шт, что давало для исследований 9 растений каждого возраста.

Использовали модель роста и развития растения, учитывающую динамику изменения площади каждого листа растения и его массы в процессе выращивания [14]. Листья с растений одного возраста разделяли на группы, в соответствии с их номером n в порядке появления на стебле. Фиксировали количество листьев на растении N , их площадь S_n , сырую массу M_n^n и выход сухого вещества m_n^{cyx} .

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные по экспериментальным данным значения суммарной площади всех листьев S_Σ , массы всего растения M_Σ^n и выхода сухого вещества m_Σ^{cyx} аппроксимированы кривыми Гомпертца по методу наименьших квадратов

$$Y = Y_0 + Y_{\max} e^{-e^{-B(t-T_m)}}, \quad (1)$$

где Y – моделируемый параметр;
 Y_0 – начальное значение параметра Y ;
 $Y_{\max}$ – конечное значение моделируемого параметра;
 B – относительная скорость роста на момент времени T_m ;
 T_m – момент времени, когда абсолютная скорость роста максимальна;
 t – текущее значение времени.

Значения коэффициентов показаны в табл. 1.

Таблица 1
Значения коэффициентов для кривых Гомпертца

Кривая	Y_0	$Y_{\max}$	B	T_m
Площади листьев $S_\Sigma = f(t)$	0,0	1400,1	0,12	20,5
Сырой массы $M_\Sigma^n = f(t)$	0,0	61,9	0,11	22,1
Сухого вещества $m_\Sigma^{cyx} = f(t)$	0,1	2,3	0,17	22,3

По кривой $S_\Sigma = f(t)$ строили кривую зависимости приращения площади листьев от времени $\Delta S = f(t)$. Значения приращения дозы потока ОИ вычисляли по формуле

$$\Delta H(t) = \Delta T \cdot E^\Phi(t) \cdot \Delta S(t), \quad (2)$$

где ΔT – интервал по оси времени,
 $E^\Phi(t)$ – динамика изменения фотонной облученности в зоне растений в процессе выращивания (принималась постоянной).

В параметрическом виде кривые $dM = f(t)$ и $dH = f(t)$ показаны на рис. 1.

Исключая параметр времени t , по полученным кривым строили годограф $dH = f(dM)$, показанный на рис. 2.

Форма годографа отражает «траекторию» роста и развития растения в процессе выращивания через взаимосвязь потоков вещества и энергии. По форме годографа можно судить об энергоэкологичности светокультуры. Интегральные показатели светокультуры в конце цикла выращивания (в расчете на одно растение салата) приведены в табл. 2.

Для характеристики энергоэффективности процесса преобразования вещества при фотосинтезе использовали величину энергоёмкости фотосинтеза ЭФС [14]. В соответствии с физическим смыслом она определяется как количество энергии, затраченной на единицу массы синтезируемого сырого или сухого вещества, моль г⁻¹. Чистая продуктивность фотосинтеза представляет собой массу накопленного органического вещества в единице площади листа за определенное время для всех N листьев растения, г м⁻² сут⁻¹. Найденные численные значения могут быть использованы при сравнительной оценке энергоэкологичности выращивания салата в различных условиях.

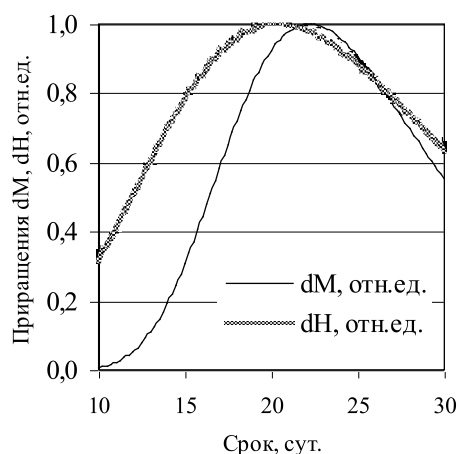


Рис. 1. Зависимости приращений массы и дозы излучения от времени

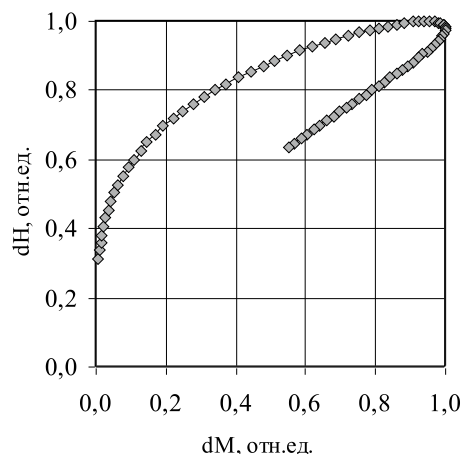


Рис. 2. Кривая годографа

Таблица 2

Интегральные показатели светокультуры

Показатель	Значение
Суммарная площадь листьев на растении S_{Σ} , см ²	1018,80
Сырая масса листьев $M_{\Sigma}^{\text{л}}$, г	40,685
Количество сухого вещества $M_{\Sigma}^{\text{сух}}$, г	1,82
Доза облучения P_{Σ} , моль	8,16
Продуктивность фотосинтеза по сырой массе, гсут ⁻¹ м ⁻²	1,13
Продуктивность фотосинтеза по сухому веществу, мгсут ⁻¹ м ⁻²	25,12
Энергоемкость фотосинтеза по сырой массе, мольг ⁻¹	0,20
Энергоемкость фотосинтеза по сухому веществу, мольг ⁻¹	4,48

Заключение

Результаты экспериментов позволили выявить закономерности роста и энергетики процесса облучения для светокультуры салата, выращиваемой на конвейерной линии, а так же отработать методику оценки энергоэкологичности (энергоэкоаудита) светокультуры.

Методика заключается в том, что в течение периода выращивания растений фиксируют динамику изменения фотонной облученности в зоне выращивания растений во времени, производят отбор экземпляров растений с различным возрастом, измеряют биометрические показатели растений, определяют динамику изменения дозы фотонного потока оптического излучения и динамику изменения содержания сухого вещества, накапливаемого в листьях растения в течение периода выращивания, об уровне энергоэкологичности светокультуры судят по форме кривой годографа, определяемого его характерными точками, построенного в координатах приращений массы сухого вещества

и дозы фотонного потока оптического излучения. Результаты энергоэкоаудита могут быть использованы для оптимизации процесса выращивания растений по критерию минимальных отклонений энергоэкологичности путем варьирования параметров облучения, условий окружающей среды и других факторов. 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 энергоэкологического аудита позволит оперативно и эффективно решать эти задачи.

Авторы выражают глубокую признательность руководству ЗАО Агрофирмы «Выборжец» за предоставленную возможность проведения измерений, а так же научному консультанту, д.б.н А.Л. Швалевой и главному инженеру-электрику А.К. Заргарову за консультирование по вопросам светокультуры.

Список литературы

1. Свентицкий И.И. Теоретические начала агроинженерных и аграрно-экологических знаний / И.И. Свентицкий, А.М. Башилов, А.Н. Обыкновенный, Е.О. Алхазова // Достижения науки и техники АПК. – 2009. – № 12. – С. 53–55.
2. Ракутько С.А. Спектральные отклонения и энергоёмкость процесса облучения растений / С.А. Ракутько // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2008. – № 10. – С. 156–160.
3. Клешнин А.Ф. Растение и свет. Теория и практика светокультуры растений / А.Ф. Клешнин. – М., 1954. – 456 с.
4. Ракутько С.А. Научные основы энергоэкологии светокультуры / Сб. статей межд. науч.-практ. конф. «Вавиловские чтения – 2015». – Саратов, Бука, 2015. – С. 228–229.
5. Ракутько С.А., Судаченко В.Н., Маркова А.Е. Оценка эффективности применения оптического излучения в светокультуре по величине энергоёмкости // Плодоводство и ягодоводство России. – 2012. – Т. 33. – С. 270–278.
6. Ракутько С.А. Прикладная теория энергосбережения в энерготехнологических процессах АПК: основные положения и практическая значимость // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2009. – № 6. – С. 129–136.
7. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Транчук А.С. Применение иерархической модели искусственной биоэнергетической системы для оценки экологичности и энергоэффективности светокультуры // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2015. – № 40. – С. 262–268.
8. Патент РФ 2115293. Способ эксплуатации газоразрядных ламп в теплице / Карпов В.Н., Ракутько С.А., Шарупич В.П., Немцев Г.Г. // №92015195/13; заявл. 28.12.92; опубл. 20.07.98.
9. Патент РФ 2357342. Способ энергосбережения в энерготехнологических процессах / Карпов В.Н., Ракутько С.А. // №2008115845(017799); заявл. 21.04.08., опубл. 25.05.2009.
10. Ракутько С.А., Бровцин В.Н., Мишанов А.П., Маркова А.Е., Ракутько Е.Н. Оценка экологичности и энергоэффективности предприятия АПК с помощью иерархической модели искусственной биоэнергетической системы // Региональная экология. – 2015. – № 6 (41). – С. 58–66.
11. Патент РФ № 2439625. Способ комплексного энергоэкологического обследования энергетических и промышленных объектов / Федоров М.П. и др. Заявка №2010102375/28, 25.01.2010.
12. Adamicki F., Nawrocka B., Badelek E., Robak J., Rogowska M., Stępowaska A. 2005. Methods of Integral Lettuce Production Under Cover. Main Inspectorate of Plant Health and Seed Inspection, Warsaw.
13. Салат – самая выгодная овощная культура. Аналитический обзор об агротехнике, развитии отрасли и рыночных перспективах культуры. <http://www.agroxxi.ru/> 3.04.2012.
14. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Сравнительная оценка эффективности источников излучения по энергоёмкости фотосинтеза // Инновации в сельском хозяйстве. – 2015. – № 2 (12). – С. 50–54.