



Моделирование и численный анализ энергоэкологичности светокультуры

Сергей Анатольевич Ракутько,

доктор технических наук, главный научный сотрудник, e-mail: sergej1964@yandex.ru;

Елена Николаевна Ракутько,

научный сотрудник

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального агроинженерного центра ВИМ, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Реферат. Для разработки теории и практики управления процессами в теплице необходимо создать математическую модель светокультуры. (*Цель исследования*) Разработать методику моделирования и анализа энергоэкологичности светокультуры. (*Материалы и методы*) Провели экспериментальное подтверждение предложенной методики для светокультуры рассады томата, выращиваемой в лабораторных условиях с контролируемыми параметрами среды. Использовали облучатель, состоящий из светодиодной матрицы с вторичной оптикой и драйвером. Фотопериод составлял 16 часов. Эксперимент завершили на 46 сутки. Методика включает анализ эффективности преобразования энергии на различных этапах в блоках модели искусственной биоэнергетической системы светокультуры: источник электрического питания; источник излучения; оптическая часть; пространственное распределение потока; поверхностное распределение потока; растение. Предложили формулы для вычисления энергоемкости каждого из блоков искусственной биоэнергетической системы светокультуры. Выявили, что для принятых по экспертным оценкам значений энергоемкости каждого блока общая энергоемкость составляет 0,32-2,27 мегаджоуля на один грамм сырой массы растения, то есть различается практически на порядок, в зависимости от конкретной реализации технологии светокультуры. Показали, что оптимизация не сводится к последовательному выбору на каждом этапе варианта с наименьшим значением энергоемкости, но требует поиска оптимального маршрута на графе вариантов. (*Результаты и обсуждение*) Для условий эксперимента общая энергоемкость искусственной биоэнергетической системы светокультуры составила 3,77 мегаджоуля на один грамм сырой массы растения. Причина низкой эффективности – неудовлетворительная фотонная отдача светодиодной матрицы и малая продуктивность фотосинтеза в растении. (*Выводы*) Разработанная методика моделирования и анализа энергоэкологичности светокультуры позволила оценить возможности энергосбережения на каждом этапе преобразования энергии и вещества в светокультуре. Теоретически возможное снижение потерь в источнике электрического питания составляет 22 процента; в оптической части – 14 процентов; при формировании пространственного распределения потока – 16 процентов; поверхностного распределения потока – 10 процентов. Возможность повышения эффективности источника излучения зависит от достигнутого уровня техники, который в настоящее время обеспечивает отдачу не менее 2,5 микромоля с одного джоуля. Для повышения продуктивности светокультуры необходимо точное согласование параметров светового режима и требований растений.

Ключевые слова: тепличное овощеводство, культивационные сооружения, энергоэкология светокультуры, энергоэффективность производства.

■ **Для цитирования:** Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Моделирование и численный анализ энергоэкологичности светокультуры // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №3. С. 11-17. DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-3-11-17.

Simulation and Numerical Analysis of Energy-and-Ecological Compatibility of Indoor Plant Lighting

Sergei A. Rakutko,

Dr.Sc.(Eng.), chief research engineer,
e-mail: sergej1964@yandex.ru;

Elena N. Rakutko,

research engineer

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – Branch of of FSAC VIM, Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. To develop the theory and practice of operation procedures in a greenhouse, a mathematical model of indoor plant lighting is required. (*Research purpose*) Development of a simulation and analysis technique of energy-and-ecological compatibility of indoor plant lighting. (*Materials and methods*) The authors experimentally verified the proposed technique for the indoor plant lighting of tomato seedlings grown under laboratory conditions with controlled environmental parameters. An irradiator consisting of a LED matrix with secondary optics and a driver was used. The photoperiod amounted to 16 hours. The experiment was completed for 46 days. The technique includes an analysis of the energy conversion efficiency at various stages in the blocks of the artificial bioenergy system of indoor plant lighting (ABES): a source of electrical power; a radiation source; an optical part; spatial flow distribution; surface flow distribution; and a plant. The authors proposed formulas for calculating the energy consumption of each ABES unit. It was revealed that for the estimated values of the energy consumption of ABES blocks taken according to expert estimates, the total energy consumption accounts for 0.32-2.27 megajoule per one gramme of wet weight of a plant, i.e. differs by almost an order of magnitude, depending on the specific implementation of the lighting technology. It is shown that optimization cannot be limited by consistent selection of an option with the lowest value of energy consumption at each stage, but requires finding the optimal route on the graph of options. (*Results and discussion*) For the experimental conditions, the total energy consumption of ABES was 3.77 megajoule per one gramme of the wet weight of a plant. The low efficiency was caused by the unsatisfactory efficiency of the LED matrix and the low productivity of the plant photosynthesis. (*Conclusions*) The developed technique for modeling and analyzing the energy-and-ecological compatibility of indoor plant lighting allowed assessing possible energy saving at each stage of energy and substance conversion in indoor plant lighting. Theoretically, possible reduction of losses in the source of electrical power is 22 percent, in the optical part – 14 percent; in spatial flow distribution – 16 percent; in surface flow distribution – 10 percent. Possible increasing of the lighting source efficiency depends on the achieved level of technology, which currently provides an output of 2.5 micromole per joule and more. To increase the productivity of indoor plant lighting, it is necessary to precisely match the parameters of the lighting mode and the requirements of plants.

Keywords: greenhouse vegetable growing, cultivation facilities, energy-and-ecological assessment of indoor plant lighting, energy efficiency of production.

■ **For citation:** Rakut'ko S.A., Rakut'ko E.N. Modelirovanie i chislenny analiz energoekologichnosti svetokul'tury [Simulation and numerical analysis of energy-and-ecological compatibility of indoor plant lighting]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N3. 11-17 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-3-11-17.

Сельскохозяйственное производство – достаточно сложный объект управления. Его оптимизация возможна путем цифровизации и внедрения новейших информационных автоматизированных систем управления [1]. Это справедливо для всех отраслей АПК, в том числе и для тепличной отрасли, уровень производства продукции в которой в настоящее время имеет большие резервы для роста в искусственной биоэнергетической системе светокультуры. Для повышения эффективности следует совершенствовать и оптимизировать технологические процессы, а также внедрять инновационное оборудование.

Чтобы управлять процессами в теплице, например продуктивностью растений, необходимо оперировать математической моделью светокультуры [2]. Под математическим моделированием тепличного производства понимают описание влияния условий окружающей среды (температуры, облученности и других факторов) на рост растений [3]. Это направление исследований зародилось в конце 60-х гг. прошлого столетия благодаря развитию физиологии растений и вычислительной техники. Математическая модель представляет собой абстракцию реального объекта, и ее цель заключается в изучении и анализе поведения системы под влиянием различных условий [4].

Оптическое излучение (ОИ) в области фотосинтетически активной радиации (ФАР) служит важней-

шим фактором выращивания растений в искусственно созданной среде культивационного сооружения, который имеет наибольший вес в составе затрат на выращивание растений [5]. Использование светодиодных (СД) источников света позволяет обеспечить возможность варьирования параметрами радиационной среды (интенсивностью, спектральным составом, продолжительностью облучения). Управление облучением в условиях светокультуры неразрывно связано с проблемами обеспечения энергоэффективности и экологичности производства [6].

Энергоэффективность светокультуры заключается в достижении требуемого уровня продуктивности растений при использовании меньшего количества энергии, что обеспечивается применением наилучших доступных технологий светокультуры (НДТС) из арсенала технического и технологического обеспечения. Показатель энергоэффективности характеризует долю потока энергии, используемой для получения полезной продукции, от общего количества затрачиваемой энергии. Для численного определения показателей, отражающих распределение потоков энергии в целях обеспечения нормируемых параметров микроклимата и режимов технологического процесса выращивания растений, проводят процедуру энергоаудита (энергетического обследования) светокультуры.



Экологичность светокультуры проявляется в измеряемых и (или) оцениваемых свойствах процесса выращивания растений в контролируемых условиях как НДТС, представляющих его естественную или намеренно обеспеченную способность оказывать воздействие на окружающую среду лишь в допустимых пределах. Для оценки соблюдения нормативных требований в области охраны окружающей среды и получения экологически чистой продукции проводят экоаудит (экологическое обследование) светокультуры.

Общемировой тенденцией последних десятилетий стала тесная связь проблем энергоэффективности и экологичности технологических процессов, чему способствовало ужесточение экологических норм и повышение требований к качеству готовой продукции. Объединение энергетического и экологического подходов позволяет предложить понятие энергоэкологичности светокультуры, связывающей потоки энергии ОИ и потоки продуктов фотосинтеза в светокультуре [7].

Интегральный подход к проблеме повышения эффективности светокультуры предполагает учет как физических процессов в технических средствах, так и биологических процессов в растениях.

Цель исследования – разработать методики моделирования и анализа энергоэкологичности светокультуры.

Материалы и методы. Провели эксперимент для подтверждения предложенной методики энергоэкологического анализа одного из вариантов светокультуры рассады томата, реализованной на СД. Измерения проводили в лаборатории энергоэкологии светокультуры Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФНАЦ ВИМ в марте 2019 г. Результаты обрабатывали с помощью пакета *MS Excel*.

Растительный материал. В качестве объекта исследования взяли рассаду томата (*Solanum Lycopersicum L.*) Полонез F_1 . Взрослые листья томата яйцевидные и нечетно-перистосложные. Обычно присутствуют три пары глубоко лопастных больших боковых листочков. Между большими боковыми листочками располагаются пары более мелких неразделенных листочков. В пятом или шестом узле над семядолями листья достигают своего полного размера и сложности, характерных для данного сорта томата. Эти особенности определяют архитектуру растения. Рассаду выращивали в контейнерах объемом один литр с торфогрунтом, состоящим из одной части субстрата «Живая земля» и двух частей торфа. Проводили необходимый полив и подкормки. Биометрические измерения ТВ осуществляли на 46 сутки после всходов.

Технические средства светокультуры. Температуру воздуха в лабораторном помещении поддерживали с помощью системы вентиляции на уровне 20-22°C. Влажность воздуха составляла 60-70%. Исполь-

зовали облучатель на базе СД-матрицы, выполненной по технологии *COB (chip-on-board)* с драйвером *XC-1100W3A-HTP* и линзой 90°. Паспортные данные драйвера: напряжение питания 85-265В, потребляемый ток до 1,38 А, выходное напряжение 23-35 В, ток нагрузки 3000 мА. Спектр, задаваемый соотношением интенсивности излучения в синем k_B (400-500 нм), зеленом k_G (500-600 нм) и красном k_R (600-700 нм) спектральных диапазонах ФАР, составлял, %: k_B : k_G : k_R = 31:20:49. Соотношение красного излучения к дальнекрасному k_{FR} (700-780 нм) равно 2,7 отн. ед. Фотонную облученность в зоне ФАР в процессе эксперимента поддерживали на уровне $E=140$ мкмоль·м⁻²·с⁻¹ изменением высоты подвеса облучателей над верхушками растений. Фотопериод после расстановки рассады составил $T_{ФП} = 16$ ч (с 7.00 до 23.00 ч). Продолжительность работы облучательной установки за время эксперимента составила:

$$T = 3600 T_{ФП} T_B = 3600 \cdot 16 \cdot 46 = 2,65 \cdot 10^6 \text{ с.}$$

Методика энергоэкологического анализа. В светокультуре могут быть выделены различные иерархические уровни, что позволяет говорить о ней как об искусственной биоэнергетической системе светокультуры (ИБЭСС) [8]. На *рисунке 1* показана блок-схема модели ИБЭСС.

Предложено выделить шесть блоков или этапов, преобразования энергии в модели ИБЭСС. Входной сигнал каждого следующего этапа формируется на выходе предыдущего i -го этапа.

Величина суммарных потерь:

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^5 \Delta Q_i . \quad (1)$$

Наличие потерь означает потенциально имеющиеся резервы энергосбережения. Их поиск на каждом этапе обеспечит наименьшую общую энергоемкость.

Первый этап преобразования энергии происходит в источнике электрического питания I . Его задача – стабилизировать потребляемый ток СД на уровне I_1 при некотором установившемся напряжении U_1 . При этом ток на входе равен I_H при сетевом напряжении U_H . Входной сигнал представляет собой потребляемую от сети мощность P_H . Выходной сигнал – мощность P_1 , потребляемую СД. Энергетические потери на данном этапе связаны с потерями энергии в источнике электрического питания.

Энергоемкость данного этапа преобразования энергии представляет собой величину, обратную КПД драйвера η_1 , отн. ед., и равна:

$$\varepsilon_1(t) = \frac{1}{\eta_1(t)} = \frac{Q_H(t)}{Q_1(t)} = \frac{P_H(t)T}{P_1(t)T} = \frac{U_H(t)I_H(t)}{U_1(t)I_1(t)} . \quad (2)$$

Современные драйверы для СД имеют КПД в диапазоне $\eta_1=0,79-0,95$ отн. ед., в зависимости от загрузки драйвера. Более высокие значения соответствуют номинальному режиму загрузки. Это дает оценку

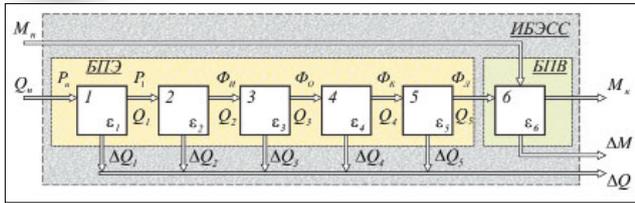


Рис. 1. Модель искусственной биоэнергетической системы светокультуры (ИБЭСС):

1 – источник электрического питания; 2 – источник излучения; 3 – оптическая часть; 4 – пространственное распределение потока; 5 – поверхностное распределение потока; 6 – растение; БПЭ – блок преобразования энергии; БПВ – блок преобразования вещества; Q_n – исходный поток энергии; M_n – исходный поток вещества; M_k – выходной поток вещества; ΔM – потери вещества; ΔQ – суммарные потери энергии; Q_1-Q_5 – потоки энергии на выходе соответствующих блоков модели; $\Delta Q_1-\Delta Q_5$ – потери энергии в соответствующих блоках модели; P_n – потребляемая от сети мощность; P_1 – потребляемая источником мощность; Φ_n – поток источника; Φ_0 – поток облучателя; Φ_k – поток на крону растения; Φ_l – поток на листья; $\varepsilon_1-\varepsilon_6$ – энергоёмкости блоков

Fig. 1. Model of an artificial bio-energetic system light crops (ABES): 1 – the source of electrical power; 2 – radiation source; 3 – the optical part; 4 – the spatial distribution of the flow; 5 – surface flow distribution; 6 – plants; БПЭ – energy conversion unit; БПВ – substance conversion unit; Q_n – input energy flow; M_n – input substance flow; M_k – output substance flow; ΔM – substance loss; ΔQ – total energy loss; Q_1-Q_5 – output energy on the corresponding units; $\Delta Q_1-\Delta Q_5$ – output energy losses on the corresponding units; P_n – rated power; P_1 – light source power; Φ_n – light source flow; Φ_0 – irradiator flow; Φ_k – crown flow; Φ_l – leaves flow; $\varepsilon_1-\varepsilon_6$ – units power consumption.

энергоёмкости данного этапа $\varepsilon_1=1,05-1,27$ отн. ед. Резерв снижения энергоёмкости заключается в применении более технически совершенных драйверов и обеспечении номинального режима их работы.

Второй этап связан с генерацией фотонов в источнике излучения 2. При моделировании этого этапа «качество» фотонов для растения пока не рассматривается. Энергетические потери на данном этапе связаны с неполным преобразованием электроэнергии в энергию фотонного потока. Эффективность генерации фотонов оценивают величиной потока ФИ (выходной сигнал данного этапа), отнесенной к затраченной на его генерацию электрической мощности P_1 , $\text{мкмоль}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{Вт}^{-1}$, что эквивалентно отношению количества генерируемых микромолей к мощности (фотонная отдача η_2), $\text{мкмоль}\cdot\text{Дж}^{-1}$ [9].

Энергоёмкость данного этапа равна:

$$\varepsilon_2(t) = \frac{1}{\eta_2(t)} = \frac{Q_1(t)}{Q_2(t)} = \frac{Q_1(t)}{\Phi_{FI}(t)T} = \frac{Q_1(t)}{T \int_{4\pi} I_\alpha d\omega}. \quad (3)$$

Для нахождения излучаемого потока силу излучения I_α от СД интегрируют по всему пространству (4π) по зональным углам ω .

В зависимости от технологии изготовления совре-

менные СД характеризуются фотонной отдачей $\eta_2=1,0-2,5$ $\text{мкмоль}\cdot\text{Дж}^{-1}$. Это дает оценку энергоёмкости данного этапа $\varepsilon_2=1,0-0,4$ $\text{Дж}\cdot\text{мкмоль}^{-1}$. Резервом снижения энергоёмкости станет применение более современных СД с повышенной фотонной отдачей.

Третий этап преобразования энергии – излучение фотонного потока облучателем 3. Энергетические потери здесь связаны с оптической частью: в отражателе либо во вторичной оптике (линзах). Выходной сигнал – поток облучателя Φ_0 .

Энергоёмкость данного этапа равна:

$$\varepsilon_3(t) = \frac{1}{\eta_3(t)} = \frac{Q_2(t)}{Q_3(t)} = \frac{Q_2(t)}{\Phi_0(t)T} = \frac{Q_2(t)}{T \int_{4\pi} I_\alpha^n d\omega}. \quad (4)$$

Для нахождения потока облучателя силу излучения I_α^n интегрируют по всему пространству.

КПД оптической части облучателя составляет $\eta_3=0,8-0,95$ отн. ед. Это дает оценку энергоёмкости данного этапа $\varepsilon_3=1,05-1,25$ отн. ед. Для ее снижения следует использовать более совершенную оптическую систему облучателя.

На четвертом этапе осуществляется пространственное распределение фотонного потока, моделируемого блоком 4. Энергетические потери на данном этапе происходят из-за того, что часть излученного потока не попадает на облучаемые растения, поглощаясь стенами, проходами и другими элементами культивационного сооружения.

Выходной сигнал данного этапа представляет собой поток ФК, заключенный в пределах телесного угла Ω , образованного пространственным конусом, опирающимся на контуры облучаемой поверхности (крону растения).

Энергоёмкость данного этапа равна:

$$\varepsilon_4 = \frac{1}{\eta_4(t)} = \frac{Q_3(t)}{Q_4(t)} = \frac{Q_3(t)}{\Phi_K(t)T} = \frac{Q_3(t)}{T \int_{\Omega} I_\alpha^n(t) d\omega}. \quad (5)$$

В зависимости от конструкции облучателя КПД можно оценить в пределах $\eta_4=0,60-0,95$ отн. ед., что дает оценку энергоёмкости $\varepsilon_4=1,00-1,67$ отн. ед. Резерв снижения энергоёмкости заложен в совершенствовании светораспределения облучателя.

На пятом этапе преобразования энергии фотонный поток $E_{x,y}$, моделируемый блоком 5, распределяется на листовой поверхности. От уровня фотонной облученности непосредственно зависит интенсивность процессов в растении. Энергетические потери на данном этапе связаны с тем, что часть потока проходит сквозь крону растения, не попадая на листья. Выходной сигнал представляет собой поток Φ_l , падающий на листовую поверхность и обеспечивающий синтез биомассы.

Энергоёмкость данного этапа равна:

$$\varepsilon_5(t) = \frac{1}{\eta_5(t)} = \frac{Q_4(t)}{Q_5(t)} = \frac{Q_4(t)}{\Phi_L(t)T} = \frac{Q_4(t)}{T \int_S E_{x,y}(t) dS}. \quad (6)$$

В зависимости от компоновочной схемы размеще-



ния растений (на плоской поверхности, вертикальные колонны, сложное в пространстве) образуется различная форма поверхности ценоза. КПД данного этапа можно оценить в пределах $\eta_5=0,7-0,8$ отн. ед., что дает оценку энергоемкости $\varepsilon_5=1,43-1,79$ отн. ед. Снизить энергоемкость можно путем согласования пространственного распределения потока от излучателя и структуры ценоза.

Шестой этап преобразования энергии заключается в формировании продуктов фотосинтеза M_K (выходной сигнал этапа 6 и всей модели ИБЭСС) из исходного потока вещества M_H под действием потока энергии Q_5 . С учетом принятых обозначений можно записать суммарную реакцию фотосинтеза:

$M_H(CO_2+H_2O) + Q_5(v) = M_K$ (биомасса) + ΔM (потери вещества) + ΔQ (потери энергии).

Потери на данном этапе связаны с тем, что из биодоступной радиации часть фотонов теряется из-за неполной абсорбции в ходе переноса по антенным комплексам и далее в процессах преобразования энергии в растениях. Лишь весьма небольшая доля потока идет на чистый прирост биомассы.

Энергоемкость этого этапа равна:

$$\varepsilon_6(t) = \frac{1}{\eta_6(t)} = \frac{Q_5(t)}{M_K(t)} \quad (7)$$

Поток биомассы представляет собой функцию основных параметров радиационного режима: облученности, спектрального состава, фотопериода [10].

Продуктивность растений варьирует в зависимости от сочетания параметров радиационного режима в широких пределах. Приняв КПД синтеза зеленой массы $\eta_6=0,4-0,8$ г·моль⁻¹, получаем оценку энергоемкости $\varepsilon_5=1,25-2,5$ моль·г⁻¹. Резервом снижения энергоемкости будет обеспечение оптимального сочетания параметров радиационного режима.

Энергоемкость БПЭ:

$$\varepsilon_{БПЭ}(t) = \prod_{i=1}^5 \varepsilon_i(t) \quad (8)$$

Энергоемкость БПВ:

$$\varepsilon_{БПВ}(t) = \varepsilon_6(t) \quad (9)$$

Общая энергоемкость ИБЭСС:

$$\varepsilon_C(t) = \varepsilon_6(t) \prod_{i=1}^5 \varepsilon_i(t) \quad (10)$$

С учетом принятых по экспертным данным оценочных значений энергоемкости на каждом этапе получаем $\varepsilon_C=0,32-2,27$ МДж·г⁻¹, то есть минимальные и максимальные значения различаются практически на порядок. Получаемая величина для конкретной реализации технологии светокультуры зависит от выбранных способов реализации каждого этапа преобразования энергии.

Рассмотрим важный момент, который следует учи-

тывать при анализе последовательности этапов различной технической реализации каждого этапа. На рисунке 2 показан пример графа для трех последовательных этапов преобразования энергии.

Пусть на основании анализа существующей технологии на i -ом этапе существуют три варианта его реализации $A(1,3)$, $B(1,7)$ и $C(1,5)$, на $i+1$ этапе – четыре варианта $D(1,9)$, $E(1,1)$, $F(1,6)$ и $G(1,8)$, на этапе n – три варианта $H(1,8)$, $I(1,5)$ и $J(1,2)$. В скобках указаны значения энергоемкости соответствующих вариантов в относительных единицах. Задача оптимизации заключается в поиске оптимального маршрута прохода на графе, при котором общая энергоемкость минимальна. В данном примере наиболее оптимально сочетание вариантов $B-E-J$. Энергоемкость при этом равна $1,7 \cdot 1,1 \cdot 1,2 = 2,24$ отн. ед., что меньше других сочетаний. Этот маршрут следует считать наилучшей доступной технологией для светокультуры.

Численный пример наглядно показывает, что оп-

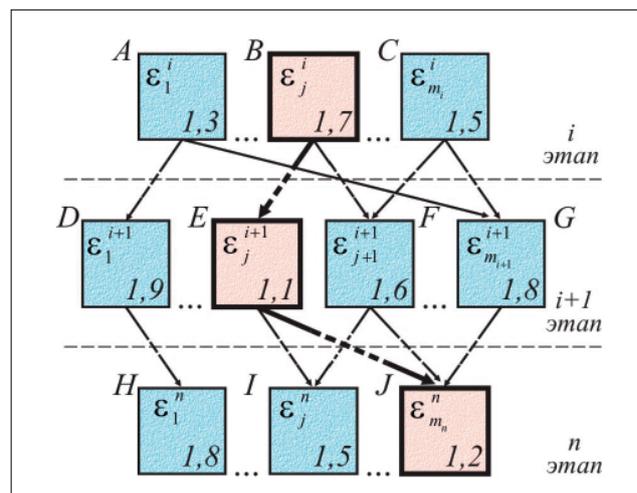


Рис. 2. Граф возможных реализаций этапов с оптимальным маршрутом

Fig. 2. The graph of the possible implementation of the stages with the best route

тимизация не сводится к последовательному выбору на каждом этапе варианта с наименьшим значением энергоемкости. Так, на первом этапе минимальное значение энергоемкости наблюдается при выборе варианта A . Однако при дальнейшем движении по графу на других этапах за этой ветвью следуют элементы, вклад которых в общую энергоемкость процесса превышает эффект от снижения энергоемкости на первом этапе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для используемого в эксперименте драйвера измерили электрические параметры, характеризующие энергоемкость первого этапа преобразования энергии. При сетевом напряжении $U_H=220$ В потребляемый ток составил $I_H=0,47$ А. При этом на выходе обеспечивался стабилизированный ток $I_1=2,92$ А при напряжении $U_1=29,1$ В. Таким

образом, потребляемая из сети мощность:

$$P_H = I_H U_H = 0,47 \cdot 220 = 103,4 \text{ Вт.}$$

Мощность на выходе драйвера:

$$P_1 = I_1 U_1 = 2,92 \cdot 29,1 = 84,9 \text{ Вт.}$$

Энергия за все время работы облучательной установки на входе и выходе драйвера соответственно равна:

$$Q_H = P_H T = 103,4 \cdot 2,65 \cdot 10^6 = 273,97 \text{ МДж и}$$

$$Q_1 = P_1 T = 84,9 \cdot 2,65 \cdot 10^6 = 224,95 \text{ МДж.}$$

Путем фотометрирования СД-матрицы выявили, что ее фотометрическое тело представляет собой сферу, касательную к излучающей плоскости, то есть излучатель круглосимметричен. Найдено выражение для кривой силы света:

$$I_a = I_0 \cos \alpha,$$

где I_0 – осевая сила излучения;

$$I_0 = 4,46 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}.$$

Фотонный поток СД-матрицы:

$\Phi_{II} = \pi I_0 = 3,14 \cdot 20,56 = 64,56 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1}$. Энергия на выходе второго этапа:

$$Q_2 = \Phi_{II} T = 64,56 \cdot 2,65 \cdot 10^6 = 171,06 \text{ моль.}$$

Фотометрирование облучателя вместе с линзой позволило найти поток $\Phi_0 = 57,05 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1}$. Энергия на выходе третьего этапа:

$$Q_3 = \Phi_0 T = 57,05 \cdot 2,65 \cdot 10^6 = 151,01 \text{ моль.}$$

Для обеспечения нормированной облученности высота подвеса облучателя над растением составляла 0,33 м, диаметр кроны растения – 0,4 м. Поток, падающий на крону растения, заключен в пределах телесного угла, образованного плоским углом 36° , и равен $\Phi_k = 48,88 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1}$. Энергия излучения в пределах этого телесного угла за все время работы облучательной установки (выход четвертого этапа) равна:

$$Q_4 = \Phi_k T = 48,88 \cdot 2,65 \cdot 10^6 = 129,51 \text{ моль.}$$

Растение томата к окончанию эксперимента имело девять ярусов оппозиционно расположенных листьев. Структура кроны такова, что часть потока проходит через нее, не попадая на листовую поверхность. Эту часть определяли методом фотограмметрии путем получения цифрового снимка кроны из точки подвеса облучателя и его последующей пороговой обработки, позволяющей разделить области на фотоснимке, принадлежащие листьям растения и фону. Установили поток, падающий на листья, $\Phi_{л} = 44,71 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1}$. Энергия, попавшая на листья растения за все время работы облучательной установки (выход пятого этапа) равна $Q_5 = \Phi_{л} T = 44,71 \cdot 2,65 \cdot 10^6 = 118,46 \text{ моль.}$

На выходе светокультуры (после шестого этапа преобразований), при данном сочетании параметров радиационного режима, получили растение томата с сырой массой 73 г.

Численные значения энергии на входах и выходах отдельных этапов, их КПД и энергоемкость для частного случая светокультуры сведены в *таблицу*.

$$\text{Энергоемкость БПЭ } \varepsilon_{БПЭ} = 1,22 \cdot 1,32 \cdot 1,14 \cdot 1,16 \cdot 1,10 = 2,34 \text{ МДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

$$\text{Энергоемкость БПВ } \varepsilon_{БПВ} = 1,61 \text{ моль} \cdot \text{г}^{-1}.$$

Таблица		Table	
ЭНЕРГИЯ, КПД И ЭНЕРГОЕМКОСТЬ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ			
ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY INTENSITY IN THE EXPERIMENT			
Этап Stage	Энергия Energy	КПД Efficiency	Энергоемкость Energy consumption
1	$Q_H = 273,97 \text{ МДж}$	$\eta_1 = 0,82 \text{ отн. ед.}$	$\varepsilon_1 = 1,22 \text{ отн. ед.}$
2	$Q_1 = 224,95 \text{ МДж}$	$\eta_2 = 0,76 \text{ мкмоль} \cdot \text{Дж}^{-1}$	$\varepsilon_2 = 1,32 \text{ Дж} \cdot \text{мкмоль}^{-1}$
3	$Q_2 = 171,06 \text{ моль}$		
4	$Q_3 = 151,16 \text{ моль}$	$\eta_3 = 0,88 \text{ отн. ед.}$	$\varepsilon_3 = 1,14 \text{ отн. ед.}$
5	$Q_4 = 129,51 \text{ моль}$	$\eta_4 = 0,86 \text{ отн. ед.}$	$\varepsilon_4 = 1,16 \text{ отн. ед.}$
6	$Q_5 = 118,46 \text{ моль}$	$\eta_5 = 0,91 \text{ отн. ед.}$	$\varepsilon_5 = 1,10 \text{ отн. ед.}$
	$M_k = 73 \text{ г}$	$\eta_6 = 0,62 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$	$\varepsilon_6 = 1,61 \text{ моль} \cdot \text{г}^{-1}$

Общая энергоемкость ИБЭСС

$$\varepsilon_c = 2,34 \cdot 1,61 = 3,77 \text{ МДж} \cdot \text{г}^{-1}.$$

Анализ полученных данных позволяет в наглядной форме оценить эффективность этапов преобразования энергии в светокультуре. Проще это сделать для этапов, энергоемкость которых характеризуется относительными единицами. Здесь превышение численного значения энергоемкости над единицей характеризует потери преобразования. Так, на первом этапе эти потери составляют 22%, на третьем – 14, на четвертом – 16, на пятом – 10%. На втором этапе полученное размерное значение энергоемкости должно сравниваться с существующими инновационными достижениями ($1,32 \text{ Дж} \cdot \text{мкмоль}^{-1}$ соответствует слишком малой фотонной отдаче для СД на сегодняшний момент). На шестом этапе выявлены очень большие затраты энергии излучения на синтез биомассы, что позволяет предположить недостаточное соответствие спектральных характеристик источника и других параметров радиационной среды требованиям растений.

Выводы

Разработанная методика моделирования и анализа энергоэкологичности светокультуры позволила оценить возможности энергосбережения на каждом этапе преобразования энергии и вещества в светокультуре.

Теоретически возможное снижение потерь в источнике электрического питания составляет 22%; в оптической части – 14; при формировании пространственного распределения потока – 16; поверхностного распределения потока – 10%.

Возможность повышения эффективности источника излучения зависит от достигнутого уровня техники, который в настоящее время обеспечивает отдачу не менее 2,5 мкмоль с одного джоуля. Для повышения продуктивности светокультуры необходимо точное согласование параметров светового режима и требований растений.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Хорошенков В.К., Смирнов И.Г., Гончаров Н.Т., Лужнова Е.С. Оптимизация управления технологическими процессами в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N3. С. 4-11.
2. Михайленко И.М. Математическое моделирование роста растений на основе экспериментальных данных // *Сельскохозяйственная биология*. 2007. N1. С. 103-111.
3. Crouch R., Haines C. Mathematical modeling: Transitions between the real world and the mathematical model. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*. 2004. Vol. 35. 197-206.
4. Mason E.G., Dzierzon H. Application of modeling to vegetation management. *Canadian Journal of Forest Research*. 2006. Vol. 36. 2505-2514.
5. Kosai T. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: concept, estimation and application to plant factory. *Proceedings of the Japan Academy. Series B*. 2013. N89(10). 447-461.
6. Попова С.А. Математическое моделирование продуктивности растений как средство повышения эффективности энергосбережения // *Вестник КрасГАУ*. 2010. N7. С. 141-145.
7. Ракутько С.А. Концептуальные основы энергоэкологии светокультуры // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N12(6). С. 38-44.
8. 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. N40. С. 262-268.
9. Прикупец Л.Б., Камшилов П.В., Зиничева А.С. Светокультура растений. Новый этап в измерениях ФАР, связанный с созданием светодиодных фитооблучателей // *Теплицы России*. 2018. N2. С. 24-28.
10. Thornley J. *Mathematical Models in Plant Physiology: A Quantitative Approach to Problems in Plant and Crop Physiology*. London: Academic Press. 1976. 318.

REFERENCES

1. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Khoroshenkov V.K., Smirnov I.G., Goncharov N.T., Luzhnova E.S. Optimizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami v rasteniyevodstve [Control optimization of technological processes in crop production]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N3. 4-11 (In Russian).
2. Mikhaylenko I.M. Matematicheskoye modelirovanie rosta rasteniy na osnove eksperimental'nykh dannykh [Mathematical modeling of plant growth based on experimental data]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*. 2007. N1. 103-111 (In Russian).
3. Crouch R., Haines C. Mathematical modeling: Transitions between the real world and the mathematical model. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*. 2004. Vol. 35. 197-206 (In English).
4. Mason E.G., Dzierzon H. Application of modeling to vegetation management. *Canadian Journal of Forest Research*. 2006. Vol. 36. 2505-2514 (In English).
5. Kosai T. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: concept, estimation and application to plant factory. *Proceedings of the Japan Academy. Series B*. 2013. N89(10). 447-461 (In English).
6. Popova S.A. Matematicheskoye modelirovanie produktivnosti rasteniy kak sredstvo povysheniya effektivnosti energosberezheniya [Mathematical modeling of plant productivity as a means of increasing energy efficiency]. *Vestnik KrasGAU*. 2010. N7. 141-145 (In Russian).
7. Rakut'ko S.A. Kontseptual'nye osnovy energoekologii svetokul'tury [Conceptual foundations of energy-and-ecological assessment of indoor plant lighting]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N12(6). 38-44 (In Russian).
8. Rakut'ko S.A., Rakut'ko E.N., Tranchuk A.S. Primenenie iyerarkhicheskoy modeli iskusstvennoy bioenergeticheskoy sistemy dlya otsenki ekologichnosti i energoeffektivnosti svetokul'tury [Application of a hierarchical model of an artificial bioenergy system for assessing the energy-and-ecological efficiency of indoor plant lighting]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015. N40. 262-268 (In Russian).
9. Prikupets L.B., Kamshilov P.V., Zinicheva A.S. Svetokul'tura rasteniy. Noviy etap v izmereniyakh FAR, svyazanny s sozdaniem svetodiodnykh fitoobluchateley [Indoor plant lighting. A new stage in the FAR measurements associated with the development of LED phytoradiation]. *Teplitsy Rossii*. 2018. N2. 24-28 (In Russian).
10. Thornley J. *Mathematical Models in Plant Physiology: A Quantitative Approach to Problems in Plant and Crop Physiology*. London: Academic Press. 1976. 318 (In English).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 19.03.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 19.03.2019

Статья принята к публикации 26.06.2019
The paper was accepted
for publication on 26.06.2019