

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЕТОКУЛЬТУРЕ САЛАТА (*LACTUCA SATIVA L.*)

Ракутько С.А.¹

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

Показана важность эмпирических моделей продукционного процесса растений, выращиваемых в условиях светокультуры. Исследование биометрических показателей растений салата (*Lactuca Sativa L.*) проводили в лабораторном помещении без естественного освещения. Эксперимент проводили четырьмя последовательными сериями опытов с 22.04.2016 по 22.07.2016, рандомизируя сочетания значений величин облученности (12,5; 15; 20; 30 Втм⁻²) и фотопериода (10, 15, 20, 24 час⁻¹). Получены математические выражения, описывающие зависимость основных биометрических показателей растения как от величины дозы облучения, так и от ее составляющих (облученности и фотопериода). Высокие значения коэффициентов детерминации в этих выражениях свидетельствуют о выполнении закона взаимозаместимости составляющих дозы. В качестве интегрального показателя использовали величину энергоемкости фотосинтеза. Для исследуемых условий минимальная энергоемкость фотосинтеза составила 23,5 кВт на 1 кг сырой массы. Оптимальные значения фотопериода составили 16 ч, облученности — 25,4 Втм⁻².

Ключевые слова: светокультура, математическая модель, биометрия, салат, доза, фотосинтез, энергоемкость

MATHEMATICAL MODEL OF THE RADIATION USAGE EFFECTIVENESS IN LETTUCE (*LACTUCA SATIVA L.*) PLANT LIGHTING

Rakutko S.A.¹

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

The importance of empirical models of productional process in plants grown under indoor plant lighting is shown. Biometric indicators of lettuce plants (*Lactuca Sativa L.*) were studied in a laboratory room without natural light. The experiment was conducted as four successive set of tests from 22.04.2016 till 22.07.2016 with random combination of irradiance (12.5; 15; 20; 30 W per sq.m) and photoperiod (10, 15, 20, 24 hour per day) values. Mathematical expressions describing the dependence of the main biometric parameters of plant, both from the radiation dose and its components (irradiance and photoperiod) were suggested. The high values of determination coefficients in these expressions indicate the performance of the reciprocity law. The value of energy-output ratio of photosynthesis was used as integral indicator. For conditions under investigation the minimal photosynthesis energy-output ratio was 23,5 kW per kilogramm of wet matter. The optimal values were 16 h photoperiod and 25.4 W per sq.m irradiance.

Keywords: indoor plant lighting, mathematical model, biometrics, lettuce, doze, photosynthesis, energy-output ratio

Энергия излучения в области фотосинтетически активной радиации (ФАР) является основой получения полезной продукции в светокультуре. Термин «светокультура» применяется к технологии использования ФАР для культивирования растений и синтезирует в себе отдельные направления физики (оптику, фотометрию, электричество), технических (светотехнику, электротехнику, автоматику, технологию), биологических (физиологию растений, растениеводство, овощеводство и др.) наук и ряда других отраслей научных знаний. Предметом исследования светокультуры как научной дисциплины являются отдельные растительные организмы или их сообщества (фитоценозы), выращиваемые при использовании как дополнительного к естественному облучения от искусственных

источников излучения, так и полностью на искусственном облучении. Основное внимание в научных работах по этому направлению уделяется излучению как важнейшему фактору управления жизнедеятельностью растений, имеющему наибольший вес в составе затрат на выращивание, но и предоставляющему широкие возможности варьирования его параметрами (интенсивностью, продолжительностью, спектральным составом и др.) в целях оптимизация производственного процесса) [14].

Выращивание растений в условиях светокультуры — энергоемкий процесс, поэтому задача снижения энергоемкости производства тепличной продукции является актуальной [8].

Для увеличения производства продукции сельское хозяйство должно развиваться интенсивно, используя инновационные энергоресурсосберегающие технологии. Особенно это справедливо для культивационных сооружений, в которых затраты на облучение составляют значительную долю энергопотребления. Это заставляет относиться к решению проблем энергосбережения как к важнейшим стратегическим инновациям [11]. Применение излучения в условиях светокультуры выдвигает особые требования к эффективности использования энергетических и материальных ресурсов [13].

Для разработки теории и практики управления светокультурой необходимо наличие математических моделей продукционного процесса растений, прежде всего роста, развития и фотосинтетической деятельности. По своей природе показатели роста являются интегральными и характеризуют влияние внешних факторов на состояние растения. Отражением процесса роста растения являются биометрические показатели, которые достаточно просто фиксировать во времени. Полученные данные могут быть использованы при разработке алгоритмов управления продуктивностью растений [3]. Задача осложняется тем, что количественные процессы преобразования вещества и энергии в растении происходят наряду с регуляторными, которые инициируют распознаваемые качественные изменения в структуре или поведении организма растения в зависимости от текущего внутреннего состояния или складывающихся внешних условий [4].

Тем не менее наряду с моделями, детально рассматривающими биофизические явления на уровне химических реакций в масштабе клетки или даже с привлечением законов молекулярной генетики, существует целый класс простейших моделей агроэкосистем, в которые не заложено никаких представлений о собственно формировании урожая. Единственной их задачей является адекватное описание динамики развития исследуемых растений в складывающихся погодных условиях и/или краткосрочный прогноз этой динамики на основе экстраполяции погодных данных. Такие модели достаточно востребованы в практике культивирования растений [2]. Эмпирический метод связан с осмысливанием экспериментальных данных и подбором наиболее подходящих (обычно

простых) формул или системы уравнений для их адекватного описания. Такой способ количественного обобщения и аппроксимации экспериментальных данных часто позволяет понять механизмы, ответственные за реакцию растения [15].

Математическая зависимость между факторами внешней среды и продукционным процессом растений позволяет оптимизировать вегетацию методом подбора необходимых сочетаний параметров этих факторов, добиваясь при этом максимальной продуктивности растений. Оптимизация по данному критерию позволит в короткие сроки получить сильную рассаду и оптимизировать основные факторы жизни растений в период вегетации до начала массового плодоношения [5].

Другим распространенным подходом является минимизация энергоемкости [10]. Выращивание растений при искусственном облучении является весьма энергоемким процессом. Основные затраты энергии здесь связаны с созданием условий для фотосинтеза, при котором происходят реакции поглощения, превращения и использования квантов света, ведущие к образованию органического вещества из углекислого газа и воды при участии фотосинтетического пигмента хлорофилла. Наличие математических зависимостей между факторами внешней среды и энергоемкостью светокультуры позволит добиться оптимизации процесса выращивания растений по критерию минимума энергоемкости путем варьирования параметров облучения, условий окружающей среды и других факторов [7].

Для разработки научных основ и создания практических приемов управления светокультурой, обеспечивающих повышение энергоэффективности и экологичности производства, необходимо исследование вопросов взаимосвязи потока энергии ФАР и потоков продуктов фотосинтеза в растениях. Важным аспектом здесь является уточнение и выявление особенностей проявления закона взаимозаместимости (или закона Бунзена—Роско). Сущность этого закона, первоначально установленного для фотохимических реакций, заключается в том, что реакция объекта на излучение определяется произведением интенсивности (задаваемой облученностью E) на время действия T , т.е. дозой H . Другими словами, величины интенсивности и времени взаимозаместимы: изменение одной из них может быть скомпенсировано соответствующим изменением другой в обратную сторону.

Цель исследований — построение математической модели, описывающей удельные затраты энергии излучения на фотосинтез сырой массы салата в зависимости от дозы и ее составляющих.

Материалы и методы исследования

Семена салата высевали в контейнеры, заполненные агроперлитом. Распикировку производили по 3 растения в горшочек PR-360 с агроперлитом в фазе первого настоящего листа. Горшочки с растениями выдерживали на поддонах с питательным раствором ($EC=1,6$

мСм/см) под круглосуточным облучением натриевыми лампами. В фазе третьего настоящего листа горшочки с растениями устанавливали на короба гидропонных установок.

Применяемый субстрат состоял из 2 частей верхового торфа и 1 части перлита. Верховой торф, низкой степени разложения (10%), кислый (рН 3,8), содержание органического вещества 95%, зольность 10%. Раскисление торфа до рН 6,0–6,2 производили агромером с содержанием 90–100% CaCO₃ и 10% SiO₂, на 10 кг торфа влажностью 65% расходовали 100 г мела. Торф заправляли основными макро- и микроэлементами, г/кг торфа: KNO₃ – 0,5; KH₂PO₄ – 0,3; MgSO₄ – 0,5. Маточный раствор микроэлементов готовили из расчета, г/л воды: H₃BO₃ – 2,86; MnSO₄ – 1,8; CuSO₄ – 0,08; молибденовокислый аммоний (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O–0,1. Рабочий раствор микроэлементов готовили из расчета: 1 мл маточного раствора доводили до 1 л водой. Для выращивания салата в рабочей зоне методом гидропоники готовили питательный рабочий раствор макро- и микроудобрений с содержанием, мг/л: азота (N-NO₃) – 162,5; фосфора (P) – 28,8; калия (K) – 231,2; кальция (Ca) – 107,9; магния (Mg) – 26,5; железа (Fe) – 0,016; молибдена (Mo) – 0,05; марганца (Mn) – 0,01; бора (B) – 0,23; меди (Cu) – 0,11; ЕС – 1,6 м см/см. Для приготовления маточного питательного раствора берутся полностью растворимые удобрения из расчета, г/л: KH₂PO₄ – 14,7; MgSO₄ –31,0; KNO₃ –38,3; MnSO₄ –0,219; ZnSO₄ – 0,052; фертибор – 0,164; CuSO₄ – 0,024; (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O – 0,0096 (бак А) и CaNO₃ – 64,4; KNO₃ –19,6; реколин Fe – 1,8 (бак Б). Рабочий питательный раствор готовится разбавлением маточного 1 : 100.

Эксперимент проводили четырьмя последовательными сериями опытов с 22.04.2016 по 22.07.2016, рандомизируя сочетания значений величин облученности ($E=12,5; 15; 20; 30$ Вт·м⁻²) и фотопериода ($T=10, 15, 20, 24$ ч·сут⁻¹). Для снятия биометрических показателей в конце серий экспериментов использовали растения из центральной части зоны выращивания, где неравномерность облученности не превышала 20%. Фиксировали массу листьев, стебля и корня отдельного растения салата, геометрические размеры каждого листа (длину и ширину) и его сырую массу. Содержание сухого вещества в конце выращивания определяли высушиванием образцов в сушильном шкафу при 85°C.

Исследования проводили в лабораторном помещении без естественного освещения площадью 36 м² с температурой воздуха +22–+24 °С, которую поддерживали с помощью системы кондиционирования. Влажность воздуха внутри помещения составляла 55–60%, подвижность — 0,05–0,25 м·с⁻¹.

В процессе эксперимента в каждой зоне поддерживали требуемый уровень облученности изменением высоты подвеса облучателей над верхушками растений.

Применяли экспериментальные СД облучатели собственного изготовления, представляющие собой алюминиевую панель – радиатор размером 1,0 м х 0,25 м.

Использованы светодиоды типа ARPL – Star – 3W в соответствующих количествах, а также блоки питания HTS–200M–12. Требуемый спектр излучения задавали пропорцией между синими, зелеными и красными светодиодами, а также величиной тока через светодиоды. Выявление роли спектрального состава представляет собой самостоятельную задачу [9], в рамках данного исследования спектральный состав во всех облучателях был одинаковый, с соотношением энергии в отдельных диапазонах ФАР $k_{\text{син}}=30\%$, $k_{\text{зел}}=20\%$, $k_{\text{кр}}=50\%$ [6]. Среднее квадратичное отклонение доли энергии в отдельных спектральных диапазонах от среднего не более 2,3%.

Результаты и обсуждение

Математическая обработка результатов факторного эксперимента позволила получить модели основных биометрических показателей растения салата (в расчете на одно растение при выращивании трех растений в одном горшочке). На рисунке 1 показана зависимость сырой массы листьев M от суточной дозы H . На рисунке 2 показана зависимость сырой массы листьев растения салата M от облученности E и фотопериода T .

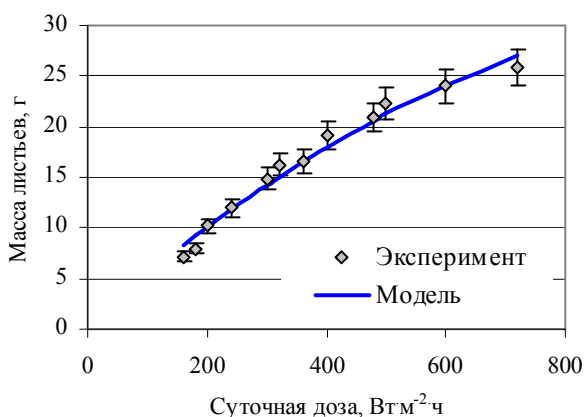


Рис. 1. Зависимость сырой массы листьев M от суточной дозы H

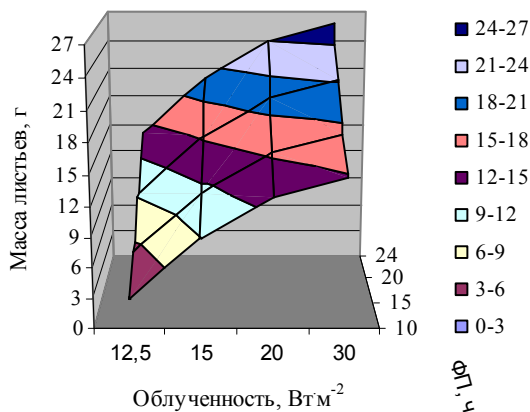


Рис. 2. Зависимость сырой массы листьев M от составляющих дозы E и T

Математические выражения для сырой массы растения в зависимости от дозы (H) и ее составляющих (E и T) аппроксимированы выражениями соответственно (1) и (2).

$$M_n = 45,878e^{-\frac{804,71}{H}}, R^2=0,94. \quad (1)$$

$$M_n = -0,039T^2 + 2,153T - 0,023E^2 + 1,590E - 31,109, R^2=0,97. \quad (2)$$

Энергоёмкость продукции, кВт·кг⁻¹, находили по формуле:

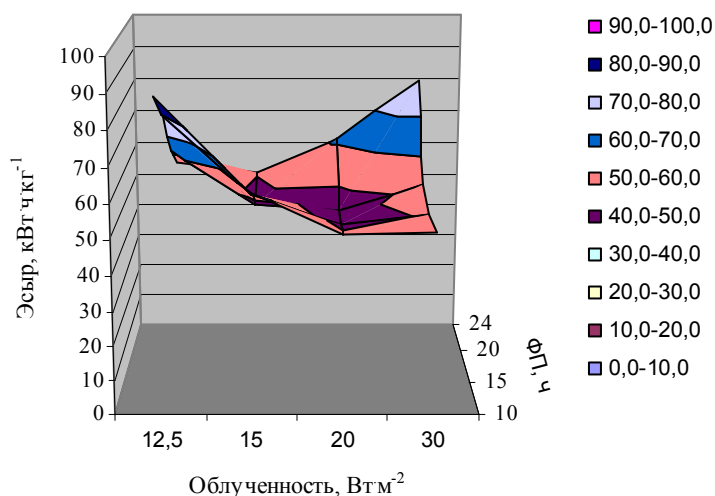
$$\varepsilon = \frac{Q}{M\kappa r}, \quad (3)$$

где Q — количество электроэнергии, Вт·ч, затрачиваемой на выращивание салата в режиме, характеризуемом облученностью E , Вт·м⁻² и фотопериодом T , ч;

κ — количество растений в горшочке, $\kappa=3$ шт.;

ρ — количество горшочков, попадаемых в зону облучения с заданной неравномерностью, $\rho=24$ шт.;

M_n — сырая масса одного растения, г.



Поверхность отклика зависимости энергоемкости продукции от облученности E и фотопериода T :

$$\varepsilon = 0,197T^2 - 10,677T + 0,135E^2 - 9,540E + 0,168TE + 230,436, R^2 = 0,77. \quad (4)$$

Экстремум данной функции наблюдается при $T_{\text{опт}} = 16$ ч, $E_{\text{опт}} = 25,4$ Вт·м⁻².

При этом минимальное значение энергоемкости $\varepsilon_{\text{мин}} = 23,5$ кВт·ч·кг⁻¹.

Несмотря на значительный опыт выращивания растений в светокультуре, в настоящее время нет единого взгляда на оптимальные уровни облученности растений и спектральный состав излучения в ростовой зоне применительно к определенным видам растений. В целом считается, что применение СД-излучателей является адекватной заменой традиционно используемых натриевых ламп при сохранении продуктивности растений и обеспечении более высоких технико-экономических показателей [1]. В данном исследовании подтверждено, что рост и развитие растений тесно связаны с условиями окружающей среды. Для обеспечения энергоэффективности технологического процесса светокультуры необходимо создавать условия, соответствующие требованиям растений. Важнейшим фактором управления жизнедеятельностью растений в условиях светокультуры является ФАР. Однако лучистая энергия, получаемая с помощью искусственных источников света, является одной из наиболее затратных статей расходов в светокультуре. Поэтому для экономики светокультуры большое значение имеет эффективное использование световой энергии.

В то же время интенсивность и спектральный состав света, его периодичность являются мощными факторами управления различными сторонами жизнедеятельности растений.

Заключение

Исследованы вопросы взаимосвязи потоков энергии ФАР и продуктов фотосинтеза в растениях салата. Уточнены и выявлены особенности проявления закона взаимозаместимости, заключающегося в том, что реакция объекта на излучение определяется произведением интенсивности (задаваемой облученностью) на время действия T , т.е. дозой H .

Получены математические выражения, описывающие зависимость основных биометрических показателей растения как от величины дозы облучения, так и от ее составляющих. Высокие значения коэффициента детерминации (0,74–0,98) в этих выражениях свидетельствуют о выполнении закона взаимозаместимости составляющих дозы.

Результаты исследований могут быть использованы для оптимизации процесса выращивания растений путем варьирования параметров облучения, условий окружающей среды и других факторов [12]. 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 алгоритмов оптимального управления светокulturой позволит оперативно и эффективно решать эти задачи.

Список литературы

1. Ефремов Н.С. Оценка интенсивности искусственного освещения светодиодного облучателя на листовой салат в защищенном грунте // Научный журнал КубГАУ. – 2014. – № 102(08).
2. Журавлева В.В. Математические модели процессов регуляции в физиологии растений // Известия Алтайского государственного университета. – 2008. – № 1. – С. 43–57.
3. Михайленко И.М. Математическое моделирование роста растений на основе экспериментальных данных // Сельскохозяйственная биология. – 2007. – № 1. – С. 103–111.
4. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб., 2006.
5. Попова С.А. Математическое моделирование продуктивности растений как средство повышения эффективности энергосбережения // Вестник КрасГАУ. – 2010. – № 7. – С. 141–145.
6. Протасова Н.Н. Светокultura как способ выявления потенциальной продуктивности растений // Физиология растений. Т. 34. – Вып. 4. – 1987.

7. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Сравнительная оценка эффективности источников излучения по энергоёмкости фотосинтеза // Инновации в сельском хозяйстве.– 2015. – № 2 (12). – С. 50–54.
8. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Энергосбережение в оптических электротехнологиях АПК // В сб.: Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. Великие Луки, 2015. – С. 252–254.
9. Ракутько С.А. Критерий оценки эффективности спектрального состава излучения источников света для облучения растений // Аграрная наука. – 1995. – № 1. – С. 31–32.
10. Ракутько С.А. Прикладная теория энергосбережения в энерготехнологических процессах (ПТЭЭТП): Известия Санкт–Петербургского ГАУ. – 2009. – № 12. – С. 133–137.
11. Ракутько С.А. Энергосбережение как важнейшая компонента инновационной агроэкономики // В сб.: Проблемы и перспективы развития агропромышленного рынка. Саратов, 2008. – С. 130–134.
12. Ракутько С.А., Васькин А.Н., Горбатенко Н.А, Забодаев Д.П. Методика энергоэкоаудита светокультуры салата (*Lactuca Sativa L.*). // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 7-4. – С. 540–543.
13. 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.
14. Светокультура растений: биофизические и биотехнические основы. Учеб. пособие / Тихомиров А.А., Шарупич В.П., Лисовский Г.М. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2000. – 213 с.
15. Торнли Дж.Г.М. Математические модели в физиологии растений. – Киев, 1982. – 312 с.