**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНА
ВЗАИМОЗАМЕСТИМОСТИ В СВЕТОКУЛЬТУРЕ САЛАТА
THE VERIFICATION OF RECIPROCITY LAW IN LETTUCE GROWING**

С.А. РАКУТЬКО, д-р техн. наук, **Е.Н. РАКУТЬКО**, науч. сотр., ФГБНУ ИАЭП,
Санкт-Петербург, Россия

S. A. RAKUTKO, d-r tech. sci., **E. N. RAKUTKO**, researcher, FGBNU «Institute for
Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production», St. -
Petersburg, Russia

Аннотация. Целью исследований являлось подтверждение и выявление точности соблюдения закона взаимозаместимости по критерию площади поверхности листьев на примере растений салата. Исследование биометрических показателей растений салата (*Lactuca Sativa* L.) проводили в лабораторном помещении без естественного освещения. Величины облученности в вариантах опыта задавали $E=12,5; 15; 20; 30 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ при значениях фотопериода $T=24; 20; 15; 10$ ч. Предложены аппроксимационные выражения для площади листовой поверхности. Выявлено, что отклонения от закона взаимозаместимости в условиях эксперимента не превышают 6,1 %.

Ключевые слова: светокультура, облученность, фотопериод, площадь листьев, закон взаимозаместимости

Abstract. The aim of the study was to confirm and reveal the accuracy of compliance with the reciprocity law by the criterion of leaf surface area using the example of lettuce plants. Biometric indicators of lettuce plants (*Lactuca Sativa* L.) were studied in a laboratory room without natural light. The irradiance values in the experiment variants were set to $E = 12.5; 15; 20; 30 \text{ Wm}^{-2}$ at the values of the photoperiod $T = 24; 20; 15; 10$ hours. It was revealed that deviations from the reciprocity law under the experimental conditions do not exceed 6.1%.

Keywords: indoor plant lighting, irradiance, photoperiod, leaf surface area, reciprocity law

Для разработки научных основ и создания практических приемов управления светокulturой, обеспечивающих повышение энергоэффективности и экологичности производства, необходимо исследование вопросов взаимосвязи потока энергии оптического излучения $H(t)$ и потоков продуктов фотосинтеза в растениях $D(t)$ [1]. Выявление этих взаимосвязей составляет одну из важнейших задач разрабатываемого в лаборатории энергоэффективных электротехнологий ИАЭП нового научного направления – энергоэкологии светокультуры, объединяющего в себе подходы физики, физиологии растений и экологии [2]. Энергия оптического излучения как важнейший фактор управления жизнедеятельностью растений имеет наибольший вес в составе затрат на выращивание, но и предоставляет широкие возможности варьирования параметрами (интенсивностью, продолжительностью, спектральным составом и др.) в целях оптимизация производственного процесса. Существенным аспектом здесь является уточнение и выявление особенностей проявления закона взаимозаместимости (Бунзена-Роско) [3].

Сущность этого закона, первоначально установленного для фотохимических реакций, заключается в том, что реакция объекта D на излучение определяется произведением интенсивности, (задаваемой облученностью) E на время

действия (фотопериод) T , т.е. дозой $H = ET$ [4]. Другими словами, величины облученности и фотопериода взаимозаместимы: изменение одной из них может быть скомпенсировано соответствующим изменением другой в обратную сторону.

Данный закон соблюдается в тех случаях, когда первичная фотохимическая реакция не сопровождается вторичными реакциями иного типа и не осложнена тормозящим действием сопутствующих веществ, в том числе самих продуктов реакции. Математическое выражение закона, например, для площади листьев растений в светокультуре

$$\begin{cases} S_1(H) = S_2(H) = const \\ H = E_1 T_2 = E_2 T_1 \end{cases} \quad (1)$$

Известно явление нарушения закона взаимозаместимости, при котором

$$S_1(H) \neq S_2(H). \quad (2)$$

Соответственно, при этом реакция объекта не может быть однозначно определена величиной дозы [5]. В наших предыдущих исследованиях произведена оценка выполнимости закона взаимозаместимости по критерию сырой массы [6]

Цель данного исследования: подтверждение и выявление точности соблюдения закона взаимозаместимости по критерию площади поверхности листьев на примере растений салата.

Материалы, методы и объекты исследования. Проявление закона взаимозаместимости ожидается в том, что при различных сочетаниях облученности E и фотопериода T площадь листьев растений будет одинакова при одинаковых произведениях E и T , т.е. при одинаковой дозе H . При табличном представлении данных $H(T, E)$ при точном соблюдении закона значения площади под главной диагональю таблицы должны быть в точности равны соответствующим значениям площади над главной диагональю таблицы.

Эксперимент проводили на растениях салата (*Lactuca Sativa L.*) сорта Афицион, выращиваемых по гидропонной технологии. В хозяйственном плане салат пользуется большой популярностью среди покупателей, особенно в зимний период [7]. В связи с особенностью использования культуры именно площадь листьев является показателем ее продуктивности.

Исследования проводили в лабораторном помещении без естественного освещения. В каждой из четырех зон помещения было установлено по СД облучателю, которые обеспечивали заданную дозу облучения H при установленном спектральном составе. Величины облученности в вариантах опыта задавали $E=12,5; 15; 20; 30 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ при значениях фотопериода $T=24; 20; 15; 10 \text{ ч}$. Требуемый уровень облученности в процессе эксперимента в каждой зоне помещения поддерживали изменением высоты подвеса облучателей над верхушками растений. Применяли экспериментальные СД облучатели собственного изготовления. Спектральный состав во всех светильниках одинаковый, с соотношением энергии потоков в соответствующих спектральных диапазонах $k_{\text{син}}=30\%$, $k_{\text{зел}}=20\%$, $k_{\text{кр}}=50\%$ [8].

Использована модель роста и развития растения, учитывающую динами-

ку изменения площади каждого листа растения и его массы в процессе выращивания [9]. 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 геометрические размеры (длину вдоль центральной жилки A_n и наибольшую ширину B_n).

Суммарную площадь листьев растения салата с достаточной точностью находили по найденной в предварительных экспериментах формуле.

Значения суммарной площади листьев получали при заданных планом эксперимента (невзаимозаменяемых) сочетаниях облученности и фотопериода: S_{11} (при E_1 и T_1), S_{21} (при E_2 и T_1), S_{12} (при E_1 и T_2), S_{22} (при E_2 и T_2). Значения S_{e1} и S_{e2} находили по предварительно полученным интерполяционным формулам $S=f(E)$ при $T=const$. Затем по формулам $S=f(T)$ при $E=const$ находили для промежуточных значений облученности и фотопериода значения S_{1t} , S_{et} и S_{2t} .

Для анализа сопоставляли значения площади листьев S_1 и S_2 , соответствующие одинаковым дозам H , сформированным значениями $E_1T_2=E_2T_1$, (симметричными относительно главной диагонали итоговой таблицы).

Результаты исследования. На рисунках 1 и 2 показаны зависимости площади листьев от соответственно облученности и фотопериода.

Рисунок 1 - Зависимости площади листьев от облученности

Рисунок 2 - Зависимости площади листьев от фотопериода

По методу наименьших квадратов были найдены значения коэффициентов полиномов второй степени аппроксимационных зависимостей. Полученные значения площади листьев приведены в таблице 1.

Таблица 1
Интерполированные значения площади листьев для взаимозаменяемых сочетаний T и E

Фотопериод $T, \text{ ч}$	Облученность $E, \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$					
	12,5	15	17,5	20	22	24
12,5	326,09	377,47	413,45	442,08	461,04	473,15
15	364,00	426,00	466,79	499,56	522,32	536,42
17,5	387,34	466,42	501,49	532,14	560,47	575,40
20	416,19	508,00	536,26	564,00	596,92	612,67
22	465,75	552,66	585,16	616,06	648,93	666,67
24	512,49	595,07	628,16	660,00	693,05	712,41

Анализ показывает, что разницы значений продуктивности растений при взаимозаменяемых значениях облученности и фотопериода (относительные ошибки) не превышают 6,1 %. Среднее значение относительной ошибки составляет 2,7 %.

Найдена зависимость площади листьев S , см², от суточной дозы облучения H , Вт·ч·м⁻², построенная по данным таблицы 1 (значения из ее главной диагонали):

$$S = 0,8922H + 210,49 (R^2=0,9872). \quad (3)$$

Зависимость имеет линейный характер при высоком значении коэффициента корреляции.

Выводы. Экспериментальные исследования вариантов облучения растений на примере салата, выращиваемого по гидропонной технологии под светодиодными источниками в контролируемых условиях с некоторым суточным фотопериодизмом излучением определенного спектрального состава проводились с целью выявления реакции растений на такие режимы облучения, первичной характеристикой которой является поток синтезируемого вещества, определяющий показатели продуктивности светокультуры. Результаты экспериментов позволили математически описать закономерности роста растения для светокультуры салата.

В результате эмпирического подхода на основе экспериментальных данных подобраны аппроксимационные формулы зависимости площади листьев салата от фотопериода и облученности.

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 [10].

Исследованы вопросы взаимосвязи потоков энергии оптического излучения и продуктов фотосинтеза в растениях. Уточнены особенности проявления закона взаимозаменяемости, заключающегося в том, что реакция растения салата (площадь листьев) на излучение определяется произведением облученности E на фотопериод T , т.е. дозой H . Полученные численные оценки характеризуют степень соблюдения закона взаимозаменяемости в условиях эксперимента. Корреляция между дозой облучения и относительной ошибкой не выявлена, т.е. степень соблюдения закона не зависит от величины дозы и ее составляющих.

Результаты исследований могут быть использованы для оптимизации процесса выращивания растений путем варьирования параметров облучения, условий окружающей среды и других факторов.

Список литературы:

1. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Сравнительная оценка эффективности источников излучения по энергоемкости фотосинтеза // Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 2 (12). С. 50-54.
2. Ракутько С.А., Маркова А.Е., Мишанов А.П., Ракутько Е.Н. Энергоэкология светокультуры - новое междисциплинарное научное направление // Технологии и технические

средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2016. – № 90. – С. 14-28.

3. Bunsen R. and Roscoe H.E., Pogg. Ann. d. Phys, 117, 536 (1862).

4. Schwarzschild, K. Phot. Korr. 36, 109 (1899).

5. Картужанский, А.Л. Нарушения фотохимического закона взаимозаменяемости для фотографических слоёв // Успехи физ. наук. 1953г.–Т.51.–с.161.

6. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Мишанов А.П., Маркова А.Е. Проявление закона взаимозаменяемости при выращивании салата под светодиодными источниками излучения // В сб.: Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики.- Саранск, 2017. С. 45-51.

7. Dougher, T.A.O., Bugbee, B., 2001. Differences in the response of wheat, soybean and lettuce to reduced blue radiation. Photochem. Photobiol. 73, 199–207

8. Протасова, Н.Н. Светокультура как способ выявления потенциальной продуктивности растений // Физиология растений.–т.34. – Вып.4. –1987.

9. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Оценка энергоэффективности источников оптического излучения с позиций прикладной теории энергосбережения // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета.–2015.–№39.–С. 359–367.

10. Ракутько С.А., Мишанов А.П., Маркова А.Е., Ракутько Е.Н., Васькин А.В. Математическая модель биометрических показателей растения салата (*Lactuca Sativa L.*) в светокультуре при различных дозах облучения // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 89. С. 118-127.

References:

1. Rakutko E.N., Rakutko S.A. Comparative evaluation of the effectiveness of radiation sources on the energy intensity of photosynthesis // Innovations in Agriculture. 2015. № 2 (12). p. 50-54.

2. Rakutko S.A., Markova A.E., Mishanov A.P. Energoecology of light culture is a new interdisciplinary scientific direction // Technologies and technical means of mechanized production of plant growing and livestock production. - 2016. - №. 90. - 3. 14-28.

3. Bunsen R. and Roscoe H.E., Pogg. Ann. d. Phys, 117, 536 (1862).

4. Schwarzschild, K. Phot. Korr. 36, 109 (1899).

5. Kartuzhansky A.L. Violations of the photochemical law of interchangeability for photographic layers // Uspekhi fiz. sciences. 1953-T.51-p.161.

6. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Mishanov A.P., Markova A.E. The manifestation of the law of interchangeability in the cultivation of salad under LED radiation sources // In: Problems and Perspectives of the Development of Domestic Lighting, Electrical Engineering and Power Engineering.- Saransk, 2017. S. 45-51.

7. Dougher, T.A.O., Bugbee, B., 2001. Differences in the response of wheat, soybean and lettuce to reduced blue radiation. Photochem. Photobiol. 73, 199–207

8. Protasova N.N. Svetokultura as a way to identify the potential productivity of plants // Physiology of plants. -t.34. - Issue 4. -1987.

9. Rakutko S.A., Rakutko E.N. Evaluation of the energy efficiency of sources of optical radiation from the standpoint of the applied theory of energy saving // Izvestiya of the St. Petersburg State Agrarian University.-2015.-No. 39.-C. 359-367.

10. Rakutko S.A., Mishanov A.P., Markova A.E., Rakutko E.N., Vaskin A.V. A mathematical model of biometric indices of a salad plant (*Lactuca Sativa L.*) in light culture at various doses of irradiation. // Technology and technical means of mechanized production of crop and livestock products. 2016. No. 89. P. 118-127.