5. Патент РФ 122915. Гидроциклон-сгуститель / Ю.А. Киров, Н.В. Батищева, Т.Ю. Козлова; опубл. 20.12.2012.
6. Шаланда А. Методы утилизации пивной дробины / <http://cbio.ru/page/45/id/1303>.
7. Малиновская Т.А. Разделение суспензий в промышленности органического синтеза. - М.: Химия, 1971. - 318 с.

Literatura

1. Volotka F.B., Bogdanov V.D. Tekhnologicheskaya i himicheskaya harakteristika pivnoj drobinny // Vestnik TGEHU. - 2013. - №1. - S. 114-124.
2. Golubev I.G., SHvanskaya I.A., Konovalenko L.YU., Lopatnikov M.V. Recikling othodov v APK: spravochnik. - M.: FGBNU "Rosinformagrotekh", 2011. - 296 s.
3. Kolpakchi A.P., Golikova N.V., Andreeva O.P. Vtorichnye material'nye resursy pivovareniya. - M.: Agropromizdat, 1986. - 160 s.
4. GOST 29018-91 Pivovarennaya promyshlennost'. Terminy i opredeleniya.
5. Patent RF 122915. Hidrociklon-sgustitel' / YU.A. Kirov, N.V. Batishcheva, T.YU. Kozlova; opubl. 20.12.2012.
6. SHalanda A. Metody utilizacii pivnoj drobinny / <http://cbio.ru/page/45/id/1303>.
7. Malinovskaya T.A. Razdelenie suspenzij v promyshlennosti organiche-skogo sinteza. - M.: Himiya, 1971. - 318 s.

УДК 57.045: 535.21

Доктор техн. наук **С.А. РАКУТЬКО**
(ФГБОУ ВО СПбГАУ, sergej1964@yandex.ru)
Соискатель **Е.Н. РАКУТЬКО**
(ИАЭП, elena.rakutko@mail.ru)

ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОЩАДИ ЛИСТЬЕВ САЛАТА (*Lactuca sativa* L.) ОТ ДОЗЫ ПОТОКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Для разработки научных основ и создания практических приемов управления светокультурой, обеспечивающих повышение энергоэффективности и экологичности производства, необходимо исследование вопросов взаимосвязи потока энергии оптического излучения $H(t)$ и потоков продуктов фотосинтеза в растениях $D(t)$. 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 [1]. 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 [2]. 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 будет иметь вид:

$$H) = S_2(H) = const$$

$$[H = ET = ET \quad (1)$$

Известно явление нарушения закона взаимозаместимости, при котором

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

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

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 примере растений салата (*Lactuca sativa L.*) сорта Афицион в 2016 г. В хозяйственном плане салат пользуется большой популярностью среди покупателей, особенно в зимний период [6]. В связи с особенностью использования культуры именно площадь листьев является показателем ее продуктивности. Семена высевали в контейнеры, заполненные агроперлитом. Распикировку производили по 3 растения в горшочки PR-360 с агроперлитом в фазе первого настоящего листа. Горшочки с растениями выдерживали на поддонах с питательным раствором ($EC=1,6 \text{ мСмсм}^{-1}$) под круглосуточным облучением натриевыми лампами. В фазе третьего настоящего листа горшочки с растениями устанавливали на короба лабораторных гидропонных установок [7].

Применяемый субстрат состоял из двух частей торфа и одной части перлита. Торф применялся верховой, низкой степени разложения (10%), кислый (pH 3,8), содержание органического вещества 95%, зольность 10%. Раскисление торфа до pH 6,0-6,2 производили агромером. Торф заправляли основными макро- и микроэлементами, гкг⁻¹ торфа: KNO₃ - 0,5; KH₂PO₄ - 0,3; MgSO₄ - 0,5. Маточный раствор микроэлементов готовили из расчета, гл⁻¹ 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 на 1 л воды.

Рис. 1. Размещение растений салата на гидропонной установке

Минеральное питание растений осуществляли питательными растворами, приготовленными из состава макро- и микроудобрений, используемых в промышленном

тепличном овощеводстве. Измерение содержания элементов питания в растворах и их корректировка осуществляли вручную, отдельно для каждого варианта с помощью кондуктометра DISTWP4, pH-метра-иономера «Эксперт-001» и спектрофотокалориметра ПЭ5400В. В составе субстрата для выращивания салата методом проточной гидропоники использовали агроперлит в виде гранул, с низкой (до отсутствия) ионообменной способностью, низким объемным весом ($94 - 117 \text{ кг/м}^3$), высокой пористостью (65 - 82%), ЕС менее 02 и pH 6,5 - 7,5.

Исследования проводили в лабораторном помещении без естественного освещения площадью 36 м^2 с температурой воздуха $+22\text{--}+24^\circ\text{C}$, которую поддерживали с помощью системы кондиционирования. Влажность воздуха внутри помещения составляла 55-60%, подвижность $0,05\text{--}0,25 \text{ м/с}^{-1}$.

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 $E=12,5; 15; 20; 30 \text{ Втм}^{-2}$ 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, представляющие собой алюминиевую панель - радиатор размером $1,0 \text{ м} \times 0,25 \text{ м}$. Были использованы светодиоды типа ARPL - Star - 3W в соответствующих количествах, а также блоки питания HTS-200M-12.

К настоящему времени накоплен большой эмпирический материал по выращиванию салата под излучением с различным спектральным составом. В зависимости от спектра излучения были обнаружены положительные физиологические, морфологические эффекты, выявлено повышенное содержание питательных веществ. Определены рекомендуемые сочетания энергии в различных диапазонах спектра [8]. Наблюдалась более высокая сухая масса у салата, выращенного под красным светом с добавлением синего, по сравнению с салатом, выращенным только под красным светом [9].

Требуемый спектр излучения задавали пропорцией между синими (460 нм, полуширина пика 25 нм), зелеными (516 нм, полуширина пика 45 нм) и красными (633 нм, полуширина пика 21 нм) светодиодами, а также величиной тока через светодиоды. Спектральный состав во всех светильниках одинаковый, с соотношением энергии потоков в соответствующих спектральных диапазонах $k_{\text{син}}=30\%$, $k_{\text{зел}}=20\%$, $k_{\text{крас}}=50\%$. Среднее квадратичное отклонение доли энергии в спектральных диапазонах от среднего составляло не более 2,3%.

Для снятия биометрических показателей использовали растения из центральной части зоны выращивания, где наравномерность облученности не превышала 20%.

Рис. 2. Измерение длины (слева) и ширины (справа) листа салата

Использована модель роста и развития растения, учитывающая динамику изменения площади каждого листа растения и его массы в процессе выращивания. 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:

$$S = \sum_{n=1}^N k_n A_n B_n \quad (3)$$

где k_n - коэффициент формы n -го листа.

Значения суммарной площади листьев получали при заданных планом эксперимента (невозмозаместимых) сочетаниях облученности и фотопериода: $S11$ (при $E1$ и $T1$), $S21$ (при $E2$ и $T1$), $S12$ (при $E1$ и $T2$), $S22$ (при $E2$ и $T2$). Значения $Se1$ и $Se2$ находили по предварительно полученным интерполяционным формулам $S=f(E)$ при $T=co\ st$. Затем по формулам $S=f(T)$ при $E=co\ st$ находили для промежуточных значений облученности и фотопериода значения Sit , Set и $S2t$ (как показано в табл. 1, которая является фрагментом итоговой таблицы с взаимозаместимыми значениями составляющих дозы).

Таблица 1. К методике вычисления площади листьев при взаимозаместимых значениях составляющих дозы

Фотопериод T	Облученность E		
	$E1$	e	$E2$
$T1$	$S11$	$Se1$	$S21$
t	$S1t$	Set	$S2t$
$T2$	$S12$	$Se2$	$S22$

Для анализа сопоставляли значения площади листьев $S1$ и $S2$, соответствующие одинаковым дозам H , сформированным значениями $E1T2=E2T1$ (симметричными относительно главной диагонали итоговой таблицы).

Результаты исследования. На рис. 3 и 4 показаны зависимости площади листьев от соответственно облученности и фотопериода.

Рис. 3. Зависимости площади листьев от облученности

Рис. 4. Зависимости площади листьев от фотопериода

По методу наименьших квадратов были найдены значения коэффициентов полиномов второй степени. Выбор степени полинома объясняется достаточно гладким характером полученных кривых. Аппроксимационные формулы для зависимости площади листьев S , $см^2$ от облученности E , $Вт·м^{-2}$ при фиксированных значениях фотопериода T , ч.

$$S = -0,516E^2 + 29,063E + 17,678 \text{ при } T=10 \text{ ч } (R^2 = 0,9980),$$

$$S = -0,813E^2 + 44,469E - 62,316 \text{ при } T=15 \text{ ч } (R^2 = 0,9984),$$

$$S = -0,862E^2 + 47,528E - 31,493 \text{ при } T=20 \text{ ч } (R^2 = 0,9706),$$

$$S = -0,728E^2 + 43,198E + 95,333 \text{ при } T=24 \text{ ч } (R^2 = 0,9857).$$

Аппроксимационные формулы для зависимости площади листьев S , см^2 от фотопериода T , ч. при фиксированных значениях облученности E , Вт м^{-2}

$$S = 0,544T^2 - 4,097T + 292,17 \text{ при } E=12,5 \text{ Вт м}^{-2} (R^2 = 0,9877),$$

$$S = 0,144T^2 + 13,445T + 186,78 \text{ при } E=15 \text{ Вт м}^{-2} (R^2 = 0,9983),$$

$$S = 0,067T^2 + 16,002T + 231,59 \text{ при } E=20 \text{ Вт м}^{-2} (R^2 = 0,9887),$$

$$S = 0,231T^2 + 13,684T + 269,25 \text{ при } E=30 \text{ Вт м}^{-2} (R^2 = 0,9909).$$

Данные зависимости построены непосредственно по полученным экспериментальным данным.

Аппроксимационные формулы для зависимости площади S , см^2 от облученности E , Вт м^{-2} при промежуточных значениях фотопериода T , ч.

$$S = -0,695T^2 + 38,027T - 39,174 \text{ при } T=12,5 \text{ ч } (R^2 = 0,9992),$$

$$S = -0,868T^2 + 47,405T - 62,183 \text{ при } T=17,5 \text{ ч } (R^2 = 0,9874),$$

$$S = -0,815T^2 + 46,371T + 23,322 \text{ при } T=22 \text{ ч } (R^2 = 0,9817).$$

Таблица 2. Интеполированные значения площади листьев для взаимозаменяемых сочетаний T и E

Фотопериод T , ч	Облученность E , Вт 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

Таблица 3. Численная оценка соблюдения закона взаимозаменяемости

Доза H , Вт ч м^{-2}	S_1	S_2	Абс. ошибка A , г	Отн. ошибка 5 , %
187,50	364,00	377,47	13,47	4,0
262,50	466,42	466,79	0,37	5,3
350,00	536,26	532,14	-4,12	0,3
440,00	616,06	596,92	-19,15	0,1
528,00	693,05	666,67	-26,38	1,6
218,75	387,34	413,45	26,12	4,2
300,00	508,00	499,56	-8,44	5,9
385,00	585,16	560,47	-24,69	6,1
480,00	660,00	612,67	-47,33	1,9
250,00	416,19	442,08	25,89	0,5
330,00	552,66	522,32	-30,35	4,4
420,00	628,16	575,39	-52,77	3,4
275,00	465,75	461,04	-4,71	0,7
360,00	595,07	536,42	-58,65	2,5
300,00	512,49	473,15	-39,33	3,6

Рис. 5. Зависимость площади листьев от суточной дозы облучения

Эти зависимости получены при тех значениях фотопериода, которые реально не были выставлены в эксперименте, но необходимы для составления взаимозаменяемых сочетаний.

Полученные значения площади листьев приведены в табл. 2.

В табл. 3 построчно приведены значения дозы, сформированные одинаковыми произведениями $E1T2=E2T1$ (симметричными относительно главной диагонали табл. 2), соответствующие им значения площади листьев $S1$ и $S2$, а также абсолютные значения разницы площади листьев $A=S1-S2$ и ее относительные значения $\delta=100|A|/S1$. При вычислении относительной ошибки значения абсолютной ошибки принимали по модулю, поскольку в данном случае нет необходимости учитывать знак разницы площади листьев.

На рис. 5 показана зависимость площади листьев от суточной дозы облучения, построенная по данным промежуточной таблицы (значения из ее главной диагонали).

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.

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 .

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%. 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.

Литература

1. **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.
2. **Карпов В.Н.** Энергосбережение в оптических электротехнологиях АПК. Прикладная теория и частные методики. - СПб, 2010. - 100 с.
3. **Bunsen R., Roscoe H.E.** Pogg. Ann. d. Phys, 117, 536 (1862).
4. **Schwarzshild K.** Phot. Korr. 36, 109 (1899).
5. **Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Мишанов А.П., Маркова А.Е.** Проявление закона взаимозаместимости при выращивании салата под светодиодными источниками излучения // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: сб. научн. тр. - Саранск, 2017. - С. 45-51.
6. **Dougher T.A.O., Bugbee B.** Differences in the response of wheat, soybean and lettuce to reduced blue radiation. Photochem. Photobiol. 2001. - 73, 199-207
7. **Михеева Н.О.** Салаты на гидропонике // Мир теплиц. - 2004. - №2. - С. 22-24.
8. **Kim H.H., Goins G.D., Wheeler R.M., Sager J.C.** Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes. HortSci, 2001. - 39, 1617-1622.
9. **Yorio N.C., Goins G.D., Kagle H.R.** Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. HortSci, 2001. - 36, 380-383.

Literatura

1. **Rakutko S.A., Markova A.E., Mishanov A.P., Rakutko E.N.** Jenergojekologija svetokul'tury - novoe mezhdisciplinarnoe nauchnoe napravlenie // Tehnologii i tehicheskie sredstva mehanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva. - 2016. - № 90. - S. 14-28.
2. **Karpov V.N.** Energoberezenie v opticheskikh jelektrotehnologijah APK. Prikladnaja teorija i chastnye metodiki. - SPb, 2010.-100 s.
3. **Vunsen R., Roscoe H.E.** Pogg. Ann. d. Phys, 117, 536 (1862).
4. **Sshwagzshild K.** Phot. Korr. 36, 109 (1899).
5. **Rakutko S.A., Rakutko E.N., Mishanov A.P., Markova A.E.** Projavlenie zakona vzaimozamestimosti pri vyrashhivanii salata pod svetodiodnymi istochnikami izluchenija // Problemy i perspektivy razvitija otechestvennoj svetotekhniki, jelektrotehniki i jenergetiki: sb. nauch. tr. - Saransk, 2017. -S. 45-51.
6. **Dougher T.A.O., Bugbee B.** Differences in the response of wheat, soybean and lettuce to reduced blue radiation. Photochem. Photobiol. 2001. - 73, 199-207
7. **Miheeva N.O.** Salaty na gidroponike // Mir teplic. - 2004. - №2. - S. 22-24.
8. **Kim H.H., Goins G.D., Wheeler R.M., Sager J.C.** Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes. HortSci, 2001. - 39, 1617-1622.
9. **Yorio N.C., Goins G.D., Kagle H.R.** Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. HortSci, 2001. - 36, S. 380-383.