

Сравнительная оценка основных характеристик натриевых и светодиодных тепличных облучателей

Надежда Петровна Кондратьева¹,
доктор технических наук, профессор;
Дмитрий Алексеевич Филатов²,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: filatov_da@inbox.ru;

Павел Валерьевич Терентьев²,
кандидат технических наук;
Александра Спиро Аль-Хелю²,
магистрант

¹Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, г. Ижевск, Российская Федерация;

²Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Реферат. Показали, что на смену традиционным натриевым тепличным облучателям приходят более эффективные светодиодные. (*Цель исследования*) Провести сравнительную оценку основных характеристик натриевых и светодиодных тепличных облучателей при равном фотосинтетическом фотонном потоке. (*Материалы и методы*) Собрали базу данных о 79 натриевых облучателях (34 облучателя с электронной пускорегулирующей аппаратурой и 45 – с электромагнитной) и 118 – светодиодных. Сравнительную оценку провели в два этапа. На первом этапе получили математические модели зависимости мощности, массы, площади и стоимости облучательных установок от генерируемого ими фотосинтетического фотонного потока. На втором этапе решили системы уравнений натриевых и светодиодных тепличных облучателей по каждой характеристике. (*Результаты и обсуждение*) Потребляемая активная мощность светодиодных облучателей по сравнению с натриевыми в среднем на 33 процента меньше. Площадь светодиодных облучателей в 2,5 раза больше, чем натриевых с электронным балластом, и на 44 процента больше, чем натриевых облучателей с электромагнитным балластом. Масса светодиодных облучателей в 3,5 раза больше, чем натриевых с электронным балластом, и на 20 процентов больше, чем натриевых с электромагнитным балластом. Стоимость светодиодных облучателей дороже, соответственно в 3,5 и 4,3 раза. (*Выводы*) Светодиодные облучатели более энергоэффективны по сравнению с натриевыми. Однако из-за высокой стоимости их внедрение требует технико-экономического обоснования, включающего дополнительные критерии оценки: срок службы, эксплуатационные затраты, цена электроэнергии и другие.

Ключевые слова: освещение в теплицах, натриевые облучатели, светодиодные облучатели, экономическая эффективность тепличных облучателей.

■ **Для цитирования:** Кондратьева Н.П., Филатов Д.А., Терентьев П.В., Аль-Хелю А.С. Сравнительная оценка основных характеристик натриевых и светодиодных тепличных облучателей // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №1. С. 50-54. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-1-50-54.

Comparative Assessment of Sodium and LED Greenhouse Irradiators Main Characteristics

Nadezhda P. Kondratieva¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor;
Dmitry A. Filatov²,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: filatov_da@inbox.ru;

Pavel V. Terentiev²,
Ph.D.(Eng.);
Alexandra S. Al-Helu²,
undergraduate

¹Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russian Federation;

²Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. The authors showed that traditional sodium greenhouse irradiators are being replaced by more efficient LED ones. (*Research purpose*) To conduct a comparative assessment of the main characteristics of sodium and LED greenhouse irradiators with an equal photosynthetic photon flux. (*Materials and methods*) The authors collected a database of 79 sodium irradiators (34 irradiators with electronic ballasts and 45 – with electromagnetic) and 118 – LED. A comparative assessment was carried out in two stages. At the first stage mathematical models of the power, mass, area and cost of irradiation facilities dependence on the



photosynthetic photon flux generated by them were obtained. At the second stage the system of equations of sodium and LED greenhouse irradiators for each characteristic were solved. (*Results and discussion*) The consumed active power of LED irradiators is on average 33 percent less compared to sodium. The area of LED illuminators is 2.5 times larger than sodium irradiators with electronic ballast and 44 percent more than sodium irradiators with electromagnetic ballast. The LED irradiators mass is 3.5 times more than sodium with electronic ballast and 20 percent more than sodium with electromagnetic ballast. The cost of LED illuminators is 3.5 and 4.3 times higher. (*Conclusions*) LED irradiators are more energy efficient compared to sodium ones. However, due to the high cost, their implementation requires a feasibility study, including additional evaluation criteria: service life, operating costs, electricity price and others.

Keywords: greenhouse lighting, sodium irradiators, LED irradiators, economic efficiency of greenhouse irradiators.

For citation: Kondratieva N.P., Filatov D.A., Terentiev P.V., Al-Helu A.S. Sravnitel'naya otsenka osnovnykh kharakteristik natrievykh i svetodiodnykh teplichnykh obluhatel'ey [Comparative assessment of sodium and LED greenhouse irradiators main characteristics]. *Sel'skhoz'yaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N1. 50-54 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-1-50-54.

В последние 5 лет в мире растет интерес к светодиодным облучателям для культивационных сооружений, стремительно развивается рынок производителей и моделей облучательных установок. Прогнозируется, что доля теплиц со светодиодными облучателями к 2022 г. будет составлять 4,8% [1].

Активно проводятся лабораторные и промышленные исследования светодиодных облучателей и их сопоставление с традиционными натриевыми при выращивании различных культур.

Например, проведены исследования влияния облучателя с натриевой лампой ДНаЗ-400 Супер и светодиодного облучателя с процентным соотношением цветов: 30% – в синем, 20% – в зеленом и 50% – в красном на листовую салат сорта Афицион при выращивании методом малообъемной гидропоники при полном искусственном облучении [2]. Под натриевой лампой урожайность составила 3,92 кг/м², что на 21,3% больше, чем при использовании светодиодного облучателя. При этом выход сухого вещества в листьях салата практически не отличался: 187,19 г/м² и 185,90 г/м² соответственно. В листьях салата под натриевой лампой содержание нитратного азота было на 7,14% ниже, чем при использовании светодиодного облучателя (2857,9 и 3077,8 мг/кг).

Выявлено положительное влияние света светодиодов на рост и формирование растений рассады томата F_1 Благовест и огурца F_1 Кураж в интенсивной светокультуре [3]. Рассада под светодиодными светильниками была готова к посадке на постоянное место на 5-9 дней раньше, чем под лампами ДНаЗ-400 Супер. Экономия электроэнергии на 1 г сухого вещества массы растения составила 38,8-40,3%.

Синтез фотосинтетических пигментов в листьях томата и салата под светоизлучающими диодами интенсивнее, чем под натриевыми лампами [4]. Урожайность томата при облучении натриевыми лампами ниже на 37%, огурца – 5%. Применение светоизлучающих диодов в составе фитооблучателей снизило электропотребление в 2 раза.

При светодиодном освещении урожайности плодов растений томата сорта Торреро выросла на 7-10% [5]. Содержание сухого вещества и сахаров в плодах варьировало несущественно. Но по количеству белка, ликопина, аскорбиновой кислоты, соединений-антиоксидантов плоды томата при LED-досветке, значимо превосходили контрольные.

В теплице американской компании *Galema's Greenhouse Inc.*, расположенной в штате Индиана изучали развитие календулы, петунии, циннии, герберы, перца, бальзамина при освещении этими дополнительными источниками света. Активная радиация составляла 70 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ для обоих источников света. Существенных различий в показателях качества растений в зависимости от источников освещения не установлено.

Как видим, применение светодиодных облучающих устройств (ОБУ) в сравнении с натриевыми может привести как к положительному, так и отрицательному результату. Очевидно, что значение имеет спектральный диапазон излучаемой световой энергии. Наибольшее значение имеют синий и красный спектры и их сочетание в облучательной установке [6-10].

Цель исследования – провести сравнительную оценку основных характеристик натриевых и светодиодных тепличных облучателей при равном фотосинтетическом фотонном потоке.

Материалы и методы. Собрана база данных тепличных ОБУ (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019622399). На момент проведения сравнительной оценки числились 79 натриевых ОБУ: 34 с электронной пускорегулирующей аппаратурой (ЭПРА) и 45 – с электромагнитной (ЭмПРА), а также 118 светодиодных. Изучили характеристики тепличных ОБУ: активную мощность, фотосинтетический фотонный поток, длину, ширину, высоту, массу, стоимость. Провели сравнительную оценку в два этапа. На первом этапе получили математические модели зависимости мощности, массы, площади и стоимости ОБУ от генерируемого ими фотосинтетического фотонного потока (*photosynthetic*

photon flux – PPF). На втором этапе решены системы уравнений натриевых и светодиодных тепличных ОБУ по каждой характеристике.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. С ростом генерируемого фотосинтетического фотонного потока увеличивается потребляемая активная мощность натриевых ОБУ с ЭМПРА (рис. 1).

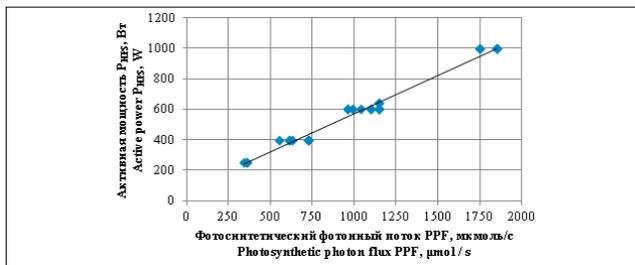


Рис. 1. Зависимость активной мощности натриевых ОБУ с ЭМПРА от генерируемого ими фотосинтетического фотонного потока

Fig. 1. The sodium LED irradiating devices active power with electromagnetic ballasts dependence on the photosynthetic photon flux generated by them

С помощью программы MS Excel получили математическое выражение изменения потребляемой активной мощности P_{HPS} от фотосинтетического фотонного потока (PPF) натриевых ОБУ с ЭМПРА:

$$P_{HPS} = 0,5042 \cdot (PPF) + 66,535, \text{ Вт}; \quad (1)$$

$$R^2 = 0,9807,$$

где R^2 – коэффициент детерминации, о.е.

Площадь натриевых ОБУ с ЭМПРА SHPS прямо пропорциональна генерируемому ими фотосинтетическому фотонному потоку (рис. 2):

$$S_{HPS} = 2 \cdot 10^{-4} (PPF) + 0,0139, \text{ м}^2, \quad (2)$$

$$R^2 = 0,885.$$

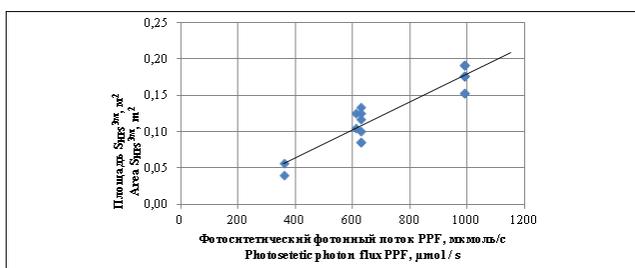


Рис. 2. Зависимость площади натриевых ОБУ с ЭМПРА от генерируемого ими фотосинтетического фотонного потока

Fig. 2. Sodium LED irradiating devices area with electromagnetic ballasts dependence on the photosynthetic photon flux generated by them

Та же тенденция отмечается и в зависимости массы и стоимости натриевых ОБУ с ЭМПРА mHPS (рис. 3, 4).

Определили математическое выражение изменения массы:

$$m_{HPS} = 57 \cdot 10^{-4} (PPF) + 4,7266, \text{ кг}; \quad (3)$$

$$R^2 = 0,8008.$$

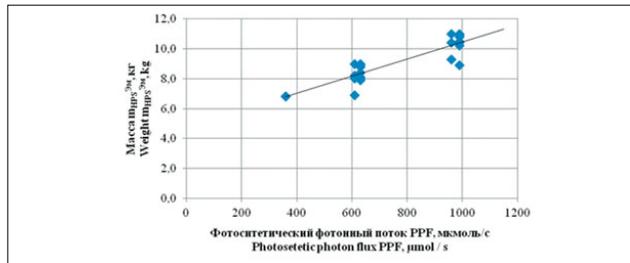


Рис. 3. Зависимость массы натриевых ОБУ с ЭМПРА от генерируемого ими фотосинтетического фотонного потока

Fig. 3. Sodium led irradiating devices mass dependence with electromagnetic ballasts from the photosynthetic photon flux generated by them

Получили математическое выражение изменения стоимости C_{HPS} :

$$C_{HPS} = 9,6895 (PPF) + 1364,6, \text{ руб.}; \quad (4)$$

$$R^2 = 0,8033.$$

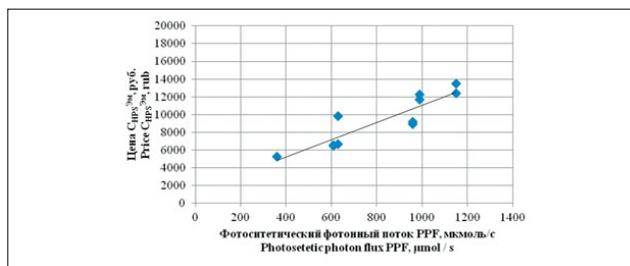


Рис. 4. Зависимость стоимости натриевых ОБУ с ЭМПРА от генерируемого ими фотосинтетического фотонного потока

Fig. 4. Sodium LED irradiating devices with electromagnetic ballasts cost dependence on the photosynthetic photon flux generated by them

Аналогичные исследования проведены для светодиодных ОБУ (рис. 5-8).

Активная мощность светодиодных ОБУ в зависимости от генерируемого ими фотосинтетического фотонного потока равна:

$$P_{LED} = 0,3634 (PPF) + 16,105, \text{ Вт}; \quad (5)$$

$$R^2 = 0,9381.$$

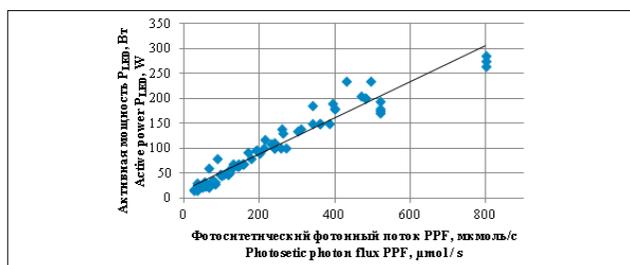


Рис. 5. Зависимость активной мощности светодиодных ОБУ от генерируемого ими фотосинтетического фотонного потока

Fig. 5. LED irradiating devices active power dependence on the photosynthetic photon flux generated by them

Определили также площадь светодиодных ОБУ:



$$S_{LED} = 3 \cdot 10^{-4} (PPF) + 0,0124, \text{ м}^2; \quad (6)$$

$$R^2 = 0,8868.$$

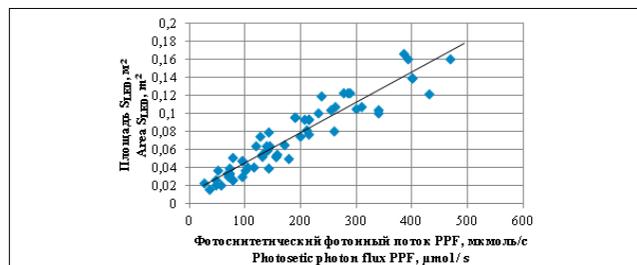


Рис. 6. Зависимость площади светодиодных ОБУ от генерируемого или фотосинтетического фотонного потока

Fig. 6. Led irradiating devices area dependence on the photosynthetic photon flux generated by them

Для расчета массы светодиодных ОБУ определили формулу:

$$m_{LED} = 0,0161 (PPF) + 0,3373, \text{ кг}; \quad (7)$$

$$R^2 = 0,8282.$$

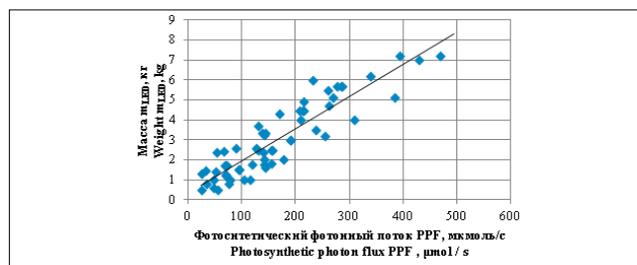


Рис. 7. Зависимость массы светодиодных ОБУ от генерируемого или фотосинтетического фотонного потока

Fig. 7 LED irradiating devices mass dependence on the photosynthetic photon flux generated by them

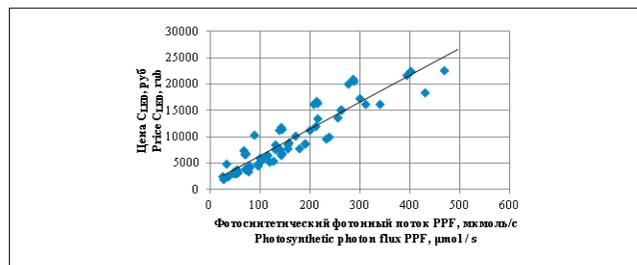


Рис. 8. Зависимость стоимости светодиодных ОБУ от генерируемого или фотосинтетического фотонного потока

Fig. 8. LED irradiating devices cost dependence on the photosynthetic photon flux generated by them

Стоимости светодиодных ОБУ вычисляем согласно уравнению:

$$C_{LED} = 50,787 (PPF) + 1369, \text{ руб}; \quad (8)$$

$$R^2 = 0,8565.$$

Для сравнения тепличных ОБУ по потребляемой активной мощности, площади, массе и стоимости решены системы уравнений по каждой характеристике для двух разных источников.

Приведем пример сравнительной оценки энерго-

эффективности светодиодных и натриевых тепличных ОБУ. Для этого необходимо решить систему из уравнений (1) и (5). Выразив фотосинтетический фотонный поток из первого уравнения и подставив его во второе, получим выражение взаимосвязи мощности светодиодных натриевых облучателей:

$$P_{LED} = 0,72 \cdot P_{HPS} - 31,85. \quad (9)$$

Определим соотношение мощностей светодиодных и натриевых установок по стандартным величинам натриевых ОБУ (табл. 1). В среднем оно составляет 0,67.

Таблица 1		
Соотношение мощностей светодиодных и натриевых облучателей, Вт		
POWER RATIO OF LED AND SODIUM IRRADIATORS, W		
P_{LED}	P_{HPS}	P_{LED}/P_{HPS}
256	400	0,64
400	600	0,67
688	1000	0,69

Аналогично оценили соотношения показателей массы, площади и стоимости натриевых и светодиодных ОБУ (табл. 2).

Таблица 2		
Усредненные характеристики светодиодных и натриевых тепличных облучателей при равном фотосинтетическом фотонном потоке		
AVERAGED CHARACTERISTICS OF LED AND SODIUM GREENHOUSE IRRADIATORS WITH EQUAL PHOTOSYNTHETIC PHOTON FLUX		
Характеристики Specifications	Натриевые ОБУ Sodium led irradiating devices	
	с ЭПРА electronic ballasts	с ЭмПРА electromagnetic ballasts
Мощность P_{LED} / P_{HPS} Power	0,67	0,67
Площадь S_{LED} / S_{HPS} Area	2,5	1,44
Масса m_{LED} / m_{HPS} Mass	3,5	1,2
Стоимость C_{LED} / C_{HPS} Cost	3,5	4,3

Выводы. Потребляемая активная мощность светодиодных облучателей меньше на 33% по сравнению с натриевыми, при равном фотосинтетическом фотонном потоке. Однако из-за высокой стоимости их внедрение требует технико-экономического обоснования, включающего дополнительные критерии оценки (срок службы, эксплуатационные затраты, цену электроэнергии и др.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прикупец Л.Б. Светодиоды в тепличном освещении: возможности и реальность // *Светотехника*. Специальный выпуск. 2019. С. 8-12.
2. Мишанов А.П., Маркова А.Е. Влияние различных типов облучателей на коэффициент энергоэкологичности в светокультуре салата // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2017. №92. С. 25-31.
3. Ракутько С.А., Маркова А.Е., Судаченко В.Н., Колянова Т.В. Определение эффективности светодиодных источников облучения при выращивании рассады томата и огурца // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2013. №84. С. 82-89.
4. Смирнов А.А., Прошкин Ю.А., Соколов А.В. Оптимизация спектрального состава и энергетической эффективности фитооблучателей // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. №1(34). С. 53-60.
5. Молчан О., Обуховская Л., Трофимов Ю., Пугачевский А. LED-освещение в производстве продукции растениеводства закрытого грунта // *Наука и инновации*. 2018. №5(183). С. 38-43.

6. Pardo G.P., Aguilar C.H., Martínez F.R., Canseco M.M. Effects of light emitting diode high intensity on growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and broccoli (*Brassica oleracea* L.) seedlings. *Annual Research & Review in Biology*. 2014. 19. 2983-2994.
7. Fan X.X., Xu Z.G., Liu X.Y., Tang C.M., Wang L.W., Han X.L. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Scientia Horticulturae*. 2013. 153. 50-55.
8. Lin K.H., Huang M.Y., Huang W.D., Hsu M.H., Yang Z.W., Yang C.M. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata). *Scientia Horticulturae*. 2013. 150. 86-91.
9. Schwend T., Prucker D., Peisl S., et al. The rosmarinic acid content of basil and borage correlates with the ratio of red and far-red light. *European Journal of Horticultural Science*. 2016. 81. 5. 243-247.
10. Chen X.-L., Xue X.-Z., Guo W.-Z., et al. Growth and nutritional properties of lettuce affected by mixed irradiation of white and supplemental light provided by light-emitting diode. *Scientia Horticulturae*. 2016. 200. 111-118.

REFERENCES

1. Prikupec L.B. Svetodiody v teplichnom osveshchenii: vozmozhnosti i real'nost' [LEDs in greenhouse lighting: opportunities and reality]. *Svetotekhnika*. Special'nyy vypusk. 2019. 8-12 (In Russian).
2. Mishanov A.P., Markova A.E. Vliyanie razlichnykh tipov obluchatelej na koeffitsient energoekologichnosti v svetokul'ture salata [The influence of various types of irradiators on the coefficient of energy-ecological compatibility in light culture of lettuce]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2017. 92. 25-31 (In Russian).
3. Rakut'ko S.A., Markova A.E., Sudachenko V.N., Kolyanova T.V. Opredelenie effektivnosti svetodiodnykh istochnikov oblucheniya pri vyrashchivaniy rassady tomata i ogurca [Determination of the effectiveness of LED radiation sources for growing tomato and cucumber seedlings]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2013. 84. 82-89 (In Russian).
4. Smirnov A.A., Proshkin Yu.A., Sokolov A.V. Optimizatsiya spektral'nogo sostava i energeticheskoy effektivnosti fitoobluchateley [Optimization of the spectral composition and energy efficiency of phytoradiators]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. 1(34). 53-60 (In Russian).
5. Molchan O., Obuhovskaya L., Trofimov Yu., Pugachevskiy A.

- LED-osveshchenie v proizvodstve produktsii rastenievodstva zakrytogo grunta [LED lighting in the production of indoor crop production]. *Nauka i innovatsii*. 2018. 5(183). 38-43 (In Russian).
6. Pardo G.P., Aguilar C.H., Martínez F.R., Canseco M.M. Effects of light emitting diode high intensity on growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and broccoli (*Brassica oleracea* L.) seedlings. *Annual Research & Review in Biology*. 2014. 19. 2983-2994 (In English).
7. Fan X.X., Xu Z.G., Liu X.Y., Tang C.M., Wang L.W., Han X.L. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Scientia Horticulturae*. 2013.153. 50-55 (In English).
8. Lin K.H., Huang M.Y., Huang W.D., Hsu M.H., Yang Z.W., Yang C.M. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata). *Scientia Horticulturae*, 2013. 150. 86-91 (In English).
9. Schwend T., Prucker D., Peisl S., et al. The rosmarinic acid content of basil and borage correlates with the ratio of red and far-red light. *European Journal of Horticultural Science*. 2016. 81. 5. 243-247 (In English).
10. Chen X.-L., Xue X.-Z., Guo W.-Z., et al. Growth and nutritional properties of lettuce affected by mixed irradiation of white and supplemental light provided by light-emitting diode. *Scientia Horticulturae*. 2016. 200. 111-118 (In English).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 28.01.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 28.01.2020

Статья принята к публикации 19.02.2020
The paper was accepted
for publication on 19.02.2020