

УДК 628.931

DOI 10.46960/2658-6754\_2021\_3\_85

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ РАСТЕНИЙ ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ФЕРМ С ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫМ ТАРИФОМ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

**Д.А. Филатов**

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия  
Нижний Новгород, Россия  
e-mail: [filatov230188@mail.ru](mailto:filatov230188@mail.ru)

**П.В. Терентьев**

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия  
Нижний Новгород, Россия  
e-mail: [terentyevpv@inbox.ru](mailto:terentyevpv@inbox.ru)

**А.С. Полумордвинов**

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия  
Нижний Новгород, Россия  
e-mail: [dekanat-312@yandex.ru](mailto:dekanat-312@yandex.ru)

В настоящее время наиболее перспективными технологическими системами для выращивания растений в мире являются вертикальные фермы с контролируемой средой. Импульсом для их развития стало применение светодиодного освещения в светокультуре. Вертикальные фермы могут сделать производство продуктов питания эффективным и устойчивым. Получать урожай возможно круглый год без перебоев из-за изменения климата, сезона или неблагоприятных природных событий. Закрытые вертикальные фермы с контролируемой средой обеспечивают в 4-6 раз большую урожайность на единицу площади по сравнению с традиционными теплицами и требуют меньше воды при орошении растений. Однако технология вертикальных ферм требует в несколько раз большего количества энергии. В статье рассматриваются режимы работы систем освещения растений для вертикальных ферм при использовании дифференцированного тарифа с позиции экономической эффективности.

**Ключевые слова:** системы освещения растений, вертикальные фермы, дифференцированный тариф.

**Для цитирования:** Филатов, Д.А. Исследование режимов работы систем освещения растений для вертикальных ферм с дифференцированным тарифом на электроэнергию / Д.А. Филатов, П.В. Терентьев, А.С. Полумордвинов // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3. С. 85-94. DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_3\_85

# STUDY OF OPERATING MODES OF PLANT LIGHTING SYSTEMS FOR VERTICAL FARMS WITH DIFFERENTIATED ELECTRICITY TARIFF

**D.A. Filatov**

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy  
Nizhny Novgorod, Russia  
e-mail: [filatov230188@mail.ru](mailto:filatov230188@mail.ru)

**P.V. Terentyev**

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy  
Nizhny Novgorod, Russia  
e-mail: [terentyevpv@inbox.ru](mailto:terentyevpv@inbox.ru)

**A.S. Polumordvinov**

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy  
Nizhny Novgorod, Russia  
e-mail: [dekanat-312@yandex.ru](mailto:dekanat-312@yandex.ru)

**Abstract.** Currently, the most promising technological systems for growing plants in the world are vertical farms with a controlled environment. The impetus for their development was the use of LED-one lighting in photoculture. Vertical farms can make food production efficient and sustainable. It is possible to get a crop all year round without interruption due to climate change, season or adverse natural events. Indoor vertical farms with a controlled environment provide 4-6 times higher yields per unit area than traditional greenhouses and require less water when irrigating plants. However, vertical truss technology requires several times more energy. The article discusses the modes of operation of plant lighting systems for vertical farms when using a differentiated tariff from the standpoint of economic efficiency.

**Keywords:** plant lighting systems, vertical farms, differentiated tariff.

**For citation:** D.A. Filatov, P.V. Terentyev and A.S. Polumordvinov, "Study of operating modes of plant lighting systems for vertical farms with differentiated electricity tariff, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 85-94, 2021.

DOI: [10.46960/2658-6754\\_2021\\_3\\_85](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2021_3_85)

## I. Введение

Одной из ключевых проблем продолжающейся урбанизации во всем мире является транспортировка большого количества еды для обслуживания широких масс населения. Одним из решений является модель вертикальной фермы [1]. Данная технология нацелена на активное ее участие в продовольственной безопасности для постоянно растущего городского населения [2, 3]. Под вертикальными фермами понимают отдельные зда-

ния или сооружения на крышах старых и новых зданий с несколькими уровнями грядок с искусственным освещением [4, 5]. Данные фермы небольшого размера возникают по всему миру; многие города внедряют эту модель в новые и старые здания, в том числе, в склады, которые собственники перепрофилировали под сельскохозяйственную деятельность. Вертикальные фермы могут сделать производство продуктов питания эффективным и устойчивым. Получать урожай можно круглый год без перебоев из-за изменения климата, сезона или неблагоприятных природных событий (засуха или наводнение). Закрытые вертикальные фермы с контролируемой средой обеспечивают в 4-6 раз большую урожайность на единицу площади по сравнению с традиционными теплицами [6, 7] и требуют меньше воды при орошении растений [8]. В то же время технология вертикальных ферм требует в несколько раз большего количества энергии [9].

Наиболее эффективными источниками света являются светодиоды. Преимуществами светодиодных облучателей по сравнению с другими искусственными источниками света для использования в светокультуре являются возможность формирования более эффективного спектра излучения [10], гибкое управление [110], низкая зависимость электрических характеристик от отклонения питающего напряжения [12]. Важным параметром для эффективности вертикальных ферм является режим работы системы освещения.

Проведен анализ литературы по режимам работы систем освещения. В [13] установлено, что вес свежих листьев и корней собранного салата был выше при фотопериоде 16 ч/день в сравнении с фотопериодом 14 ч/день независимо от качества света. В [140] исследовались эффекты фотопериода (12, 15, 18 ч/день) при взаимодействии с концентрацией питательного раствора. Наибольшее количество листьев и масса растений были обнаружены у салата-латука при фотопериоде 18 ч/день. Однако уменьшение фотопериода способствовало снижению содержания нитратов и увеличению свободных аминокислот, растворимого белка и витамина С. В [150] исследовалось влияние фотопериода (12, 16, 18, 24 ч/день) на зеленом и красном салате. Наибольшая сырая масса получена при фотопериоде 16 ч/сутки как для красного, так и для зеленого салата. Недостаточное количество света привело к замедлению роста и заметному повышению содержания нитратов и нитритов у обоих сортов. В [16] увеличение времени облучения с 16 до 24 ч/сутки не привело к увеличению урожая микрозелени. На основании проведенного анализа можно говорить, что наиболее эффективным является фотопериод 16 ч/сутки.

В [140] исследовалось влияние света, обеспечиваемого различной интенсивностью света в сочетании с разными фотопериодами, на рост и морфогенез салата-латука (*Lactuca sativa L.*) в системе заводов закрытого типа. Рассматривались три разных фотопериода: 18/6 (1 цикл), 9/3 (2 цик-

ла) или 6/2 (3 цикла) (свет / темнота). Фотопериод 9/3 при световом потоке  $290 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  показал наибольшую высоту растений и массу свежих побегов. В [18] сравнивались несколько вариантов работы системы освещения в режиме свет/темнота (16/8 один цикл (контроль), 8/4 – два цикла, 6/3 и 4/2 – три цикла, 4/2 – четыре цикла, 3/ 1,5 или 1/0,5 – шесть циклов, 2/1 – восемь циклов) для облучения салата. Вариант 8/4 увеличил сырую биомассу на 5,8 %, вариант 4/2 на 15,8 % по сравнению с контролем. Таким образом, периодическое освещение с четным количеством циклов может быть лучше непрерывного освещения.

Проанализированные исследования не рассматривают вопрос конкретных часов работы системы освещения в течение суток (утром, днем или ночью). Уточнение часов работы может позволить снизить затраты на потребляемую электроэнергию поскольку в разное время суток разная цена на электроэнергию.

Цель настоящего исследования – определение наиболее эффективного режима работы системы освещения при дифференцированном тарифе на электроэнергию в вертикальных фермах с контролируемой средой.

## II. Материалы и методы

Для исследований использовалась вторая ценовая категория (II) для объемов покупки электрической энергии (мощности), учет которых осуществляется по зонам суток расчетного периода. Расчетный период включает три зоны суток. Расчетный период по трем зонам суток включает ночной период (23.00-7.00), полупиковый период (10.00-17.00 и 21.00-23.00), пиковый период (7.00-10.00 и 17.00-21.00). Затраты на электроэнергию по трем зонам суток определяются по выражению:

$$C_{II-II} = W_1 \cdot T_1 + W_2 \cdot T_2 + W_3 \cdot T_3 \quad (1)$$

где  $W_1, W_2, W_3$  – объем потребленной электроэнергии за ночной, полупиковый и пиковый период, кВт·ч;  $T_1, T_2, T_3$  – тариф (цена) на электроэнергию в ночной, полупиковый, пиковый период соответственно, руб. /кВт·ч.

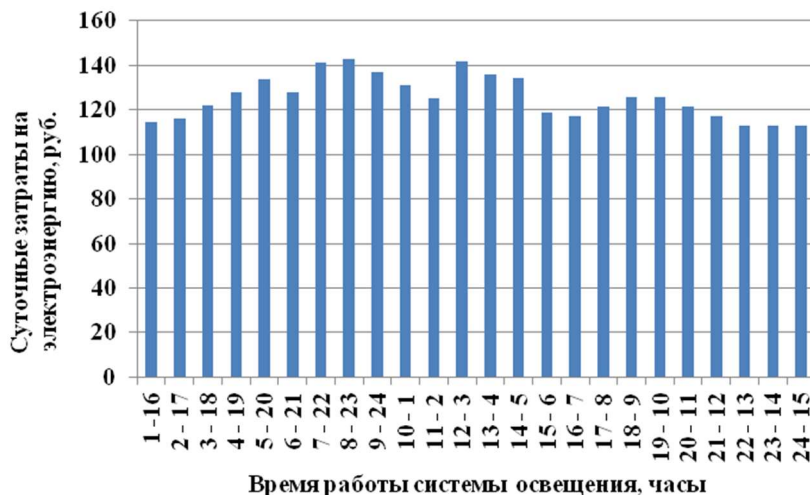
Для расчетов использованы предельные уровни цен на электрическую энергию (мощность), поставляемую ПАО «ТНС энерго НН» потребителям с максимальной мощностью энергопринимающих устройств менее 670 кВт. Для упрощения расчетов принята мощность фермы 1 кВт, поскольку результаты можно масштабировать без их искажения.

## III. Результаты и обсуждение

Наиболее эффективные режимы определялись для двух вариантов работы систем освещения. Первый вариант – непрерывный режим свет/темнота 16/8-часовой, второй прерывистый режим – 8/4-часовой (2 периода в сутки).

Для определения режима с самыми низкими затратами на электроэнергию каждый из них был рассмотрен в 24 возможных вариациях со смещением на один час, и была рассчитана конечная стоимость электроэнергии в сутки.

*16/8-часовой режим освещения.* В данном режиме растения непрерывно облучаются на протяжении 16 часов, затем идет 8-часовой перерыв. График с суточными затратами на электроэнергию представлен на рис. 1.



**Рис. 1.** Суточные затраты на электроэнергию при 16/8-часовом режиме освещения (1 период)

**Fig. 1.** Daily energy costs at 16/8 hours of lighting (1 period)

Из рис. 1 видно, что наиболее экономичными являются три последних режима, где освещение производится с 22<sup>00</sup> до 13<sup>00</sup> или с 23<sup>00</sup> до 14<sup>00</sup>, или с 24<sup>00</sup> до 15<sup>00</sup>.

*8/4-часовой режим освещения (2 периода в сутки).* При использовании данного режима растения облучаются в течение 8 часов, затем 4-часовой перерыв, затем снова облучаются на протяжении 8 часов, после идет 4-часовой перерыв. За сутки проходит 2 периода освещения. График с суточными затратами на электроэнергию представлен на рис. 2.

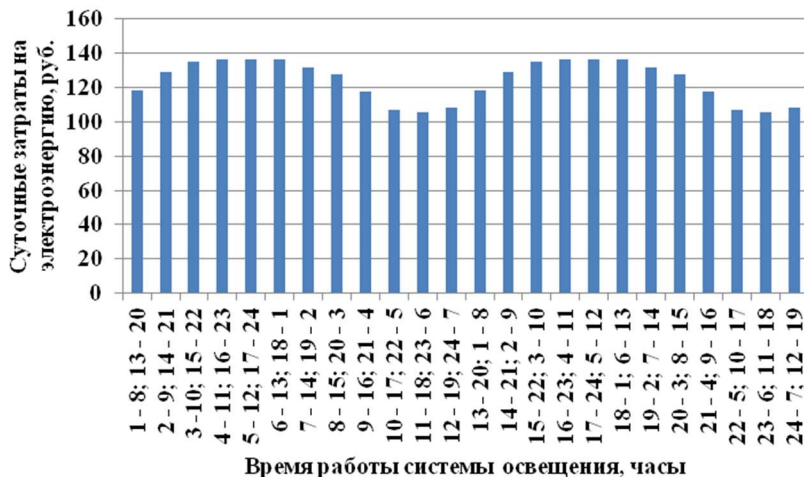


Рис. 2. Суточные затраты на электроэнергию при 8/4-часовом режиме освещения (2 периода)

Fig. 2. Daily energy costs at 8/4 hours of lighting (2 periods)

Из рис. 2 видно, что самым экономичным вариантом является режим, где освещение проводится с 23<sup>00</sup> до 6<sup>00</sup>, затем с 11<sup>00</sup> до 18<sup>00</sup>. Суточные затраты на электроэнергию в данном режиме составляют 105 руб. 63 коп. Данный период считаем контрольным. Режим с освещением с 11<sup>00</sup> до 18<sup>00</sup> и с 23<sup>00</sup> до 6<sup>00</sup> по стоимости электроэнергии оказался равным контрольному.

#### IV. Выводы

Проведенные исследования позволили определить наиболее эффективные режимы работы систем освещения растений для вертикальных ферм с дифференцированным тарифом на электроэнергию (на примере Нижегородской области Российской Федерации). Для непрерывного режима работы в течение 16 часов в сутки наиболее экономичными являются режимы 22<sup>00</sup>-13<sup>00</sup> или 23<sup>00</sup>-14<sup>00</sup> или 24<sup>00</sup>-15<sup>00</sup>. Для прерывистого режима свет/темнота 8/4 часа в сутки самым экономичным вариантом является режим 23<sup>00</sup>-6<sup>00</sup>, затем 11<sup>00</sup>-18<sup>00</sup>.

© Филатов Д.А., 2021

© Герентьев П.В., 2021

© Полумордвинов А.С. 2021

Поступила в редакцию 01.09.2021

Received 01.09.2021

**Библиографический список**

- [1] Al-Kodmany K. The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city // *Buildings*. 2018. № 8 (2). P. 24. DOI: 10.3390/buildings8020024
- [2] Thomaier S., Specht K., Henckel D., Dierich A., Siebert R., Freisinger U., Sawicka M. Farming in and on urban buildings: Present practice and specific novelties of zero-acreage farming (ZFarming) // *Renewable Agriculture and Food Systems*. 2015. № 30 (1). P. 43–54. DOI:10.1017/S1742170514000143
- [3] Despommier D. Farming up the city: The rise of urban vertical farms // *Trends in Biotechnology*. 2013. № 31 (7). P. 388–389. DOI: 10.1016/j.tibtech.2013.03.008
- [4] Toulaiatos D., Dodd I.C., McAinsh M. Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics // *Food and Energy Security*. 2016. № 5 (3). P. 184–191. DOI: 10.1002/fes3.83
- [5] Muller A., Ferré M., Engel S., Gattinger A., Holzkämper A., Huber R., Müller M., Six J. Can soil-less crop production be a sustainable option for soil conservation and future agriculture? // *Land Use Policy*. 2017. № 69 (3). P. 102–105. DOI: 10.1016/j.landusepol.2017.09.014
- [6] Abel C. The vertical garden city: Towards a new urban topology // *CTBUH Journal*. 2010. № 2. P. 20–30.
- [7] Eigenbrod C., Gruda N. Urban vegetable for food security in cities. A review // *Agronomy for Sustainable Development*. 2015. № 35. P. 483–498. DOI: 10.1007/s13593-014-0273-y
- [8] Saffikhani T., Abdullah A.M., Ossen D.R., Baharvand M. A review of energy characteristic of vertical greenery systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. № 40. P. 450–462. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.166
- [9] Barbosa G.L., Gadelha F.D.A., Kublik N., Proctor A., Reichelm L., Weissinger E., Wohlleb G.M., Halden, R.U. Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015. № 12 (6). P. 6879–6891. DOI: 10.3390/ijerph120606879
- [10] 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
- [11] Kondratieva N.P., Filatov D.A., Terentiev P.V. Study of operating modes of a controllable lighting system consisting of a triak dimmer and a LED light source with a controllable driver // *Light & Engineering*. 2020. Vol. 28. № 4. P. 84–90. DOI: 10.33383/2019-083
- [12] Kondratieva N.P., Filatov D.A., Terentiev P.V. Dependence of current harmonics of greenhouse irradiators on supply voltage // *Light & Engineering*. 2020. Vol. 28. № 2. P. 85–88. DOI: 10.33383/2019-024
- [13] Yan Z., He D., Niu G., Zhai H. Evaluation of growth and quality of hydroponic lettuce at harvest as affected by the light intensity, photoperiod and light quality at seedling stage // *Scientia Horticulturae*. 2019. Т. 248. P. 138–144. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.01.002

- [14] Song J., Huang H., Song S., Zhang Y., Su W., Liu H. Effects of photoperiod interacted with nutrient solution concentration on nutritional quality and antioxidant and mineral content in lettuce // *Agronomy*. 2020. № 10 (7). P. 920. DOI: 10.3390/agronomy10070920
- [15] Viršilė A., Brazaitytė A., Vaštakaitė Kairienė V., Miliauskienė J., Jankauskienė J., Novičkovas A., Samuolienė G. Lighting intensity and photoperiod serves tailoring nitrate assimilation indices in red and green baby leaf lettuce // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2019. № 99. P. 6608-6619. DOI: 10.1002/jsfa.9948
- [16] Kong Y., Kamath D., Zheng Y. Blue versus red light can promote elongation growth independent of photoperiod: A study in four brassica microgreens species // *HortScience*. 2019. № 54 (11). P. 1955–1961. DOI: 10.21273/HORTSCI14286-19
- [17] Kang J.H., Kumar S.K., Sua Atulba S.L., Jeong B.R., Hwang S.J. Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system // *Horticulture, Environment and Biotechnology*. 2013. № 54 (6). P. 501-509. DOI: 10.1007/s13580-013-0109-8
- [18] Chen X., Yang, Q. Effects of intermittent light exposure with red and blue light emitting diodes on growth and carbohydrate accumulation of lettuce // *Scientia Horticulturae*. 2018. № 234. P. 220–226. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.02.055

### References

- [1] K. Al-Kodmany, “The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city”, *Buildings*, no. 8 (2), p. 24, Feb. 2018. DOI: 10.3390/buildings8020024
- [2] S. Thomaier, K. Specht, D. Henckel, A. Dierich, R. Siebert, U. Freisinger and M. Sawicka, “Farming in and on urban buildings: present practice and specific novelties of zero-acreage farming (ZFarming)”, *Renewable Agriculture and Food Systems*, no. 30 (1), pp. 43–54, 2015. DOI:10.1017/S1742170514000143
- [3] D. Despommier, “Farming up the city: The rise of urban vertical farms”, *Trends in Biotechnology*, vol. 31, no. 7, pp. 388–389, June 2013. DOI: 10.1016/j.tibtech.2013.03.008
- [4] D. Toulaitos, I.C. Dodd and M. McAinsh, “Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics”, *Food and Energy Security*, no. 5 (3), pp. 184–191, June 2016. DOI: 10.1002/fes3.83
- [5] A. Muller, M. Ferré, S. Engel, A. Gattinger, A. Holzkämper, R. Huber, M. Müller and J. Six, “Can soil-less crop production be a sustainable option for soil conservation and future agriculture?”, *Land Use Policy*, vol. 69, no. 3, pp. 102–105, Dec. 2017. DOI: 10.1016/j.landusepol.2017.09.014
- [6] C. Abel, “The vertical garden city: Towards a new urban topology”, *CTBUH Journal*, no. 2, pp. 20–30, 2010.
- [7] C. Eigenbrod and N. Gruda, “Urban vegetable for food security in cities. A review”, *Agronomy for Sustainable Development*, no. 35, pp. 483–498, 2015. DOI: 10.1007/s13593-014-0273-y
- [8] T. Safikhani, A.M. Abdullah, D.R. Ossen, M. Baharvand, “A review of energy characteristic of vertical greenery systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 40, pp. 450–462, Dec. 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.166



- [9] G.L. Barbosa, F.D.A. Gadelha, N. Kublik, A. Proctor, L. Reichelm, E. Weissinger, G.M. Wohlleb and R.U. Halden, "Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, no. 12 (6), pp. 6879–6891, June 2015. DOI: 10.3390/ijerph120606879
- [10] N.P. Kondratieva, D.A. Filatov, P.V. Terentyev and A.S. Al-Helu, "Comparative assessment of sodium and led greenhouse irradiators main characteristics", *Agricultural Machinery and Technologies*, vol. 14, no.1, pp. 50-54, 2020. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-50-54
- [11] N.P. Kondratieva, D.A. Filatov and P.V. Terentiev, "Study of operating modes of a controllable lighting system consisting of a triak dimmer and a LED light source with a controllable driver", *Light & Engineering*, vol. 28, no. 4, pp. 84–90, 2020. DOI: 10.33383/2019-083
- [12] N.P. Kondratieva, D.A. Filatov and P.V. Terentiev, "Dependence of current harmonics of greenhouse irradiators on supply voltage", *Light & Engineering*, vol. 28, no. 2, pp. 85–88, 2020. DOI: 10.33383/2019-024
- [13] Z. Yan, D. He, G. Niu and H. Zhai, "Evaluation of growth and quality of hydroponic lettuce at harvest as affected by the light intensity, photoperiod and light quality at seedling stage", *Scientia Horticulturae*, vol. 248, pp. 138–144, Apr. 2019. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.01.002
- [14] J. Song, H. Huang, S. Song, Y. Zhang, W. Su and H. Liu, "Effects of photoperiod interacted with nutrient solution concentration on nutritional quality and antioxidant and mineral content in lettuce", *Agronomy*, no. 10 (7), p. 920, June 2020. DOI: 10.3390/agronomy10070920
- [15] A. Viršilė, A. Brazaitytė, V. Vaštakaitė, Kairienė, J. Miliauskienė, J. Jankauskienė, A. Novičkovas and G. Samuolienė, "Lighting intensity and photoperiod serves tailoring nitrate assimilation indices in red and green baby leaf lettuce", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 99 (14), pp. 6608-6619, July 2019. DOI:10.1002/jsfa.9948
- [16] Y. Kong, D. Kamath, and Y. Zheng, "Blue versus red light can promote elongation growth independent of photoperiod: A study in fourbrassica microgreens species", *HortScience*, vol. 54 (11), pp. 1955–1961, Nov. 2019. DOI: 10.21273/HORTSCI14286-19
- [17] J.H. Kang, S.K. Kumar, S.L. Sua Atulba, B.R. Jeong and S.J. Hwang, "Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system", *Horticulture, Environment and Biotechnology*, vol. 54 (6), pp. 501-509, Dec. 2013. DOI: 10.1007/s13580-013-0109-8
- [18] X. Chen and Q. Yang, "Effects of intermittent light exposure with red and blue light emitting diodes on growth and carbohydrate accumulation of lettuce", *Scientia Horticulturae*, no. 234, pp. 220–226, Apr. 2018. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.02.055

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ  
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Филатов Дмитрий Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Dmitriy A. Filatov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Терентьев Павел Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Pavel V. Terentyev**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Полумордвинов Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Alexander S. Polumordvinov**, master of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod, Russian Federation