



## Оценка равномерности поверхностного распределения потока излучения как фактора энергоэффективности светокультуры

С. А. Ракутько\*, Е. Н. Ракутько

*Институт агроинженерных и экологических проблем  
сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ  
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»  
(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)*

\**sergej1964@yandex.ru*

*Введение.* Тепличные осветительные установки являются неотъемлемым элементом системы выращивания растений в культивационных сооружениях с искусственным микроклиматом. Обеспечение равномерности распределения освещенности по площади выращивания является важным для повышения эффективности использования энергии и улучшения качества растений наряду с другими требованиями. Цель работы – рассмотреть математический аппарат для описания распределения потока излучения по поверхности, а также обосновать выбор способов характеристики степени равномерности освещения.

*Материалы и методы.* С позиции теоретической фотометрии рассмотрены основные понятия предметной области: освещенность, тело освещенности, кривая горизонтальной освещенности, кривая силы света. Для оценки энергоэффективности светокультуры использован коэффициент полезного использования потока. Изложены различные способы определения среднего значения освещенности. Представлены формулы для коэффициентов равномерности. Экспериментальную проверку производили на горизонтальной плоскости, моделирующей поверхность для выращивания растений. Использовали светильник с круглосимметричным светораспределением.

*Результаты исследования.* Доказано, что вычисленные по предложенной методике значения освещенности в различных точках освещаемой поверхности соответствуют экспериментально полученным значениям. Большую информацию о равномерности несет коэффициент, учитывающий картину распределения освещенности по всем точкам поверхности. Построен частотный график распределения величины освещенности, и обоснована его практическая применимость. Выявлена взаимосвязь между коэффициентом полезного использования потока и равномерностью создаваемой освещенности. При снижении высоты подвеса светильника возможно существенно увеличить коэффициент полезного использования потока, однако при этом резко ухудшается равномерность освещения.

*Обсуждение и заключение.* Показана возможность оценки энергоэффективности по коэффициенту полезного использования, определяющему долю полезного потока, падающего на поверхность, от общего потока, генерируемого источниками света. Выказано предположение, что этот показатель может характеризовать экологичность светокультуры, поскольку установлена его связь с равномерностью создаваемой освещенности, влияние которой на светокультуру следует из литературных источников.

© Ракутько С. А., Ракутько Е. Н., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

**Ключевые слова:** светокультура, осветительная установка, равномерность освещения, коэффициент полезного использования потока, энергоэффективность, экологичность

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Ракутько, С. А. Оценка равномерности поверхностного распределения потока излучения как фактора энергоэффективности светокультуры / С. А. Ракутько, Е. Н. Ракутько. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202103.470-486 // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 470–486.

*Original article*

## Assessment of Lighting Uniformity as a Factor of Energy Efficiency in Greenhouse Horticulture

S. A. Rakutko\*, E. N. Rakutko

*Institute for Engineering and Environmental Problems*

*in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific*

*Agroengineering Center VIM (Saint Petersburg, Russian Federation)*

\**sergej1964@yandex.ru*

**Introduction.** Greenhouse lighting systems are an integral part of the system for growing plants in cultivation facilities with an artificial microclimate. The uniformity of light distribution over the growing area is important to increase energy efficiency and improve plant quality, among other requirements. The aim of the work is to consider the mathematical apparatus for describing the distribution of light over the surface and to justify the choice of ways to characterize the degree of lighting uniformity.

**Materials and Methods.** The basic concepts of the subject area such as lighting, lighting body, horizontal lighting curve, luminous intensity curve are considered in terms of theoretical photometry. To assess the energy and ecological friendliness of the greenhouse horticulture, the lighting efficiency factor was used. Various methods for determining the average lighting value are presented. The formulas for the uniformity coefficients are presented. Experimental verification was carried out on a horizontal plane simulating a surface for growing plants. A luminary with a round-symmetric light distribution was used.

**Results.** It has been found that the lighting values calculated by the proposed method at various points of the illuminated surface correspond to the experimentally obtained values. It has been shown that the coefficient taking into account the pattern of lighting distribution over all points of the surface carries a lot of information about the uniformity. A frequency graph for the lighting distribution value has been constructed and its practical applicability has been substantiated. The relationship between the lighting efficiency and uniformity of the generated lighting has been revealed. With reduced suspension height of the luminary, it is possible to increase significantly the lighting efficiency factor, however, the lighting uniformity deteriorates sharply.

**Discussion and Conclusion.** There is proposed a method for assessing the energy efficiency by the lighting efficiency factor, which determines the proportion of the useful lighting falling on the surface in the total lighting generated by light sources. It is suggested that this indicator can characterize the ecological quality of photoculture, since it has been established its relationship with the uniformity of the created lighting, the impact of which on photoculture is described in the literature.

**Keywords:** greenhouse horticulture, lighting installation, lighting uniformity, flux efficiency, energy efficiency, ecology friendliness

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

*For citation:* Rakutko S.A., Rakutko E.N. Assessment of Lighting Uniformity as a Factor of Energy Efficiency in Greenhouse Horticulture. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(3):470-486. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.470-486>

## Введение

Для удовлетворения потребностей людей в продуктах питания необходимо развивать сельское хозяйство. В то же время его интенсификация сопряжена с усугублением ряда экологических проблем: изменением климата, утратой биоразнообразия, деградацией земель и пресной воды. Развитие методов выращивания растений в искусственных условиях (теплицах, вертикальных фермах, аква-, гидро- и аэропонных установках) позволяет обеспечить стабилизацию производства, уйти от влияния погодных и других условий для получения запланированных объемов урожая [1].

Установки тепличного освещения являются неотъемлемым элементом системы выращивания растений в культивационных сооружениях с искусственным микроклиматом, особенно в тех регионах, где наблюдается недостаток естественного дневного освещения. Их задача – повышение интенсивности фотосинтеза у растений, которое характеризуется величиной ассимиляции  $\text{CO}_2$ , поэтому их также называют «установками ассимиляционного освещения». В таких установках в настоящее время наиболее широко применяются натриевые лампы. Активно используются светодиодные источники [2]. За последние годы практически подтверждено, что светодиодное освещение имеет множество преимуществ, по сравнению с другими источниками света, благодаря их хорошим спектральным характеристикам, сроку службы, эффективности и экологичности [3]. Перспективным является применение гибридных систем освещения. В этом случае различные

типы источников излучения обеспечивают максимальный полезный эффект от их совместного применения [4]. Такая практика является ярким примером реализации наилучших доступных технологий светокультуры [5].

Когда свет распределен по поверхности (и внутреннему объему) ценоза неравномерно, скорость пролиферации (деления) клеток в различных частях растения так же будет неодинаковой. В результате растения одной группы будут иметь различные физиологические и морфологические показатели, хотя и выращиваются в примерно одинаковых условиях. Впоследствии это повлияет на качество как самих растений, так и получаемой от них продукции. Степень соответствия параметров световой среды требованиям растений можно считать экологичностью светокультуры.

Когда условия освещения в зоне выращивания неоднородны, физиологические процессы в них протекают с различной скоростью. При более интенсивном освещении они растут и развиваются быстрее и вскоре управляться такими растениями, находящимися в различном биологическом состоянии, по единому алгоритму становится довольно сложно. Это затрудняет применение оптимальных алгоритмов управления, что снижает энергоэффективность светокультуры. По этой причине для повышения эффективности использования энергии и улучшения качества растений необходимо улучшать равномерность освещения в помещениях и установках для выращивания растений [6]. Однако некоторые теоретические, связанные с влиянием компоновочной схемы осветительной

установки на энергоэффективность освещения, и практические, касающиеся возможности характеристики степени неравномерности освещенности с помощью простых формул, вопросы остаются недостаточно изученными.

Целью данной работы является рассмотрение математического аппарата для описания распределения потока излучения по поверхности, а также обоснование выбора способов характеристики степени неравномерности.

### Обзор литературы

Вопросы равномерности освещения растений в теплице могут иметь большую важность, чем в осветительной практике бытовых и производственных помещений. Человеческий глаз воспринимает интенсивность света в логарифмической шкале, что делает его нечувствительным к весьма значительным перепадам освещения. Растения же более линейно реагируют на уровень освещения. Поэтому различия в интенсивности, незаметные для человеческого глаза, могут иметь значительное влияние на общий рост и урожай растений при промышленном выращивании. В исследовательской практике неравномерность освещения может привести к повышенной вариативности фиксируемого отклика растений на условия выращивания. Отклик варьируется для отдельных экземпляров, растущих на различных участках поверхности. Это может снизить статистическую достоверность и практическую значимость полученных результатов<sup>1</sup>.

Равномерность распределения освещенности по площади выращивания растений является актуальной проблемой [7]. На этот критерий влияет размещение светильников в теплице. Как правило, основной задачей проектирования системы дополнительного освещения является обеспечение среднего уровня освещенности. Однако важна и равномерность распределения потока по всей площади выращивания<sup>2</sup>. Эти данные являются исходными (наряду с типом выращиваемых культур, планировкой теплицы, ее высотой, параметрами светильника) для определения количества и расположения светильников в системе дополнительного освещения теплицы.

Для характеристики однородности создаваемого на поверхности распределения потока используют ряд параметров, например: градиент равномерности, отношение минимального значения освещенности к максимальному, стандартное отклонение от среднего<sup>3</sup>. В отечественной практике часто используют заимствованный из методики светотехнических расчетов коэффициент минимальной освещенности, вычисляемый как отношение средней освещенности к минимальной. Также используют коэффициент, вычисляемый как отношение минимальной освещенности к максимальной [8]. На практике применяют и обратные величины для этих коэффициентов. На основании анализа различных мер однородности распределения светового потока в теплице предложено использовать частотный график результатов измерений освещенности

<sup>1</sup> Albright L. D., Both A. J. Comparisons of Luminaires: Efficacies and System Design // Proceeding of International Lighting in Controlled Environments Workshop (27–30 March 1994). Madison, Wis.: NASA, 1994. Pp. 281–298. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/62385> (дата обращения: 10.04.2021).

<sup>2</sup> Guidelines for Lighting of Plants in Controlled Environments / G. Dietzer [et al.]. // Proc. Intl. Lighting in Controlled Environments Workshop. Madison, WI: NASA, 1994. Pp. 391–393. URL: [https://www.researchgate.net/publication/234261412\\_Guidelines\\_for\\_lighting\\_of\\_plants\\_in\\_controlled\\_environments](https://www.researchgate.net/publication/234261412_Guidelines_for_lighting_of_plants_in_controlled_environments) (дата обращения: 10.04.2021).

<sup>3</sup> IESNA Lighting Handbook / ed. by M. S. Rea. New York: Illumination Engineering Society of North America, 1993. 1000 p.

во всех точках плоскости выращивания. Такой подход позволяет определить долю точек поверхности, освещенность в которых удовлетворяет некоторым требованиям, например отклоняется от среднего уровня не более чем на 10 %. Другой подход заключается в оценке освещенности в различных точках поверхности и среднего значения освещенности по поверхности [9].

В литературе широко рассмотрены вопросы проектирования систем дополнительного освещения теплиц и их моделирования [10]. Выработаны рекомендации по устройству систем освещения, выпускаемых отдельными производителями. Выявлено, что наибольшее влияние на равномерность света на рабочей плоскости оказывает отражательная способность внутренних поверхностей, следом за этим фактором идет пространственное светораспределение, а количество светодиодов (непосредственно воздействующее на интенсивность освещения) оказывает наименьший эффект [11]. Ученые создали модель равномерности освещения с красной и синей светодиодной матрицей и использовали ее для исследования влияния расстояния между светильником и освещаемой поверхностью на равномерность освещения растений с помощью численного моделирования [12]. Изучена однородность освещения как по интенсивности, так и по спектральному составу [13]. Теоретически обоснованы и практически исследованы вопросы оптимизации светораспределения светильников, обеспечивающих равномерное освещение горизонтальной рабочей поверхности [14]. Разработан генетический алгоритм проектирования тепличных облучательных установок, обеспечивающий равномерность распределения потока по поверхности [15].

Имеются результаты сравнения равномерности света в теплице, создаваемой различными типами светильников, и энергоэффективностью<sup>4</sup>.

Обеспечение энергоэффективности тепличных осветительных установок – важный аспект выращивания растений в искусственных условиях [16]. Энергоэкологический подход является современной междисциплинарной тенденцией и предусматривает взаимосвязь двух процессов: использование энергии обществом и последствия этого для окружающей среды [17]. Данный подход наиболее разработан при оценке эффективности топлива [18]. Сообщается об опыте использования коэффициента энергоэкологичности, учитывающем одновременно экономическую и экологическую целесообразность при выборе источников энергоснабжения [19]. Разработана методика моделирования и анализа энергоэкологичности светокультуры, заключающаяся в определении эффективности преобразования энергии на различных этапах в блоках модели искусственной биоэнергетической системы светокультуры. В одном из блоков модели учитывается распределение потока по освещаемой поверхности [20].

По мнению ряда авторов, распределение света и его поглощение кроной растения более важны, чем электрический коэффициент полезного действия (КПД) прибора. При этом ценность получаемых однородных растений может быть более важна, чем фактор меньшей эффективности использования фотонного потока. Авторы приводят аналогию с поливом: точно так же, как и точное орошение может повысить эффективность использования воды, точное освещение может повысить эффективность электроэнергии [21].

<sup>4</sup> Research on Energy Consumption of HID Lighting / A. J. Both [et al.] // Proc. National Agricultural Demand-Side Management Conf. Ithaca, N.Y.: NRAES, Cornell University, 1992. Pp. 125–134.

Анализ литературных источников показал, что имеется взаимосвязь между равномерностью создаваемой освещенности и степенью экологичности светокультуры, понимаемой как качество среды выращивания. Равномерность освещенности является одним из факторов световой среды.

### Материалы и методы

В исследовании применяется математический аппарат теоретической фотометрии. Понятие облученности  $E$  в фотометрии вводится как величина, характеризующая интенсивность процессов, протекающих под воздействием излучения, и определяется как отношение потока излучения  $d\Phi$  к площади элемента поверхности  $dS$ , на которую он падает:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}, \text{ или } E = \frac{1}{S} \int d\Phi. \quad (1)$$

В энергетической системе величин облученность измеряется в  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ . В растениеводческой практике в настоящее время чаще используют величину фотонной облученности –  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Эта величина называется освещенностью и измеряется в люксах. При

изучении вопросов равномерности для источника с одним и тем же спектром имеет место пропорциональность между этими величинами, поэтому можно применять любую единицу измерения.

В общем случае поток по освещаемой поверхности распределяется неравномерно (рис. 1). Каждой точке поверхности с координатами  $x, y$  можно сопоставить значение освещенности  $E(x, y)$ .

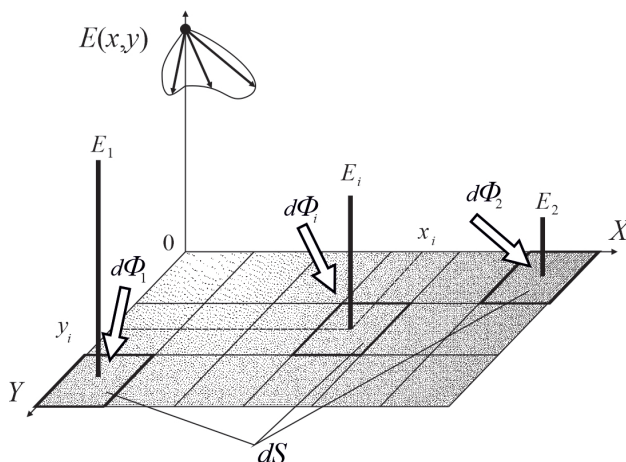
Получаемая в трехмерном пространстве фигура (тело освещенности) имеет объем, вычисляемый по формуле:

$$\Phi = \int_S E(x, y) dS. \quad (2)$$

$\Phi$  численно равен падающему на поверхность потоку излучения.

Оценка эффективности использования потока, зависящего от компоновочной схемы осветительной установки, может быть произведена по величине коэффициента полезного использования потока:

$$\text{КПИ} = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{ис}}} 100\%, \quad (3)$$



Р и с. 1. Общий случай распределения потока  $\Phi$  по поверхности  $S$   
F i g. 1. The general case of distributing the flow  $\Phi$  on the surface  $S$



где  $\Phi_{\text{ис}}$  – поток, излучаемый источником света в пространство.

Если  $E(x,y) = \text{const}$ , то можно говорить о средней освещенности:

$$E_{\text{ср}} = \frac{\Phi}{S}, \quad (4)$$

где  $\Phi$  – полный поток, падающий на поверхность площадью  $S$ .

Представляет интерес кривая, получаемая сечением тела освещенности плоскостью, перпендикулярной освещаемой поверхности и проходящей через проекцию точки подвеса светильника. Для плоской поверхности, как правило, горизонтально расположенной, эта кривая называется кривой горизонтальной освещенности (КГО). Типичный вид КГО показан на рисунке 2.

Характерными точками здесь следует выделить максимальное значение освещенности  $E_{\text{max}}$ ; минимальное значение освещенности  $E_{\text{min}}$  в точке поверхности с координатой  $x_{\text{кр}}$ ; среднее значение освещенности  $E_{\text{ср}}$ , которое может быть найдено из нижеследующих вычислений.

Пусть КГО построена в плоскости, перпендикулярной поверхности диска и проходящей через его центр. Дадим координате  $x$  приращение  $dx$ .

Площадь кольца с радиусом  $x$

$$dS = 2\pi x dx. \quad (5)$$

Поток, падающий на это кольцо

$$d\Phi = E_x dS, \quad (6)$$

где  $E_x$  – освещенность в точке с координатой  $x$  (определяется по КГО).

Тогда

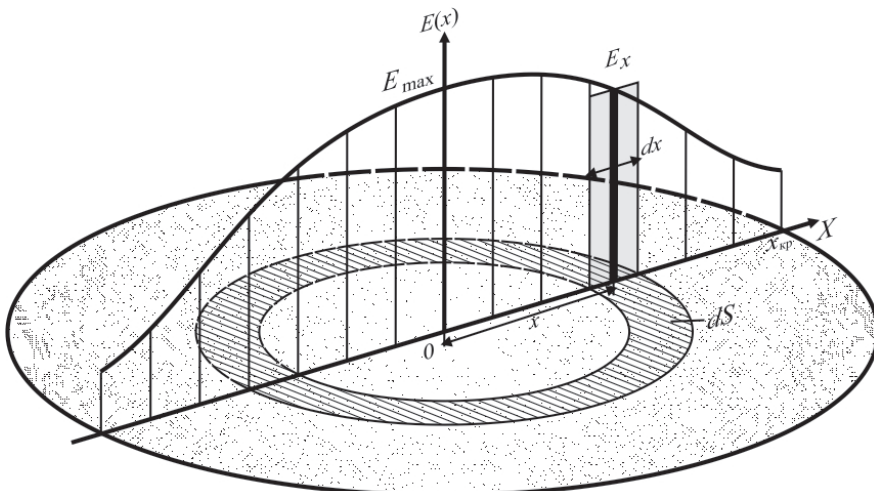
$$d\Phi = E_x 2\pi x dx. \quad (7)$$

Поток, падающий на диск радиусом  $x_{\text{кр}}$

$$\Phi = 2\pi \int_0^{x_{\text{кр}}} E(x) x dx. \quad (8)$$

Площадь диска

$$S = \pi x_{\text{кр}}^2. \quad (9)$$



Р и с. 2. Нахождение среднего значения освещенности от круглосимметричного светильника

F i g. 2. Finding the average value of illumination from a circular symmetric luminaire

Средняя освещенность для рассмотренного частного случая

$$E_{cp} = 2 \frac{\int_0^{x_{кр}} E(x) x dx}{x_{кр}^2}. \quad (10)$$

В общем случае возможны различные подходы к определению среднего значения:

1. Среднее между минимальным и максимальным значением

$$E_{cp1} = \frac{E_{max} + E_{min}}{2}; \quad (11)$$

2. Среднее для всего множества расчетных точек поверхности

$$E_{cp2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i. \quad (12)$$

Равномерность хода кривой горизонтальной освещенности характеризуется коэффициентом равномерности. Здесь также возможны различные подходы:

1. Через максимальное и минимальное значения освещенности

$$z_1 = \frac{E_{max}}{E_{min}}; \quad (13)$$

2. Через среднее и минимальное значения освещенности

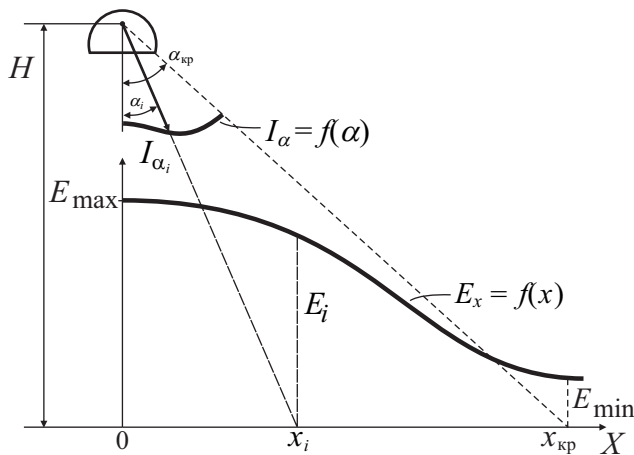
$$z_{21} = \frac{E_{cp1}}{E_{min}} \text{ и } z_{22} = \frac{E_{cp2}}{E_{min}}. \quad (14)$$

При равномерном характере кривой  $E(x)$   $E_{min} = E_{max} = E_{cp}$  значения этих коэффициентов равны единице. При больших отклонениях кривой  $E(x)$  от равномерного характера их значения увеличиваются.

Для построения КГО каждой точке с координатой  $x_i$  необходимо сопоставить значение освещенности  $E_i$  в этой точке (рис. 3).

В соответствии с основным законом светотехники возможно построить распределение освещенности в точках поверхности по известному пространственному распределению потока, заданному кривыми силы света (КСС) в меридиональных плоскостях.

Создаваемая освещенность  $E(x,y)$  пропорциональна силе света в данном направлении  $I_\alpha$  и косинусу угла  $\alpha$



Р и с. 3. Построение КГО по КСС

F i g. 3. Construction horizontal light curve on the light intensity curve



между вертикалью и нормалью к поверхности и обратно пропорциональна квадрату высоты светильника  $H$  над плоскостью:

$$E = \frac{I_{\alpha} \cos^3 \alpha}{H^2}. \quad (15)$$

Пусть освещаемая поверхность представляет собой прямоугольник размерами  $A \times B$ , проекция подвеса светильника отстоит от краев поверхности соответственно на  $a$  и  $b$ .

Для произвольной расчетной точки на поверхности с координатами  $x$  и  $y$  расстояние от нее до проекции светильника на плоскость

$$R = \sqrt{(y - b)^2 + (x - a)^2}. \quad (16)$$

Расстояние от светового центра светильника до расчетной точки

$$L = \sqrt{R^2 + H^2}. \quad (17)$$

Косинус угла между вертикалью и направлением на расчетную точку

$$\cos \alpha = \frac{H}{L} = \frac{H}{\sqrt{H^2 + (y - b)^2 + (x - a)^2}}. \quad (18)$$

При косинусном светораспределении зависимость силы излучения  $I_{\alpha}$  в произвольном направлении  $\alpha$  связана с осевой силой света  $I_0$  выражением

$$I_{\alpha} = I_0 \cos \alpha. \quad (19)$$

При этом

$$I_0 = \frac{\Phi_{\text{ис}}}{\pi}. \quad (20)$$

Окончательно получаем

$$E(x, y) = \frac{I_0 H^2}{(H^2 + (y - b)^2 + (x - a)^2)^2}. \quad (21)$$

Для экспериментальной проверки измерялись значения освещенности, создаваемые светодиодным светильником на горизонтальной плоскости, моделирующей поверхность для выращивания растений.

Высота подвеса светильника  $H = 2,40$  м. Размер рабочей поверхности  $A = 1,90$  м,  $B = 0,90$  м. Проекция подвеса светильника отстоит от краев поверхности на  $a = 0,30$  м и  $b = 0,70$  м соответственно.

На рисунке 4 совмещенно показаны формируемое распределение освещенности и горшочки с растениями перца, размещенные на освещаемой поверхности. В качестве светильника взят светодиодный излучатель мощностью 100 Вт. Излучаемый им световой поток составлял  $\Phi_{\text{ис}} = 9\,027$  лм.

Измерения вели с трехкратной повторностью. Полученные результаты обрабатывали в электронных таблицах Excel.

### Результаты исследования

Вычисленные значения в различных точках освещаемой плоскости показаны в таблице на рисунке 5. Они соответствуют экспериментально полученным значениям в тех же точках, поскольку светораспределение светильника соответствует косинусному закону. Поэтому дальнейший анализ ведется для полученных в результате моделирования значений освещенности.

Как и ожидалось, для данного типа светораспределения светильника максимальная освещенность приходится на точку его проекции на плоскость, минимальная – на дальний угол прямоугольной поверхности.

На рисунке 6 показано тело освещенности, на рисунке 7 – картина горизонтальных изолукс, получаемая сечением тела освещенности плоскостями, параллельными рабочей поверхности.

При исходных данных осевая сила света составила  $I_0 = 2\,873$  кд,

максимальная освещенность  $E_{\max} = 499$  лк, минимальная освещенность  $E_{\min} = 290$  лк, средние освещенности  $E_{\text{ср}1} = 394$  лк и  $E_{\text{ср}2} = 429$  лк. Значения коэффициентов, характеризующих неравномерность освещения:  $z_1 = 1,72$ ;  $z_{21} = 1,36$ ;  $z_{22} = 1,48$  отн.ед.

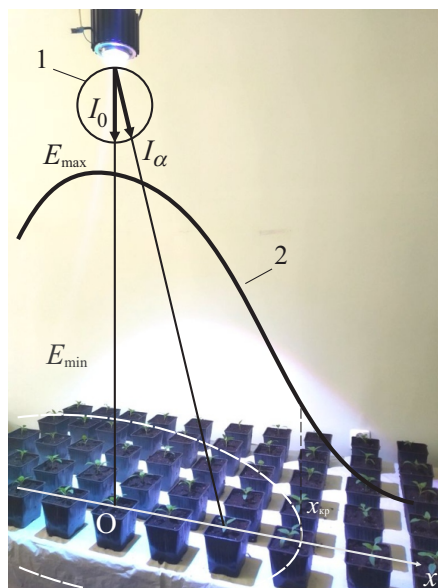
Меньшее значение  $z_{21}$  не означает лучшую равномерность распределения освещенности. Для каждого способа вычисления коэффициентов  $z$  должны быть свои допустимые нормы. Представляется более обоснованным применение коэффициента  $z_{22}$ , поскольку он при расчете среднего учитывает картину распределения освещенности по всем точкам поверхности.

На рисунке 8 показан частотный график распределения величины освещенности всех точек рабочей поверхности. Он отображает количество точек на поверхности, освещенность в которых попадает в интервал между двумя соседними изолуксами. Так, по графику

можно найти, что освещенность от 400 до 499 лк наблюдается на  $28,7 + 44,4 = 73,1$  % площади поверхности.

В соответствии с формулой (2) падающий на рабочую поверхность поток составляет  $\Phi = 733$  лм. То есть коэффициент полезного использования (КПИ) потока 8,1 %. Это очень низкая величина, поэтому представляет интерес выявление зависимости КПИ потока от различных параметров компоновочной схемы. Примем, что светильник находится над серединой освещаемой поверхности. Анализ показывает, что при фиксированном светораспределении КПИ потока зависит от высоты подвеса излучателя (рис. 9).

При снижении высоты подвеса до 0,5 м возможно повысить КПИ до 65 %. Однако при этом резко возрастает неравномерность распределения освещенности. При высотах более 3 м неравномерность, характеризуемая коэффициентом  $z_{22}$ , стремится к единице,

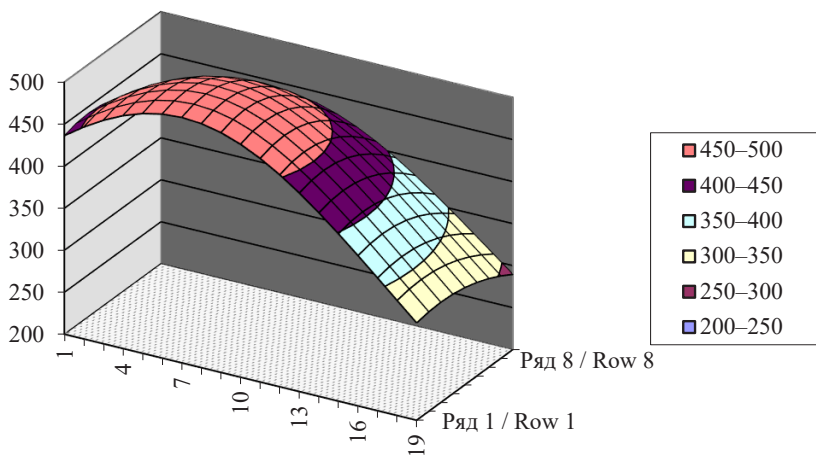


Р и с. 4. Распределение освещенности по верхушкам растений на натурной модели: 1 – КСС; 2 – КГО

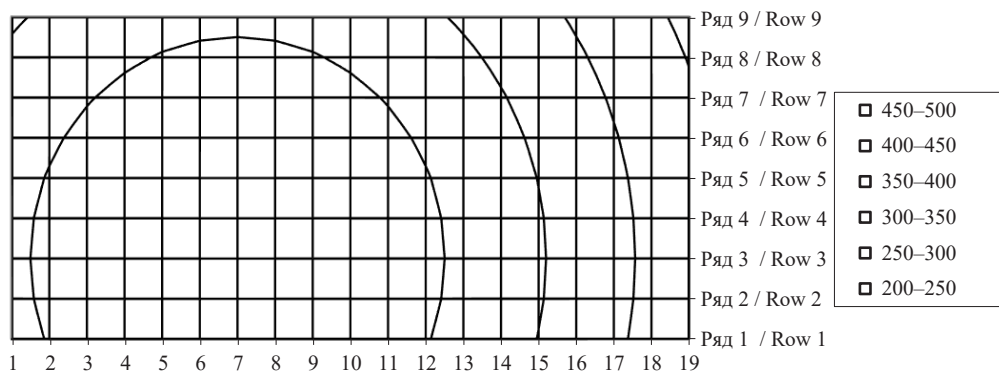
F i g. 4. Lighting distribution on the tops of plants in the full-scale model: 1 – light intensity curve; 2 – horizontal light curve

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	
1	0,1	436,2	452,2	465,9	477,1	485,3	490,3	492,0	490,3	485,3	477,1	465,9	452,2	436,2	418,3	399,1	378,8	357,9	336,8	315,8
2	0,2	440,5	456,7	470,7	482,0	490,3	495,4	497,1	495,4	490,3	482,0	470,7	456,7	440,5	422,4	402,8	382,3	361,1	339,7	318,4
3	0,3	441,9	458,2	472,3	483,6	492,0	497,1	498,9	497,1	492,0	483,6	472,3	458,2	441,9	423,7	404,1	383,4	362,2	340,7	319,3
4	0,4	440,5	456,7	470,7	482,0	490,3	495,4	497,1	495,4	490,3	482,0	470,7	456,7	440,5	422,4	402,8	382,3	361,1	339,7	318,4
5	0,5	436,2	452,2	465,9	477,1	485,3	490,3	492,0	490,3	485,3	477,1	465,9	452,2	436,2	418,3	399,1	378,8	357,9	336,8	315,8
6	0,6	429,2	444,8	458,2	469,1	477,1	482,0	483,6	482,0	477,1	469,1	458,2	444,8	429,2	411,8	393,0	373,1	352,7	332,1	311,4
7	0,7	419,7	434,8	447,7	458,2	465,9	470,7	472,3	470,7	465,9	458,2	447,7	434,8	419,7	402,8	384,6	365,4	345,6	325,6	305,5
8	0,8	407,9	422,4	434,8	444,8	452,2	456,7	458,2	456,7	452,2	444,8	434,8	422,4	407,9	391,7	374,3	355,8	336,8	317,5	298,2
9	0,9	394,2	407,9	419,7	429,2	436,2	440,5	441,9	440,5	436,2	429,2	419,7	407,9	394,2	378,8	362,2	344,6	326,5	308,0	289,6

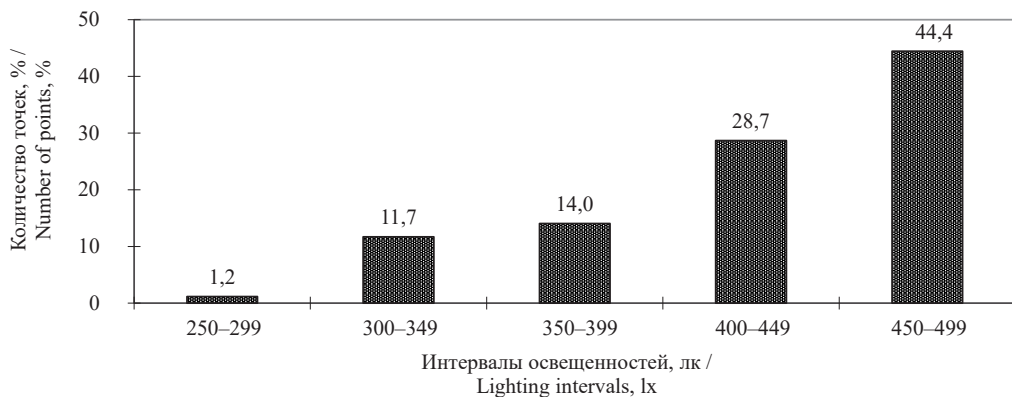
Р и с. 5. Значения освещенности в расчетных точках поверхности  
 F i g. 5. Lighting values at design points of the surface



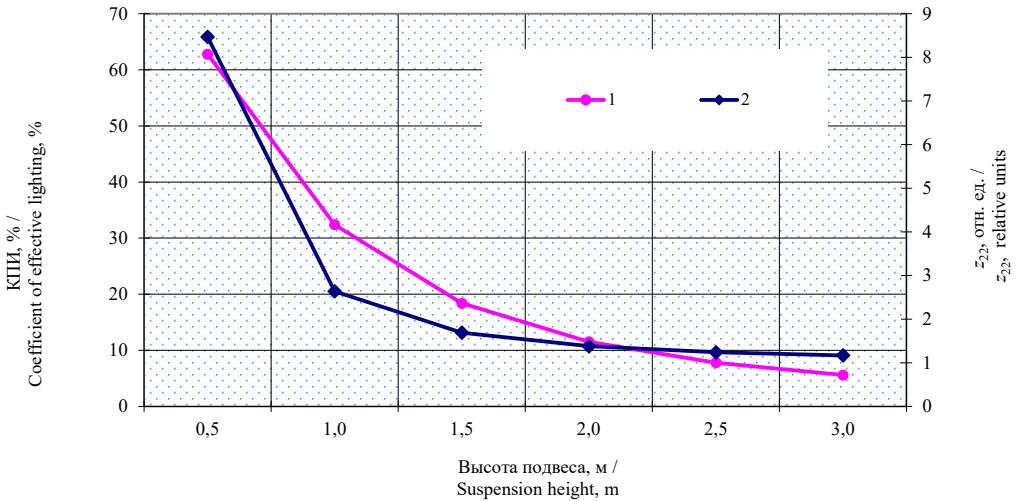
Р и с. 6. Тело освещенности  
F i g. 6. Body of illumination



Р и с. 7. Картина горизонтальных изолюкс  
F i g. 7. Picture of horizontal isoluxes



Р и с. 8. Частотный график  
F i g. 8. Frequency chart



Р и с. 9. Зависимость КПИ потока и равномерности создаваемой освещенности от высоты подвеса светильника: 1 – КПД, %; 2 –  $z_{22}$ , отн. ед.

F i g. 9. Dependence of the coefficient of effective lighting and uniformity of lighting on the suspension height of the luminaire: 1 – efficiency, %; 2 –  $z_{22}$ , relative units

однако при этом резко (до 10 %) снижается величина КПИ.

### Обсуждение и заключение

Управление освещением имеет решающее значение для выращивания сельскохозяйственных культур в контролируемой среде. Наибольшее внимание среди факторов освещения обычно уделяют фотопериоду (продолжительности светового дня), количеству (интенсивности) и качеству (спектральному составу) света.

Равномерность распределения потока по освещаемой поверхности часто игнорируется, несмотря на важность этого фактора. При выращивании тепличных или комнатных культур однородность света не менее важна, чем другие факторы.

Равномерность освещения оказывает большое влияние на распределение уровня урожайности по площади размещения растений, получающих световой поток различной интенсивности. Свет регулирует рост, развитие (в том числе

цветение), а также интенсивность физиологических процессов (фотосинтез, транспирацию) растений.

Обеспечение равномерности важно при выборе ориентации и остеклении новых теплиц, размещении системы затенения, а также для осветительных установок, включая фотопериодические, дополнительные и осветительные приборы (из единственного источника).

Представленный в работе математический аппарат позволяет оценить степень создаваемой равномерности в теплице, а также сопоставить ее с энергоэффективностью осветительной установки.

По нашему мнению, совместное рассмотрение вопросов энергоэффективности и экологичности позволит выйти на трактовку термина энергоэкологичности светокультуры. Это является объектом дискуссии и одним из направлений наших дальнейших исследований.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Urban Horticulture for Food Secure Cities through and beyond COVID-19 / M. M. Khan, M. T. Akram, R. Janke [et al.]. – DOI 10.3390/su12229592. – Текст : электронный // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, Issue 22.
2. **Dutta Gupta, S. D.** Fundamentals and Applications of Light-Emitting Diodes (LEDs) in in Vitro Plant Growth and Morphogenesis / S. D. Dutta Gupta, B. Jatothu. – DOI 10.1007/s11816-013-0277-0 // Plant Biotechnology Reports. – 2013. – Vol. 7. – Pp. 211–220.
3. Horticultural Lighting System Optimalization: A Review / L. Sipos, I. F. Boros, L. Csambalik [et al.]. – DOI 10.1016/j.scienta.2020.109631. – Текст : электронный // Scientia Horticulturae. – 2020. – Vol. 273.
4. Hybride Irradiation as Best Available Practice in Artificial Plant Lighting / S. A. Rakutko, A. Avotins, J. Gruduls, E. N. Rakutko. – DOI 10.22616/ERDev.2020.19.TF254 // Proceedings of 19<sup>th</sup> International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (20–25 May 2020). – Jelgava, 2020. – Pp. 1076–1081.
5. **Ракутько, С. А.** Энергоэкологические основы наилучших доступных технологий светокультуры / С. А. Ракутько. – DOI 10.24411/0131-5226-2019-10121 // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2019. – № 1. – С. 44–60. – Рез. англ.
6. **Xu, Y.** Seven Dimensions of Light in Regulating Plant Growth / Y. Xu. – DOI 10.17660/ActaHortic.2016.1134.56 // Proceedings of ISHS Acta Horticulturae 1134: VIII International Symposium on Light in Horticulture. – 2016. – Vol. 1134. – Pp. 445–452.
7. Comparison and Perspective of Conventional and LED Lighting for Photobiology and Industry Applications / B.-S. Wu, Ya. Hitti, S. MacPherson [et al.]. – DOI 10.1016/j.envexpbot.2019.103953. – Текст : электронный // Environmental and Experimental Botany. – 2020. – Vol. 171.
8. **Moreno, I.** Illumination Uniformity Assessment Based on Human Vision / I. Moreno. – DOI 10.1364/OL.35.004030 // Optics Letters. – 2010. – Vol. 35, Issue 23. – Pp. 4030–4032.
9. **Ciolkosz, D. E.** Selection and Placement of Greenhouse Luminaires for Uniformity / D. E. Ciolkosz, A. J. Both, L. D. Albright. – DOI 10.13031/2013.6842 // Applied Engineering in Agriculture. – 2001. – Vol. 17, Issue 6. – Pp. 875–882.
10. **Saito, K.** Evaluation of the Light Environment of a Plant Factory with Artificial Light by Using an Optical Simulation / K. Saito, Y. Ishigami, E. Goto. – DOI 10.3390/agronomy10111663. – Текст : электронный // Agronomy. – 2020. – Vol. 10, Issue 11.
11. **Xu, Y.** Analysis of the Uniformity of Light in a Plant Growth Chamber / Y. Xu, H. Wang, W. Nsengiyumva. – DOI 10.1109/UV.2018.8642131. – Текст : электронный // Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference on Universal Village. – 2018.
12. Study on Illumination Distribution and Uniformity for LED Plant Light Source Array / Z. Zhu, S. S. Ying, H. J. Hu [et al.]. – DOI 10.3788/gzxb20144308.0822004 // Acta Agriculturae Zhejiangensis. – 2015. – Vol. 27. – Pp. 1489–1493.
13. High Uniformity LED Panel-Light for Plant Lighting / Zh. Shuai, W. Shang-Sheng, M. Bing-Xu [et al.]. – DOI 10.3788/fgxb20183903.0403 // Chinese Journal of Luminescence. – 2018. – Vol. 39, Issue 3. – Pp. 403–413.
14. **Кочетков, Н. П.** Определение кривой силы света, обеспечивающей равномерное освещение горизонтальной рабочей поверхности / Н. П. Кочетков, Т. А. Широбокова, Т. П. Галлямова // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 8. – С. 64–66. – URL: <https://clck.ru/Vrmgm> (дата обращения: 10.04.2021). – Рез. англ.
15. **Ferentinos, K. P.** Optimal Design of Plant Lighting System by Genetic Algorithms / K. P. Ferentinos, L. D. Albright. – DOI 10.1016/j.engappai.2004.11.005 // Intelligence. – 2005. – Vol. 18, Issue 4. – Pp. 473–484.
16. **Zhang, Y.** Comparison of Energy Use Efficiency of Greenhouse and Indoor Plant Factory System / Y. Zhang, M. Kacira. – DOI 10.17660/eJHS.2020/85.5.2 // European Journal of Horticultural Science. – 2020. – Vol. 85, Issue 5. – Pp. 310–320.



17. Urban Horticulture in Retail Parks: Environmental Assessment of the Potential Implementation of Rooftop Greenhouses in European and South American Cities / E. Sanyé-Mengual, J. Martínez-Blanco, M. Finkbeiner [et al.]. – DOI 10.1016/j.jclepro.2017.11.103 // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 172. – Pp. 3081–3091.

18. **Сорока, Б. С.** Использование топлива и загрязнение окружающей среды. (Часть 1. Энергоэкология использования топлива и нормирование вредных выбросов) / Б. С. Сорока // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2007. – № 2. – С. 39–52. – URL: <https://energy.bntu.by/jour/article/view/646> (дата обращения: 10.04.2021). – Рез. англ.

19. Энергоэкологическая оценка использования различных генерирующих источников в сельском хозяйстве / А. Ю. Брюханов, И. А. Субботин, Е. В. Тимофеев, А. В. Эрк. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201903.366-382 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 3. – С. 366–382. – Рез. англ.

20. **Ракутько, С. А.** Моделирование и численный анализ энергоэкологичности светокультуры / С. А. Ракутько, Е. Н. Ракутько. – DOI 10.22314/20737599-2019-13-3-11-17 // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2019. – Т. 13, № 3. – С. 11–17. – Рез. англ.

21. **Nelson, J. A.** Economic Analysis of Greenhouse Lighting: Light Emitting Diodes vs. High Intensity Discharge Fixtures / J. A. Nelson, B. Bugbee. – DOI 10.1371/journal.pone.0099010. – Текст : электронный // PLoS ONE. – 2014. – Vol. 9, Issue 6.

*Поступила 12.04.2021; одобрена после рецензирования 14.05.2021; принята к публикации 21.05.2021*

*Об авторах:*

**Ракутько Сергей Анатольевич**, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией энергоэкологии светокультуры Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филътровское ш., д. 3), доктор технических наук, доцент, Researcher ID: B-2745-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2454-4534>, Scopus ID: 26040971100, [sergej1964@yandex.ru](mailto:sergej1964@yandex.ru)

**Ракутько Елена Николаевна**, научный сотрудник Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филътровское ш., д. 3), Researcher ID: AAW-6856-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3536-9639>, [elena.rakutko@mail.ru](mailto:elena.rakutko@mail.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

С. А. Ракутько – научное руководство, формулирование основной концепции исследования и структуры статьи, написание первоначального варианта статьи.

Е. Н. Ракутько – анализ научных источников, математическое моделирование, написание статьи.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Khan M.M., Akram M.T., Janke R., et al. Urban Horticulture for Food Secure Cities through and beyond COVID-19. *Sustainability*. 2020; 12(22). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/su12229592>

2. Dutta Gupta S.D., Jatothu B. Fundamentals and Applications of Light-Emitting Diodes (LEDs) in in Vitro Plant Growth and Morphogenesis. *Plant Biotechnology Reports*. 2013; 7:211-220. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11816-013-0277-0>

3. Sipos L., Boros I.F., Csambalik L., et al. Horticultural Lighting System Optimization: A Review. *Scientia Horticulturae*. 2020; 273. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109631>

4. Rakutko S.A., Avotins A., Gruduls J., Rakutko E.N. Hybride Irradiation as Best Available Practice in Artificial Plant Lighting. In: Proceedings of 19<sup>th</sup> International Scientific Conference “Engineering

for Rural Development” (20-25 May 2020). Jelgava; 2020. Pp. 1076-1081. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF254>

5. Rakutko S.A. Energy and Ecological Basis of Best Available Techniques of Plant Lighting. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies and Technical Means for Mechanized Production of Crop and Livestock Products. 2019; (1):44-60. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10121>

6. Xu Y. Seven Dimensions of Light in Regulating Plant Growth. In: ISHS Acta Horticulturae 1134: VIII International Symposium on Light in Horticulture. 2016; 1134:445-452. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.56>

7. Wu B.-S., Hitti Ya., MacPherson S., et al. Comparison and Perspective of Conventional and LED Lighting for Photobiology and Industry Applications. *Environmental and Experimental Botany*. 2020; 171. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103953>

8. Moreno I. Illumination Uniformity Assessment Based on Human Vision. *Optics Letters*. 2010; 35(23):4030-4032. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.35.004030>

9. Ciolkosz D.E., Both A.J., Albright L.D. Selection and Placement of Greenhouse Luminaires for Uniformity. *Applied Engineering in Agriculture*. 2001; 17(6):875-882. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.6842>

10. Saito K., Ishigami Y., Goto E. Evaluation of the Light Environment of a Plant Factory with Artificial Light by Using an Optical Simulation. *Agronomy*. 2020; 10(11). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10111663>

11. Xu Y., Wang H., Nsengiyumva W. Analysis of the Uniformity of Light in a Plant Growth Chamber. In: Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference on Universal Village. 2018. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/UV.2018.8642131>

12. Zhu Z., Ying S.S., Hu H.J., et al. Study on Illumination Distribution and Uniformity for LED Plant Light Source Array. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*. 2015; 27:1489-1493. (In Chin.) DOI: <https://doi.org/10.3788/gzxb20144308.0822004>

13. Shuai Zh., Shang-Sheng W., Bing-Xu M., et al. High Uniformity LED Panel-Light for Plant Lighting. *Chinese Journal of Luminescence*. 2018; 39(3):403-413. (In Chin.) DOI: <https://doi.org/10.3788/fjxb20183903.0403>

14. Kochetkov N.P., Shirobokova T.A., Gallyamova T.R. Definition Light Didistribution, Provides Un Form Lighting Horizontal Surface. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AIC. 2013; (8):64-66. Available at: <https://clck.ru/Vrmgm> (accessed 10.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

15. Ferentinos K.P., Albright L.D. Optimal Design of Plant Lighting System by Genetic Algorithms. *Intelligence*. 2005; 18(4):473-484. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2004.11.005>

16. Zhang Y., Kacira M. Comparison of Energy Use Efficiency of Greenhouse and Indoor Plant Factory System. *European Journal of Horticultural Science*. 2020; 85(5):310-320. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.2>

17. Sanyé-Mengual E., Martínez-Blanco J., Finkbeiner M., et al. Urban Horticulture in Retail Parks: Environmental Assessment of the Potential Implementation of Rooftop Greenhouses in European and South American Cities. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 172:3081-3091. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.103>

18. Soroka B.S. Fuel Utilization and Environment Pollution. (Part 1. Energy Ecology of Fuel Utilization and Standardizing of Hazardous Effluents). *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obedineniy SNG* = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. 2007; (2):39-52. Available at: <https://energy.bntu.by/jour/article/view/646> (accessed 10.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

19. Briukhanov A.Yu., Subbotin I.A., Timofeev E.V., Erk A.F. Energy and Environment Assessment of Agricultural Application of Power Generating Sources. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):366-382. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.366-382>

20. Rakutko S.A., Rakutko E.N. Simulation and Numerical Analysis of Energy-and-Ecological Compatibility of Indoor Plant Lighting. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2019; 13(3):11-17. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22314/20737599-2019-13-3-11-17>

21. Nelson J.A., Bugbee B. Economic Analysis of Greenhouse Lighting: Light Emitting Diodes vs. High Intensity Discharge Fixtures. *PLoS ONE*. 2014; 9(6). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099010>

*Received 12.04.2021; approved after reviewing 14.05.2021; accepted for publication 21.05.2021*

*About the authors:*

**Sergey A. Rakutko**, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Energy Ecology of Light Culture, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), D.Sc. (Engr.), Associate Professor, Researcher ID: B-2745-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2454-4534>, Scopus ID: 26040971100, [sergej1964@yandex.ru](mailto:sergej1964@yandex.ru)

**Elena N. Rakutko**, Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), Researcher ID: AAW-6856-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3536-9639>, [elena.rakutko@mail.ru](mailto:elena.rakutko@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

S. A. Rakutko – scientific guidance, formulation of the basic research concept and structure of the article, writing the initial version of the article.

E. N. Rakutko – analysis of scientific sources, mathematical modeling, article writing.

*All authors have read and approved the final manuscript.*