

Разработка и расчет системы агроосвещения на базе светодиодных и натриевых ламп высокого давления

➔ Статья посвящена разработке светотехнического проекта для тепличного освещения. Предложено решение для искусственного освещения теплиц с использованием боковой и общей досветки, рассмотрены основные характеристики и требования, предъявляемые к агроосвещению, а также представлены основные методики расчета.

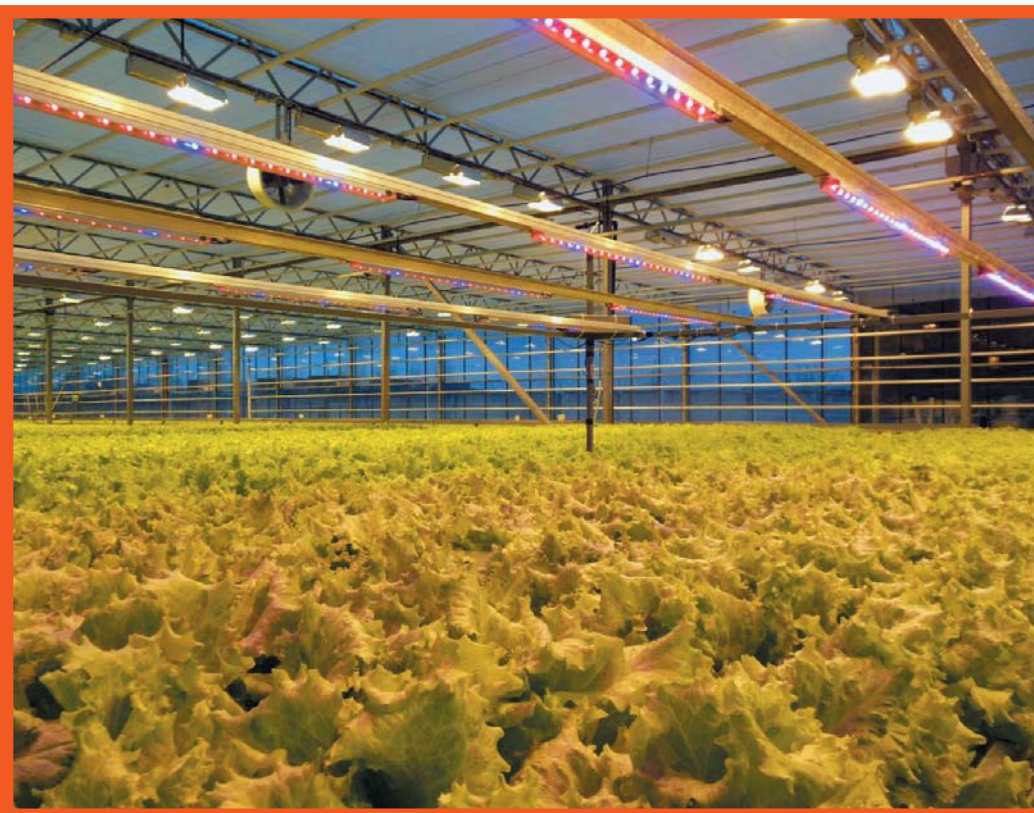
Нестабильная политическая ситуация и свободное поле для реализации бизнеса — весомые аргументы для развития сельского хозяйства в России. Если проанализировать динамику цен на плодово-овощную продукцию в течение года, то становится очевидно, что наиболее рентабельно реализовывать овощи и фрукты с декабря по март. Однако в суровом российском климате, с короткой продолжительностью зимнего дня, их трудно выращивать в зимне-весенние периоды без использования эффективных систем освещения в теплицах.

Ключевой вопрос при проектировании светотехнического решения для теплиц — выбор источников света (ИС). Сейчас в агроосвещении применяются люминесцентные лампы (ЛЛ), натриевые лампы высокого давления (ДНаТ) и светодиоды (СД). Однако при использовании таких источников света в производственных масштабах необходимо обеспечить максимальную световую отдачу, поэтому следует подбирать светильники с большими показателями световых потоков (от 10 клм), а также учитывать их стоимость и срок службы, поскольку они будут применяться в большом количестве. Наиболее целесообразно выбирать для этих целей СД и ДНаТ, поскольку у них, наряду с прочими достоинствами, спектры излучения наиболее эффективно покрывают спектр поглощения растений.

Рассмотрим положительные и отрицательные стороны таких ИС.

Преимущества ДНаТ: низкая стоимость, мощности до 1200 Вт, световой поток до 145 клм, а также они обеспечивают экономию на обогреве. Недостатки: высокие требования к расположению светильников (минимальное допустимое расстояние до растений — 1,5 м из-за нагрева в нижнюю полусферу), отсутствие плавного диммирования, низкая световая отдача, а также использование в конструкции неэкологичных материалов, вследствие чего в случае применения ДНаТ предъявляются высокие требования к условиям их эксплуатации.

СД по сравнению с ДНаТ имеют большую световую отдачу, более продолжительный срок службы, более плавное диммирование. Кроме того, они отличаются экологичностью, у них отсутствует пульсация,



а также возможна перестройка их спектра излучения. СД допустимо располагать близко к растению, поскольку не происходит нагрева в нижнюю полусферу. Недостатки: высокая стоимость, дополнительные затраты на отопление, световой поток до 20 клм.

Учитывая свойства ИС этих двух типов, следует использовать их преимущества и нивелировать недостатки при организации этих светильников в одну систему освещения. ДНаТ больше подходит по техническим параметрам для верхней досветки, а СД незаменимы для бокового освещения. Таким образом, целесообразно применять ДНаТ и СД в тандеме, причем СД будут обеспечивать треть излучения.

В настоящее время, к сожалению, не существует стандартизированной системы норм для дополнительного освещения. Например, при проектировании освещения для теплиц приходится руководствоваться лишь рекомендуемыми нормами, приведенными в иностранных изданиях, в частности в работах [1, 2], или параметрами, полученными на практике [4]. Стоит упомянуть, что агрономов, в отличие от светотехников, интересуют не количественные характеристики света, а обеспечиваемые показатели урожайности. Так, в работе [4] приведены рекомендуемые нормы для различных культур, основанные на том, сколько сухой массы урожая требуется вырастить (табл. 1). К примеру, для сбора 1 кг огурцов с 1 м² площади необходимо еженедельно обеспечивать растения энергией в 3000 Дж.

Если нужно повысить урожайность, то можно увеличить PPFД (Photosynthetic Photon Flux Density — плотность фотосинтетического потока фотонов, характеризующаяся количеством фотонов в секунду на один квадратный метр, или мкмоль/с·м²).

В работе [1] приведены результаты исследования, проведенного для определения эффективности использования дополнительного освещения для выращивания огурцов при PPFД более 200 мкмоль/с·м². Количество продукции растениеводства находится в линейной зависимости от значения PPFД, то есть масса огурцов пропорционально растет при повышении PPFД. Однако стоит заметить, что существует некий предел, до которого допустимо увеличивать

Таблица 1. Необходимое количество энергии для выращивания 1 кг/м² плодов огурцов

Тип огурцов	Плод		Энергия, Дж/см ²
	Масса, г	Длина, см	
Длинноплодный	350-450	26-32	3000-3500
Среднеплодный	180-220	18-22	3500-4000
Короткоплодный, или корнишон	100-130	12-15	4000-4500

значение PPFД. Если это критическое значение будет превышено, эффективность фотосинтеза снизится, перейдя в стадию перенасыщения, и появится необходимость более интенсивной поливки, а растение может погибнуть от перегрева.

В работе [2] представлены результаты исследования, показавшего, что при PPFД, равном 400 мкмоль/с·м², урожайность резко снижается и становится сравнима с полученной при 200 мкмоль/с·м². Например, чтобы обеспечить максимальную урожайность, для огурцов приемлемым будет значение PPFД, равное (16,2 ± 5,2) моль/м² в сутки (минимальное значение — (8,8 ± 1,7) моль/м² в сутки), или 200–350 мкмоль/с·м², для помидоров — (17,2 ± 3,1) моль/м² в сутки (минимальное — (8,8 ± 0,3) моль/м² в сутки), или 180–200 мкмоль/с·м², для перца — (23,0 ± 7,1) моль/м² в сутки (минимальное — (5,8 ± 1,7) моль/м² в сутки), или 350–400 мкмоль/с·м² (данные Applications of supplemental LED, The University of Arizona).

Впрочем, существует возможность превысить приведенные выше пределы, перераспределив свет более равномерно. И поможет это сделать боковое освещение, в частности упомянутое выше решение с использованием ДНаТ и СД. В результате удастся избежать перенасыщения растений в одной плоскости, а также более эффективно и равномерно распределить освещение в другой. Кроме того, будет сэкономлена потребляемая электроэнергия.

С учетом приведенных рекомендаций можно рассчитать долю дополнительного освещения, используя алгоритм, представленный в работе [3]. Для этого необходимо определить долю естественного

освещения, воспользовавшись данными инсоляций для конкретной области с учетом коэффициента пропускания теплицы (обычно $K_{пр} = 0,7$). В табл. 2 приведены результаты расчета для декабря (месяца с минимальной продолжительностью дня), марта и июня (месяца с максимальной продолжительностью дня).

Плотность фотосинтетического потока фотонов в 1 с:

$$PPFD(out)^* = \frac{PPFD(out)}{(T \times 3600) \times 10^6}, \quad (1)$$

где T — продолжительность дня, ч, $PPFD(out)$ — кумулятивная плотность фотосинтетического потока фотонов в день.

Исходя из рекомендуемых норм для огурцов ($PPFD(rec)^* = 200-350$ мкмоль/с·м²) доля дополнительного освещения в декабре с учетом естественного освещения:

$$PPFD(in)^* = PPFD(rec)^* - PPFD(out)^* = 350 - 50,17 = 299,8 \text{ мкмоль/с·м}^2. \quad (2)$$

Для создания системы освещения с использованием дополнительного бокового освещения следует рассчитать значение PPFД, приходящегося на основное и дополнительное освещение. В случае использования ДНаТ и СД одновременно на ДНаТ будет приходиться $2/3 PPFD(in)$. В декабре для ДНаТ величина PPFД будет равна 199,89 мкмоль/с·м², а для СД значение PPFД составит 99,94 мкмоль/с·м².

Зная необходимое количество PPFД в конкретный месяц, можно регулировать этот параметр, варьируя мощность световой установки или изменяя время экспозиции (рис. 1).

Таблица 2. Результаты расчета естественного освещения в теплице

Месяц	Естественная засветка					
	T, ч	E, Вт·ч/м ² в сутки	E, МДж/м ² в сутки	E (in), МДж/м ² в сутки	PPFD (out), моль/м ² в сутки	PPFD (out)*, мкмоль/с·м ²
Декабрь	6	0,2	0,72	0,5	1,08	50,17
Март	11,91	2,36	8,5	5,95	12,79	298,22
Июнь	18,4	5,78	20,81	14,57	31,32	472,77

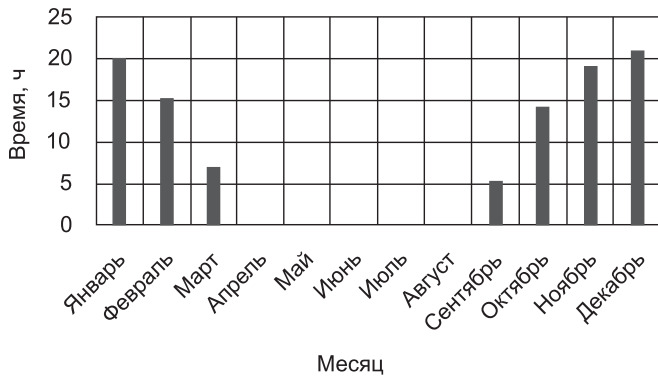


Рис. 1. Динамика времени экспозиции при постоянной досветке PPFD, равной 300 мкмоль/с·м²

В летний период дополнительное освещение, как правило, не нужно, за исключением бессолнечных дней, когда логично будет использовать только СД, которые не создают дополнительного нагрева.

Чтобы рассчитать, сколько потребуется светильников, стоит воспользоваться программой Dialux Evo. Заменив значения светового потока светильника в исходном .ies-файле на PPF (Photosynthetic Photon Flux — фотосинтетический поток фотонов), который характеризует количество фотонов в секунду (мкмоль/с), при расчетах можно оперировать PPFD вместо освещенности. В программе Dialux Evo была смоделирована теплица размерами 20×20 м с расстоянием между шпалерами, равным 1 м, для растений, высота которых вместе с лотком составляет 3 м.

В расчете использовались зеркальные лампы-светильники ДНаЗ супер/Reflux S 600 фирмы Reflux (табл. 3).

В случае с ДНаТ мощностью 600 Вт расстояние от светильника до верхушек растений должно составлять 2–2,5 м. В данном случае было выбрано минимальное рекомендованное расстояние в 2 м (рис. 2).

Общая высота монтажа светильников составила 5 м от пола. Для обеспечения максимально возможного уровня PPFD, равного 300 мкмоль/с·м², с использованием только общего освещения на ДНаТ, необходимо 100 светильников. Что же касается освещения боковых шпалер растений, то здесь PPFD составила 45 мкмоль/с·м², а на высоте 1,5 м снизилась до 20 мкмоль/с·м² (рис. 3).

Общая потребляемая мощность установки была равна 66 кВт. Дальнейшее увеличение количества светильников, для того чтобы повысить уровень PPFD на боковых поверхностях шпалер, невозможно из-за ограничений, обусловленных эффективностью фотосинтеза. Если увеличить общее количество светильников, то будет превышено

Таблица 3. Технические характеристики лампы-светильника Reflux ДНаЗ супер/Reflux S 600

Общий вид	
Мощность лампы, Вт	600
Напряжение сети, В	220
PPF, мкмоль/с	1060

Таблица 4. Технические характеристики светильника Philips GreenPower LED interlighting

Общий вид	
Мощность лампы, Вт	117
Напряжение сети, В	220
PPF, мкмоль/с	220

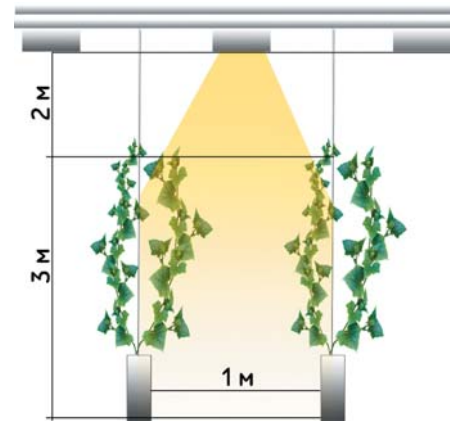


Рис. 2. Расположение ДНаТ и шпалер с растениями

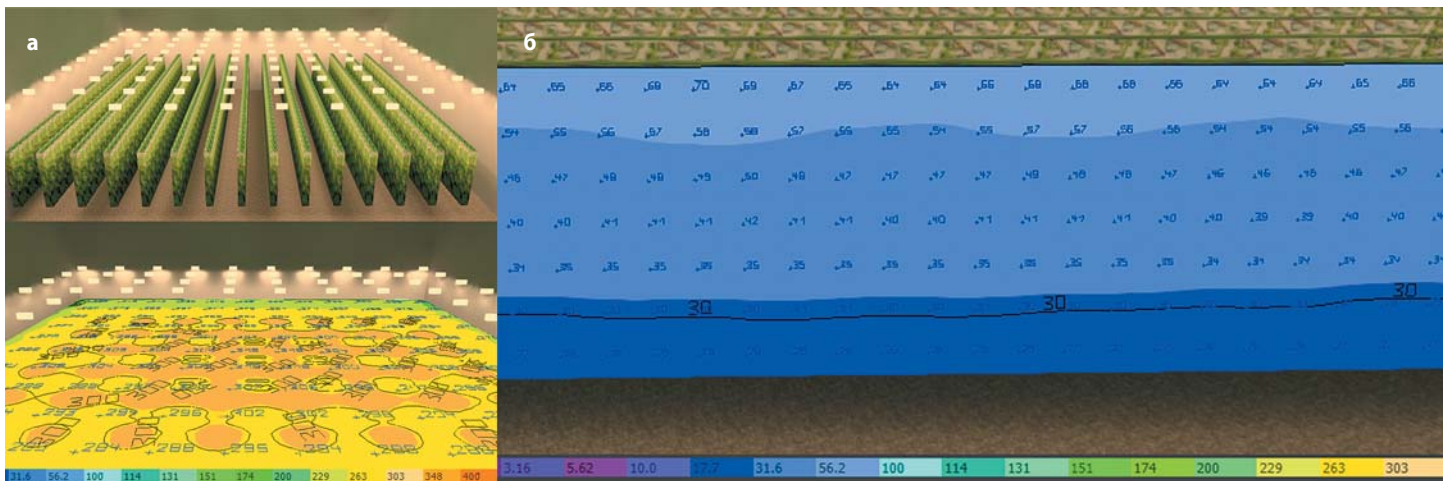


Рис. 3. Расчет PPFD (в мкмоль/с·м²) для ДНаТ: а) для плоскости на высоте 3 м от пола; б) расчет PPFD на уровне плоскости шпалер

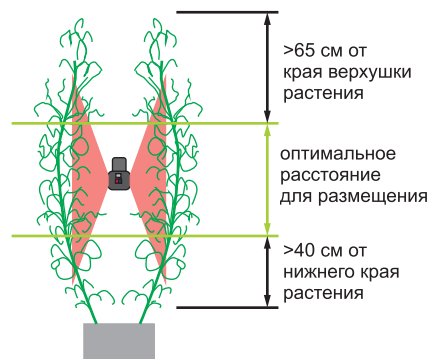


Рис. 4. Расположение светильников Philips GreenPower LED interlighting в один ряд

допустимое значение PPFД на уровне верхушек растений.

Теперь рассмотрим светотехническое решение на базе тандема СД и ДНаТ. Для бокового освещения были использованы светильники GreenPower LED interlighting фирмы Philips (табл. 4).

Светильники были расположены с учетом рекомендаций фирмы Philips (рис. 4, 5) [5].

Особенностью СД является то, что они могут быть расположены сколь угодно близко к растению, что увеличивает их эффективность. Чтобы в декане обеспечить досветку в диапазоне расчетного PPFД, для ДНаТ равного 200 мкмоль/с·м², необходимо 64 светильника, а для бокового освещения, составляющего 100 мкмоль/с·м², требуется 100 (рис. 6). Таким образом,

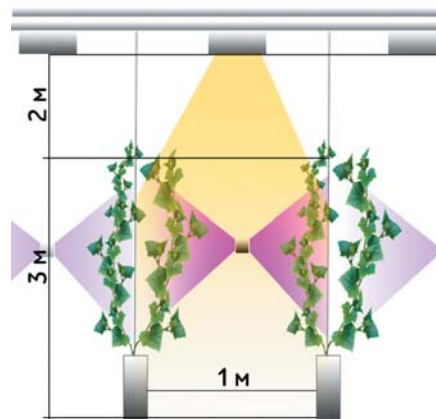


Рис. 5. Расположение ДНаТ и СД в случае однорядового расположения

потребляемая мощность установки будет равняться 53,9 кВт.

Эффективность установки можно повысить, добавив второй ряд светильников и придерживаясь рекомендаций, приведенных в работе [5] (рис. 7). В результате количество ДНаТ

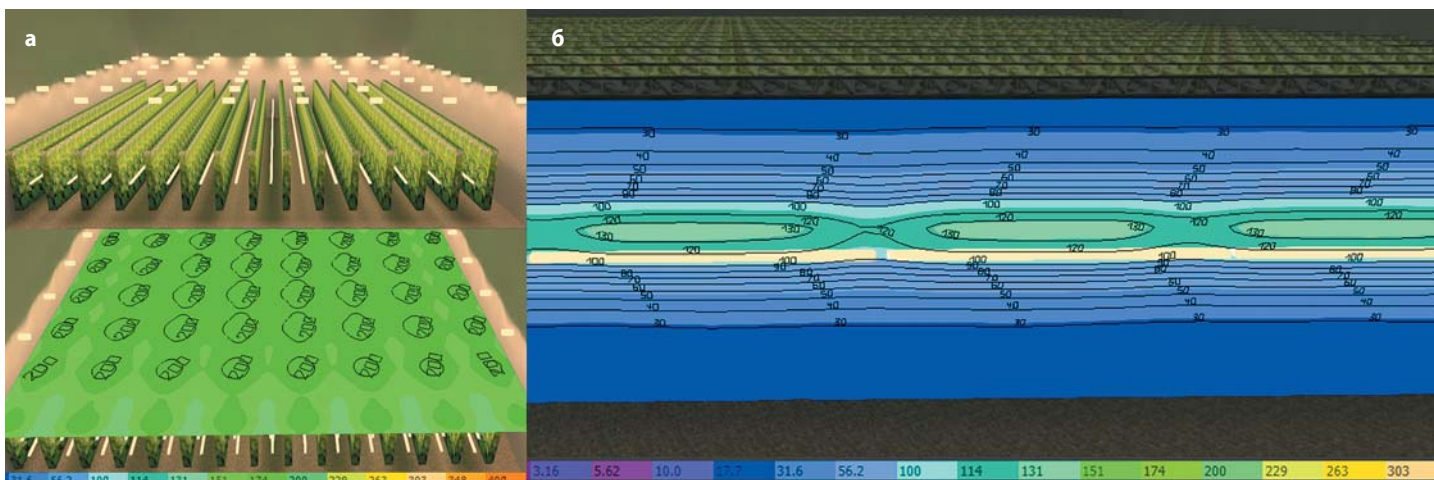


Рис. 6. Расчет PPFД (в мкмоль/с·м²) для ДНаТ и СД в случае однорядового расположения: а) для плоскости на высоте 3 м от пола; б) на уровне плоскости шпалер, без учета общего освещения на ДНаТ

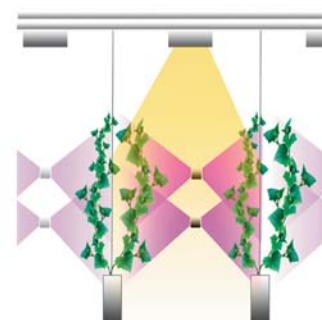
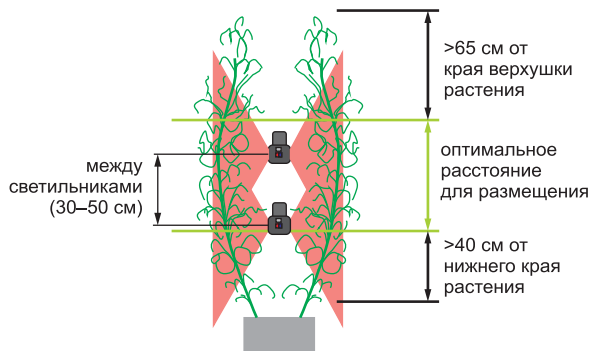


Рис. 7. Расположение светильника Philips GreenPower LED interlighting в два ряда (а); двухрядовое расположение ДНаТ и СД (б)

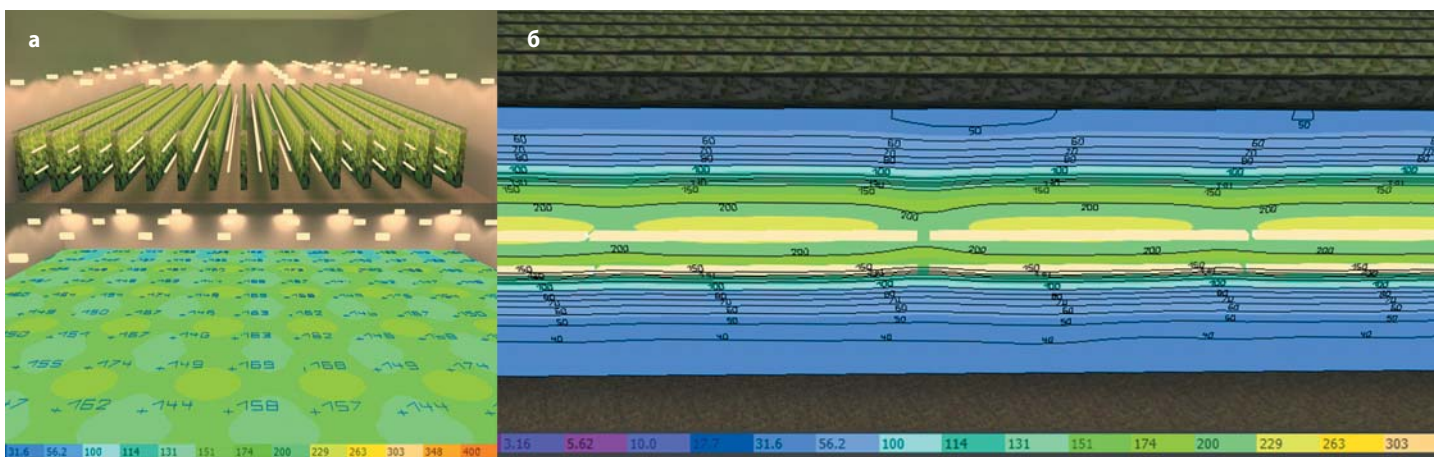


Рис. 8. Расчет PPFD (в мкмоль/с·м²) для ДНаТ и СД в случае двухрядового расположения: а) для плоскости на высоте 3 м от пола; б) на уровне плоскости шпалер, без учета общего освещения на ДНаТ

возможно уменьшить на 15 светильников (рис. 8). Общая потребляемая мощность установки составит 55,4 кВт.

Итоги

Принимая решение повышать уровень PPFD для роста урожайности, не забывайте о том, что его можно увеличивать лишь до определенного предела. Однако если грамотно перераспределить свет и использовать наряду с общей досветкой боковую, удастся повысить эффективность светотехнической установки для растений. Например, применение только общей досветки на базе ДНаТ не помогает добиться необходимого освещения шпалер. Не весь свет равномерно распределяется по плоскости роста растений, на уровне 1,5 м от пола и ниже PPFD резко снижается, а весь свет оказывается сосредоточенным на верхушках растений.

При увеличении количества светильников PPFD на уровне высоты растений пропорционально возрастает, однако не оказывает существенного влияния на усиление освещения на уровне

шпалер. К тому же значение PPFD, необходимое для реализации эффективного процесса фотосинтеза, имеет свой предел, превышать который не только экономически невыгодно, но и вредно для растений.

Таким образом, в результате совместного применения бокового и общего освещения можно использовать преимущества ДНаТ и СД, нивелируя их недостатки, а также повысить предел насыщения растений светом, избегая дополнительного нагрева от ДНаТ тогда, когда вполне достаточно естественного тепла (в летний период), и включая только боковое освещение посредством СД. Регулировать количество света, попадающего на растения, предполагается диммированием ИС в случае применения СД или разбиванием на группы и включением их при использовании ДНаТ. ●

Литература

1. The effect of photosynthetic photon flux density on cucumber and tomato transplants assimilative indices / James A. Weber, John D. Tenhunen, David M.

Gates, Otto L. Lange. // Proceedings of the 7th International Scientific Conference Rural Development. 2015.

2. Antioxidant responses of cucumber (*Cucumis sativus*) to photoinhibition and oxidative stress induced by norflurazon under high and low PPFDs / Jung S., Kim J. S., Cho K. Y., Tae G. S., Kang B. G. // Screening Research Division, Korea Research Institute of Chemical Technology. P.O. Box 107. Yusung. Taejeon. South Korea. Plant Sci. 2000. Apr 25. 153 (2).
3. Паниткин Ю. А. Свет для растений. Искусственное освещение / Институт медико-биологических проблем РАН. Лаборатория изучения воздействия светодиодного освещения на рост и развитие растений. Москва. 2014.
4. Цыдендамбаев А. Д., Нестеров С. Ю., Семенов С. Н. Досвечивание овощных культур: методическое пособие / Тепличный сервис. Москва. 2014.
5. Thosar Abhay. GreenPowerLED interlighting // Philips Horticulture LED Solutions. Amsterdam. Netherlands. 2015.