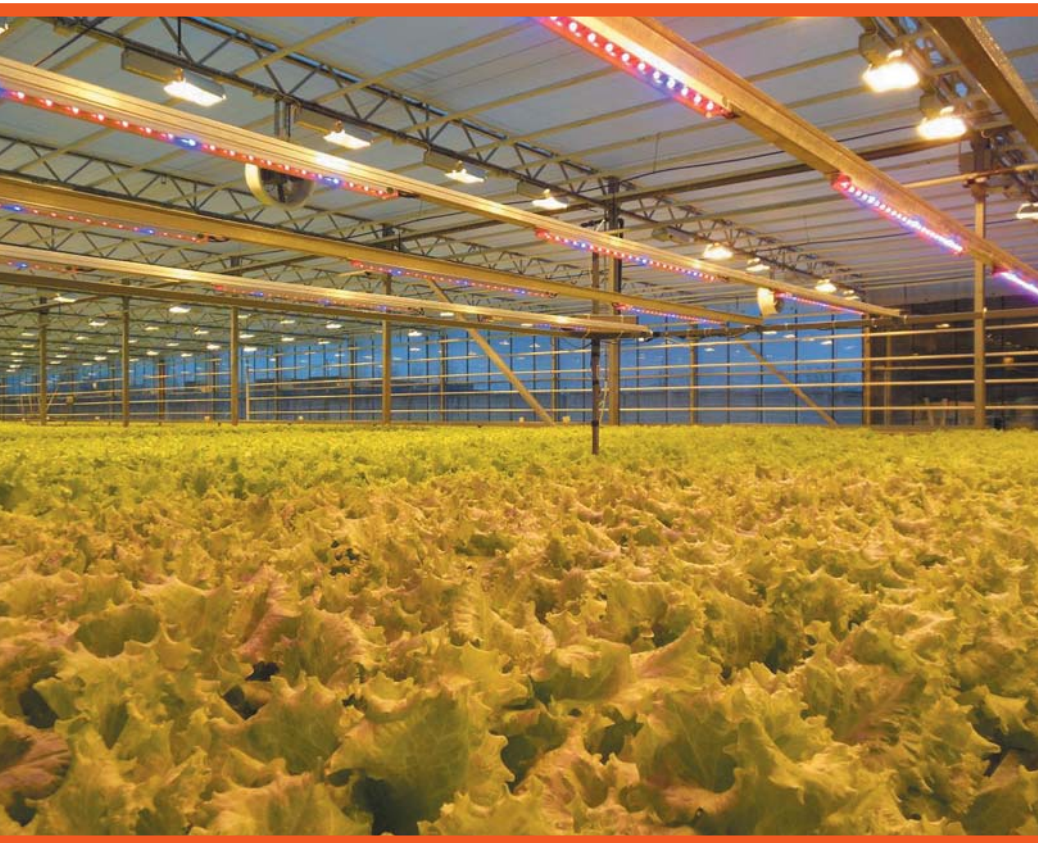


Ян Эшдаун (Ian Ashdown) | Перевод: Владимир Рентюк

# Светодиодное освещение для растениеводства

➔ Системы на основе твердотельного освещения все чаще используются в растениеводстве, в том числе для теплиц и закрытых «вертикальных ферм». Для удовлетворения потребностей растениеводческой промышленности разработчикам таких систем необходимо понимать требования, которые предъявляются к спектральному распределению энергии для фотосинтеза, обеспечивающему оптимальное состояние растений и их рост. В статье предлагается обзор влияния спектрального состава освещения на растения и обсуждается вопрос конвертации люмен и люкс в единицы PAR и PPFD.



**Т**вердотельное освещение в растениеводстве имеет хорошие перспективы. Однако производители осветительных приборов и специалисты в области растениеводства «разговаривают на разных языках». Успех же на этом рынке будет зависеть от базового понимания фотосинтеза растений и спектрального распределения мощности освещения, которое требуется для создания оптимально комфортных условий, обеспечивающих здоровье и рост растений. Производители источников твердотельного освещения и разработчики должны также четко понимать, как конвертировать фотометрические единицы люмен и люкс в фотосинтетически активное излучение и плотность фотосинтетического фотонного потока для различных источников света, включая светодиоды белого света и квазимонохромные. Для целей растениеводства наличие многоканальных светильников на основе регулируемых по цвету твердотельных источников света, то есть с перестраиваемым спектральным распределением мощности, предоставит новые возможности для изучения уникальных требований в части спектральных характеристик освещения для различных культур и интеграцию таких твердотельных систем освещения с системами парникового климат-контроля.

## Фотосинтез растений

Фотосинтез — это процесс, который используется растениями для преобразования электромагнитного излучения (света) в химическую энергию, необходимую для их роста и развития. Все, что нужно для этого процесса, — диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ), питательные вещества и вода. Сам процесс не является особо эффективным; только 4–6% от поглощенного излучения преобразуется в химическую энергию [9]. Тем не менее это именно тот двигатель, который в наибольшей степени управляет жизнью на нашей планете.

Фотосинтетически активное излучение (Photosynthetically Active Radiation, PAR) определяется как электромагнитное излучение в спектральном диапазоне 400–700 нм, которое фотосинтезирующие живые организмы способны использовать в процессе фотосинтеза, чтобы превратить углерод из  $\text{CO}_2$  в углеводы. Измерение фотосинтетически активного излучения в растениеводстве, как для

научно-исследовательских целей, так и для проектирования систем парникового освещения, осуществляется специальными фотометрами [1].

Условная единица измерения для PAR — это фотосинтетическая плотность потока фотонов (Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD), которая выражается в единицах моль на квадратный метр в секунду<sup>1</sup>. В этом случае каждый фотон поглощается, независимо от его длины волны (и, следовательно, энергии), и, как предполагается, в равной мере участвует в процессе фотосинтеза. Это происходит в соответствии с законом Штарка — Эйнштейна, который гласит, что между длинами электромагнитных волн в диапазоне 400 и 700 нм каждый фотон (или квант), который поглощается, будет возбуждать один электрон, независимо от энергии фотона. По этой причине поток фотосинтетических фотонов также называют квантовым потоком.

Поглощение листьями растений любого фотона с данной длиной волны зависит от спектрального коэффициента поглощения листа, который, в свою очередь, определяется в основном его оптическими свойствами, в том числе концентрацией растительных фотопигментов, таких как хлорофиллы А и В, различные каротиноиды (каротины и ксантофиллы) и антоцианы. Хлорофиллы несут ответственность за характерный зеленый цвет листьев; каротиноиды и антоцианы вносят вклад в желтый, оранжевый и красный цвета, которые проявляются в осенних листьях после разложения хлорофилла.

Типичные спектры поглощения хлорофилла А, хлорофилла В, бета-каротина и двух изоформ фитохрома показаны на рис. 1. Следует отметить, однако, что эти спектры являются приблизительными. Они измерялись в пробирке путем растворения пигментов из экстрактов в растворителе, который оказывает влияние на поглощение спектра. Обычно полагается, что использования синих и красных светодиодов будет вполне достаточно для целей растениеводства. В действительности дело обстоит гораздо сложнее.

### Влияние спектра на фотосинтез

МакКри (McCree) в исследовании [4] показал измерение квантового выхода поглощения CO<sub>2</sub> для листьев 22 видов культурных растений<sup>2</sup>. Используя измерения с интервалом в 25 нм для всех видов растений, он выделил эффективный участок спектра (рис. 2), который является наиболее характерным для большинства культурных растений.

Действие, оказываемое спектром, здесь представлено простым графиком, показывающим его биологическую эффективность в зависимости от длины волны падающего света.

Как отмечает МакКри в [4], PPFD не является идеальным показателем фотосинтетически активного излучения по той причине, что в этом случае систематически завышается эффективность синего света по отношению к красному. Тем не менее это представление весьма полезно, хотя бы потому, что этот показатель не зависит от какого-либо конкретного вида растений и может быть измерен как в лаборатории, так

и в полевых условиях с помощью спектрометра со спектрально-калиброванным квантовым датчиком, таким как LI-190SA от компании LI-COR [5].

### Из люксов в PPFD

Как разработчикам систем освещения, нам нужно иметь некий способ перевода люменов в PAR и освещенности в PPFD. Но мы можем сделать это только в том случае, если нам известно или можем оценить спектральное распределение мощности (Spectral Power Distribution, SPD) источника света.

Итак, пусть мы имеем некий источник света с известным относительным SPD, например типичный «холодный белый» светодиод с цветовой температурой 5000 К (рис. 3).

1 Вт мощности излучения на длине волны 555 нм, по определению, равен 683 лм. Учитывая приведенную в CIE 1931

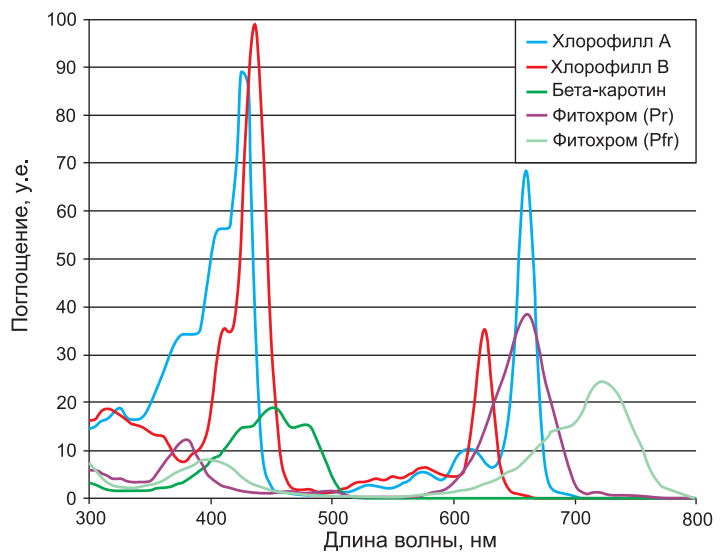


Рис. 1. Спектральные характеристики поглощения фотопигментов

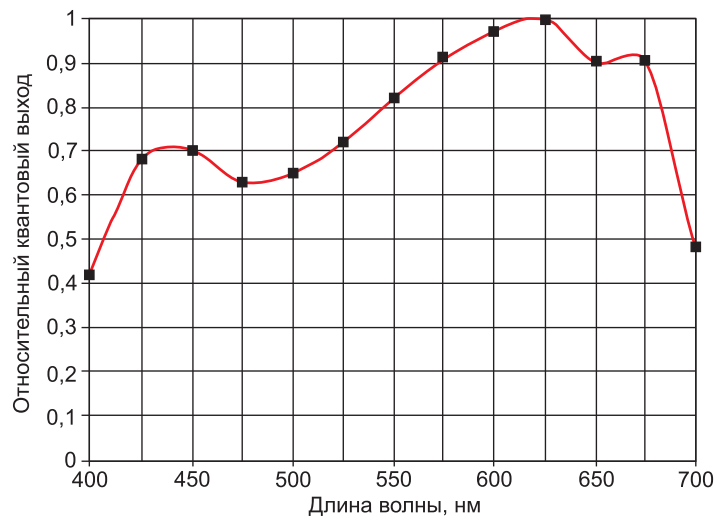


Рис. 2. Влияние спектра на фотосинтез для культурных растений

<sup>1</sup> Моль — единица измерения, используемая в химии для выражения количества атомов в веществе, которое эквивалентно числу атомов в 12 г изотопа углерода-12, что соответствует числу Авогадро, значение которого, обозначаемое как N<sub>A</sub>, равно 6,022×10<sup>23</sup> атомов (в данном случае фотонов) на моль.

<sup>2</sup> Квантовый выход фотосинтеза определяется как мкмоль двуокиси углерода, ассимилированной (поглощенной) листом в расчете на каждый поглощенный им квант света.

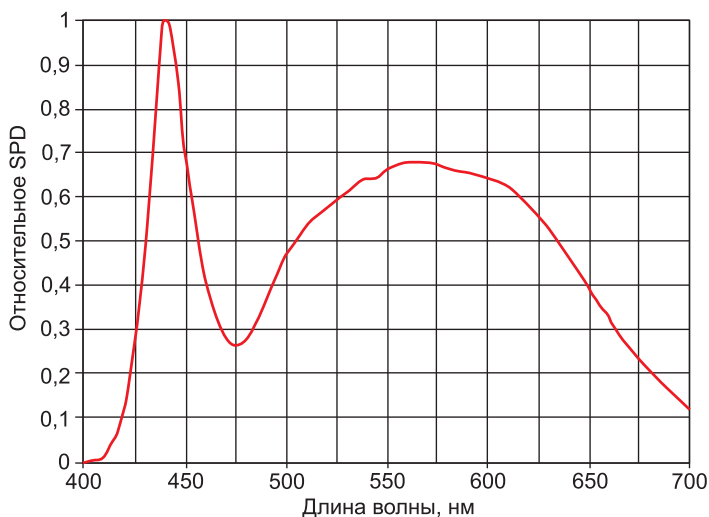


Рис. 3. Относительное спектральное распределение мощности излучения светодиода с цветовой температурой 5000 К

функцию относительной световой эффективности (рис. 4), мы можем вычислить спектральную плотность лучистого потока  $\vartheta(\lambda)$  в ваттах на нанометр для каждого люмена:

$$\Phi(\lambda) / lm = \frac{W_{rel}(\lambda)}{683 \times \sum_{400}^{700} V(\lambda) W_{rel}(\lambda) \Delta\lambda},$$

где:  $W_{rel}(\lambda)$  — относительное спектральное распределение мощности;  $V(\lambda)$  — эффективность световой функции на длине волны  $\lambda$ ;  $\Delta\lambda$  — интервал длин волн (как правило, 5 нм). Для приведенного выше примера спектральный поток излучения на нанометр для каждого люмена при 440 нм составляет 22,5 мкВт, а по отношению к общему потоку излучения на люмен — 3,18 мВт.

При этом мы можем вычислить фотосинтетический фотонный поток (Photosynthetic Photon Flux, PPF) на нанометр в единицах мкмоль в секунду на нанометр:

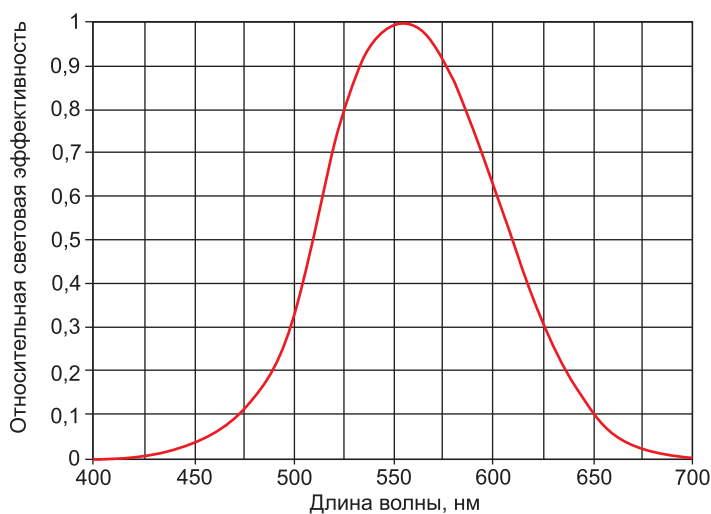


Рис. 4. CIE 1931 относительная световая эффективность V(λ)

$$PPF / nm = 10^{-9} \times \frac{\lambda \Phi(\lambda)}{(N_A \times 10^{-6}) hc},$$

где  $N_A$  — это число Авогадро. А вот суммирование в диапазоне 400–700 нм дает PPF на люмен для данного источника света:

$$PPF = \frac{10^{-3}}{N_A hc} \times \sum_{400}^{700} \lambda \Phi(\lambda) \Delta\lambda \approx 8,359 \times 10^{-3} \times \sum_{400}^{700} \lambda \Phi(\lambda) \Delta\lambda.$$

Учитывая значение освещенности ( $lm/m^2$ ) и зная SPD источника света, мы можем также вычислить PPFD в мкмоль/с/м<sup>2</sup> для данного источника света. Для приведенного выше примера один килолюкс равен 14,62 мкмоль/с/м<sup>2</sup>.

### Коэффициенты пересчета

В технической литературе достаточно легко найти графические представления спектрального распределения энергии источника света, но значительно труднее найти эту информацию в табличной форме, подходящей для указанных выше расчетов. К счастью, эта информация опубликована в стандарте CIE 15: 4 «Колориметрия» [2]. Он не включает в себя светодиоды с излучением «белый свет», но эта информация может быть получена путем оцифровки данных из каталогов производителей (например, из [6]).

Учитывая такую информацию, можно рассчитать коэффициенты для пересчета килолюксов в PPFD для большинства источников света.

Таблица 1 не включает в себя такие коммерческие продукты, как Sylvania SHP-TS GroLux (с цветовой температурой 2050 К), потому что компания Sylvania, как и большинство других производителей ламп, не публикует характеристики в части SPD для своих ламп в табличной форме. Но имеется возможность оцифровать графическое представление белых светодиодов, потому что полоса синих светодиодов накачки равна, по крайней мере, 15 нм. А вот оцифровать опубликованные данные по SPD для натриевых ламп высокого давления и металлогалогенных ламп невозможно. Это связано с тем, что их разрешение по длине волны неизвестно. Субнанометровая ширина линии излучения, например, может варьироваться в сторону увеличения до пяти раз, в зависимости от биннинга (разбраковки), который может быть равен 1 или 5 нм.

Таблица 1. Коэффициенты пересчета освещенности (килолюкс) в PPFD (мкмоль/с/м<sup>2</sup>)

Источник света	Коэффициенты пересчета
CIE A (лампа накаливания, 2856 К)	17,0
CIE 5000К дневной свет (D50)	28,5
CIE 5500К дневной свет (D55)	28,0
CIE 6500К дневной свет (D65)	25,2
CIE 7500К дневной свет (D75)	22,8
CIE HP1 (стандартная натриевая лампа высокого давления, 1959 К)	3,9
CIE HP2 (натриевая лампа высокого давления расширенным спектром, 2506 К)	13,0
CIE HP3 (металлогалогенная, 3144 К)	9,2
CIE HP4 (металлогалогенная, 4002 К)	9,0
CIE HP5 (металлогалогенная, 4039 К)	13,9
2700 К белый светодиод	16,9
3000 К белый светодиод	18,2
3500 К белый светодиод	17,4
4000 К белый светодиод	17,7
5000 К белый светодиод	14,6

## Системы светодиодного освещения для растениеводства

В настоящее время наиболее распространенным источником света для освещения парников, который обычно используется в дополнение к дневному свету в течение зимних месяцев, являются натриевые лампы высокого давления (High-Pressure Sodium Lamp, HPS, НЛВД). Тем не менее, с ростом интереса к городскому растениеводству, которое опирается исключительно на электрическое освещение, светодиоды обладают многими преимуществами. Это особенно верно для систем выращивания овощей в многоуровневых теплицах, где используются близко расположенные стойки с поддонами, на которых выращиваются растения в виде многоуровневых вертикальных конструкций. В таких условиях применение натриевых ламп высокого давления является непрактичным.

МакКри в [4] отмечает, что относительный квантовый выход излучения спектра, влияющего на урожайность фотосинтеза, имеет два пика с длинами волн в 440 нм и 620 нм. Он также отметил, однако, эффект Роберта Эмерсона (Robert Emerson), который заключается в том, что красный свет с длиной волны более 700 нм, относительно малоэффективный в фотосинтезе высших растений, становится вполне эффективным, если использовать его совместно с более коротковолновым красным светом. Это явление, названное эффектом усиления Эмерсона, было положено в основу гипотезы, согласно которой фотосинтез включает две разные световые реакции, и оптимальные условия создаются для него в том случае, когда две эти реакции протекают одновременно. В частности, добавление белого или синего света к источнику длинноволнового красного света может с успехом увеличить скорость фотосинтеза.

Зеленый свет также используется в процессе фотосинтеза, как это можно видеть из результатов воздействия спектра на урожайность культур (рис. 2). Было установлено, что зеленый свет воздействует на фотосинтез в самом теле листа более эффективно, чем красный или синий [8]. Кроме того, насекомые, которые используются в теплицах для опыления и в качестве средств биологической борьбы с вредителями, лучше видят в зеленой и ультрафиолетовой областях спектра.

Вполне вероятно, что именно по этой причине многие заводские светодиодные осветительные модули содержат InGaN-светодиоды с эффективной длиной волны 450 нм, а также синие светодиоды и AlInGaP темно-красные светодиоды с длиной волны 660 нм. Типичным примером таких светодиодных модулей является Philips Luxeon, которые сочетают в себе «королевский синий» и «насыщенный красный» цвет излучения [7]. Оба этих источника света весьма эффективны, так как превращают в видимый свет около 45% от подводимой к ним электрической мощности. Зеленые светодиоды, хотя и являются весьма полезными, редко используются из-за их гораздо меньшего КПД излучения. Однако в ближайшее время эта ситуация может в корне измениться, поскольку компания OSRAM Opto недавно объявила о разработке InGaN зеленых светодиодов с 25% внешнего квантового выхода на длине волны 530 нм.

При этом, однако, проблема заключается в том, что длины волн 450 и 660 нм близки к пределам нашего цветового зрения (рис. 4). Следовательно, компания Philips и другие производители, как правило, выражают оптические характеристики таких продуктов в радиометрических терминах, а не в терминах фотометрии, а именно — в милливаттах на люмен.

Таким образом, процесс проектирования освещения становится немного сложнее. Сначала нужно оцифровать опубликованные светодиодные спектральные распределения мощности для определения коэффициентов пересчета между милливаттами и люменами. Это будет необходимо для моделирования при проектировании осветительной системы. Коэффициент определяется по формуле:

$$\Phi_L = 0,683 \times \frac{\sum_{400}^{700} \Phi_R(\lambda)V(\lambda)}{\sum_{400}^{700} V(\lambda)},$$

где:  $\Phi_L$  — световой поток;  $\Phi_R(\lambda)$  — относительный спектральный поток излучения;  $V(\lambda)$  — функция спектральной чувствительности зрительного аппарата.

Используя в качестве примера данные для Philips Luxeon с цветами «королевский синий» и «насыщенный красный», коэффициенты пересчета составят примерно 0,07 и 0,03 лм/мВт соответственно. Тем не менее, к этим цифрам нужно подходить с некоторой осторожностью, так как они относятся только к светодиодам, имеющим излучение с длиной волны 450 и 660 нм. Если, например, пиковая длина волны насыщенного голубого (синего) светодиода 440, а не 450 нм, то коэффициент пересчета будет равен 0,05 лм/мВт. Аналогичным образом, если пиковая длина волны насыщенного красного светодиода была 650, а не 660 нм, то коэффициент пересчета будет равен уже 0,06 лм/мВт. В компании Philips биннинговые диапазоны составляют 440–460 нм и 650–670 нм соответственно. Таким образом, неопределенности для коэффициента преобразования составят от +75 до –50% для голубого и от +60 до –30% для красного светодиодов. Поэтому приведенные выше коэффициенты пересчета являются весьма приблизительными. Отметим, что некоторые производители светодиодных модулей для растениеводства разбраковывают свои светодиоды с меньшим бином. То есть так, чтобы пик сдвига максимума был как можно меньшим, поскольку даже сдвиг в 10 нм, как было показано, оказывает весьма негативное влияние на рост растений. Таким образом, если данные по биннингу не указаны в технической документации производителя, это приводит к неопределенности.

Необходимо учитывать еще один важный момент, а именно: даже лучшие измерители уровней освещенности могут быть в высшей степени неточными при измерении в таких диапазонах спектра, как насыщенный голубой (синий) и насыщенный красный. Коммерчески доступные фотометрические измерители, как правило, классифицируются в соответствии с их числом  $f1'$  ( $f1' < 3\%$  является предпочтительным), которое в основном определяет, насколько близко спектральная характеристика прибора совпадает с частотой фотопической функции зрительного восприятия (рис. 4). Как отмечается в CIE 127: 2007 «Измерение светодиодов» [3], это полезно только для измерений светодиодов белого света. В документе указано (цитата): «В случае одноцветных светодиодов спектральные ошибки несоответствия могут быть очень существенными, даже если  $f1'$  является относительно малым. Это связано с тем, что пики спектра некоторых светодиодов расположены на границах функции

**Таблица 2.** Коэффициенты пересчета освещенности (килолюкс) в PPFD (мкмоль/с/м<sup>2</sup>) для светодиодов

Источник света	Коэффициент пересчета
Насыщенный голубой (синий), 450 нм	14,3
Зеленый, 525 нм	1,0
Насыщенный красный, 660 нм	15,6

$V(\lambda)$ . Отклонения в этих зонах оказывают малое влияние на  $f_l'$ , но могут привести к большим ошибкам».

Теперь, имея коэффициенты пересчета, мы можем вычислить приблизительные соответствия для уровня освещенности к PPFD для светодиодов, используемых в растениеводстве (табл. 2).

Конкретный выбор освещения на основе баланса соотношения от красного до синего света, вероятно, будет зависеть от вида культур, которые выращиваются, и от стадии их роста. Некоторые растения предпочитают расти в тени, в то время как другие любят прямой солнечный свет, с различными требованиями по плотности мощности. Несмотря на это, указанные выше коэффициенты пересчета все равно будут весьма полезны.

В дополнение к упомянутым выше хлорофиллам и каротиноидам, растения для фотосинтеза используют и другие фотопигменты с широким диапазоном функций. Фитохромы типов Pr и Pfr, например, чувствительны к длине волны 660 нм красного и 735 нм инфракрасного излучения соответственно. Они

вызывают прорастание семян и цветение, регулируют разворачивание листьев и удлинение стеблей. Они также отвечают за «переключения» фотопериодов и дают ответную реакцию на затенение.

Другие фотопигменты отвечают за регулирование фототропизма (ориентацию листьев и стеблей) и циркадные ритмы (для которых синий свет является наиболее эффективным), фотоморфогенез (форма растения), рост корневой системы, открытие устьиц, передвижения хлоропластов и т. д. Этот перечень можно продолжать, поскольку исследователи, работающие в области растениеводства, продолжают изучать зависимость между SPD ламп, оптимальным состоянием растений и их ростом.

### Выводы

Напомним, что фотосинтетически активное излучение (PAR) не означает отклик растений на спектральную характеристику (рис. 2). Этот параметр просто представляет число фотонов (квантов) на единицу площади в секунду в диапазоне электромаг-

#### Фотосинтез и видимый свет

Для инженеров, работающих в области освещения, может показаться подозрительным, что все фотосинтетически активное излучение находится в спектральном диапазоне от 400 до 700 нм. Именно этот диапазон мы обычно берем за диапазон электромагнитных волн, воспринимаемых нашим человеческим зрением. А как насчет более коротких волн?

Когда МакКри [4] измерил свои 22 вида сельскохозяйственных культур как в поле, так и в лабораторных камерах для выращивания растений (с очень похожими условиями), он получил следующий эффективный в части воздействия спектр.

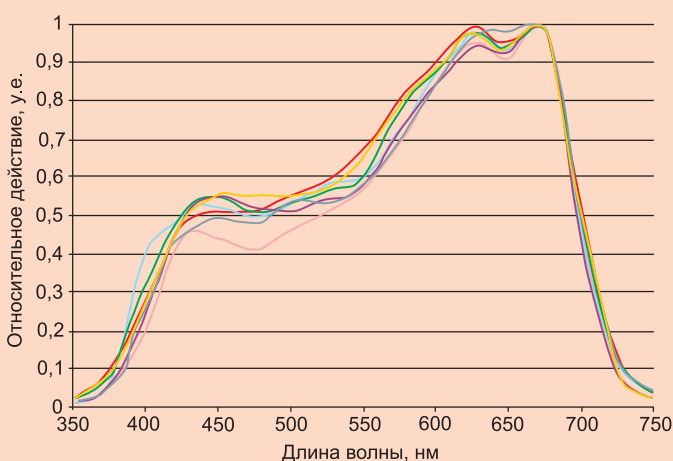
В диапазоне длин волн ниже 400 нм существует риск, что при фотоокислении образуются токсичные радикалы, которые могут разрушить хлорофилл клетки и другие клеточные компоненты. Под сильным ультрафиолетовым излучением виолаксантин, который участвует в процессе фотосинтеза, преобразуется с помощью цикла ксантофилла в зеаксантин. При этом он получает энергию от хлорофилла и освобождает ее в виде тепла. Этот процесс, таким образом, осуществляет фотозащиту растений от ультрафиолета.

В то же время другие фотопигменты растений, в том числе криптохромы и фототропины, не имеют такой чувствительности (при измерении в пробирке) и не реагируют на ультрафиолет и, вероятно, дают реакцию в условиях наличия недостаточной освещенности. Тем не менее активность этих составляющих, вероятно, подавляется в условиях высокой освещенности благодаря синтезу ксантофилла.

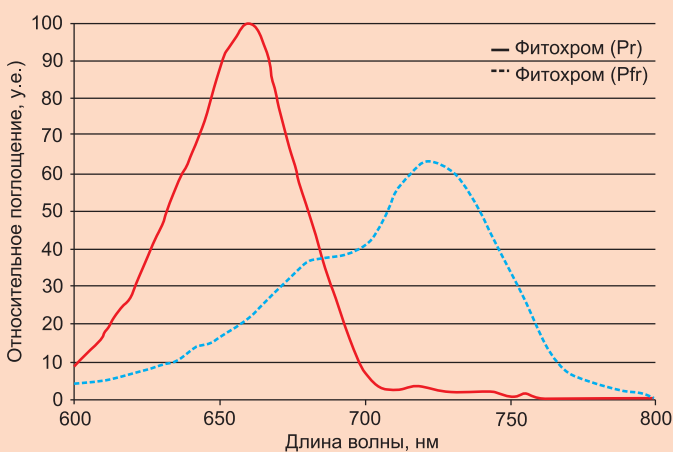
При длинах волн выше 700 нм энергия фотона является слишком низкой, чтобы активировать процесс фотосинтеза с помощью хлорофиллов и различных каротиноидов. Тем не менее фитохромный фотопигмент, который отвечает за выход в трубку, разворачивание листьев, а также уклонение от затенения, восприятие соседнего растения, прорастание семян, стимулирование начала цветения, имеет две изоформы, называемые Pr и Pfr. В основном состоянии фитохром Pr имеет пик поглощения спектральной плотности 660 нм. Когда поглощается красный фотон, он преобразует фитохромный фотопигмент в состояние Pfr, которое имеет спектральный пик поглощения 730 нм. Когда молекула фитохрома поглощает инфракрасный фотон, она преобразуется обратно в состояние Pr, вызывая при этом физиологические изменения в растении.

Хлорофилл листьев является прозрачным для инфракрасного излучения. Таким образом, фитохромный механизм сигнализации опти-

тельно подходит для целей чувствительности к измерениям условий освещения на лесных этажах и в присутствии соседних растений, соревнующихся за доступность прямых солнечных лучей.



Показатель активности спектра четко объясняет логику поведения в спектральном диапазоне 400–700 нм



Фитохромная активность спектра

нитных волн 400–700 нм. При наличии перестраиваемых по цвету светодиодных модулей для освещения парника специалистам в области растениеводства, вероятно, захочется поэкспериментировать с различными спектральными составами излучения для конкретных культур и цветущих растений, а также в области влияния направленности светового потока и временными режимами работы светильников (рис. 5). Возможность прогнозируемо преобразовывать измеренные значения освещенности до значений PPFD для общих источников света, безусловно, уменьшит проблемы во взаимопонимании между разработчиками систем освещения и специалистами в области растениеводства. ●

### Литература

1. Barnes C., T. Tibbitts, J. Sager, G. Deitzer, D. Bubenheim, G. Koerner, B. Bugbee. Accuracy of Quantum Sensors Measuring Yield Photon Flux and Photosynthetic Photon Flux // Horticultural Science. 1993. 28(122).
2. CIE. 2004. Colorimetry, Third Edition. CIE Technical Report 15:2004. Vienna, Austria: Commission Internationale de l'Éclairage.
3. CIE. 2007. Measurement of LEDs, Second Edition. CIE Technical Report 127:2007. Vienna, Austria: Commission Internationale de l'Éclairage.
4. McCree, K. J. The Action Spectrum, Absorptance and Quantum Yield of Photosynthesis in Crop Plant. // Agricultural and Forest Meteorology 9. 1972.
5. www.licor.com
6. Philips Lumileds. 2014a. Luxeon Rebel ES Portfolio Datasheet DS61. Philips Lumileds Lighting Company.
7. Philips Lumileds. 2014b. Luxeon Rebel Color Portfolio Datasheet DS68. Philips Lumileds Lighting Company.
8. Terashima I., T. Fujita, T. Inoue, W. S. Chow, R. Oguchi. Green Light Drives Leaf Photosynthesis More Efficiently than Red Light in Strong White Light: Revisiting the Enigmatic Question of Why Leaves are Green // Plant & Cell Physiology. 2009. 50(4).
9. Zhu X.-G., S. P. Long, D. R. Ort. Improving Photosynthetic Efficiency for Greater Yield // Annual Review of Plant Biology 61. 2010.

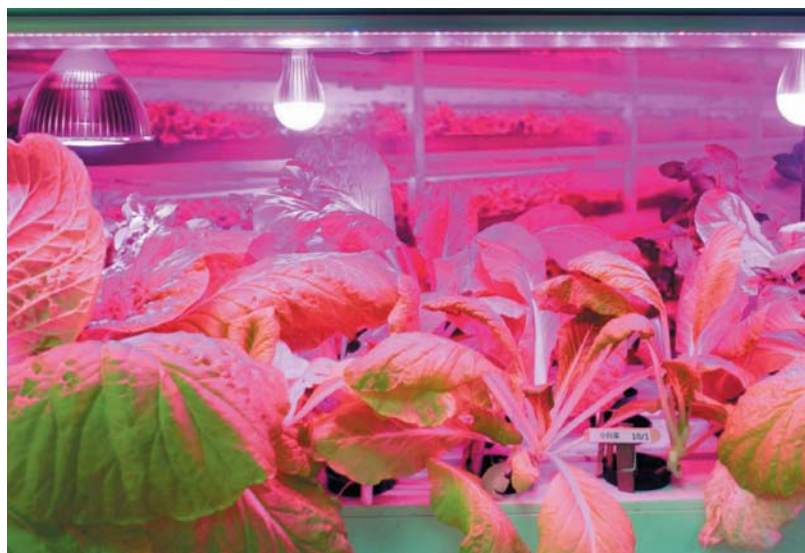


Рис. 5. Испытательная установка для изучения освещения в растениеводстве