

Метод и прибор для оперативной оценки энергоэффективности оптического излучения в условиях светокультуры

В.Н. КУЗЬМИН, С.Е. НИКОЛАЕВ

Научно-техническое предприятие «ТКА» (ООО), Санкт-Петербург
E-mail: kvnlight@mail.ru

Аннотация

Описаны метод измерения уровня энергоэффективности оптического излучения в условиях светокультуры и спектрофотометр, разработанный в Научно-техническом предприятии «ТКА».

Ключевые слова: растения, светокультура, плотность потока фотонов фотосинтеза, светильники, источник излучения, спектр излучения, энергоэффективность.

Введение

Известно, что почти вся энергия на земную поверхность прямо или косвенно поступает от Солнца. Растения преобразуют её в удобную для них форму через фотосинтез. Существует разность представлений о фотосинтетически активной радиации (ФАР) и её количественном описании.

При изучении действия оптического излучения на растения всегда необходимо учитывать, что в физиологических процессах (фотосинтез, образование пигментов, рост, фотоморфогенез и проч.) участвует только та часть излучения, которая поглощается растительными тканями¹.

¹ Ещё К. А. Тимирязев в конце XIX века ставил перед физиологами растений задачу выяснить, какая часть солнечного излучения, падающего на лист, им используется. А сравнительно недавно (1972 г.) К. Дж. Маккри обнаружил более сильную корреляционную связь процесса фотосинтеза растений с числом фотонов, чем с энергией облучения. При этом фотосинтез управляется и количественно пропорционален числу фотонов, поглощаемых листьями, и обусловлен светом только в определённом диапазоне длин волн. Учёный выразил обеспокоенность тем, что спектр излучения, используемого в фотосинтезе, существенно различается в разных исследованиях, и заявил о важности оценивать скорость фотосинтеза всеми по одним и тем же критериям.

Известно [1, 2], что спектр оптического излучения можно условно разбить на участки в соответствии с их влиянием на физиологические процессы: с $\lambda > 1000$ нм – тепловое воздействие; $\lambda = 700–750$ нм («дальний красный») – ярко выраженное регуляторное действие; $\lambda = 600–700$ нм («красный») – максимальное фотосинтетическое действие, синтез хлорофилла, вызывание эффекта фотопериодизма; $\lambda = 500–600$ нм («зелёный») – обеспечение фотосинтеза в оптически плотных листьях и густых посевах растений (благодаря высокой проникающей способности); $\lambda = 400–500$ нм («синий») – поглощение каротиноидами, второй пик фотосинтеза, ростовой и формативный эффекты; $\lambda = 320–400$ нм – регуляторная роль в развитии растений; $\lambda = 280–320$ нм (УФ–В) – оказание вреда большинству растений; $\lambda < 280$ нм (УФ–С) – вызывание гибели растений.

О разработке методики измерений

Условно зелёный лист можно рассматривать как плоский светофильтр, пропускающий и отражающий лучистую энергию. В отличие от традиционных стеклянных светофильтров лист – светофильтр существенно светорассеивающий, что сильно осложняет измерение лучистой энергии, им пропускаемой, отражаемой и поглощаемой. Причём по спектрам пропускания и отражения листья большинства культур весьма близки между собой. Как правило, максимумы отражения и пропускания листьев лежат в «зелёной» части спектра (на $\lambda_{max} \approx 550$ нм), а их спектр поглощения имеет два максимума: один в «синефиолетовой» ($\lambda_{max} \approx 440$ нм) и другой в «красной» ($\lambda_{max} \approx 660$ нм) частях.

Известны попытки создать единый приёмник излучения (ПИ) для всех

растений и условий. Но серийно выпускать единый ПИ с совершенной спектральной характеристикой, если он не спектрорадиометр, проблематично. При этом определяется только интенсивность падающего излучения в диапазоне ФАР без учёта поглощающей способности растений и излучательных характеристик источников излучения в этом диапазоне. Однако это позволяет для регистрации облучённости растений применять тепловые ПИ (фитопиранометры) [3].

В мировой практике было принято соглашение, которое позволяет определять и измерять ФАР-облучённость (*PAR*) как падающий фотонный поток в спектральном диапазоне 400–700 нм. В литературе термины «*PAR*», «*PPF*» (поток фотонов фотосинтеза) и «*PPFD*» (*Photosynthetic Photon Flux Density*, плотность потока фотонов фотосинтеза) стали использовать как взаимозаменяемые.

Внедрение новых технологий в тепличное растениеводство (овощеводство и цветководство), задачи по со-



Рис. 1. Внешний вид спектрофотометра «ТКА-Спектр» (ФАР)

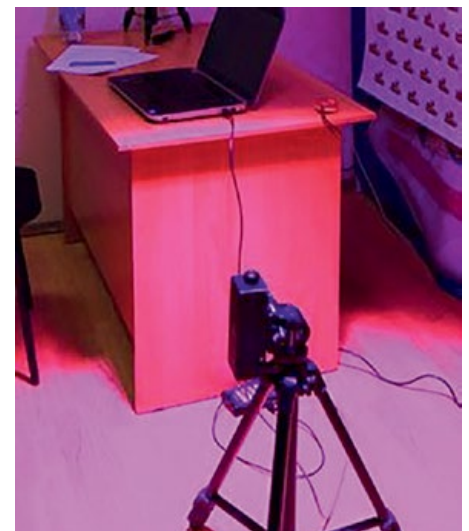


Рис. 2. Рабочий момент измерений

Рис. 3. Среднестатистическая относительная спектральная эффективность фотосинтеза для разных видов растений (от 6 разных авторов, по 66 экспериментальным данным)

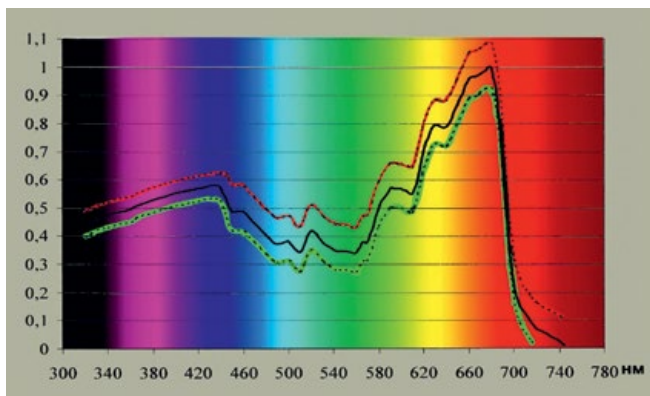
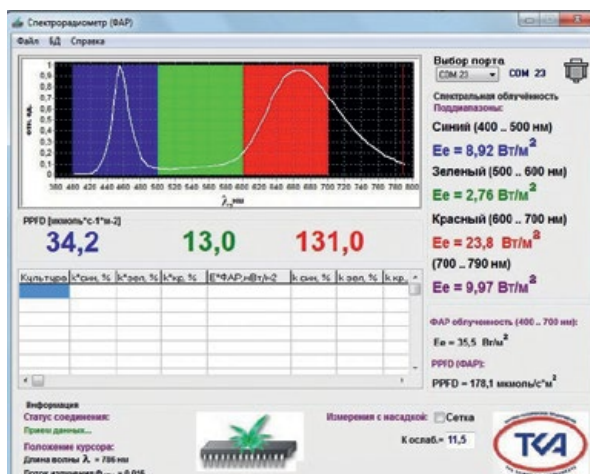


Рис. 4. Рабочее окно программного обеспечения



вершенствованию нормирования характеристик облучательных установок (ОУ) и экономии электроэнергии, грамотное сопоставление вариантов ОУ — всё это требует применения современных технических средств, обеспечивающих измерение параметров оптического излучения с достаточной точностью и надёжностью во всём спектральном диапазоне.

В ходе разработки методики «Оперативная оценка энергоэффективности потока оптического излучения в условиях интенсивной светокультуры» нами совместно с ГНУ СЗНИИМЭСХ РАСХН создан соответствующий измерительный прибор — спектрофотометр «ТКА-Спектр» (ФАР) (рис. 1 и 2).

В его основе — определение значений *PPFD* по принципу оценки числа фотонов.

Оценка эффективности растениеводческих источников излучения по потоку фотонов требует корреляции числа фотонов со способным его воспринимать числом молекул вещества. Поскольку в идеале каждый фотон способен возбудить молекулу пигмента, можно говорить о некотором количественном соответствии падающих

фотонов молекулам вещества, способным их воспринимать.

Идеология построения данного измерительного прибора вытекала из особенности фотобиологического действия излучения на растение. Так, например, в результате фотосинтеза (этой наиболее распространённой в природе фотореакции) лучистая энергия трансформируется в химическую. На рис. 3 показан график спектральной эффективности фотосинтеза для растений.

Спектральная характеристика выпускаемых ПИ (фотоэлементов) не совпадает со спектральной характеристикой фотосинтеза, поэтому первую необходимо корректировать под требуемую вторую. Самый простой из методов корректирования состоит в использовании светофильтров из цветных оптических стёкол путём последовательного наложении их перед ПИ. Однако получение П-образной спектральной характеристики (чувствительности) ПИ с границами, совпадающими с границами требуемой спектральной зоны, технически очень сложно. И мы отказались от этого подхода ввиду отсутствия в серийном производстве на территории

СНГ соответствующей номенклатуры оптических стёкол.

Принцип работы прибора

Работа созданного прибора основана на измерении спектра оптического излучения с последующей математической обработкой результатов измерений. Диспергирующее устройство представляет собой полихроматор с регистрацией разложенного излучения фотодиодной линейкой. Прибор является продолжением отработанной технологии серийно выпускаемого средства измерения — спектроколориметра «ТКА-ВД» [4]. Знание спектра измеряемого источника излучения позволяет решить практически любую задачу по определению его характеристик, хотя и технически сложным, трудоёмким образом.

Прибор представляет собой прямоотсчётное устройство с выводом спектральных значений облучённости в $Вт/м^2$ и спектральных значений *PPFD* в $мкмоль/(м^2 \cdot с)$. Программное обеспечение (ПО) прибора разделено на две части. Метрологически значимая часть ПО устанавливается изготовителем непосредственно в программируемом постоянном запоминающем устройстве (ППЗУ) микроконтроллера управления прибором, а интерфейсная часть ПО запускается на ПК и служит для отображения принимаемых данных (как в табличном, так и в графическом виде) и сохранения результатов измерений (рис. 4).

Всё чаще внимание исследователей обращается к энергетическим аспектам в связи с ростом потребления электроэнергии на облучение. Для сельскохозяйственных объектов стали использовать источники излучения и облучатели с более высокими показателями энергоэффективности. Для исследовательской работы оператор может завести базу нормированных таблиц для облучаемых культур и проводить расчёты значений таких новых показателей энергоэффективности излучений и источников излучения для разных культур, как коэффициент отклонения спектра культуры, спектральная энергоёмкость, энергоёмкость облучённости и полная энергоёмкость [5].

Расчётные значения отображаются на экране и могут быть переданы в книгу *Microsoft Excel*. Данная воз-

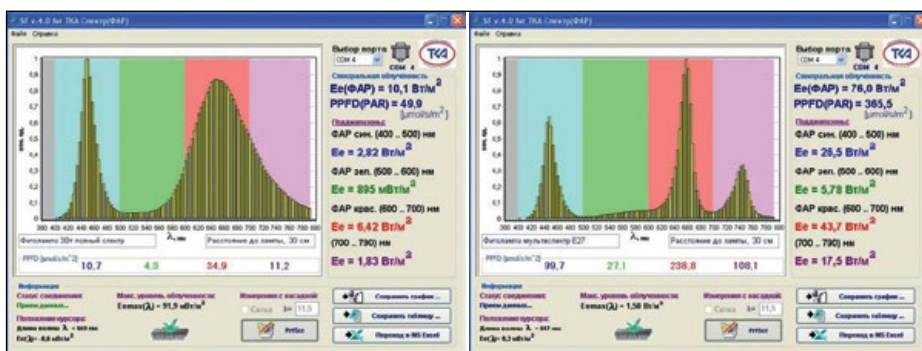


Рис. 5. Сравнение параметров фитоламп (3 Вт, цоколь E27, измерительное расстояние 0,3 м)

возможность позволяет повысить точность измерений без использования дополнительных средств измерения, только за счёт повышения требований к квалификации операторов. Использование для вычислений книги *Microsoft Excel*, а не создание специализированной программы на языке высокого уровня, может способствовать широкому распространению описанной методики. Она даёт возможность исследования источников излучения и принятия решений о возможности и путях их использования, а также позволяет минимизировать негативное воздействие указанного излучения.

Для оценки степени совершенства ОУ целесообразно использовать категорию «энергоэффективность», которая, кроме энергетических показателей, должна также охватывать качество облучения, определяемое степенью равномерности распределения поглощаемой энергии излучения по поверхности или объёму среды облучаемого объекта.

Заключение

Спектрофотометр хорошо себя рекомендовал при исследованиях светодиодных тепличных растениеводческих ламп и их китайских аналогов, которые проводит лаборатория фитосвета *FitoLabb.ru*. Именно спектральный состав и уровень *PPFD* определяют эффективность использования для данного растения той или иной лампы, включая оценку того, насколько хорошо (быстро) будет происходить рост светокультуры.

Следует отметить, что при определении основных метрологических характеристик канала измерения энергетической освещённости нами использовалась фотометрическая метрологическая база. Контроль

качества растениеводческих ламп и полезной облучённости в производственных условиях необходимо проводить приборами со спектральной чувствительностью, достаточно скорректированной под спектральную эффективность фотосинтеза, или спектральными приборами.

При проведении такого рода измерений для градуировки приборов необходимы светоизмерительные лампы с известными значениями силы эксергии излучения. Расчёт силы эксергии излучения образцовых ламп, световой поток и сила света которых определены при заданной цветовой температуре нити накала, не представляет трудностей и не требует дополнительных фотометрических измерений [6].

Целью этой статьи являлось дальнейшее развитие диалога между производителями, потребителями светотехнической продукции, инженерами метрологических служб и исследовательских лабораторий для совместной выработки правильных решений в следующих областях: методики измерений; метрологическое обеспечение измерений; разработка новых приборов для растениеводов и их модернизация. Приглашаем к обсуждению данной проблематики и сотрудничеству заинтересованных специалистов.

НТП «ТКА» продолжает совместно с другими научными организациями и лабораториями вести исследования по определению изменений свойств материалов под действием излучения светодиодов с целью повышения качества светильников и облучателей с этими источниками излучения. И в связи с этим, в частности, создана новая версия ПО для оперативного анализа спектра источников излучения (рис. 5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Знак, 2006. — 972 с.
2. Сарычев Г.С. Облучательные светотехнические установки. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 242 с.
3. Казенас В.Ю. Биофотометрический контроль облучения растений / Тр. I Межд. светотех. конф. 14–18.06.1993, Санкт-Петербург. — СПб: Б.и., 1993. — С. 97–98.
4. Антонов В.В., Круглов О.В., Кузьмин В.Н. Приборы для измерения оптических параметров и характеристик светодиодов // Полупроводниковая светотехника. — 2010. — № 3. — С. 26–31.
5. Ракутько С.А., Судаченко В.Н., Маркова А.Е. Оценка эффективности применения оптического излучения в светокультуре по величине энергоёмкости // Плодоводство и ягодоводство России. — 2012. — № 33. — С. 270–278.
6. Свенцицкий И.И., Обычный А.Н. Метод измерения эксергии оптического излучения для растениеводства / Сб. «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Тр. 3 Межд.н.-т. конф.». Ч. 1 («Возоб. ист. энергии»). — М.: ГНУ «ВИЭСХ», 2003. — С. 260–266.



Кузьмин Владимир Николаевич, доктор техн. наук, профессор. Окончил в 1971 г. Кишинёвский государственный университет по специальности «Оптика и спектроскопия». Зам. генерального

директора НТП «ТКА» по оптике и фотометрии. Область научных интересов: разработка методов и приборов для измерения параметров и характеристик источников оптического излучения



Николаев Сергей Евгеньевич, инженер. Окончил в 2001 г. Северо-Западный государственный заочный технический университет по специальности «Проектирование

и технология радиоэлектронных средств». Заведующий лабораторией проектирования и конструирования опико-электронных приборов НТП «ТКА». Область научных интересов – проектирование и технология производства приборов для измерения параметров и характеристик источников оптического излучения