

Технологическое освещение в агропромышленном комплексе России

Л.Б. ПРИКУПЕЦ

ООО «ВНИСИ им. С.И. Вавилова», Москва
E-mail: prikup@vnisi.ru

Аннотация

В статье рассматриваются состояние и перспективы развития технологического освещения в основных по виду производимой продукции современных сооружениях агропромышленного комплекса Министерства сельского хозяйства РФ. Приведены реальные данные и выполнены соответствующие оценки влияния технологического освещения на рост продуктивности в животноводстве, птицеводстве, рыбоводстве, грибоводстве и тепличном растениеводстве. Отмечается активное использование в агропромышленном комплексе последних достижений светотехники и фотобиологии.

Ключевые слова: освещение в сельском хозяйстве, фотопериод, натриевые лампы высокого давления, НЛВД, светодиодные фитооблучатели, светокультура растений, система фотосинтетических фотонных величин, нормативная база.

1. Введение

Ускоренное развитие агропромышленного комплекса (АПК) относится к важнейшим государственным приоритетам России, и благодаря различным видам государственной поддержки и привлечению крупных частных инвестиций, последние несколько лет

АПК демонстрирует устойчивый рост на уровне не менее 3 % в год. Развитие АПК носит инновационный характер: сооружаются новые производственные комплексы для животноводства, птицеводства, рыбоводства, грибоводства, растениеводства; устанавливается новое оборудование и осваиваются высокопроизводительные технологии.

Во всех видах современного сельскохозяйственного производства, особенно в тепличном растениеводстве, искусственное освещение играет важную или важнейшую роль.

2. Животноводческие и птицеводческие комплексы

Благоприятные условия освещения указанных помещений являются одним из важнейших показателей необходимого микроклимата, обеспечивающего нормальное физиологическое состояние и высокую продуктивность животных и птицы, а также создающего хорошие условия персоналу ферм для обеспечения производственного процесса.

Рекомендации по выбору уровней освещённости в животноводческих и птицеводческих помещениях были выработаны ещё в СССР на основе многолетних агротехнических исследований и в последние 20 лет не подвергались существенному пересмо-

тру. Действующие нормы ОСН-АПК 2.10.24-001-04 [1] мало чем отличаются от аналогичного документа 1991 г., в разработке которого принимал участие также и ВНИСИ.

2.1. Освещение комплексов для крупного рогатого скота

Нормируемые в [1] уровни освещённости в животноводческих комплексах для крупного рогатого скота (КРС) в секциях (боксах) для содержания животных (освещённость $E = 20 \div 30$ лк) и в зонах кормления ($E = 50 \div 75$ лк) в современных условиях устарели и практически не принимаются во внимание. Современные комплексы КРС – это предприятия интенсивного молочного (на несколько сотен голов) и мясного (до $20 \div 30$ тыс. голов) животноводства на промышленной основе, оснащённые в существенной доле зарубежным оборудованием. Вместе с оборудованием в отечественные комплексы приходят новые технологии, касающиеся, в том числе, искусственного освещения.

Результаты агротехнических исследований, проведённых за последние 10–15 лет в ряде стран, в частности, в Германии, наглядно подтверждают, что свет, являясь активным возбуждающим фактором для многих биохимических процессов организма животных, оказывает влияние на рост, развитие, здоровье, плодовитость и продуктивность КРС.

Правильное освещение имеет большое значение для обеспечения беспрепятственного передвижения коров при беспривязном содержании, а также для рационального потребления корма. Так, по данным [2, 3] в основных производственных помещениях в зонах у поилок и кормового стола освещённость должна составлять $200 \div 300$ лк, а в блоках для отдыха лактирующих коров – 200 лк. Продолжительность освещения для лактирующих коров в осенне-зимний период должна достигать 16 часов с 8-часовой фазой отдыха. Одно только соблюдение этих рекомендаций при благоприятных прочих параметрах среды и нормальном кормлении способно увеличить продуктивность молочных коров на до 8 %.

Эти новые рекомендации, естественно, направлены также на улучшение условий труда обслуживающего персонала ферм.



Рис. 1. Светильники с СД для животноводческих комплексов для КРС:
а – INOX LED70 (ООО «Световые технологии»): 67 Вт, 7000 лм, 5000К [4];
б – Iron Agro (компания «Вартон»): 36 /54 Вт, 4000/6300 лм, 4000 /6500 К [5]

Радикальные изменения в животноводческих комплексах происходят в последние годы с ассортиментом используемых источников света и осветительных приборов. Если в действующих нормах «рекомендуются» ещё ЛН, ЛЛ и ДРЛ, а ещё 7÷10 лет назад «пионерскими» считались проекты с НЛВД (которые, кстати, хорошо зарекомендовали себя в осветительных установках (ОУ) ферм КРС), то в последние несколько лет в новых проектах всё активнее начинают использоваться светильники с СД. Несмотря на то, что, благодаря системам регулирования микроклимата, концентрация агрессивных паров (аммиака и др. агрессивных соединений) в воздухе в современных комплексах для КРС существенно снижена, тем не менее, светильник для производственных помещений для КРС должен обладать степенью защиты $IP65$, а его корпус должен быть сделан из стойких к агрессивным средам АБС-пластика или анодированного алюминия, а рассеиватель – из акрила или полистирола.

На рис. 1 приведены примеры светильников с СД, используемых в новых проектах для КРС, а на рис. 2 – фотография современного производственного помещения животноводческого комплекса для КРС.

2.2. Освещение в свиноводстве

В современном свинокомплексе (рис. 3) в зависимости от назначения помещения требуемая технологическая освещённость может варьироваться от 50 до 100 и даже 300 лк, а продолжительность освещения – от 10 до 16 часов. Общий подход с учётом физиологических потребностей откармливаемых животных в большинстве случаев достаточно прост: необходимо умеренно освещённое, а иногда даже затемнённое помещение [8].

В новых свиноводческих комплексах практически повсеместно в настоящее время устанавливаются специальные светильники с СД, отличающиеся повышенной герметичностью, т.к. они должны быть устойчивы к агрессивной среде и выдерживать высокое давление струи воды при мойке помещений.

Следует отметить, что использование СД обеспечило реальное снижение энергопотребления в свиноком-

Рис. 2. СД освещение в животноводческом комплексе для КРС [6]



Рис. 3. СД освещение в свиноводческом комплексе [7]



плексах на цели освещения не менее чем в 2 раза.

2.3. Освещение в птицеводстве

Современная птицефабрика представляет собой комплекс изолированных от внешней среды помещений, в которых создаётся управляемый микроклимат, обеспечивающий, в том числе за счёт рационального искусственного освещения, хорошее физиологическое состояние птиц и позволяющий добиться существенного роста практически всех показателей продуктивности стада птиц, увеличить выживаемость и снизить затраты кормов.

Влияние основных параметров искусственного освещения на птицу, грамотный подход к использованию «светового фактора» в птицеводстве, отличающегося существенными особенностями, рассмотрены в [9, 10].

С учётом резко отрицательной физиологической реакции птицы в форме «стресса» на мгновенное включение или выключение искусственного освещения, важнейшей задачей последнего является имитация естественного фактора «рассвет-закат» с по-

мощью прерывистого или ритмически варьируемого освещения.

Для этой цели прекрасно подходят светильники с СД, активно вытесняющие в последние годы в птицеводстве осветительные приборы с ЛН, трубчатыми ЛЛ и КЛЛ.

В настоящее время светильниками с СД оснащено около 200 птицеводческих хозяйств, а общее число установленных в них светильников с СД приближается к 1 млн шт. ОУ в птицеводстве работают, в основном, по различным сценариям в режиме прерывистого освещения, управление светильниками с регулированием светового потока в пределах 0÷100 % осуществляется на основе широтно-импульсной модуляции с частотой > 300 Гц.

При напольном выращивании цыплят-бройлеров (рис. 4а) рекомендуемый уровень освещённости составляет 45 лк, а при клеточном содержании кур (рис. 4б) освещённость в зоне кормушек должна достигать 100 лк.

Современные светильники с СД для птицеводства имеют линейную конфигурацию и следующие основные параметры: мощность – 10÷12 Вт, $T_{цв} = 3500 \div 5000$ К, $R_a > 80$, и, по соо-



Рис. 4. СД освещение в птицеводческом комплексе: а – с напольным содержанием птицы [11]; б – с клеточным содержанием птицы [12]

бражениям электробезопасности, они работают от вторичного источника питания с постоянным напряжением 24, 36 или 48 В.

По данным ООО «Техносвет Групп», лидера в освещении птицеводческих комплексов, применение СД позволяет снизить затраты электроэнергии в ОУ в 10–12 раз по сравнению с ЛН и в 1,5–3 раза по сравнению с ЛЛ [13].

3. Технологическое освещение в аквакультуре

Под термином «аквакультура» понимается выращивание рыбы на ком-

мерческой основе в континентальных водоёмах или в бассейнах на рыбозаводах, а также в специально созданных морских плантациях. Возникнув в середине 80-ых годов в Норвегии, как интенсивное производство, современная аквакультура является областью приложения эффективных научноёмких технологий, касающихся, в том числе, искусственного освещения.

В условиях аквакультуры выращиваются норвежская сёмга, лосось, а также осётр, треска, карп и другие виды рыб.

Свет в окружающей среде является для рыб эволюционно ключевым

фактором, синхронизирующим все жизненные стадии роста и развития. В основе поведения рыб лежат зрительные (фототаксис) и незрительные (циркадный биоритм) реакции, управляемые фотопериодом, спектром и интенсивностью освещения. Работающий источник света над поверхностью бассейна (на рыбозаводе) или погружённый в воду (на акваферме) воспринимается рыбой как продолжающийся «световой день» и является сигналом для активного потребления корма, приводящего к более быстрому накоплению веса, ускоренному росту и развитию, улучшению вкусовых качеств [14, 15]. Как и у людей, наступление темноты резко увеличивает у рыбы синтез мелатонина и подавляет её активность. Эффекты, достигаемые при этом, могут быть весьма значительными (рис. 5) и не просто оправдывают применение специальных светильников с МГЛ или СД, но и делают это необходимым. На рыбозаводе искусственное освещение используется практически круглый год (рис. 6), а на аквафермах в морских клетках (рис. 7) преимущественно в месяцы с коротким световым днём.

Рис. 5. Эффект «световой стимуляции» в рыбоводстве [16]

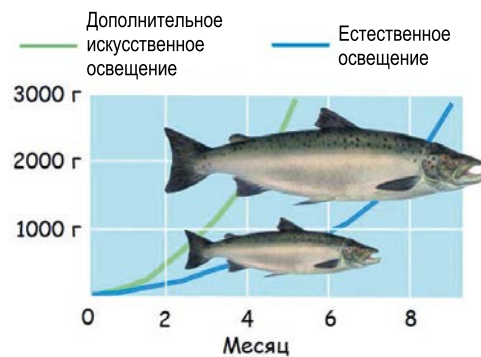


Рис. 6. Технологическое освещение на рыбозаводе [17]



Применение «световой стимуляции» особенно эффективно на более активных ранних стадиях развития рыб [15]. В результате ряда проведённых исследований можно сформулировать рекомендации по выбору основных характеристик специального освещения при различных видах рыб в помещениях рыбозавода:

– для тилапии: освещённость на поверхности бассейна $E_{пов} = 600$ лк, продолжительность светового дня $\tau_{ф} = 12$ ч [19];

– для молоди осетровых рыб: $E_{пов} \leq 800$ лк; $\tau_{ф} = 12$ ч, предпочтительно использовать зелёный излучатель [14];

– для молоди карпа: $E_{\text{пов}} = 20$ лк;
 $\tau_{\text{ф}} = 20$ ч [15].

За рубежом направление аквакультуры является одним из наиболее инвестиционно привлекательных в агро-секторе, производство искусственно выращенной рыбы за 30 лет выросло в 12 раз. В США, Норвегии и др. странах проводятся исследования, касающиеся более тонких механизмов «световой стимуляции», разрабатываются технологии выращивания других морепродуктов. В России аквакультура начала активно развиваться в последние 3÷5 лет, и потенциал привлечения светотехники в это направление достаточно велик.

4. Технологическое освещение в промышленном грибоводстве

В связи с активным возрождением отечественного тепличного грибоводства в промышленных масштабах (по сравнению с 2013 г. производство грибов в России к 2020 г. должно увеличиться в 12 раз), мы впервые рассматриваем эту область АПК как объект, представляющий научный и коммерческий интерес для светотехники.

Интенсивное культивирование грибов в защищённом грунте является одним из важных источников обеспечения населения высококачественным и экологически чистым белком. Промышленным способом в сооружениях со строго контролируемым микроклиматом ($t = 13\div 20$ °С, влажность 85÷90%, пониженное содержание CO_2) выращивают шампиньоны, вёшенки, шиитаки и другие виды грибов со средней урожайностью на уровне 300 кг/м² в год.

Грибы, как известно, не относятся к фототрофным организмам, прямо использующим оптическое излучение для получения органического вещества (энергии), однако в то же время, для большинства видов грибов свет является морфогенетическим фактором и обеспечивает фоторегуляцию метаболизма, оказывая влияние на продуктивность. Вопросы фоторегуляции в мицелии и при росте грибов достаточно сложны и системно до настоящего времени не изучены, но активно исследуются в последние годы [20]. Установлено, что световыми сенсорами у грибов являются хромопротеины, чувствительные в синем диапазоне видимой области (флавины), а в красном –

Рис. 7. Технологическое освещение на акваферме с погружным светильником [18]



Рис. 8. Грибоводческая теплица с вёшенками [24]



это фитохром, аналогичный рецептору у высших растений.

Предполагается, что существенные эффекты в увеличении продуктивности могут быть достигнуты при использовании излучения в синей области с $\lambda = 430\div 470$ нм [21].

Выполненные фотобиологические исследования, в том числе и на молекулярном уровне, находят практическое использование в аграрном производстве. Специальные эксперименты подтверждают, что видимое излучение (как уровень освещённости, так и продолжительность освещения) активизирует ростовые процессы, в частности, вёшенки, влияя на формирование плодовых тел и продуктивность [22]. В апробируемой в настоящее время в одном из грибоводческих хозяйств технологии выращивания вёшенки рекомендуемый уровень освещённости («белый свет») составляет 150÷200 лк при фотопериоде 10÷12 ч в течение всего периода выращивания (рис. 8) [23].

В то же время, показано, что при повышении уровня освещённости до ~1000 лк при длительности освещения 12 ч в день может быть достигнуто увеличение продуктивности вёшенки обыкновенной на 25÷30 % [20].

Завершая анализ небольшого пока объёма экспериментальных и практических данных, с учётом планируемых масштабов развития направления, можно, тем не менее, прогнозировать хорошие перспективы применения искусственного освещения в промышленном грибоводстве, которое внесёт существенный вклад в создание высокопродуктивных экологически чистых технологий целенаправленного синтеза грибов, в том числе, с заданным биохимическим составом.

5. Технологическое освещение (облучение) растений в теплицах

5.1. Общие вопросы

В настоящее время тепличное растениеводство – это одна из наиболее динамично развивающихся отраслей АПК и, возможно, всего реального сектора отечественной экономики.

В конце 80-х годов, во времена СССР, площадь зимних теплиц в стране составляла около 4000 га, а с начала 90-х она неуклонно снижалась и к 2010 г. упала до 1800 га. Однако благодаря начавшемуся строительству новых цветочных теплиц, а затем, в том числе и в результате при-

Рис. 9. Строительство новых теплиц в России в последние 10 лет и перспективы до 2020 г.

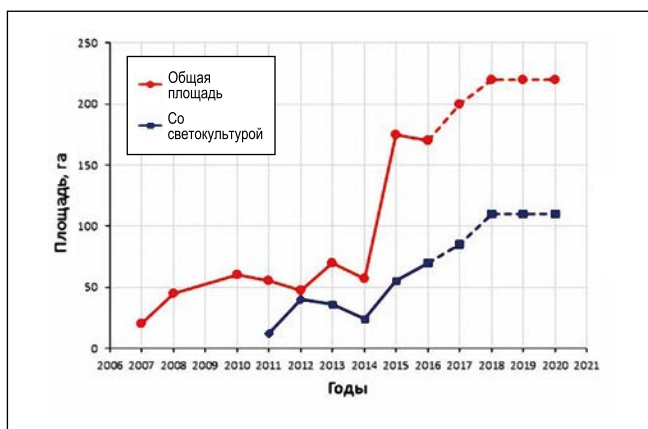
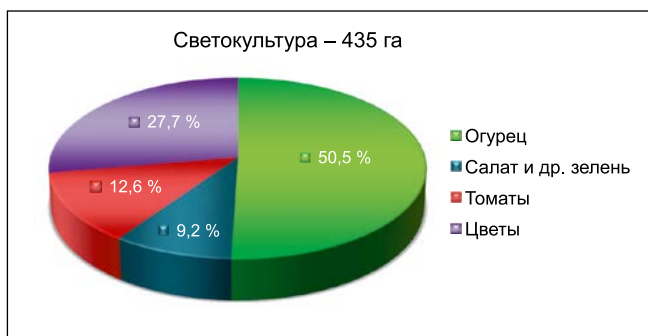


Рис. 10. Структура площадей отечественных теплиц со светокультурой



нятых мер поддержки на государственном уровне, и овощных теплиц, к 2017 году общая площадь была доведена до 2300 га. До 2020 г. предполагается построить ещё около 1000 га и удвоить производство тепличных овощей. На рис. 9 приведены данные по строительству новых теплиц за период с 2007 по 2017 г. и прогноз до 2020 г.

Современные промышленные теплицы в России – это небольшой, но весьма специфический сектор экономики, отличающийся одновременно высокой энергоёмкостью и энергоэффективностью и, в тоже время, высокой степенью использования новых технологий, общее количество которых достигает 20-ти, с компьютерным управлением выращивания растений. Важнейшей макротехнологией в новых теплицах является технология светокультуры, позволяющая при использовании искусственного освещения выращивать продукцию практически круглый год. Структура площадей со светокультурой по видам растений представлена на рис. 10.

Общая электрическая мощность, потребляемая теплицами России, включая собственную генерацию, достигает 650 МВт, количество световых точек (светильники с НЛВД, в основном, 400, 600 и 1000 Вт) превосходит 1 млн штук; в год ОУ теплиц расхо-

дуют около 1,8 млрд кВт·ч электроэнергии, что превосходит энергопотребление всех утилитарных ОУ городов Москва, Санкт-Петербург, Нижний Новгород и Казань.

Приведём основные энергетические параметры технологии светокультуры: удельная установленная электрическая мощность – $100 \div 250 \text{ Вт/м}^2$ (в зависимости от вида растений), продолжительность освещения в год – до 5500 ч, уровень освещённости – $10 \div 30 \text{ клк}$, продуктивность – до 150 кг/м^2 (огурец), среднегодовой расход электроэнергии на 1 кг продукции – до 15 кВт·ч.

Годовая ёмкость рынка светильников для теплиц определяется, в основном, количеством вновь вводимых площадей со светокультурой растений. В 2017 г. она может достигнуть $250 \div 270 \text{ тыс. штук}$. Отметим, что темпы ввода тепличных площадей с искусственным освещением в России (рис. 10), равно, как и их доля в общих объёмах строительства теплиц, являются уникальными для мировой практики.

5.2. Источники света для теплиц

Практически во всех производственных теплицах используются «фито»-НЛВД, отличающиеся от обычных НЛВД более высоким дав-

лением буферного газа, что позволило довести световую отдачу до 150 лм/Вт (для ламп мощностью 600 Вт), увеличить срок службы и стабильность светового потока, а также незначительно поднять долю излучения в важном для роста и развития растений синем диапазоне фотосинтетически активной радиации (ФАР). Основные параметры фито-НЛВД в трубчатых колбах приведены в табл. 1.

Несмотря на то, что спектр НЛВД считается не вполне благоприятным для роста и развития растений, именно благодаря этим лампам в сочетании с передовой агротехникой удалось достичь высоких уровней продуктивности растений. Необходимо при этом помнить, что ОУ теплицы является идеальным примером ОУ совмещённого действия естественного и искусственного освещения, поэтому даже в самое «тёмное» время года (декабрь месяц), когда доля искусственного освещения достигает 90 %, суммарный спектр излучения имеет существенную добавку от естественного освещения в синей части ФАР, обеспечивающую необходимое фоторегуляторное действие на растения.

На российском рынке представлены фито-НЛВД ведущих зарубежных компаний: *BLV* (Германия), *Osram* (Германия), *Philips* (Нидерланды), *Narva* (Германия), *MegaPhoton* (Китай). Производство НЛВД по полному циклу в России отсутствует; наиболее крупным и известным отечественным производителем НЛВД в зеркальной и трубчатой колбе на основе импортных горелок является ООО «Рефлекс». Выпуск фито-ламп в трубчатых колбах начат в ГУП РМ «Лисма», а ООО «БЛ ТРЕЙД» организовало производство наиболее востребованных типов фито-НЛВД мощностью 600 и 1000 Вт на заводе одной из ведущих зарубежных фирм под брендом «Galad».

5.3. Светильники для теплиц

Особенностью светильников для теплиц (фитооблучателей) является высокая функциональность при возрастающих требованиях к дизайну. В условиях жёсткой конкуренции с зарубежными производителями на успех на рынке могут претендовать только фитооблучатели со световой отдачей на уровне $120 \div 125 \text{ лм/Вт}$ (для мощности 600 Вт), что обеспечивается КПД

Основные параметры фито-НЛВД в трубчатых колбах ($P_{л}$ – мощность лампы, U_c – напряжение сети, I_c – ток, потребляемый из сети, $I_{л}$ – ток лампы, $U_{л}$ – напряжение на лампе, $P_{ПРА}$ – потери мощности в пускорегулирующем аппарате, $\Phi_{л}$ – световой поток лампы, η_v – световая отдача лампы, PPF – фотосинтетический поток фотонов (лампы), η_{ph} – эффективность лампы в области ФАР, $\Phi_{л}$ – диаметр колбы лампы)

№ п/п	$P_{л}$, Вт	U_c , В	I_c , А	$I_{л}$, А	$U_{л}$, В	$P_{л}+P_{ПРА}$, Вт	$\Phi_{л}$, клим	η_v , лм/Вт	PPF , мкмоль/с	η_{ph} , МК-моль/(с·Вт)	$\Phi_{л}$, мм
1	250*	220	1,5	3,0	100	285	33,2	132	420	1,7	46
2	400*	220	2,4	4,4	104	445	56,5	140	725	1,8	46
3	600	220	3,4* 2,9**	6,2	112	645* 635**	90,0	150	1100	1,8	48
4	600	380	1,90* 1,61**	3,6*	200	645* 640**	90,0	150	1150	1,9	48
5	1000**	380	2,61	4,0	250	1040	145	145	2100	2,1	32***

* – с электромагнитным пускорегулирующим аппаратом; ** – с электронным пускорегулирующим аппаратом; *** – в софитном исполнении

отражателя на уровне 90÷92%, минимальными активными потерями в пускорегулирующих аппаратах (ПРА) (7,0÷7,5 % для мощности 600 Вт), высокой надёжностью и большим сроком службы, минимальным весом в своей категории и приемлемыми ценовыми параметрами.

Зеркальные лампы (лампы-светильники) «Рефлекс» несут в себе один из основных элементов конструкции светильника – отражатель, а благодаря переходу производителя на использование для отражающего слоя серебра вместо алюминия, лампы-светильники улучшили свой КПД и широко представлены в новых проектах.

В настоящее время на рынке востребованы светильники как с электромагнитными (ЭМПРА) (для мощностей 250, 400 и 600 Вт), так и с электронными (ЭПРА) (для мощностей 250, 600 и 1000 Вт) ПРА. Наличие в конструкции того или иного из названных типов ПРА является решающим отличием, определяющим достоинства и недостатки фитооблучателя, которые хорошо известны в тепличном сообществе и достаточно подробно рассмотрены, например, в [25]. Светильники с ЭПРА – более лёгкие и обладают возможностью регулировать электрическую мощность светильника, но менее надёжные и более дорогие; светильники с ЭМПРА, напротив, значительно более надёжные и менее дорогие, но более тяжёлые. Примеры наиболее востребован-

ных на рынке светильников с НЛВД мощностью 600 и 1000 Вт приведены на рис. 11. Предпочтения потребителей, строящих новые теплицы, по крайней мере в настоящем году, распределяются относительно выбора типа светильника примерно в равных долях.

На российском рынке тепличных светильников активно действуют известные зарубежные компании *Hortilux* (Нидерланды) и *Gavita* (Нидерланды – США – Канада – Норвегия), которым противостоит предприятие с 45-летней предысторией производства фитооблучателей ОАО «КЭТЗ» (торговая марка «Galad»), выпускающее более 20 типов светильников, а также ООО НПП «НФЛ», ООО «Точка Опоры» и начавшее сборку тепличных светильников ООО «Рефлекс».

5.4. ОУ для современных теплиц

ОУ для современных теплиц не имеют аналогов в светотехнике по удельным энергозатратам (на 1 га площади приходится более 2000 шт. светильников мощностью 600 Вт каждый) и более чем на порядок превосходят энергозатраты, характерные для самых энергоёмких ОУ, например, в спортивном освещении. Особые меры принимаются для повышения коэффициента использования светового потока (достигает уровня 0,95÷0,97) благодаря использованию в ночное время зеркальных экранов на потолке и стенах не только для обеспечения максимальной энергоэффективности, но и для максимально возможного снижения светового загрязнения окружающей среды.

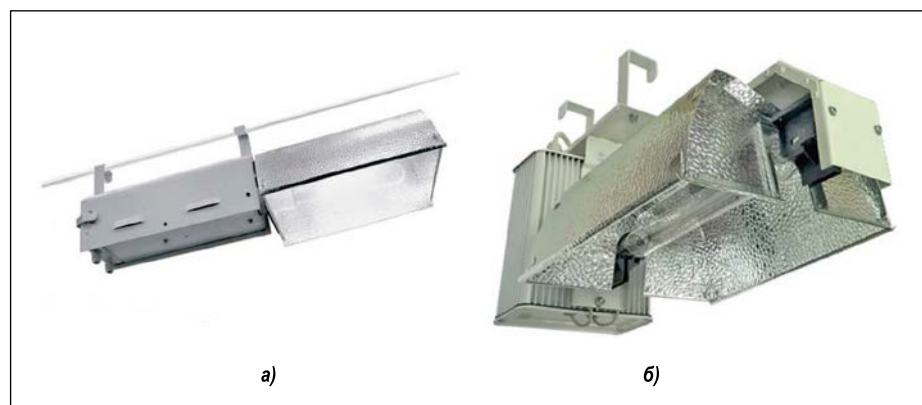


Рис. 11. Тепличные светильники Galad [26]: а – ЖСП30–600–013; б – ЖСП38–1000–003

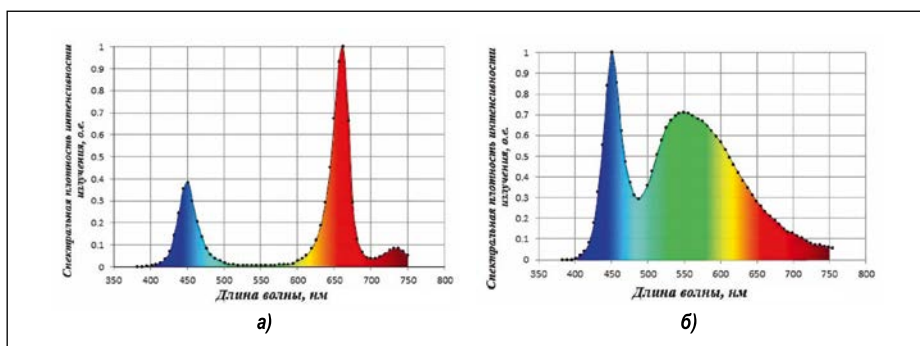


Рис. 12. Типовые спектры СД-фитооблучателей: а – облучатель типа «double peak»; б – «белый» облучатель

Важное значение при проектировании ОУ придаётся достижению максимальных значений отношения обеспечаемого уровня освещённости E к удельной установленной электрической мощности P_1

$$K_{OY} = E/P_1,$$

которое является показателем энергоэффективности ОУ и имеет значения на уровне $K_{OY} = 125 \div 130$ лм/Вт.

Высокие требования предъявляются и к стабильности освещённости в процессе эксплуатации, определяемой, в основном, спадом светового потока ламп. Наши измерения показали, что в реальных условиях ОУ для светокультуры спад потока НЛВД достигает 18–20 % в течение 4-х лет эксплуатации; выполненные расчётные оценки позволяют утверждать, что с учётом прямой зависимости продуктивности от уровня освещённости дальнейшая эксплуатация ламп экономически нецелесообразна [27].

5.5. Светодиодные фитооблучатели для теплиц

Радикальные измерения на рынке тепличного освещения происходят на фоне быстрого развития светодиодных источников излучения и нарастающего давления со стороны приборов с СД на традиционно используемые облучатели с фито-НЛВД с целью постепенного вытеснения последних из теплиц. Достигнув и превзойдя уровень натриевых фитооблучателей по энергоэффективности, СД-фитооблучатели изначально превосходят их также по возможности оптимизации спектральных характеристик с учётом видовых особенностей конкретных культур и задач выращивания.

К сожалению, многие фирмы-работчики, стремясь выиграть время и опередить конкурентов, вместо достаточно длительных и дорогих фотобиологических исследований, направленных на оптимизацию требований к основным характеристикам фитооблучателей и ОУ с ними, изобретают различные квазинаучные подходы, стремясь «подогнать» спектр изделия к спектру действия фотосинтеза, в то время как достаточно хорошо известно, что единого «оптимального» спектра для всех растений не существует.

ВНИСИ придерживается другого подхода, стремясь в сотрудничестве с светофизиологами растений решить эту задачу на основе фотобиологических исследований, результаты которых ориентированы на практическое применение в теплицах [28–31]. Потенциал подобной оптимизации весьма высок и способен обеспечить энергосбережение при замене НЛВД на СД-излучатели на уровне 30–35 % [28, 29].

В настоящее время на российском рынке предложения СД-фитооблучателей многократно превышают спрос. Свои изделия предлагают около двадцати зарубежных и отечественных фирм. Облучатели производятся либо на основе СД, содержащих красные и синие монохромные кристаллы структур $AlGaInP$ и $InGaN$, либо полноцветных СД на основе $InGaN$ с люминофором по технологиям SMD или CoB . В облучателях используются СД ведущих зарубежных производителей: *Cree* (США), *Osram Semiconductor* (Германия), *Lumileds Luxeon* (США), *Nichia* и *Citizen* (Япония) и др. На рис. 12 приведены характерные спектры излучения СД, которые могут присутствовать в современных теплицах, причём на рис. 12а приведён характерный спектр типа

«double peak» красно-синего облучателя, на рис. 12б – спектр белого СД-облучателя, коррелированную цветовую температуру которого может выбираться в пределах от 1800 до 6000 К.

Внедрение СД-фитооблучателей в ОУ теплиц проходит по трём направлениям:

- 1) традиционное верхнее освещение;
- 2) межрядное освещение;
- 3) освещение новых многоярусных систем выращивания растений.

Облучатели верхнего освещения предназначены для замены светильников с НЛВД и могут иметь прямоугольную или линейную форму и мощность от 100 до 600 Вт; межрядные СД-облучатели имеют мощность 35–160 Вт, длину 85–250 см и удельную мощность 0,4–0,65 Вт/см (рис. 13). СД-облучателям для многоярусных систем выращивания альтернативы нет, и объёмы их производства зависят только от темпов продвижения на рынок новаторских фитоустановок типа «City Farm» (рис. 14).

Основной общей причиной, тормозящей появление на рынке тепличного освещения СД-фитооблучателей всех типов, является их высокая стоимость. Детальный технико-экономический анализ показывает, что срок окупаемости затрат при установке СД фитооблучателей составит не менее 5–7 лет [35]. Тем не менее, следует отметить, что в 2017 г. в одном из тепличных комбинатов запланирован первый в отечественной практике крупный проект на основе СД-фитооблучателей [36].

5.6. Новые проблемы измерения фотосинтетически активного излучения

Появление разнеспектральных СД-фитооблучателей с излучением, в том числе, на границах видимой области спектра сделало необходимым введение новой системы измерения ФАР. Ещё в 60-х годах прошлого века высказывалось предложение построить такую систему на основе учёта количества фотонов в области ФАР ($\lambda = 400 \div 700$ нм), поглощённых растением, и эквивалентного ему количества молекул O_2 , образовавшихся в соответствии с реакцией фотосинтеза [37]. С учётом этого на основе рекомендаций *DIN5031, t.1* (1985 г.) [38], отнеся для

практического удобства количество фотонов к числу Авогадро, можно ввести единицу измерения фотосинтетического потока фотонов (PPF) мкмоль/с и производные от него величины: мкмоль/($m^2 \cdot c$) для плотности фотосинтетического потока фотонов ($PPFD$), мкмоль/($c \cdot Вт$) (мкмоль/Дж) для эффективности в области ФАР и т.д.

Некоторые значения PPF для фито-НЛВД приведены в табл. 1.

Фотосинтетический поток фотонов как эффективная величина может быть записан в следующем каноническом виде:

$$\Phi_{PPF} = \int_{400}^{700} \Phi_e(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda,$$

где $S(\lambda) = \frac{\lambda}{h \cdot c \cdot N_A}$ – функция спектральной

эффективности в фотосинтетической фотонной системе величин, $\Phi_e(\lambda)$ – спектральная плотность энергетического потока излучения, λ – длина волны излучения в области ФАР, h – постоянная Планка, c – скорость света, N_A – число Авогадро.

Аналогично может быть записано выражение для E_{PPFD} .

Несмотря на простой вид линейной функции $S(\lambda)$, задача обеспечения измерений фотосинтетических фотонных величин сталкивается с серьезными метрологическими трудностями, обсуждение которых заслуживает отдельного рассмотрения.

На отечественном рынке в настоящее время присутствуют несколько зарубежных и отечественных приборов [39, 40] спектрального и интегрального типов для измерения PPF и $PPFD$. Однако ни один из них не включён в Государственный реестр средств измерений, что не даёт гарантий точных измерений, за исключением самого простого случая – облучателя с НЛВД.

5.7. Нормативная база освещения теплиц

Развитие светокультуры и появление СД-фитооблучателей подчеркнули важность формирования нормативной базы технологического освещения промышленных теплиц. В настоящее время она практически отсутствует. В единственном документе, относящемся к тому же к «Системе рекомендательных документов АПК МСХ

Рис. 13. ОУ межрядного освещения с СД облучателями компании Philips [32]

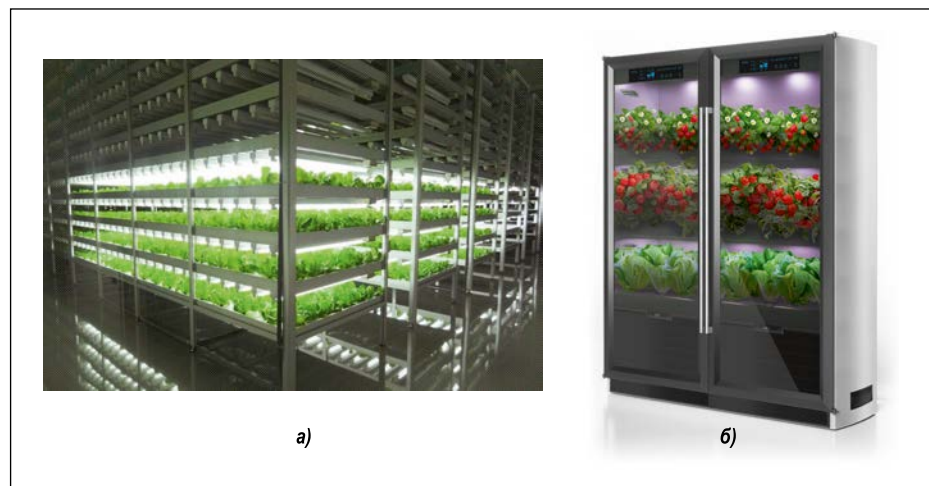


Рис. 14. Многоярусная установка для выращивания растений с СД-облучением: а – производственная, типа «City Farm» [33]; б – бытового назначения [34]

РФ», вопросы светового режима в теплицах изложены некорректно [40].

В 2016 г. в ООО «ВНИСИ» выполнены разработки двух стандартов [44–45], связанных с нормированием и контролем фотосинтетического потока фотонов СД-облучателей при производстве изделий и с порядком измерения плотности фотосинтетического потока фотонов в теплицах, в которых фактически впервые вводится в практику новая система фотосинтетических фотонных величин.

Работа по подготовке нормативных документов по тепличному освещению активно проводится и за рубежом. В июле 2017 г. в США выпущен национальный стандарт «Величины и единицы оптического излучения для растений», подготовленный при участии международной группы экспертов Американским национальным институтом стандартов ($ANSI$) и Американским обществом сельскохозяйственных и биоинженеров ($ASABE$) [46]. В США ведётся подготовка ещё нескольких стандартов по проблемам освещения растений в теплицах [47], и хочется надеяться, что

в России эта работа также будет продолжаться.

Завершая настоящий обзор по, казалось бы, достаточно разным системам освещения в производственных сооружениях АПК МСХ РФ, отметим одно важное общее обстоятельство: сельскохозяйственное освещение в России, всего лишь 15–20 лет назад базировавшееся на устаревших источниках света и осветительных приборах с ЛН, ЛЛ Т12 и ДРЛ, сделало качественный скачок и, используя самые современные достижения светотехники, вносит весомый вклад в импортозамещение и обеспечение населения страны высококачественными продуктами питания.

Раздел 5 «Технологическое освещение (облучение) растений в теплицах» написан в рамках проекта финансовой поддержки прикладных научных исследований Министерством образования и науки Российской Федерации, тема «Комплексные исследования в области светокультуры растений и создание высокоэффективных фитооблучателей, обеспечивающих повышение энергоэффективности промыш-

ленных теплиц» (соглашение о предоставлении субсидии № 14.576.21.0099 от 26.09.2017. Уникальный идентификатор: RFMEFI57617X0099).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ОСН–АПК 2.10.24.001–04 Нормы освещения сельскохозяйственных предприятий, зданий и сооружений. – Москва, 2004 г.
- Кансволь Н. Больше света в коровнике // Новое сельское хозяйство. – Москва. – 2006. – № 1. – С. 58–62.
- Kansvol N., Mathias S. Für mehr licht ins Melkstand sorgon. // Fortschrittliche Landwist. – 2013. – № 4. – P. 14–15.
- <https://lto.com.ru/products/types/industrial-luminaires/up-to-5-meters/inox-led/inox-led-70-ovp-5000k/>
- <http://varton.ru/products/product/158/>
- <http://www.agroinvestor.ru/companies/article/12053-pyat-novykh-ferm-za-vosem-let/>
- <http://www.bashinform.ru/news/731905/>
- Какой свет нужен в свинарнике? https://agrobearus.by/articles/nauka/kakoy_svet_nuzhen_v_svinarnike/
- Каветарашвили А.Ш. Технологические методы повышения эффективности производства куриных яиц / Диссертация доктора с/х наук (спец. 06.02.04), г. Сергиев-Посад, 1999, 366 с.
- Мухамедина А.Р. Влияние света на поведение и продуктивность птиц // Ветеринария. – 2005. – № 6. – С. 16–18.
- <https://www.hartmann-light.ru/> — kltfx
- <http://refportal.com/news/business/spravochnik-po-ndt-v-pishievoy-promishlennosti-poyavitsya-v-217-godu/>
- Гладин Д.В. Система освещения в птицеводстве. Прошлое и настоящее. http://www.ntp-ts.ru/upload/iblock/1f0/past_and_present.pdf
- Ручин А.Б. Влияние фотопериода на рост, физиологическое и гематологические показатели молоди сибирского осетра // Известия РАН. Биологическая серия. – 6: 698–704.
- Власов В.А., Маслова Н.И., Пономарев С.В., Баканева Ю.М. Влияние света на рост и развитие рыб // Вестник АГТУ. Сер: Рыбное хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 24–33.
- <http://www.akvagroup.com/products/cage-farming-aquaculture/underwater-lights>
- <http://aquafarmer.ru/>
- <http://www.akvagroup.com/news/image-gallery>
- Григорьев С.С., Седова Н.А. Индустриальное рыбоводство // Уч. пособие. Камчатский гос. тех. ун-т. – Ч. 1. – 2008. – 353 с.
- Поединок Н.Л. Использование искусственного света при культивировании грибов // Biotechnologia Acta. – 2013. – № 6. – С. 58–70.
- Purschwitz I., Muller S., Kasther Ch. Seeling the rainbow: light sensing in fungi. // Curr. Opin. Microbiol. – 2006. – Vol. 9, No. 6. – P. 566–571.
- Девочкина Н.Л. Выращивание вешенок в теплицах интенсивным способом // Теплицы России. – 2009. – № 3. – С. 23–26.
- Глушаков О.В., Алексеева К.Л. Опыт выращивания вешенок в ООО «Агрико», Чувашская Республика // Теплицы России. – 2017. – № 2. – С. 28–29.
- <http://gribportal.ru/vyrashchivanie/vyrashchivanie-veshenok-v-domashnih-usloviyah-dlya-novichkov/>
- Прикупец Л.Б. Светокультура. Рациональный подход к выбору системы освещения // Теплицы России. – 2016. – № 1. – С. 56–61.
- [http://galad.ru/catalog/? FILTER\[KLASS_PROD\]=1503](http://galad.ru/catalog/?FILTER[KLASS_PROD]=1503)
- Прикупец Л.Б. Светокультура. Лампы светят. Когда менять? // Теплицы России. – 2015. – № 1. – С. 52–53.
- Емелин А.А., Прикупец Л.Б., Тараканов И.Г. Спектральный аспект при использовании светодиодных облучателей для выращивания салатных растений в условиях светокультуры // Светотехника. – 2015. – № 4. – С. 47–52.
- Yemelin A.A., Prikupets L.B., Tarakanov I.G. Spectral Aspect when Using Light-Emitting Diode Irradiators for Salad Plant Cultivation under Photoculture Conditions // Light & Engineering. – 2015. – Vol. 23, No. 4. – P. 41–45.
- Boos G.V., Prikupets L.B., Terehov V.G. Tarakanov I.G. Studies in the field of plant irradiation with LEDs // The 10th Asia Lighting Conference, Shanghai, China, August 17–18, 2017. <http://asialightingconference.org/index.php>.
- Prikupets L.B., Terehov V.G., Tarakanov I.G. LED and HPS luminaires in Russian greenhouses // Lux Europa 2017, Ljubljana, Slovenia, September 18–20, 2017 <http://www.luxeuropa2017.eu/>
- <http://www.lighting.philips.ru/products/horticulture>
- <http://innovatube.com/2016/12/26/caccong-nghe-moi-duoc-mong-cho-nam-2017-phan-2/>
- <http://fibonacci.farm/models>
- Прикупец Л.Б., Емелин А.А. Использование облучателей на основе светодиодов для светокультуры салата: экономический аспект // Теплицы России. – 2013. – № 3. – С. 66–68.
- <https://www.vegprice.ru/news/tag/0/7965-philips-lighting>, Дата обращения: 05.07.2017.
- Тооминг Х.Г., Гуляев Б.И. Методика измерения фотосинтетически активной радиации // Учебное пособие. – М.: Наука, 1967. – 143 с.
- Vornorm DIN5031 Teil 1 (1985) »Strahlungsphysik im optischen Bereich».
- Кузьмин В.Н., Николаев С.Е. Методы и приборы для оперативной оценки энергоэффективности оптического излучения в условиях светокультуры // Светотехника. – 2016. – № 4. – С. 41–43.
- Kuzmin, V.N., Nikolaev, S.E. Methods and Devices for Quick Evaluation of Optical Radiation Energy Efficiency under Photoculture Conditions // Light & Engineering. – 2016. – No. 4. – P. 99–104.
- РД-АПК 1.10.09.01–14 Методические рекомендации по технологическому проектированию теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады. Москва, 2014.
- ГОСТ Р 57671–2017 «Приборы облучательные со светодиодными источниками света для теплиц. Общие технические условия».
- ПНСТ 211–2017 «Облучение растений светодиодными источниками света. Методы измерений».
- Боос Г.В., Прикупец Л.Б., Розовский Е.И., Столяревская Р.И. Стандартизация светотехнических приборов и установок для теплиц // Светотехника. – 2017. – № 6. – С. 69–74.
- Boos G.V., Prikupets L.B., Rozovskiy, E.I., Stolyarevskaya R.I. Standardization in the field of lighting equipment and installations for greenhouses // Light & Engineering. – 2015. – Vol. 26 – in print.
- ANSI/ASABE S640 «Quantities and Units of Electromagnetic Radiation for Plants (Photosynthetic Organisms)».
- Jianzhong J. Stakeholders make progress on LED lighting horticulture standards // LEDs Magazine. – June. – 2015. – P. 39–41.



Прикупец Леонид Борисович, канд.тех.наук. Окончил с отличием в 1970 г. МЭИ. Зав. лабораторией ООО «ВНИСИ имени С.И. Вавилова» и ведущий технический консультант ООО «БЛ ТРЕЙД»