

Основные направления повышения эффективности тепличных облучательных установок

*В.М. Пчелин, к.т.н., генеральный директор ООО «Рефлекс»,
М.В Саморуков, главный инженер ООО «Рефлекс»,
Р.Ш. Ариков, инженер ООО «Рефлекс»*

Затраты на электроэнергию при выращивании светокультуры составляют значительную часть себестоимости производимой продукции и доходят до 30-40% от себестоимости. В связи с этим рассмотрим основные факторы, влияющие на повышение эффективности тепличных облучательных установок.

Важным фактором является выбор источника света. Именно источник света в значительной мере определяет эффективность осветительной установки. При этом, как правило, чем выше световая отдача источника света (H), тем лучше. На рис.1 приведены характеристики основных типов источников света, потенциально применимых в теплицах. Как видно из рисунка в настоящее время вне конкуренции натриевые лампы высокого давления (НЛВД), сочетающие большую единичную мощность, высокую световую отдачу и длительный срок службы (τ). Например, НЛВД 600Вт – $H \sim 150$ лм/Вт (140 лм/Вт с учетом потерь в ПРА), $\tau > 20\ 000$ часов (4÷5 лет работы на светокультуре).

Широко обсуждаемые в последнее время светодиоды, несомненно весьма

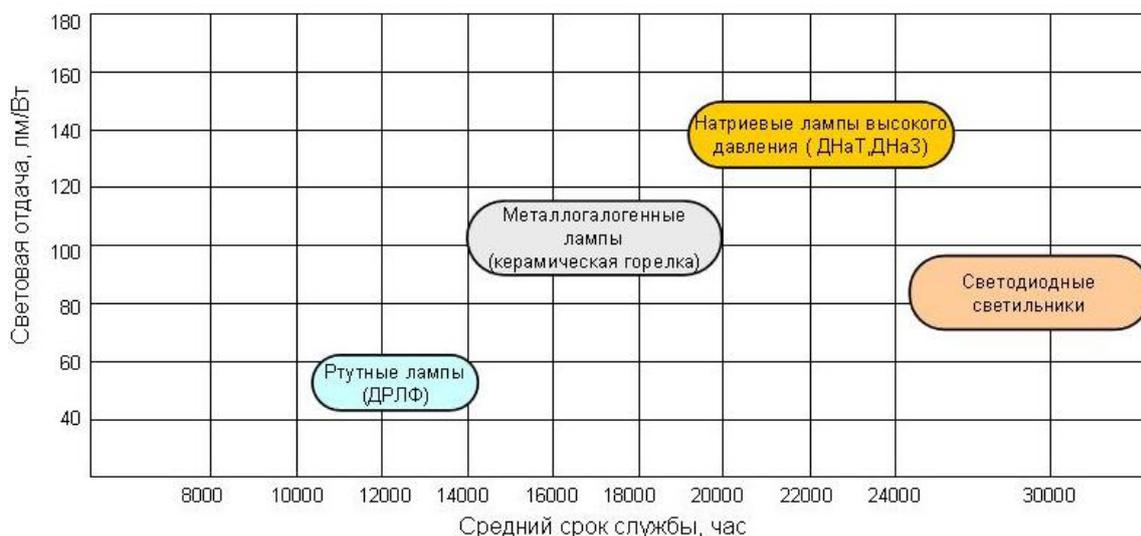


Рис. 1. Характеристики основных типов источников света.

перспективные источники света, однако применительно к тепличным облучательным установкам они пока существенно уступают НЛВД.

Во-первых: световая отдача светодиодных светильников мощностью $100 \div 150$ Вт, с учетом потерь в драйвере не превышает даже для холодно-белого цвета $80 \div 100$ лм/Вт., а для светильников большей мощности она еще ниже. Следовательно, при переходе на светодиодные светильники затраты на электроэнергию увеличиваются, как минимум, в 1,5 раза, а их доля в себестоимости производимой продукции возрастает до 60%.

Во-вторых: в настоящее время светодиодные светильники очень дорогие – стоимость светильников со световым потоком, эквивалентным световому потоку одного современного светильника с НЛВД 600Вт превышает стоимость последнего не менее чем в 10 раз!

В-третьих: даже если тепличников не смущает то, что они будут в 1,5 раза больше платить за электроэнергию и вместо 5 га современных теплиц с обычной системой досвечивания смогут построить за те же деньги только 1 га, но зато со светодиодной системой, урожайность в такой «нанотехнологичной» теплице будет на $10 \div 20\%$ ниже, чем в обычной за счет того, что светодиодные светильники имеют очень большие габаритные размеры и их корпуса будут экранировать $15 \div 30\%$ естественного дневного света.

С учетом изложенного, по нашему мнению, массовое использование светодиодных осветительных систем в теплицах можно ожидать не ранее чем через $5 \div 7$ лет и при этом скорее всего это будут совершенно новые системы, принципиально отличающиеся от существующих. По крайней мере, простая замена светильника с НЛВД на светильник со светодиодами не эффективна.

Вывод – основной источник света в теплицах на ближайшее время - натриевая лампа высокого давления мощностью $600 \div 1000$ Вт. Они выпускаются в двух модификациях – на 220В и на 400В питающего напряжения. Лампы на разное напряжение существенно отличаются друг от друга электрическими параметрами ($I_{л}=6,0$ А; $I_{л}=3,6$ А) и в меньшей степени спектральными и световыми характеристиками. Сравнительные характеристики типичных НЛВД приведены на рис.2 и в таблице 1.

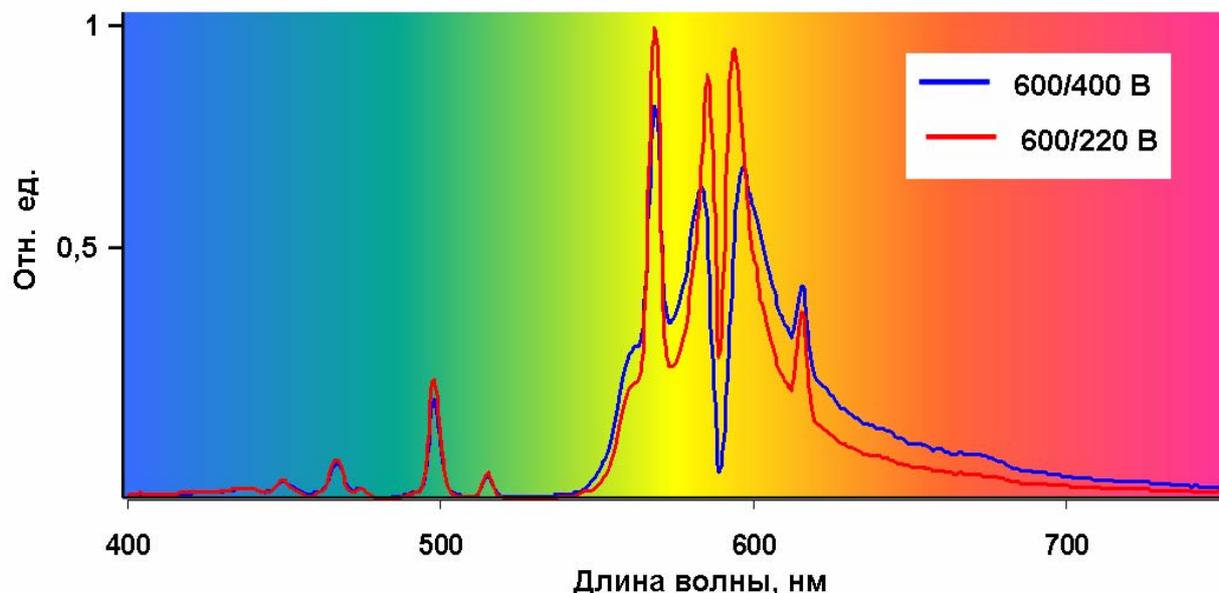


Рис. 2. Спектры излучения натриевых ламп.

Основные типы натриевых ламп, используемых в тепличных облучательных установках

Таблица 1

Тип лампы	Мощность, Вт	Напряжение сети, В	Ток лампы, А	Световой поток, клм	Поток ФАР, мкмоль/с
ДНаТ супер 600	600	220	6,0	90	1120
ДНаЗ супер/Reflux S 600	600	220	6,0	86	1060
ДНаТ супер 600/400В	600	380	3,6	87	1180
ДНаЗ супер/Reflux S 600/400В	600	380	3,6	83	1120
ДНаСф супер 1000/400В	1000	380	4,5	130	1850

НЛВД на 220 В имеют несколько большую световую отдачу, чем аналогичные лампы на 400 В (на 3÷5 %), но при этом последние имеют большую интенсивность излучения в желто-красной области спектра и за счет этого несколько большую интенсивность излучения в области ФАР (на те же 3÷5 %). Влияние этих различий на урожайность растений еще недостаточно изучено. Решение о том какие НЛВД и на какое напряжение целесообразно применять, остается на усмотрение специалистов тепличных хозяйств.

Любая газоразрядная лампа, в том числе и НЛВД, работает в комплекте с пуско-регулирующим аппаратом (ПРА). Тип используемого ПРА и его характеристики могут оказывать существенное влияние на эффективность и технические возможности осветительной

установки в целом. И, хотя эти вопросы довольно подробно рассмотрены в литературе, вкратце остановимся на них тоже.

Сейчас для НЛВД используются в основном два типа ПРА: электромагнитный дроссель с импульсным зажигающим устройством (ЭМПРА) и электронный (ЭПРА). К несомненным преимуществам (ЭМПРА) относится высокая надежность и сравнительно низкая стоимость. В то же время, ЭПРА представляют новый этап в развитии ПРА и обладают целым рядом достоинств.

Сравнительные характеристики двух типов ПРА приведены в Таблице 2.

Сравнительные характеристики основных типов пускорегулирующих аппаратов для НЛВД

Таблица 2

Тип	Пусковые токи	Коэффициент мощности ($\cos \varphi$)	Стабилизация мощности на лампе при колебании напряжения сети	Возможность управления световым потоком	Вес, кг
Электромагнитный ПРА	$1.4 * I_{ном}$	0,85	плохо	нет	~ 10
Электронный ЭПРА	$0.7 * I_{ном}$	0,96	хорошо	есть	~ 3.5

К преимуществам ЭПРА можно отнести: отсутствие пусковых токов, высокий коэффициент мощности, хорошая стабилизация мощности лампы при колебаниях напряжения сети, возможность регулировки светового потока, малый вес. В результате, применение ЭПРА является весьма перспективным и позволяет повысить эффективность тепличных облучательных установок на 20÷30 %. Основными причинами, сдерживающими более быстрое внедрение ЭПРА, является их недостаточная надежность и более высокая цена.

Другим важным фактором, оказывающим влияние на эффективность тепличных облучательных установок являются характеристики оптической системы светильников: коэффициент полезного действия (КПД) и кривая силы света (КСС). КПД показывает, какая доля светового потока лампы выходит из светильника. Очевидно, что чем выше КПД, тем лучше. У современных светильников он составляет 0,8÷0,95% и вплотную приблизился к теоретическому максимуму равному 1.

КСС описывает распределение излучения светильника в пространстве. В зависимости от направления максимальной силы света (α_{\max}) КСС подразделяются на широкую ($\alpha_{\max} = 55 \div 85^\circ$), полуширокую ($\alpha_{\max} = 35 \div 55^\circ$), косинусную ($\alpha_{\max} = 0 \div 35^\circ$). В связи с этим встает вопрос, а какая КСС наиболее эффективна? К сожалению этому вопросу до последнего времени уделяли недостаточное внимание. Попробуем это исправить.

В настоящее время основным нормируемым показателем при проектировании тепличных облучательных установок является значение средней горизонтальной освещенности (облученности) ($E_{\text{гор.ср}}$) и коэффициента ее неравномерности ($K_{\text{нер}}$) на заданном уровне от поверхности грунта. Например: $E_{\text{гор.ср.}} = 10000$ лк при $K_{\text{нер.}} = 0,90$ на уровне 1,0 м. При этом проектировщик не обязан учитывать высоту и планировку размещения растений, затемнения рядами растений друг друга и т.д. Его задачей является обеспечение нормируемых показателей при минимальной установленной мощности Вт/м². Поставленная задача обычно достигается расчетом нескольких осветительных установок, отличающихся друг от друга типом используемых светильников и их размещением, отбором из этих установок тех, которые обеспечивают нормируемые параметры и выбором из отобранных одной, имеющей наименьшую установленную мощность в Вт/м². На наш взгляд, такой подход более менее приемлем для выращивания низкорослых культур – рассады, салатных линий, в меньшей степени для цветов. Но он совершенно не подходит для проектирования осветительных установок для светокультуры огурца и томатов, когда высота растения достигает 3÷3,5 м. По нашему мнению, использование $E_{\text{гор.}}$ в качестве основной нормируемой величины для высоких культур некорректно.

Рассмотрим этот вопрос подробнее, для чего обратим внимание на формулу расчета горизонтальной освещенности в точке А от нескольких источников света, расположенных на расстоянии r_i от точки А.

$$E_{\text{гор}A} = \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{r_i^2} \cos \alpha_i \quad (1)$$

где I_i – сила света i -го светильника по направлению к точке А.

α_i – угол между лучами света, падающего в точку А с направления i и нормалью к горизонтальной поверхности в точке А.

Из формулы видно, что вклад излучения светильника в создание горизонтальной освещенности в заданной точке зависит не только от силы света светильника в направлении к этой точки и от квадрата расстояния до нее, но и от косинуса угла падения этого луча на горизонтальную поверхность (α). Несколько упростим задачу. Допустим, что источники света, создающие $E_{гор}$ в точке А находятся на одинаковом расстоянии от нее и имеют одну и ту же силу света (рис.3). Тогда, формула (1) примет вид:

$$E_{горA} = \frac{I}{r^2} \sum_{i=1}^n \cos \alpha_i \quad (2)$$

Учитывая, что значения $\cos \alpha$ изменяются от 1, при вертикальном падении луча на поверхность ($\alpha = 0^\circ$) до 0, при падении под углом 90° к нормали (см. рис.3), получается, что наибольшую ценность имеют вертикальные лучи, а лучи упавшие на горизонтальную поверхность, под углами близкими к 90° практически не увеличивают значение $E_{горA}$ и в связи с этим считаются «бесполезными» для растений.

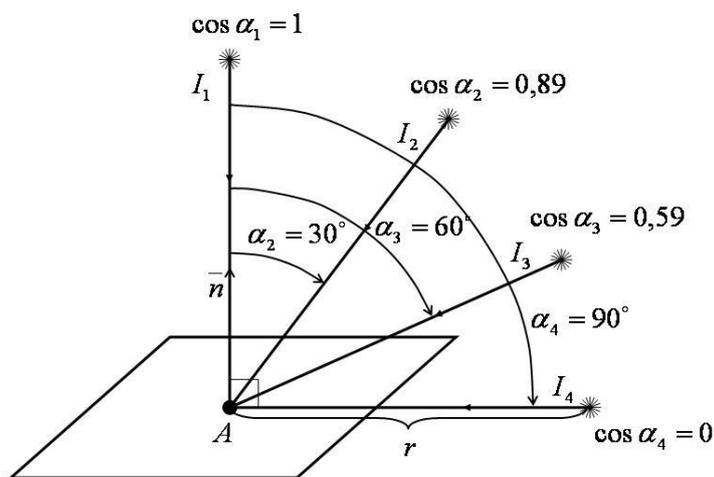


Рис. 3. Значения $\cos \alpha$ в зависимости от угла падения луча на горизонтальную поверхность

На самом деле это совершенно не так. На рис.4 представлена типичная фотография светокультуры огурца (в данном случае, сделанная в ТК «Майский»). Основными приемниками излучения источников света являются листья, которые, как хорошо видно на фото, не имеют горизонтальной ориентации, а свободно висят и скорее ориентированы почти вертикально, т.е. в реальных условиях горизонтальные лучи попадают на поверхность листьев практически перпендикулярно и весьма эффективно поглощаются ими.



Рис. 4. Расположение листьев в отделении светокультуры огурца

Таким образом, в реальных условиях выращивания светокультуры огурца для максимально эффективного использования освещения большинство лучей должно выходить из светильника не вертикально вниз, а под углами близкими к горизонтальному направлению и именно эти лучи должны вносить наибольший вклад в наполнение основной нормируемой величины. При существующей системе нормирования ($E_{гор.ср.}$) все с точностью до наоборот. Следовательно, существующая система проектирования тепличных облучательных установок, основанная на нормировании горизонтальной освещенности не учитывает реальной эффективности воздействия излучения на растения и требует пересмотра. Однако, пересмотр системы нормирования – задача не простая и требует времени. А какими же критериями пользоваться сейчас? Очевидно, что основной критерий – наибольшая урожайность при равных энергетических затратах. Рассмотрим, как на этот критерий влияет кривая силы света

светильника, на примере двух существенно отличающихся друг от друга кривых – широкой КСС, у которой основной световой поток сосредоточен в диапазоне углов от 55 до 75° и косинусной КСС, когда большая часть излучения направлена вертикально вниз и лежит в диапазоне от 0 до 35°.

На рис.5 схематично представлена система освещения светокультуры огурца светильниками с широкой КСС.

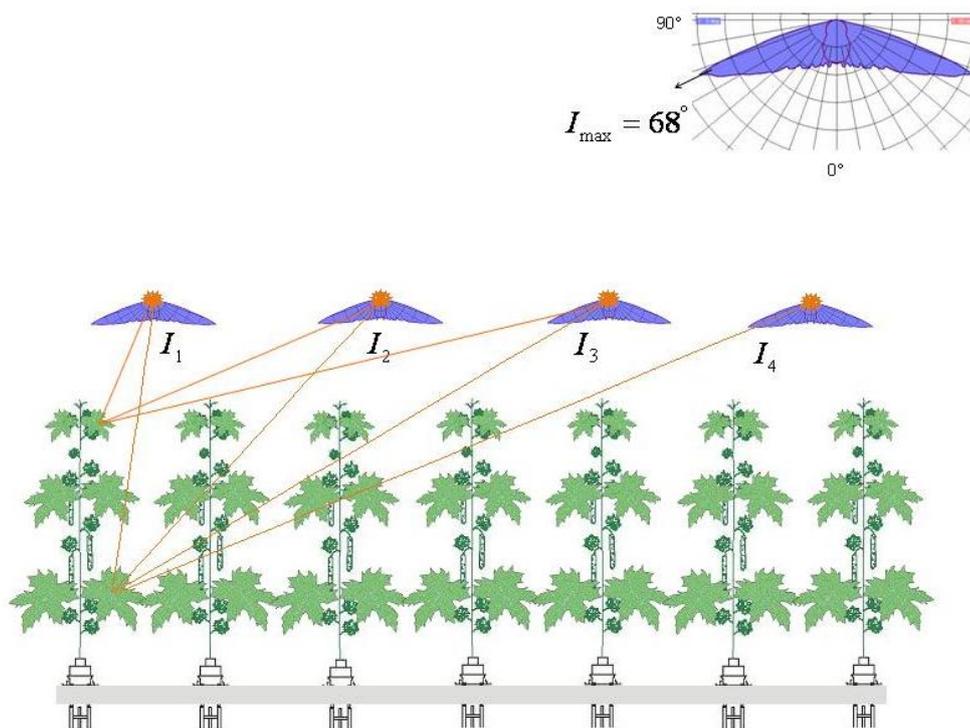


Рис. 5. Модель освещения светокультуры огурца светильниками с широкой КСС

Видно, что на каждый лист каждого растения свет поступает от большого числа светильников с разных сторон и под разными направлениями, создавая эффект объемного освещения. Очевидно, что такое излучение более эффективно поглощается растениями.

На рис.6 представлена аналогичная система, но при освещении светильниками с косинусной КСС. В этом случае на каждый лист свет поступает только от одного – двух светильников и эффект объемного освещения отсутствует.

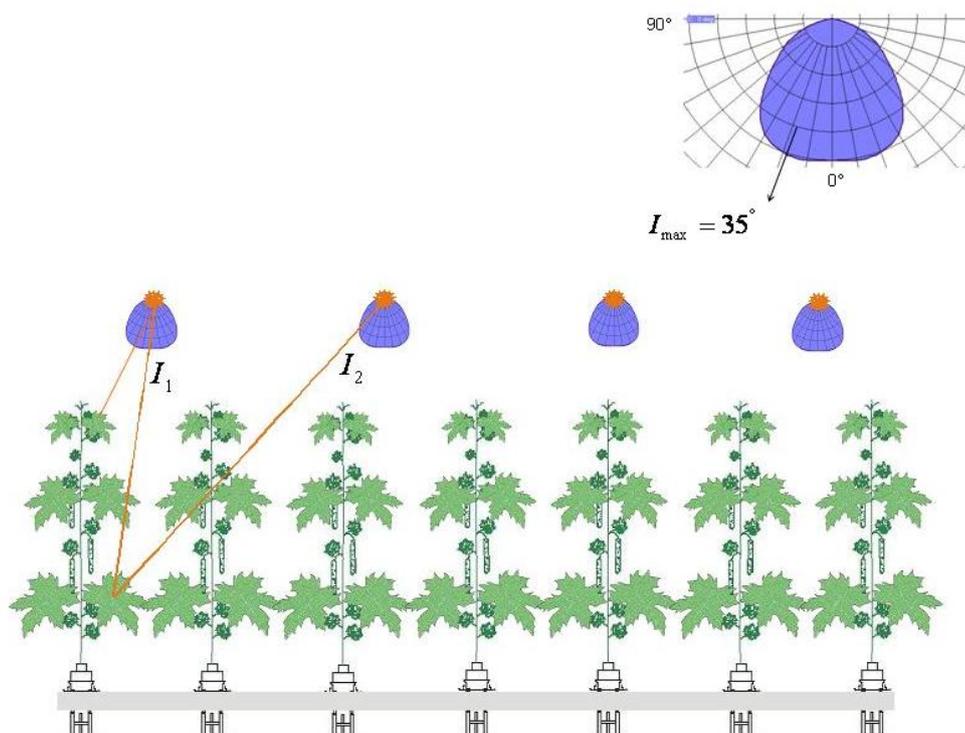


Рис. 6. Модель освещения светокультуры огурца светильниками с косинусной КСС

Резонно предположить, что наличие эффекта объемного освещения должно весьма положительно сказываться на урожайности овощных культур. А как на практике?

В Тепличном Комбинате «Майский», в одной из теплиц, на участке в 450 м² основные для ТК «Майский» светильники с зеркальными лампами «Рефлекс» 600 Вт (широкое светораспределение $I_{\max}=68^\circ$) были заменены на светильники с трубчатой лампой 600 Вт фирмы «Филипс» и металлическим отражателем (полуширокое светораспределение с $I_{\max}=40^\circ$). При этом был обеспечен одинаковый с другими участками, освещенными лампами «Рефлекс», уровень освещенности $E_{\text{гор.ср.}}$ 18000 лк. Сопоставление продуктивности на соседних участках с разными системами освещения в течении 3-х лет показало, что урожайность под лампами «Рефлекс» с широким светораспределением была стабильно на 20-25 % выше, чем под светильниками с полушироким светораспределением. В настоящее время во всех осветительных установках ТК «Майский» используются только лампы «Рефлекс» с широким светораспределением, что по нашему мнению способствует получению ТК «Майский» самых высоких в отрасли урожаев светокультуры огурца (более 110 кг/м²).

В пользу эффективности «объемного» освещения говорят и еще ряд примеров:

1. Известно, что замена прозрачного покрытия теплиц на диффузно-рассеивающее приводит к увеличению урожайности различных культур на 8-10 %. По заявлению специалистов – это также связано с созданием в этом случае эффекта «объемного» освещения внутри теплицы.

2. В настоящее время не только в Финляндии, но и в других странах достаточно широкое распространение получила система дополнительного межрядного освещения.

В соответствии с этой системой, дополнительно к основному верхнему освещению светокультуры огурца и томатов, применяется внутрирядная досветка с использованием или вертикально висячих трубчатых натриевых ламп (без отражателей) (рис.7), или других источников света (люминисцентных ламп, светодиодов и т.д.). По заявлению авторов этой системы – межрядная досветка дает значительную прибавку урожайности. Принимая во внимание, что при этом, как правило, светильники верхнего света имеют КСС близкие к полушироким или косинусным, то становится очевидным, что межрядная досветка в этом случае призвана исправить неэффективность данного верхнего света и создать объемное освещение для растений.

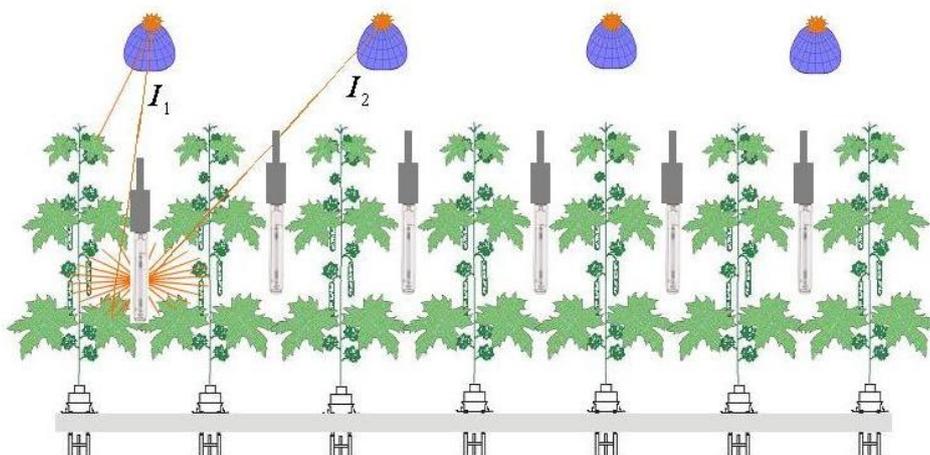


Рис. 7. Модель освещения светокультуры огурца светильниками с косинусной КСС и межрядной досветкой.

По данным ТК «Майский», межрядная досветка в сочетании со светильниками верхнего света с широкой КСС, практически не дает положительного эффекта.

В завершении этого раздела следует отметить, что высокая эффективность светильников с широкой КСС в полной мере реализуется только при их правильном расположении,

относительно рядов растений. По нашему мнению, светильники нужно вешать посередине межи (прохода) поперек рядов растений, т.е. таким образом, чтобы свет проникал как можно глубже.

В заключении данной статьи отметим еще несколько факторов, которые обязательно должны учитываться в рамках снижения затрат при производстве светокультуры.

Светокультуру можно весьма условно разделить на две большие группы:

- салатные линии и цветы с энергозатратами ~ 100В/м и временем досветки 4000-5000 ч/год;
- огурцы и томаты с энергозатратами ~ 200В/м и временем досветки 3000-4000 ч/год.

В связи с этим легко рассчитать стоимость электроэнергии, потребляемой одной 600-Ватной лампой за год (рис. 8). Если для рассадного отделения она составляет не более 2 тыс. руб., то для светокультуры огурца стоимость потребляемой электроэнергии увеличивается до 8-12 тыс. рублей. И это только для одной лампы, а их количество на 1 га может доходить до 3000 единиц.

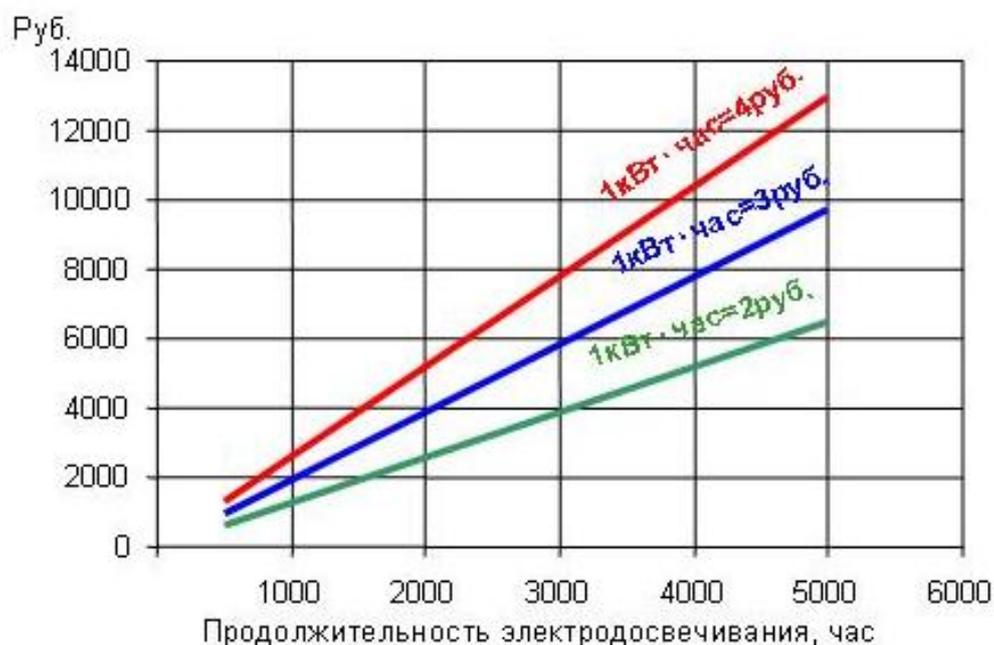


Рис. 8. Стоимость электроэнергии, потребляемой за год одной световой точкой с лампой 600Вт

С другой стороны, известно, что в процессе эксплуатации облучательной установки происходит спад светового потока светильника, обусловленный снижением эффективности отражателя, запылением и старением лампы (рис. 9).

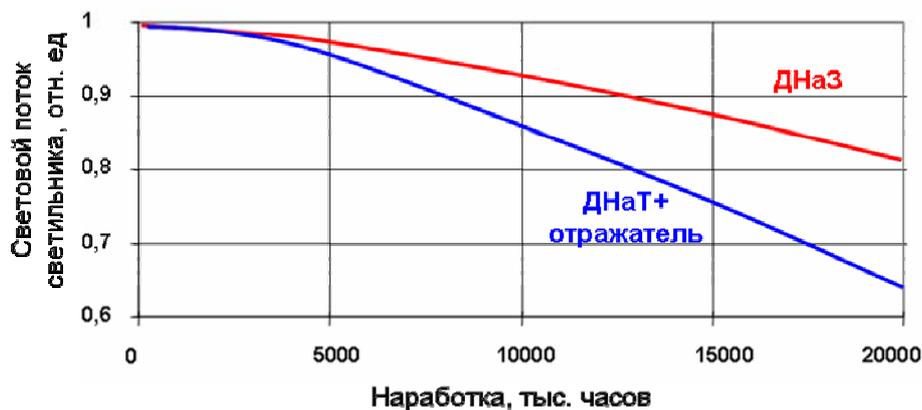


Рис. 9. Спад светового потока светильника в ходе эксплуатации для различных систем

На рис.9 приведен график изменения светового потока светильников в процессе наработки для двух наиболее типичных отражательных систем:

- светильник с металлическим отражателем и трубчатой натриевой лампой;
- светильник с зеркальной лампой ДНаЗ/Reflux.

Большая стабильность параметров светильников с лампами ДНаЗ/Reflux обусловлена тем, что отражатель этих ламп не стареет в процессе эксплуатации (находится в вакууме), а пыль оседая только на верхней части лампы также не приводит к дополнительному снижению светового потока.

Очевидно, что спад светового потока светильника является негативным фактором, так как приводит к снижению урожайности. Для грубой оценки можно воспользоваться общепринятым, но не бесспорным соотношением: один процент света – один процент урожая, а принимая во внимание, что 1% света стоит значительно дешевле, чем 1% урожая, то целесообразно, в процессе эксплуатации, тратить средства на компенсацию спада светового потока светильников, сохраняя тем самым урожайность.

Механизм поддержания светового потока может быть реализован за счет использования электронных светильников с регулируемой мощностью. По мере спада светового потока светильника его мощность должна пропорционально увеличиваться. Естественно, что в этом случае затраты на электроэнергию будут постепенно возрастать. Увеличение мощности будет целесообразно, но до какой степени?

Другим способом восстановления светового потока эксплуатируемой осветительной установки является групповая одновременная замена старых ламп и отражателей на новые. Способ не дешевый, но эффективный. Он позволяет полностью восстановить световые характеристики установки, без дополнительных затрат электроэнергии. При каких условиях экономически оправдана групповая замена? Для того, чтобы ответить на оба вопроса рассмотрим пример для светильников с лампами мощностью 600 Вт.

Исходные данные: стоимость электроэнергии – 3 руб/кВт · час, время работы в год – 5000 часов. Стоимость групповой замены ламп и отражателей (из расчета на 1 светильник):

- для трубчатой лампы и отражателя – 1300 руб.
- для зеркальной лампы ДНаЗ/Reflux – 1500 руб.

Данные по спаду светового потока светильника и затратам на дополнительную электроэнергию приведены в табл.3.

Исходные данные

Таблица 3

Наработка, год	Светильник с трубчатой лампой и отражателем		Светильник с зеркальной лампой ДНаЗ/Reflux	
	Спад светового потока, %	Дополнительные затраты на электроэнергию на один светильник, руб.	Спад светового потока, %	Дополнительные затраты на электроэнергию на один светильник, руб.
1	5	250	3	150
2	15	750	8	550
3	25	2000	13	1050
4	35	3000	18	1550

Групповая замена становится целесообразной в том случае, если планируемые дополнительные затраты на электроэнергию в наступающем году превышают затраты на групповую замену ламп.

Как видно из табл.3 для светильников с трубчатыми лампами такая замена в нашем примере оправдана в начале 3-го года эксплуатации (групповая замена ламп и отражателей – 1300 руб., дополнительные затраты на электроэнергию – 2000 руб.), а для светильников с

лампами ДНаз/Reflux в начале 4-го или 5-го года (групповая замена ламп и отражателей – 1500 руб., дополнительные затраты на электроэнергию – 1550 руб).

Мы привели только оценочный расчет. В реальных условиях сроки групповой замены зависят от многих факторов и должны рассчитываться индивидуально. Хотелось бы только отметить, что не надо бояться групповой замены ламп и отражателей, так как часто экономический эффект от такой замены в разы превосходит затраты на ее проведение. Достаточно вспомнить, что в свое время переход с одного оборота светокультуры огурца в год на 2-3 позволил значительно увеличить урожайность.

Выводы:

Высокоэффективные облучательные установки могут быть реализованы в настоящее время при использовании:

1. Натриевых ламп высокого давления мощностью 600-1000 Вт на напряжение 220 и 400 В.
2. Светильников с электронными пускорегулирующими аппаратами с регулировкой светового потока.
3. Светильников с широкой кривой силы света или набора светильников, обеспечивающих «объемное» освещение растений.
4. Ламп-светильников или светильников с высокой стабильностью световых параметров в процессе эксплуатации.
5. Своевременной групповой замены ламп и отражателей.