

Разработка и испытание цилиндрического светильника для салатной космической оранжереи, построенного на основе светоизлучающих диодов.

Секция «Системы жизнеобеспечения»

Ерохин А.Н., Беркович Ю.А., Смолянина С.О., Паниткин Ю.Г.

Введение

Одной из актуальных экологических и технических проблем в области пилотируемой космонавтики в настоящее время является создание для небольших коллективов людей в изолированных отсеках регенерационных биолого-технических систем жизнеобеспечения (БТСЖО). Непременным компонентом БТСЖО являются устройства для культивирования высших растений, или космические оранжереи, [1-3], вследствие чего характеристики БТСЖО существенным образом зависят от прогресса технологии в растениеводстве, а также от технического совершенства применяемого оборудования. Специфические условия среды обитания внутри пилотируемых космических аппаратов, особенно изменённая по сравнению с земной гравитация, не позволяют использовать даже лучшие из известных на земле агротехнологий без существенной доработки. Второй причиной для поиска новых агротехнологий в космическом растениеводстве является высокая по сравнению с условиями Земли цена потребляемых космическими оранжереями ресурсов. Среди таких ресурсов обычно выделяют следующие [4]: масса доставляемого на борт оборудования и материалов, занимаемый герметизированный объём, потребляемая электроэнергия, мощность теплового потока, отводимого от оранжереи, а также трудозатраты экипажа на её обслуживание.

В последние годы в Государственном научном центре РФ - Институте медико-биологических проблем Российской академии наук (ГНЦ РФ - ИМБП РАН) был разработан перспективный метод выращивания растений на выпуклых посадочных поверхностях, при котором стебли растут вдоль нормалей к поверхности, вследствие чего верхушки растений удаляются друг от друга по мере роста. Такие посевы были названы самораздвигающимися. На основании уравнений теории фотосинтетической продуктивности было показано, что одна и та же энергия, затраченная на освещение растений, позволяет получить в самораздвигающихся посевах большую продуктивность, чем в посевах на плоской посадочной поверхности [5]. Кроме того, организация посева на выпуклых сферической или цилиндрической посадочных поверхностях требуют меньшего объёма, чем традиционной компоновка посева на плоскости. Предварительные эксперименты подтвердили эти выводы. Экономия объёма и потребляемой энергии в оранжереях с выпуклыми посадочными поверхностями делает эти конструкции более эффективными, чем традиционные вегетационные установки с плоской посадочной поверхностью. В данной работе представлены результаты разработки светильника для цилиндрической салатной космической оранжереи.

1. Обоснование выбора источников света для освещения конвейерного посева зеленных растений

Важным условием оптимизации технологии культивирования растений при искусственном освещении является выбор источников света. Исследования последних лет

показали, что такие культуры, как салат, пшеница и некоторые другие, могут нормально расти и развиваться при освещении их светоизлучающими диодами (СД) - полупроводниковыми приборами, генерирующими практически монохроматическое оптическое излучение при прохождении через них электрического тока [6,7]. Был выявлен ряд несомненных преимуществ светодиодов для светокультуры растений перед другими искусственными источниками света [8]. Среди них отметим основные:

- 1). возможность создания светильников, обеспечивающих плотность потока фотонов (ППФ) на поверхности посева до $1000 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;
- 2) высокую надежность (срок службы до 100000 час);
- 3) высокую устойчивость к механическим воздействиям и изменениям температуры;
- 4) высокую световую отдачу (свыше 30 лм/Вт);
- 5) отсутствие инфракрасной составляющей в спектре излучения.

Такие характеристики делают эти приборы предпочтительными по сравнению с другими искусственными источниками света в салатных космических оранжереях.

Исследования влияния спектрального состава излучения на развитие и состав биомассы зеленных растений [9,10] показали, что, кроме основной красно-оранжевой составляющей в спектре излучения (с длиной волны $\lambda = 600\text{-}700 \text{ нм.}$) необходимо присутствие синей компоненты (с $\lambda = 400\text{-}500 \text{ нм.}$) с интенсивностью приблизительно 10% от суммарной плотности светового потока. В результате анализа технических характеристик на рынке светодиодов, выпускаемых промышленностью России, США и Японии, для светильника макетного образца конвейерной вегетационной системы были выбраны красные светодиоды L1345SRC/E (фирма Kingbright) с $\lambda = 660 \text{ нм}$ и синие светодиоды типа OPT - P470 - 60 (фирма OPTOLOCO) с $\lambda = 470 \text{ нм}$.

2. Обоснование оптимальной формы светильника для освещения конвейерного посева растений

В работах [5, 11] было показано, что цилиндрическая компоновка оранжереи с выпуклой посадочной поверхностью позволяет снижать объем, занимаемый посевом растений, и существенно увеличивать фотосинтетическую продуктивность растений на единицу потребляемой светильником электроэнергии. Поэтому источники света - панели с СД, в разрабатываемом светильнике были установлены на спиральной цилиндрической поверхности, внешней по отношению к цилиндрическому блоку корневых модулей и соосной с ним. Форма направляющей спирали цилиндрической поверхности светильника соответствовала усреднённой кривой роста зеленных растений в конвейере (рис.1). Таким образом, в такой конвейерной оранжерее верхушки растений разного возраста располагаются на одинаковых расстояниях от источников света. В условиях невесомости при включенном свете стебли растений в конвейерной оранжерее тянутся к ближайшему источнику света, ориентируясь вдоль градиента светового поля, т.е. почти перпендикулярно к цилиндрической посадочной поверхности, что и обеспечивает формирование самораздвигающегося посева при выбранной форме светильника.

Для оценки распределения света в оранжерее с цилиндрическим светильником была написана компьютерная программа, позволяющая рассчитывать световое поле в любой точке цилиндрической оранжереи с описанной конструкцией светильника при заданных характеристиках светодиодов. Расчёты показали, что при одной и той же светоотдаче светильника, плотность вертикальной составляющей светового потока, падающего на посев растений в оранжерее с цилиндрическим светильником, может достигать в 2,7 раза большего значения, чем в случае традиционной компоновки источников света и растений

на плоских параллельных поверхностях (рис.2). Степень концентрации светового потока в такой оптической системе зависит от высоты (или возраста) растений в посевах, в отличие от плоской компоновки, где интенсивность падающего на посев света почти постоянна в течение вегетации. Таким образом, большую часть вегетации листья растущих растений в самораздвигающемся посевах находятся в более выгодных световых условиях.

Разработанный для салатной космической оранжереи светильник состоит из 15 плоских панелей со светодиодами, распределенных по внутренней поверхности спирального цилиндра. Длина вегетационной камеры в спиральной цилиндрической салатной оранжерее составляет 620 мм, а длина спирали на уровне световых панелей - 1700 мм. Габариты каждой панели 80 x 595 мм. На 12 панелях смонтировано по 438 красных и 88 синих светодиода. На 3 панелях, соответствующих начальным шагам конвейера, где листовая индекс посева мал, расположено по 396 красных и 44 синих светодиода. Блок управления позволяет отдельно включать системы красных и синих светодиодов, а также регулировать для них рабочие токи в пределах от 10 до 35 мА. Суммарная освещаемая площадь посева при этом составляет 0,8 м². Измеренная на расстоянии 3 см от источников света суммарная ППФ составила 350 ± 10 мкмоль/(м²·с) при токе 25 мА на красных светодиодах и 23 мА на синих.

3. Испытание макетных образцов световых панелей

Технические испытания изготовленных световых панелей со светодиодами проводили в лабораторном помещении, изолированном от солнечного света. Световые панели работали непрерывно в течение 800 часов без заметного изменения характеристик, при потребляемой мощности 385 Вт. При этом красные светодиоды потребляли около 290 Вт., а синие - 95 Вт. Измерения ППФ проводились фотометром LI-250 (LI-COR Inc., USA). При повышении тока питания до 30 мА на красных светодиодах и 33 мА на синих суммарное значение ППФ на расстоянии 3 см от светодиодов составило 457 ± 19 мкмоль/(м²·с). Приведенные данные показывают, что разработанный светильник способен обеспечить облучение конвейерных посевов растений с ППФ в диапазоне 350-450 мкмоль/(м²·с).

Были проведены синхронные опыты по изучению роста и развития пекинской капусты при освещении посевов комбинированным светом от красных (660 нм) и синих (470 нм) светодиодов. В контрольном опыте растения освещали люминесцентными лампами белого света. В первом опыте суммарная ППФ на уровне верхних листьев в обоих вариантах составила (115 ± 5) мкмоль/(м²·сек) при соотношении мощностей красного и синего световых потоков в светодиодном светильнике 4:1; во втором опыте суммарная ППФ составила 300 ± 15 мкмоль/(м²·сек) при соотношении мощностей красного и синего световых потоков 9 : 1. В первом опыте растения выращивали на двух пористых керамических трубках длиной 36 см и диаметром 22 мм с характерным диаметром пор 4-10 мкм, в количестве 14 растений на трубку; во втором опыте растения росли на трех металлокерамических трубках длиной 58 см и диаметром 16 мм, с диаметром пор 10-15 мкм, в количестве 33 растений на трубку. Пористые трубки были обернуты слоем ионообменного волокнистого заменителя почвы БИОНА-В толщиной 0,2 см и снабжены свето-, водонепроницаемыми чехлами. Края чехлов образовывали сплошные продольные щели шириной 1-2 мм, через которые прорастали растения. Каждая трубка была соединена с резервуаром, из которого поступал питательный раствор при стабилизированном водном потенциале на уровне оси трубок на оптимальном уровне, равном -1,0 кПа. Растения в обоих опытах выращивали при непрерывном освещении, на питательном растворе Чеснокова с добавлением микроэлементов по Хогланду.

Температура и относительная влажность воздуха составили 27 ± 2 °С и $24 \pm 3\%$, в первом опыте и, соответственно, 28 ± 1 °С и $40 \pm 5\%$ - во втором. «На 30-й день экспозиции у вегетирующих растений измеряли интенсивность фотосинтеза и дыхания, а также урожай и биохимический состав листьев. Кроме того, в первом опыте, на 15-й день вегетации убирали по 4 растения с каждой трубки для оценки их устойчивости к патогенной (серая гниль) и условно патогенной (мукор) микрофлоре. Листья растений заражали чистой культурой патогена в чашках Петри, поставленных под соответствующие светильники. По истечении 7 дней оценивали суммарную площадь пораженных участков и характер развития патогена. Результаты опытов показали, что растения, выращенные под светодиодным светильником, не отличались от контрольных растений по продуктивности, а также доле съедобной биомассы в общей массе растения (табл. 1). Увеличение ППФ в 2,6 раза привело к увеличению продуктивности посевов в расчете на единицу светящей поверхности светильника в 2,1 и 2,3 раза для контрольного и опытного посевов, соответственно. В первом опыте листья опытного варианта отличались более высокой интенсивностью дыхания и брутто-фотосинтеза, однако интенсивность нетто-фотосинтеза в обоих вариантах была практически одинакова.

Биохимический анализ показал, что побеги растений, выращенных под люминесцентными лампами и светодиодами, не отличались по содержанию хлорофилла, каротина (провитамина А) и клетчатки (табл.2). Содержание нитратов в побегах в контроле и в опыте несколько превысило допустимый уровень (3 мг/г сырой массы), что указывает на необходимость коррекции состава питательного раствора.

В целом, представленные данные свидетельствуют о том, что ни урожай, ни биохимический состав биомассы растений, выращенных под светодиодным светильником, не претерпели заметных изменений по сравнению с растениями, освещаемыми люминесцентными лампами белого света, традиционно используемыми в известных КО.

**Показатели продуктивности 30-дневных растений пекинской капусты при
выращивании их под
люминесцентными лампами и светодиодами**

Показатели растений	люминесцентные лампы		светодиоды	
	115мкМоль/м ² сек	300мкМоль/м ² сек	115мкМоль/м ² сек	300мкМоль/м ² сек
Сырая съедобная масса посева, г	398	828	373	843
Удельная продуктивность, кг/м ² светящей поверхности	3,9	8,2	3,7	8,4
Доля съедобной биомассы в общей массе растений, %	98	85	98	89
Содержание сухих веществ в побегах, %	8 ± 1	6 ± 2	5 ± 1	6 ± 1

**Биохимический состав листьев 30-дневных растений пекинской капусты,
выращенных под
люминесцентными лампами и светодиодами**

Показатели растений	Источник освещения	
	люминесцентные лампы	светодиоды
Хлорофилл, мг/г сырой массы	0,66 ±0,15	0,63 ±0,12
Каротиноиды, мг/г сырой массы	0,10 + 0,02	0,10 ±0,03
Клетчатка, мг/г сырой массы	115 ±90	111 ±40
Нитраты, мг/г сырой массы	10,9 ±2,5	14,3 ± 2,7

Следует отметить, что выращивание растений под светодиодами при ППФ, равной 115 ± 5 мкМоль/(м²сек) и при соотношении мощностей красного и синего световых потоков 4:1 привело к значительному повышению устойчивости растений к патогенной и условно патогенной микрофлоре. Площадь пораженных листьев опытных растений на 7-й день после заражения была меньше по сравнению с контролем в 5 раз при заражении мукором и в 9 раз - при заражении серой гнилью. При этом на листьях растений, выращенных под светодиодным светильником, наблюдали образование некротических зон в местах заражения, препятствующих дальнейшему развитию патогена. Напротив, на листьях контрольных растений наблюдали быстрое развитие и достаточно активное спороношение патогенных грибов. Таким образом, первые опыты позволяют надеяться на благоприятное воздействие выбранных для светильника салатной оранжереи источников света на урожай и устойчивость растений к болезням.

Работа выполнена при поддержке гранта МНТЦ № 2137

ЛИТЕРАТУРА

1. Bartsev S.I., Gitelson J.I., Lisovsky G.M., Mezhevikin V.V., Okhonin V.A. Perspectives of different type biological life support systems (BLSS) usage in space missions. Acta Astronautica, V.39, No.8, pp. 617-622, 1997.
2. Мелешко Г.И., Шепелев Е.Я., Биологические системы жизнеобеспечения. (Замкнутые экологические системы). М., "Синтез", 280 с, 1994.
3. Salisbury F.B. Controlled environment life support systems (CELSS): A prerequisite for long term space studies. Fundamentals of space biology. Japan Sci. Soc. Press. Tokyo. 1990. Pp.171-183.
4. Levri Ju., Vaccari D.A., Drysdale A.E. Theory and Application of the Equivalent System Mass metric. SAE Technical Paper #2000-01-2395, 2000.
5. Berkovich Yu. A. Evaluation of planting surfaces for crop production in microgravity. Adv.Space Res. Vol.26, No.2, 2000.Pp.271-279.
6. Goins G., Ruffe L., Cranston N., Yorio N., Wheeler R., Sager J. Salad crop production under different wavelengths of red light-emitting diodes (LEDs). 2001, SAE technical paper # 2001-01-2422.
7. Goins G., Yorio N. Spinach Growth and development under innovative narrow- and broad-spectrum lighting sources. 2000, SAE technical paper # 2000-01-2290.
8. Варфоломеев Л.П. Светодиоды и их применение. Новости светотехники, вып.3, М. 1998
9. Беркович Ю.А., Корбут В.Л., Павловский В.И. Оранжереи с криволинейной посадочной поверхностью. Космическая биология и авиакосмическая медицина, 1985, № 6, стр. 77-80.
10. Goins G., Yorio N., Sanwo-Lewandowski M., Brown C. Life cycle experiments with Arabidopsis grown under red light emitting diodes (LEDs). Life Support&Biosphere Science. 1998. Vol.5, pp.143-149.

11. Johnson C, Langhans R., Albright L. et al. Spinach: Nitrate Analysis of an Advanced Life Support (ALS) Crop Cultured under ALS Candidate Artificial Light Sources. 1999. SAE technical paper # 1999-01-2107.