

$$\sigma_{rr,r} + \frac{4}{r}k^* = 0. \quad (17)$$

Когда  $r_D = r_n$ , то пористость определяется по формуле

$$\varepsilon_2 = \frac{G}{G + k^*} \varepsilon_0. \quad (18)$$

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} = -\frac{4k^*}{r}. \quad (19)$$

При  $k^* = const$  из выражения (19) получим

$$\sigma_{rr} = -4k^* \frac{dr}{r}. \quad (20)$$

Откуда после интегрирования на внутренней стенке имеем

$$\sigma_{rr} = -4k^* (\ln r_D - \ln r_b). \quad (21)$$

Выражение для напряжения на наружной стенке будет

$$\sigma_{rr} = -\sigma_R \frac{4Gr_{во}(\varepsilon_0 - \varepsilon)}{3(\varepsilon_0 - 1)}. \quad (22)$$

Из выражений (21) и (22) получим

$$\sigma_R = \frac{42k^*(\varepsilon_0 - 1)(\ln r_b - \ln r_D)}{4Gr_{во}(\varepsilon_0 - \varepsilon)}. \quad (23)$$

Учитывая выражения (3) и (23), получим значе- ние силы  $P$ , при которой будет потеряна несущая способность стенки поры

$$P = \frac{\pi R^2 k^* (\varepsilon_0 - 1) (\ln r_b - \ln r_D)}{Gr_{во} (\varepsilon_0 - \varepsilon) \cos \alpha}. \quad (24)$$

#### Заключение

Радиальное напряжение  $\sigma_r$ , определяемое форму- лой (23), является критическим для сохранения объема порового пространства, так как переход в пластическое состояние будет характеризоваться замыканием пор (в почвогрунтах будет происходить переупаковка твердых и жидких частиц). Из уравнения (24) можно определить критическую нагрузку на почву, при которой будет происходить замыкание пор, а следовательно, ухудшаться агрономические свойства почвы. Эта нагрузка может учитываться при прогнозировании давления на почву от сельскохозяйственной техники.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Новые процессы деформации металлов и сплавов/ А.П. Колинов [и др.]; под общ. ред. А.П. Колинова. – М.: Высш. шк., 1986. – С. 351.
2. Чигарев, Ю.В. Математические основы меха- ники почв/ Ю.В. Чигарев, П.Н. Синкевич. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – С. 163.

УДК 621.38

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 15.06.2011

## ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ МОЩНОСТИ И СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ РОСТА ТЕПЛИЧНЫХ КУЛЬТУР

Е.В. Галушко, канд. техн. наук, доцент, В.Л. Цвирко, аспирант, О.Ч. Ролич, канд. техн. наук, доцент (БГАТУ)

#### Аннотация

*В статье обоснована структура системы автоматического управления источниками света на основе анализа влияния мощности, спектрального состава и параметров импульсного излучения на интенсивность роста тепличных культур. Выявлены оптимальные диапазоны параметров фотосинтетически активной радиации для приемлемого роста светлюбивых растений.*

*The article justifies the structure of automatic light controlling based on the analysis of the influence of power, spectral composition and parameters of pulsed radiation on the growth rate of the green house plants. The optimal parameter ranges of photo-synthetically active radiation for the acceptable growth of luciphile plants are defined.*

#### Введение

В последнее время при досвечивании тепличных и декоративных культур в процессе их выращивания в условиях полного искусственного освещения в тепли-

цах, на селекционных станциях и фитотронах всё больше внимания уделяется вопросу светокультуры растений [1].

В естественной среде в период вегетации расте- ния редко испытывают острый недостаток солнечной

радиации, который приводил бы к их гибели. В то же время фотосинтетически активная радиация (ФАР) имеет особую значимость в условиях защищенного грунта, где из-за низкой облученности и короткой длины дня в осенне-зимние месяцы выращивание полноценных растений возможно только с применением источников искусственного света.

В связи с необходимостью расширения площадей под посадку растений в условиях защищенного грунта значительно возрастает роль и потребность в системах автоматического управления (САУ) источниками ФАР, имеющих высокую биологическую эффективность.

### Основная часть

Фотосинтез и рост – два основных процесса жизнедеятельности растений, от сбалансированности которых зависит конечный урожай [2]. Оба этих процесса находятся в тесной зависимости от времени-импульсных, спектральных и энергетических параметров света [3-5]. Известно, что в благоприятных условиях освещения и минерального питания у растений формируется листовая поверхность, фотосинтетическая деятельность которой способна полностью обеспечить ростовую функцию и репродуктивные процессы, закодированные в геноме. В неблагоприятных световых условиях у растений в процессе эволюции выработались компенсаторные механизмы, восполняющие недостаток одного параметра другим [1, 6]. Так, при низких интенсивностях света невысокий фотосинтез частично компенсируется усиленным ростом площади листьев, в то время, как при высоких интенсивностях света меньшая листовая поверхность может

компенсироваться повышенной скоростью ассимиляции двуокси углерода  $CO_2$ . В итоге улучшается количественный баланс поглощенной световой энергии, как у теневых, так и у световых растений.

Согласно основному закону фотохимии, только поглощенный свет может вызвать определенный эффект. В строго продуманных и точно поставленных экспериментах К.А. Тимирязеву впервые удалось показать, что поглощение пигментами света неравномерно по спектру, и максимум фотосинтеза (ассимиляции  $CO_2$ ), как и максимум поглощения света хлорофиллом, соответствует красному спектру света. К.А. Тимирязевым был получен спектр действия фотосинтеза (рис. 1, кривая 1), выведенный путем измерения величины ответной реакции на воздействие светом узких участков спектра одинаковой интенсивности [1, 7].

Различными исследователями в той или иной форме подтверждена универсальность кривой спектра действия фотосинтеза зеленых листьев разных видов растений, в основе которых лежит общность структурных и функциональных характеристик зеленых пигментов, обеспечивающих фотосинтез листа [1, 8].

В связи с потребностью в разработке новых многоканальных САУ источниками ФАР и с учетом наличия у растений различных фоторецепторов, обеспечивающих поглощение энергии по всей области ФАР, важно знание ответной реакции растений на облучение их тремя основными областями ФАР: синей, красной и зеленой.

При синем спектре света поверхностная плотность клеток и хлоропластов, а также количество ингибиторов роста в листьях растений значительно больше, чем при

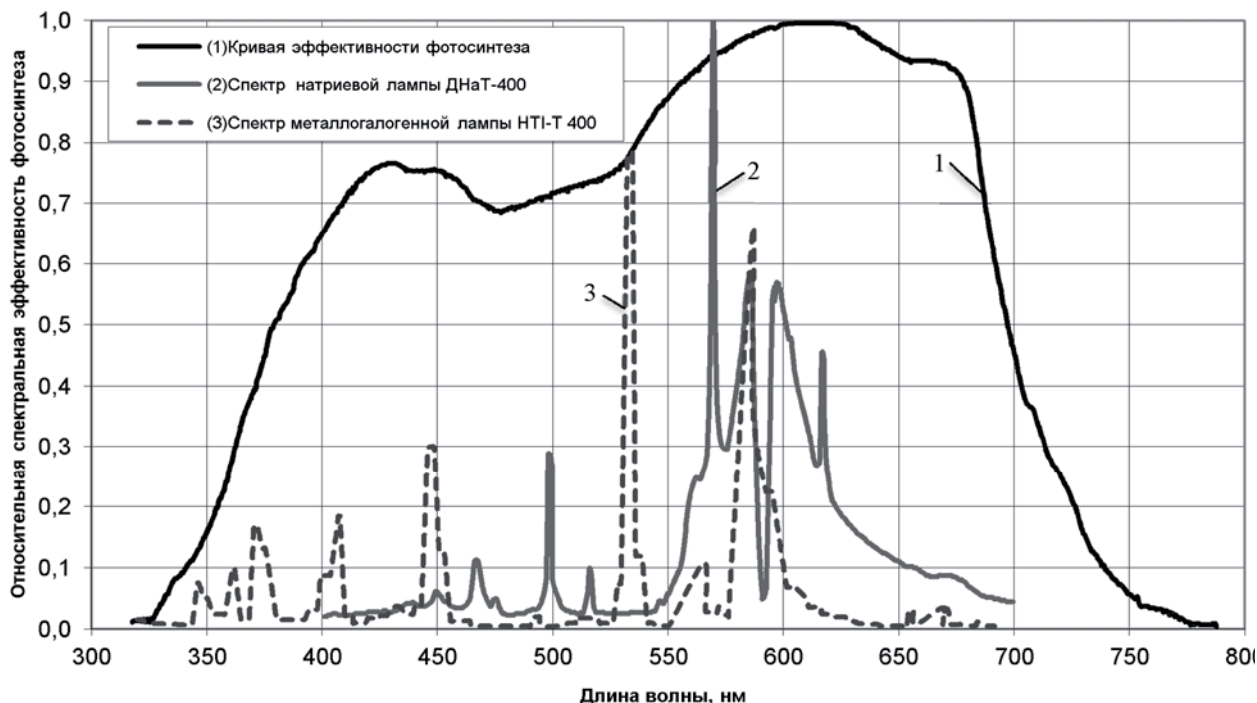


Рис. 1. Спектральные кривые:

1 – относительная спектральная эффективность фотосинтеза; 2 – излучения лампы ДНаТ-400;  
3 – излучения лампы НТИ-Т 400

красном и зеленом спектре света. В этом случае наблюдается самый высокий фотосинтез на единицу площади листа, и у растений формируются укороченные стебли и толстые листья [3]. Синий спектр света снижает рост стебля и площадь листьев, что приводит к формированию растений с низкой продуктивностью.

Красный спектр света с максимумом излучения в диапазоне 640-670 нм способствует интенсивному росту листьев и осевых органов. При этом наблюдается самый высокий ростовой эффект, дополнительно стимулированный фоторецептором красного спектра света – фитохромом [4].

В зеленой области спектра с максимумом излучения в диапазоне 520-550 нм формируются тонкие листья с меньшим числом клеток и хлоропластов, и самым низким фотосинтезом на единицу площади листа, но самым высоким фотосинтезом в расчете на хлоропласт. Растения при этом характеризуются низкой продуктивностью.

Таким образом, спектральный состав света является сильным морфогенетическим фактором, регулирующим как ростовые, так и фотосинтетические реакции в системе целого растения. При этом наиболее оптимальными являются следующие соотношения энергии по спектру ФАР в источниках света для большинства сельскохозяйственных растений: 25-30% – в синей области (380-490 нм), 20% – в зеленой (490-590 нм) и 50% – в красной области (600-700 нм) [4, 7].

На рост растений оказывает влияние и интенсивность света, причем световое насыщение процессов роста наступает при более низких уровнях облученности, чем процесса фотосинтеза [3, 4].

При освещении растений в процессе выращивания светом различной интенсивности вплоть до насыщающей – 500 Вт/м<sup>2</sup> ФАР, равной максимальной интенсивности солнечного света, по мере увеличения интенсивности света растёт скорость фотосинтеза и размер листовой поверхности (рис. 2). Экспериментально установлено, что торможение ростовых процессов светом высоких интенсивностей наблюдается как у светолюбивых, так и у тенелюбивых растений [3, 4].

Таким образом, на основании анализа зависимостей (рис. 2), можно выделить следующие диапазоны интенсивностей:

- низкую интенсивность ФАР (минимально допустимая) – диапазон интенсивностей, при котором рост вегетативных органов происходит, но не образуются полноценные генеративные органы. При этом фотосинтез имеет низкие показатели. Светолюбивым растениям соответствуют интенсивности в диапазоне 15-30 Вт/м<sup>2</sup> (0,02-0,04 кал/(см<sup>2</sup>·мин));

- оптимальную интенсивность ФАР – диапазон интенсивностей, при котором наблюдается максимальное накопление биомассы в единицу времени. Фотосинтез и рост хорошо сбалансированы. Для светолюбивых растений – это диапазон ФАР – 150-220 Вт/м<sup>2</sup> (0,21-0,32 кал/(см<sup>2</sup>·мин));

- насыщающую интенсивность ФАР – максимальная интенсивность света, при которой достигается выход фотосинтеза на плато светового насыщения, то есть на максимальный фотосинтез (400 Вт/м<sup>2</sup>

(0,57 кал/(см<sup>2</sup>·мин)) и более). При этом наблюдается торможение роста стебля и других осевых органов. Растения приобретают низкорослую форму.

Процесс фотосинтеза определяется не только особенностями структуры и функциями пигментного аппарата, но и темновыми реакциями в растении.

Фотосинтез зеленых растений протекает в две стадии: первая из них объединяет световые реакции, идущие только под действием света, вторая – темновые реакции, которые могут происходить как в темноте, так и на свету. Упрощенно процесс протекания этих реакций представлен схемой на рис. 3. В световых реакциях энергия света поглощается хлорофиллом и другими пигментами фотосинтезирующих клеток и запасается в химической форме аденилтрифосфата (АТФ) и в виде восстановленного никотинамидадениндинуклеотидфосфата (НАДФН). Одновременно выделяется кислород. В темновых реакциях вещества, образовавшиеся в световой стадии, используются для восстановления двуокиси углерода СО<sub>2</sub> до глюкозы и других органических продуктов.

Скорости темновых реакций, в которых происходит восстановление СО<sub>2</sub> до глюкозы, регулируются время-импульсными, спектральными и энергетическими параметрами света. Поэтому, для поддержания требуемого развития растений в условиях защищенного грунта, возможно проводить импульсное облучение.

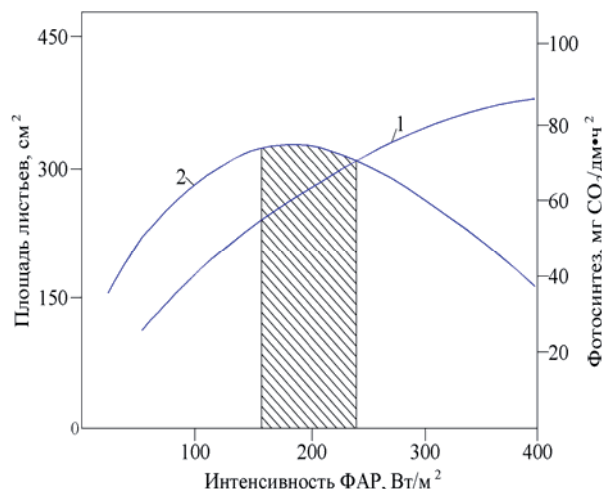


Рис. 2. Зависимость фотосинтеза (1) и роста площади листьев (2) от интенсивности света у растений редиса: заштрихованная область – диапазон интенсивностей, наиболее благоприятных для светолюбивых растений

На основании исследований Б.В. Коржа, установлено, что наиболее приемлемым для большинства растений является импульсный режим со световой длительностью 0,5...0,6 с и с темновой длительностью 1,0 с. При этом наиболее эффективно растения используют световую энергию при комбинированном облучении, заключающемся в чередовании тридцати

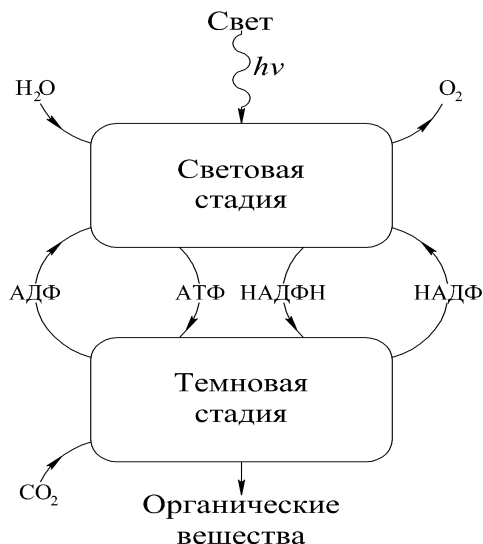


Рис. 3. Упрощенная схема световой и темновой стадий фотосинтеза:

АДФ – аденозиндифосфат; НАДФН – окисленная форма никотинамидадениндинуклеотидфосфата

секундного импульсного облучения с пятнадцати секундным непрерывным [5].

Современные распространенные оптические излучатели – аграрная лампа ДНаТ-400 и металлгалогенная НТИ-Т 400 фирмы «Philips», используемые в САУ ростом тепличных культур, не позволяют обеспечивать требуемых время-импульсных, спектральных и энергетических параметров света. Так, лампа ДНаТ-400 с линейчатый спектром, представленным кривой 2 на рис. 1, дает излучение в желто-оранжевой области спектра с максимумом 594 и 600 нм. Похожая ситуация наблюдается и у металлгалогенной лампы НТИ-Т 400 со спектральной кривой 3 на рис. 1. Кроме этого, люминесцентные лампы тяжелы в управлении интенсивностью их излучения и вообще не позволяют обеспечить импульсное облучение с длительностью в 500-600 мс, необходимое как для формирования темновой стадии роста растений, так и для энергосбережения.

### Заключение

На основании вышеизложенного, можно сделать следующий вывод:

1. Наиболее оптимальным для светолюбивых растений является ФАР с интенсивностью 150-220 Вт/м<sup>2</sup> (0,21-0,32 кал/(см<sup>2</sup>·мин)), с соотношением энергии по спектру – 30% в области 380-490 нм, 20% – в области 490-590 нм и 50% – в области 600-700 нм, с комбинированным облучением, заключающимся в чередовании тридцати секундного импульсного облучения (со световой длительностью 500-600 мс и с темновой длительностью 1,0 с) с пятнадцати секундным непрерывным излучением.

2. Применяя существующие мощные, с высоким коэффициентом полезного действия и относительно недорогие люминесцентные источники света, для достижения оптимальных параметров облучения

тепличных культур спектр люминесцентных ламп необходимо дополнить (досветить) в синей области в диапазоне 400-450 нм и в красном спектральном диапазоне – 660-680 нм.

3. САУ источниками ФАР должна не только оптимизировать их интенсивность в условиях естественного солнечного или искусственного люминесцентного освещения, но и восполнять и корректировать его спектральный состав с учетом комбинированного импульсного режима облучения.

Следовательно, САУ должна иметь три контура управления: спектром, интенсивностью и время-импульсными параметрами облучения. Эта задача решается применением светодиодных источников с гибким управлением по интенсивности и малой постоянной времени включения или отключения в совокупности с современной элементной базой, позволяющей создать распределенную многоканальную систему стабилизации интенсивности излучения источников света на основе комбинации принципов широтно-импульсного управления со стабилизацией интенсивности излучения в импульсе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Тихомиров, А.А. Светокультура растений: биологические и биотехнические основы : учеб. пособ. / А.А. Тихомиров, В.П. Шарупич, Г.М. Лисовский. – Новосибирск: СО РАН, 2000. – 213 с.
2. Нишпорович, А. А. Фотосинтетическая деятельность растений и пути повышения их продуктивности. Теоретические основы фотосинтетической продуктивности / А. А. Нишпорович. – М.: Наука, 1972. – 511 с.
3. Протасова, Н. Н. Фотосинтез и рост высших растений, их взаимосвязь и корреляции. Физиология фотосинтеза / Н. Н. Протасова, В. И. Кефели. – М.: Наука, 1982. – 251 с.
4. Фотосинтетическая активность, рост и уровень природных регуляторов у растений, выращенных на свету различной интенсивности. Теоретические основы фотосинтетической продуктивности / Н. Н. Протасова [и др.]. – М.: Наука, 1972. – 385 с.
5. Корж, В.Б. Использование коротких серий импульсного освещения для изучения процессов фотосинтеза дыхания зеленых растений на свету : автореф. дис. ... канд. биологич. наук : 03.00.12 / В.Б. Корж ; Всесоюз. ордена Ленина и ордена Дружбы народов науч.-исслед. ин-т растениеводства им. Н.И. Вавилова. – Ленинград, 1976. – 25 с.
6. Куперман, И. А. Физиологические механизмы адаптации и устойчивости растений / И. А. Куперман. – Новосибирск: Наука, 1972. – 175 с.
7. Воскресенская, Н.П. Фотосинтез и спектральный состав света / Н.П. Воскресенская. – М.: Наука, 1965. – 312 с.
8. Базов, Д.И. Спектр действия фотосинтеза фотосистемы I / Д.И. Базов, Г.А. Санадзе // Материалы межфакультетской конф. Тбил. ун-та по естественным наукам: химия, биология, география, геология, Тбилиси, май 1984. – С. 153 – 165.