

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ФОТОСИНТЕЗА В ОБЪЕКТАХ ОБЛУЧЕНИЯ**

© 2019 С.А. Шиков, С.Н. Ивлиев

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

Статья поступила в редакцию 09.11.2018

Статья посвящена разработке математической модели эффективности облучательных установок, которая позволит оптимизировать затраты электроэнергии на досвечивание растений в теплицах, без экономических потерь. В ходе написания статьи были проанализированы работы ряда учёных, ведущих исследования в области изучения хлорофилла, фотосинтеза и процессов, происходящих в зелёном листе растения. На их основе была создана схематичная структура работы фотосинтезирующего аппарата растений, и составлены кинетические дифференциальные уравнения, описывающие структуру и функционирование фотосинтезирующего хлорофиллового аппарата зелёных растений. В результате работы были получены математические выражения, описывающие изменение концентраций основных веществ, участвующих в образовании структуры фотосинтезирующего аппарата и накоплении продуктов фотосинтеза. Решив эти уравнения совместно, будут получены характеристики фотосинтезирующих объектов в динамическом режиме. Полученная система является первоначальной математической моделью, описывающей процессы утилизации лучистой энергии в зелёном листе и настройку фотосинтезирующего аппарата. Её оптимальное решение будет использовано при экспериментальном определении режима облучения, позволяющего максимально использовать лучистую энергию при искусственном досвечивании растений в теплицах.

Ключевые слова: моделирование, облучательная установка, растения, хлорофилл, математическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка математической модели эффективности облучательных установок позволит оптимизировать режимы облучения для выращивания растений в условиях защищённого грунта. Это поможет экономить электроэнергию и повысить урожайность выращиваемых культур.

Основной задачей является нахождение оптимального распределения лучистой энергии во времени с целью получения максимального интегрального фотосинтеза.

Объект облучения – зелёный лист, чрезвычайно сложный живой организм, приспособившиеся к изменению факторов окружающей среды, в частности к различным уровням облучения. Каждый элемент листа может тем или иным способом вступать во взаимодействие с лучистой энергией. В оптическом отношении он может характеризоваться, как и другие физические тела коэффициентами пропускания и поглощения в соответствии с законами оптики и фотометрии. Биохимические реакции, проходящие в растении, их скорость определяются

Шиков Станислав Александрович, аспирант, преподаватель кафедры информационной безопасности и сервиса. E-mail: stenlav@mail.ru

Ивлиев Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационной безопасности и сервиса. E-mail: ivliev_sn@mail.ru

наличием субстратов, концентрацией исходных веществ и температурой.

Но лист в отличие от физических тел неживой природы представляет собой самонастраивающуюся систему, мера реакции которой зависит от величины лучистого воздействия, наличия ингибирующих факторов. Как известно, при изменении величины облученности меняется концентрация хлорофилла и площадь хлоропластов, т.е. характеристики, определяющие оптические параметры листовой пластинки. Одновременно ряд экспериментов указывает на наличие корреляции между интенсивностью фотосинтеза и концентрацией хлорофилла [6, 12-17]. Ряд авторов, занимающихся подобной тематикой, например, Белова А.Ю., Гурьянова Ю.В. Лысенко В.С. В их работах присутствуют собственные методы и модели облучения выращиваемых растений. Но они имеют ряд недостатков. Например, в работе Беловой А.Ю., не учитывается важный момент, что характеристики фотосинтезирующего аппарата меняются в зависимости от условий облучения. Но фотосинтез не является линейной функцией количества хлорофилла, более того, имеются сведения, указывающие на его зависимость от структурной организации светособирающего аппарата растений.

В настоящее время за элементарный фотосинтезирующий орган при моделировании фотосинтезирующей функции растений приня-

та фотосинтетическая единица (ФСЕ), которая представляет собой структуру, состоящую из нескольких молекул-сборщиков и центра утилизации энергии возбуждения, называемого реакционным центром (РЦ) [1-3,5,7,8].

Целью исследований является разработка математической модели эффективности облучательных установок, которая позволит оптимизировать затраты электроэнергии на досвечивание растений, без потери качества.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Были изучены работы В.Л. Калера, а также статьи следующих авторов: Фатеев В.И., Лабинков В.В., Чиков В.И., Белова А.Ю., Мокронос А.Т., Furbank R.T., Lichtenthaler H.K., Omasa K., Buschmann C. Используя работы вышеупомянутых авторов, на их основе была схематично изображена работа фотосинтезирующего аппарата растений, которая представлена в виде схемы (рисунок 1).

Количество образовавшегося хлорофилла a , связанного с ферментным комплексом и выполняющего функции РЦ (согласно приведенной схеме), зависит от концентрации протохлорофиллида и величины облученности. За счёт темновой реакции связанный хлорофилл- a переходит в свободный и образует конгломерат молекул-сборщиков. Их концентрация определяется интенсивностью облучения и количеством свободного кислорода в тканях листа, т.к.

в среде кислорода на свету происходит распад хлорофилла. Основным источником кислорода на свету является фотосинтез. Таким образом, необходимо учесть наличие отрицательной обратной связи между синтезом хлорофилла и фотосинтезом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Формализация процессов фотосинтеза позволила составить систему кинетических дифференциальных уравнений, описывающих структуру и функционирование фотосинтезирующего хлорофиллового аппарата зеленых растений.

Основываясь на схеме процессов функционирования хлорофиллового аппарата изображённой на рисунке 1, составим следующую систему уравнений.

Количество протохлорофиллида и скорость его накопления в листовой пластинке согласно схеме (рисунок 1) определяется алгебраической суммой двух составляющих: накопления продукта и синтеза на его основе связанного с биологической мембраной ферментного комплекса хлорофилла- a . Для описания подобных биохимических реакций удобнее пользоваться кинетическими дифференциальными уравнениями вида:

$$\frac{dA}{dt} = aB, \quad (1)$$

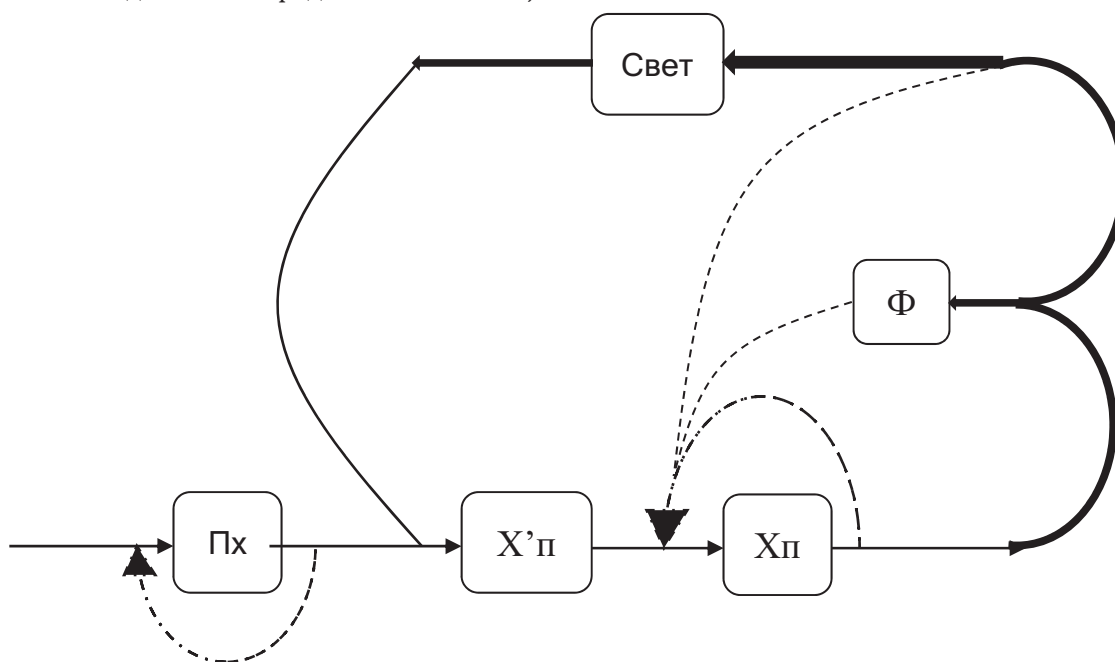


Рис. 1. Схема процессов функционирования хлорофиллового аппарата:

- Пх – протохлорофиллид;
- X'п – хлорофилл, связанный с биологической мембраной;
- Xп – свободный хлорофилл;
- Ф – фотосинтез;
- положительная связь;
- отрицательная связь

где A – концентрация некоторого вещества;
 a – константа скорости синтеза вещества A ;
 B – концентрация субстрата A .

На основании приведённой формулы количество образовавшегося протохлорофиллида можно рассчитать:

$$\frac{dP_1}{dt} = C_1 L, \quad (2)$$

где P_1 – концентрация образующегося протохлорофиллида, мг/г.сух.веса;

C_1 – константа скорости синтеза протохлорофиллида, c^{-1} .

В качестве субстрата в (2), учитывая, что синтез протохлорофиллида это темновой процесс, выбрана величина:

$$L = const Y - P, \quad (3)$$

где P – концентрация протохлорофиллида, мг/г.сух.веса.

Константа $const Y$ в выражении определяет максимально допустимую концентрацию протохлорофиллида, при которой происходит остановка всех процессов биосинтеза этого вещества. Как показано в работах по исследованию хлорофилла [6, 13], максимальное значение $const Y = 40$.

Скорость синтеза хлорофилла, связанного с биологической мембраной a , под действием света [4] можно описать дифференциальным уравнением:

$$\frac{dP_2}{dt} = C_2 n P, \quad (4)$$

где P_2 – концентрация синтезированного хлорофилла, связанного с биологической мембраной, мг/г.сух.веса.

n – облученность, Вт/м²;

C_2 – константа скорости, $c^{-1} \text{Вт}^{-1} \text{м}^2$.

Алгебраически суммируя (3) с (5) с учётом (4), получено дифференциальное уравнение, описывающее баланс протохлорофиллида в зелёном листе.

$$\frac{dP}{dt} = C_1(40 - P) - C_2 n P, \quad (5)$$

Полученная формула представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение, т.к. облученность в общем случае зависит от времени.

На свету протохлорофиллид переходит в связанный с биологической мембраной хлорофилла a , выполняющий функцию РЦ. В свою очередь, связанный хлорофилл за счёт темновой реакции переходит в свободный. Следовательно, баланс РЦ можно описать следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dR}{dt} = C_2 n P - C_3 R, \quad (6)$$

где R – концентрация реакционных центров в зелёной листовой пластинке, мг/г.сух.веса.

C_3 – константа скорости темновой реакции перехода хлорофилла a в свободное состояние, c^{-1} ;

Процесс фотоокисления хлорофилла определяется облучённостью и концентрацией свободного кислорода в полости листа. Одновременно в ряде работ указывается, что этот процесс происходит только в том случае, если размер ФСЕ превышает некоторое допустимое значение. Так, В.И. Фатеевым было предложено выражение, связывающее облучённость с величиной эффективной площади ФСЕ [10]

$$\frac{R}{S_{\phi} t_{\tau} H n} = \frac{1}{h \vartheta}, \quad (7)$$

где S_{ϕ} – эффективная площадь молекулы хлорофилла, $S_{\phi} = 10^{-18} \text{м}^2$;

t_{τ} – «темновое» время, т.е. время нахождения РЦ в окисленном состоянии, $t_{\tau} = 10 \div 5 \text{ с}$ [10];

H – концентрация хлорофилла, мг/г.сух.веса;

h – постоянная Планка, $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$;

ϑ – частота кванта монохроматического излучения с минимальной энергией активации молекулы хлорофилла, $\vartheta = 0,39 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$.

После преобразования (7) получено выражение для интервала облучённости, в котором не происходит фотоокисление свободного хлорофилла

$$n \geq \frac{R h \vartheta}{S_{\phi} t_{\tau} H}. \quad (8)$$

Вместе с тем, скорость фотоокисления пропорциональна интенсивности фотосинтеза – основного источника свободного кислорода в зелёном растении на свету. Таким образом, учитывая (6) и (8), получено дифференциальное уравнение, описывающее концентрацию свободного хлорофилла в листовой пластинке.

$$\frac{dH}{dt} = C_3 R - C_4 F \left(n - \frac{R h \vartheta}{S_{\phi} t_{\tau} H} \right) H, \quad (9)$$

где C_4 – константа скорости фотоокисления хлорофилла, $\text{м}^2 \text{мг}[\text{CO}_2]^{-1} \text{Вт}^{-1} \text{с}^{-1}$;

F – интенсивность фотосинтеза, $\text{мг}[\text{CO}_2]/\text{м}^2$;

Следует учесть, что фотоокисление имеет место только при невыполнении неравенства (8) и выражение (9) содержит ряд общезначимых констант. Поэтому (9) можно представить:

$$\frac{dH}{dt} = C_3 R - C_4 F H P', \quad (10)$$

где

$$P' = n - \frac{R}{H} C_7, \quad (11)$$

при этом $C_7 = 3,27 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$. В общем виде (11) примет вид:

$$P' = \begin{cases} n - \frac{R}{H} C_7, & n > \frac{R}{H} C_7; \\ 0, & n \leq \frac{R}{H} C_7; \end{cases} \quad (12)$$

Процесс накопления продуктов фотосинтеза зависит от величины облученности, размера ФСЕ и количества реакционных центров, перерабатывающих лучистую энергию. В том случае, если размер ФСЕ оптимален, т.е. неравенство (8) превращается в равенство, то скорость накопления продуктов фотосинтеза пропорциональна количеству хлорофилла. Если (8) выполняется, то хлорофилл является лимитирующим фактором, а, следовательно, скорость фотосинтеза опять пропорциональна количеству хлорофилла. Избыточный хлорофилл быстро под действием света окисляется [4] и при описании процесса может не учитываться.

Таким образом, кинетическое дифференциальное уравнение, описывающее баланс продуктов фотосинтеза примет вид:

$$\frac{dF_1}{dt} = C_5 H n, \quad (13)$$

где F_1 – интенсивность фотосинтеза, в работе определяется по величине газообмена, $\text{мг}[\text{CO}_2]/\text{м}^2$; C_5 – константа скорости фотосинтеза, $(\text{мг}[\text{CO}_2]/\text{мг/г.сух.веса})^{-1}\text{Вт}^{-1}\text{с}^{-1}$.

Как известно, в зелёном листе растения существует отрицательная обратная связь по продуктам фотосинтеза [9], тогда с учётом (13) окончательно получено:

$$\frac{dF}{dt} = C_5 H n - C_6 F, \quad (14)$$

где C_6 – константа скорости ингибирования фотосинтеза собственными продуктами, с^{-1} .

Таким образом, выражение (14) позволяет рассчитать баланс продуктов фотосинтеза в зелёном листе.

В итоге получено математические выражения, описывающие изменение концентраций основных веществ, участвующих в образовании структуры фотосинтезирующего аппарата и накоплении продуктов фотосинтеза. Целью усовершенствования математической модели является достижение максимальных значений фотосинтеза при экономически обоснованном уровне облученности. Решая эти уравнения совместно, получены характеристики фотосинтезирующих объектов в динамическом режиме. Уравнения (5),(6),(10) и (14) представляют из себя систему для лимитирующих величин облученностей, что часто имеет место в практике овощеводства защищённого грунта.

$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} = C_1(40 - P) - C_2 n P; \\ \frac{dR}{dt} = C_2 n P - C_3 R; \\ \frac{dH}{dt} = C_3 R - C_4 F H \left(n - \frac{R}{H} 3,27 - 10^4 \right) \\ \frac{dF}{dt} = C_5 H n - C_6 F. \end{cases}$$

Система уравнений представляет собой динамическую модель некоторой управляемой системы. Она может быть решена при условии максимального фотосинтеза. В случае, если управляющим параметром в ней будет оптическое излучение, будут получены исходные данные для проектирования установки искусственного облучения растений, которая позволит сократить расход электрической энергии, не снижая качества выращиваемых растений.

ВЫВОДЫ

Полученная система является первоначальной математической моделью, описывающей процессы утилизации лучистой энергии в зелёном листе и настройку фотосинтезирующего аппарата. Её оптимальное решение будет использовано при экспериментальном определении режима облучения, позволяющего максимально использовать лучистую энергию при искусственном досвечивании растений в теплицах.

Дальнейшей работой является определение неизвестных функций системы уравнений при условии оптимального распределения лучистой энергии во времени. Следует отметить, что данная модель требует дальнейших уточнений как по точности определения констант, входящих в уравнение, так и по воспроизводимости результатов на основе лабораторных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белова А.Ю. Влияние пигментов в листьях растений на формирование и свойства плодов /А.Ю. Белова, С.В. Мурашев, В.Г. Вержук // Процессы и аппараты пищевых производств. – 2012.– № 1. – С. 13.
2. Валяев Д.Б., Малышев В.В. Технично-экономическое обоснование применения светодиодных светильников в теплицах // Инновации в сельском хозяйстве. – 2013. – № 3 (1). – С. 55–57.
3. Григорай Е.Е., Далькэ И.В., Табаленкова Г.Н., Головки Т.К. Световой режим и продуктивность тепличной культуры огурца при использовании дополнительных источников освещения в междурядьях // Гавриш. – 2012. № 3. – С. 10–13.
4. Гурьянова Ю.В. Формирование площади листьев и содержание хлорофилла в листьях при минеральном питании / Ю.В. Гурьянова, В.В. Рязанова // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2012. – № 4. – С. 30–31.
5. Каримов, И.И. Оптимизация расхода электроэнергии на освещение теплиц на основе светодиодных технологий / Яковлев С.М., Каримов И.И. // Материалы международной научно-практической конференции в рамках XXII международной специализированной выставки Агорокомплекс-2012 «Инновационному развитию агропромышленного комплекса – научное обеспечение» Уфа: Башкирский ГАУ, 2012г. Часть II. – С.20-22.
6. Каримов, И.И. Повышение эффективности облу-

- чения растений в условиях закрытого грунта / Каримов И.И., Яковлев С.М. // Материалы LIII международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» Челябинск: Челябинская ГАА 2014г. – С. 20-26
7. Каримов, И.И. Оптимизация управления ростом растений в теплице с использованием светодиодной системы облучения и концепции биологического времени / Каримов И.И., Яковлев С.М. // Материалы международной научно-практической конференции в рамках XXIV международной специализированной выставки Агорокомплекс-2014 «Перспективы инновационного развития АПК» Уфа: Башкирский ГАУ. 2014г. – С. 241-245.
 8. Каримов, И.И. Повышение энергоэффективности облучения растений при использовании светодиодных светильников / Галиуллин Р.Р., Каримов И.И. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергообеспечения предприятий» Уфа: Башкирский ГАУ, 2015г. – С.39-43
 9. Кондратьева Н.П. Повышение эффективности электрооблучения растений в защищенном грунте: дисс. ... доктр. техн. наук: 05.20.02 / Кондратьева Надежда Петровна. – Москва, 2003. – 365с.
 10. Лысенко В.С. Функциональные особенности фотосинтетической системы нормальных и хлорофилл-дефицитных секторов пестролистных растений *Ficus benjamina* L. / В.С. Лысенко, В.Г. Сойер, Д.В. Зимаков // Вестник южного научного центра РАН. 2010. Том 6, № 2. С. 38–44
 11. Мокроносов А.Т. Фотосинтез. Физиолого-экологические и биохимические аспекты. /А.Т.Мокроносов, В.Ф. Гавриленко, Т.В. Жигалова // Под ред. И.П.Ермакова. – М.: Академия, 2006. – 436 с.
 12. Овчукова С.А. Повышение эффективности оптического излучения в сельскохозяйственном производстве / С.А. Овчукова, О.Ю. Коваленко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2006.– № 4. – С. 18-20.
 13. Чиков В.И. Эволюция представлений о связи фотосинтеза с продуктивностью растений / В.И. Чиков // Физиология растений. – 2008. –Т. 55. № 1. – С. 140-154.
 14. Юферев, Л.Ю. Эффективность использования искусственного освещения растений / А.В. Соколов, Л.Ю. Юферев // Труды ГОСНИТИ. – М.: ГОСНИТИ, 2013. – Т. 111. № 1. – С. 163-165.
 15. Buschmann C. Variability and application of the chlorophyll fluorescence emission ratio red/far-red of leaves // Photosynthesis Research. 2007. Vol. 92. P. 261–271.
 16. Furbank R.T., Taylor W.C. Regulation of Photosynthesis in C3 and C4 Plants: A Molecular Approach // The Plant Cell. 1995. Vol. 7. P. 797–807.
 17. Lichtenthaler H.K., Babani K. Light Adaptation and Senescence of the Photosynthetic Apparatus. Changes in Pigment Composition, Chlorophyll Fluorescence Parameters and Photosynthetic Activity // In: Papageorgiou G., Govindjee A. (eds). Chlorophyll fluorescence: a signature of photosynthesis. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2008. P. 713–736.
 18. Lichtenthaler H.K., Babani K., Langsdorf G. Chlorophyll fluorescence imaging of photosynthetic activity in sun and shade leaves of trees // Photosynthesis Research. 2007. Vol. 93. P. 235–244.
 19. Lichtenthaler K. Chlorophyll and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // Methods in Enzymology. 1987. Vol. 148. P. 351–382.
 20. Omasa K., Takayama K. Simultaneous measurement of stomatal conductance, non-photochemical quenching, and photochemical yield of photosystem ii in intact leaves by thermal and chlorophyll fluorescence imaging // Plant and Cell Physiology. 2003. Vol. 44 (12). P. 1290–1300.

REFERENCES

1. Belova A.Yu. Influence of pigments in plant leaves on the formation and properties of fruits. Belova, S.V. Murashev, V.G. Verzhuk // Processes and Apparatuses of Food Production. - 2012.- No. 1. - P. 13.
2. Valyaev D.B., Malyshev V.V. Feasibility Study of the Application of LED Lightings in Greenhouses // Innovations in Agriculture. - 2013. - No. 3 (1). - P. 55-57.
3. Grigori E.E., Dalke I.V., Tabalenkova G.N., Golovko T.K. Light regime and productivity of a greenhouse cucumber culture using additional sources of illumination in the aisles // Gavrish. - 2012. № 3. - P. 10-13.
4. Guryanova, Yu.V. Formation of leaf area and chlorophyll content in leaves with mineral nutrition / Yu.V. Guryanova, V.V. Ryazanov // Bulletin of Michurin State Agrarian University. - 2012. - № 4. - P. 30-31.
5. Karimov, I.I. Optimization of electricity consumption for lighting greenhouses based on LED technology / Yakovlev SM, Karimov II // Materials of the international scientific and practical conference within the framework of the XXII international specialized exhibition Agrocoplex-2012 «Innovative development of the agro-industrial complex - scientific provision» Ufa: Bashkir State University, 2012. Part II. - P.20-22.
6. Karimov, I.I. Increasing the efficiency of plant irradiation in conditions of enclosed soil / Karimov II, Yakovlev SM // Materials of the LIII International Scientific and Technical Conference «Science Achievements - Agro-Industrial Production» Chelyabinsk: Chelyabinskaya GAA 2014. - P.20-26
7. Karimov, I.I. Optimization of Plant Growth Management in a Greenhouse Using the LED System of Irradiation and the Biological Time Concept / Karimov II, Yakovlev SM // Materials of the International Scientific and Practical Conference within the framework of the XXIV International Specialized Exhibition Agorokompleks-2014 «Perspectives of innovative development of the agro-industrial complex» Ufa: Bashkir State University. 2014g. - P. 241-245.
8. Karimov, I.I. Increase in energy efficiency of irradiation of plants using LED light fixtures / Galiullin RR, Karimov II // Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Actual problems of energy supply of enterprises» Ufa: Bashkir State Automobile Plant, 2015. - P.39-43
9. Kondratieva, N.P. Increase of efficiency of electric irradiation of plants in protected soil: diss. ... of

- those. Sciences: 05.20.02 / Kondratieva Nadezhda Petrovna. - Moscow, 2003. - 365s.
10. *Lysenko, V.S.* Functional features of the photosynthetic system of normal and chlorophyll-deficient sectors of variegated plants *Ficus benjamina* L. / V.S. Lysenko, V.G. Sawyer, D.V. Zimakov // Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2010. Volume 6, No. 2. P. 38-44
 11. *Mokronosov, A.T.* Photosynthesis. Physiological, ecological and biochemical aspects. / A.T. Mokronosov, V.F. Gavrilenko, T.V. Zhigalov, Ed. I.P. Ermakova. - Moscow: Academy, 2006. - 436 p.
 12. *Ovchukova S.A.* Increasing the efficiency of optical radiation in agricultural production. Ovchukova, O.Yu. Kovalenko // Mechanization and electrification of agriculture. - 2006.- No. 4. - P. 18-20.
 13. *Chikov V.I.* Evolution of ideas about the connection of photosynthesis with plant productivity / V.I. Chikov // Physiology of Plants. - 2008. -Т. 55. № 1. - P. 140-154.
 14. *Yuferev, L.Yu.* Efficiency of using artificial lighting of plants / A.V. Sokolov, L.Yu. Yuferev // Proceedings of GOSNITI. - Moscow: GOSNITI, 2013. - Vol. 111. No. 1. - P. 163-165. Buschmann C. Variability and application of the chlorophyll fluorescence emission ratio red / far-red of leaves // Photosynthesis Research. 2007. Vol. 92. Pp. 261-271.
 15. *Furbank R.T., Taylor W.C.* Regulation of Photosynthesis in C3 and C4 Plants: A Molecular Approach // The Plant Cell. 1995. Vol. 7. Pp. 797-807.
 16. *Lichtenthaler H.K., Babani K.* Light Adaptation and Senescence of the Photosynthetic Apparatus. Changes in Pigment Composition, Chlorophyll Fluorescence Parameters and Photosynthetic Activity // In: Papageorgiou G., Govindjee A. (eds). Chlorophyll fluorescence: a signature of photosynthesis. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2008. Pp. 713-736.
 17. *Lichtenthaler H.K., Babani K., Langsdorf G.* Chlorophyll fluorescence imaging of photosynthetic activity in the sun and shade leaves of trees // Photosynthesis Research. 2007. Vol. 93. P. 235-244.
 18. *Lichtenthaler K.* Chlorophyll and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembrans // Methods in Enzymology. 1987. Vol. 148. Pp. 351-382.
 19. *Omasa, K. and Takayama, K.* Simultaneous measurement of stomatal conductance, non-photochemical quenching, and photochemical yields of photosystems in intact leaves by thermal and chlorophyll fluorescence imaging, Plant and Cell Physiology. 2003. Vol. 44 (12). Pp. 1290-1300.

MATHEMATICAL MODELING OF EFFECTIVENESS OF IRRIGATION INSTALLATIONS

© 2019 S.A. Shikov, S.N. Ivliev

National Research Ogarev Mordovia State University

The article is devoted to the development of a mathematical model for the efficiency of irradiation plants, which will allow to optimize the energy costs for plant reforestation in greenhouses, without economic losses. During the writing of the article, the work of a number of scientists conducting research in the field of studying chlorophyll, photosynthesis and processes occurring in the green leaf of the plant was analyzed. On their basis, a schematic structure of the photosynthetic apparatus of plants was created, and kinetic differential equations describing the structure and functioning of the photosynthetic chlorophyll apparatus of green plants were compiled. As a result of the work, mathematical expressions were obtained that describe the change in the concentrations of the basic substances involved in the formation of the photosynthetic apparatus and the accumulation of photosynthetic products. Solving these equations together, the characteristics of photosynthesizing objects in a dynamic mode will be obtained. The resulting system is the initial mathematical model describing the processes of utilization of radiant energy in the green leaf and the adjustment of the photosynthetic apparatus. Its optimal solution will be used in the experimental determination of the irradiation regime, which makes it possible to make maximum use of radiant energy by artificially planting plants in greenhouses.

Keywords: modeling, irradiation plant, plants, chlorophyll, mathematical model.

Stanislav Shikov, Post-Graduate Student, Lecturer of Information Security and Service Department.

E-mail: stenlav@mail.ru

Sergey Ivliev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information Security and Service. E-mail: ivliev_sn@mail.ru