

УДК 62:535.8:634

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ МЕДЛЕННОЙ
ИНДУКЦИИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРОФИЛЛА
И ОПТИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЛИСТЬЕВ РАСТЕНИЙ
ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗОНДИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Ольга Николаевна Будаговская

доктор технических наук, в.н.с.

Федеральный Научный Центр имени И.В.Мичурина,
Мичуринский государственный аграрный университет

budagovsky@mail.ru

г. Мичуринск, Россия

Аннотация. Определены линейные диапазоны ватт-амперных характеристик светодиодов, используемых в комбинированном приборе при измерении фотосинтетической активности и относительного содержания хлорофилла. Изучена зависимость параметров медленной индукции флуоресценции интактных листьев растений от интенсивности зондирующего излучения. Выявлены оптимальные значения плотности мощности излучателя синей области спектра, предназначенного для оценки параметров медленной индукции флуоресценции. Оптимальная интенсивность источника, используемого в конструкции комбинированного прибора для возбуждения флуоресценции, составляет 850 ± 60 Вт/м².

Ключевые слова: интенсивность излучения, ватт-амперная характеристика излучателей, медленная индукция флуоресценции хлорофилла, листья растений.

В работах [1, 2] было проведено теоретическое обоснование спектрального состава и интенсивности излучателей комбинированной оптико-электронной аппаратуры для диагностики функционального состояния растений, объединяющей оценку фотосинтетической активности и относительного содержания хлорофилла за один измерительный цикл. Для его реализации необходимо провести экспериментальную оптимизацию интенсивности излучателей, входящих в состав оптико-электронной схемы прибора, что является целью данной статьи.

В качестве источников зондирующего излучения обосновано использование малогабаритных светодиодов (СИД) синей (470 нм) и красной (630-650 нм) области спектра с изменяемой мощностью излучения с помощью тока питания. Для этого необходимо знать ватт-амперную характеристику излучателей, которую определяли с помощью испытательного стенда, включающего стабилизированный блок питания 1, переменное сопротивление 2, мультиметр 3 для измерения тока инжекции СИД, колодку для установки СИД 4, линейный фотоприемник 5 с регистратором показаний 6 (рис.1).

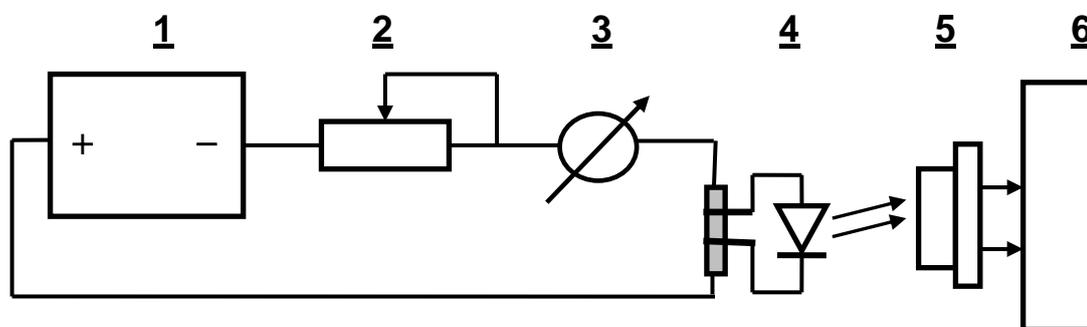


Рисунок 1 – Схема стенда для проведения экспериментов по определению линейной зоны ватт-амперных характеристик и калибровочных уравнений зависимости выходной мощности от тока питания излучателей

Для обеспечения максимального светосбора, использовали фотоприемник с большой фоточувствительной площадкой (не менее 1 см^2) и минимизировали его удаленность от излучателя. На этапе определения линейной зоны ватт-амперной характеристики в качестве линейного фотоприемника использовали фотодиод ФД-24К, подключенный в фотогальваническом режиме к мультиметру, а на этапе калибровки выходной мощности излучателя от тока

питания СИД - измеритель мощности оптического излучения ОРНІR (Израиль).

Выбор линейной зоны ватт-амперной характеристики производили с помощью программы Excel. Для этого на полученных графиках зависимости показаний линейного фотоприемника от тока питания СИД добавляли линию тренда с линейной аппроксимацией и определяли участки с максимальной линейностью по R^2 (табл.1).

Таблица 1

Оценка линейности ватт-амперной характеристики при различных диапазонах рабочих токов излучателей

Тип излучателя	Рабочие диапазоны тока питания, мА	Уравнение аппроксимации	R^2
Красный, 640 нм	0...30	$Y=55,042X$	0,9968
	0,6...21	$Y=5,497X - 11,753$	0,9992
Синий, 470 нм	0...26	$Y=13,349X$	0,8785
	0,9...25,9	$Y=10,573X + 48,577$	0,9721
	4...18	$Y=5,56266X + 91,975$	0,9864
	8...25	$Y=7,9953X + 978,478$	0,9947

В результате были выявлены оптимальные диапазоны рабочих токов питания излучателей с максимальной линейностью уравнения связи отклика фотоприемника (Y), регистрирующего выходной поток излучателей от тока инжекции (X) светодиодных излучателей. На заключительном этапе провели калибровку излучателей внутри оптимальных рабочих диапазонов ватт-амперных характеристик СИД с использованием универсального измерителя мощности оптического излучения ОРНІR (табл.2).

Таблица 2

Зависимость выходной мощности излучателей (P, мВт) от тока питания СИД (I_n , мА) внутри оптимального диапазона рабочих токов.

Тип излучателя	Оптимальный диапазон тока, мА (выходной мощности, мВт)	Уравнение калибровки	Достоверность калибровочного уравнения
Красный, 640 нм	0,6...21 мА (0,0385...1,62 мВт)	$P=0,077 I_n$	0,999
Синий, 470 нм	8...25 мА (1,76...5,5 мВт)	$P=0,2202 I_n$	0,995

Следующий этап экспериментальных исследований заключался в определении оптимальной интенсивности зондирующего потока, возбуждающего флуоресценцию с тем, чтобы обеспечить минимальную длительность регистрации фотосинтетической активности без потери информативности. Для измерений использовали листовые пластинки различных видов растений с высоким уровнем фотосинтетической активности Y не менее 0,75 усл.ед. Оценивали амплитуду и скорость тушения флуоресценции при различной интенсивности возбуждения и длительности засветки. Эксперименты проводили на растениях яблони (*Malus domestica*), смородины черной (*Rubus nigrum L.*), цисуса ромболистного (*Cissus quadrangularis.*) на высечках или целых листьях. Для измерений использовали средние зоны листьев, между крупными жилками. Отделенные листья или высечки помещали в чашки Петри на увлажненную фильтровальную бумагу. Перед каждым измерением проводили 15 минутную темновую адаптацию объекта при освещенности менее 40 лк. Флуоресценцию возбуждали синим светодиодом (465 ± 12 нм), площадь освещаемого участка составляла $6,4$ мм². Плотность мощности излучения задавали в диапазоне от 100 до 2400 Вт/м². Регистрировали относительную амплитуду и скорость тушения флуоресценции в ходе индукции флуоресценции $((F_m - F_t)/F_m)$ и V_t соответственно). Длительность засветки варьировали от 15 до 600 секунд. На графиках представлены типичные кривые.

Установлено, что кинетика флуоресцентного сигнала существенно зависит от интенсивности возбуждающего света (рис. 2). Графики МИФХ имеют стандартный характер быстроспадающих кривых по логарифмическому закону с постепенным выходом на плато. С увеличением интенсивности зондирующего света увеличиваются абсолютные значения интенсивности флуоресценции и амплитуда ее спада, обусловленная эффектом Каутского [3, 4].

Изменения показателей МИФХ от времени и интенсивности засветки имеют нелинейный характер. При небольших интенсивностях (100...200 Вт/м²) к 60 - 90 секунде засветки они достигают максимального значения и далее от времени практически не изменяются. С увеличением интенсивности зондирующего потока процесс фотоконверсии сигнала ускоряется, но не пропорционально увеличению интенсивности, что может быть связано с процессами светового насыщения фотосинтезирующего аппарата.

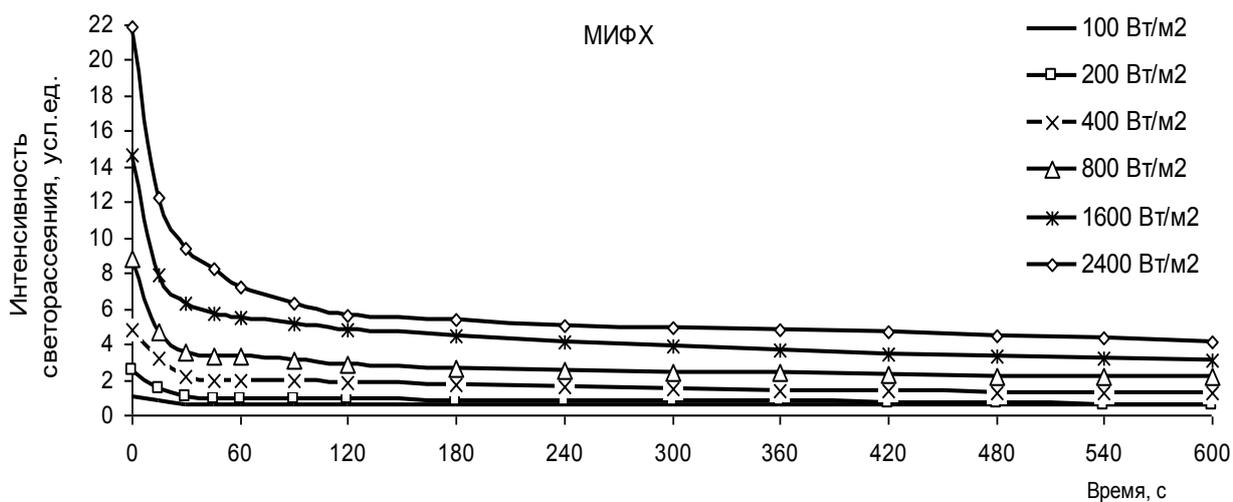


Рисунок 2 - Типовые кинетики светорассеяния листьев с высокой функциональной активностью ($F_v/F_m > 0,6$) в процессе длительной засветки интенсивным монохроматическим излучением синей области спектра (470 нм).

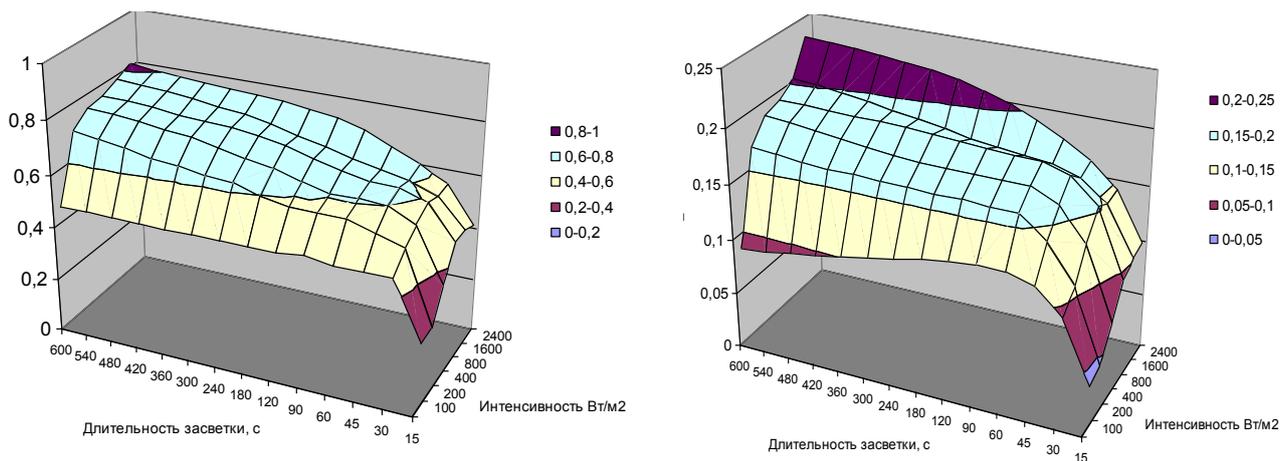


Рисунок 3 - Зависимость амплитуды относительного тушения ($F_m - F_t$)/ F_m (левый график) и скорости тушения флуоресценции V_t (правый график) от интенсивности и длительности засветки, возбуждающей флуоресценцию.

Выявлено, что оптимальная плотность мощности зондирующего излучения составляет $850 \pm 60 \text{ Вт/м}^2$, так как в этом случае допустимо сокращение длительности регистрации параметров медленной индукции флуоресценции хлорофилла (МИФХ) до 45-90 секунд вместо типовых 300-360 секунд. Увеличение интенсивности засветки выше заданного уровня не дает существенных преимуществ, а при плотности мощности более 1200 Вт/м^2 приводит к необратимым процессам фотодеструктивного повреждения фотосинтезирующего аппарата, особенно при низких значениях фотосинтетической активности (данные не представлены).

Заключение

Определены линейные диапазоны ватт-амперных характеристик светодиодов, используемых в комбинированном приборе при измерении фотосинтетической активности и относительного содержания хлорофилла. Изучена зависимость параметров медленной индукции флуоресценции интактных листьев растений от интенсивности зондирующего излучения. Выявлены оптимальные значения плотности мощности излучателя синей области спектра, предназначенного для оценки параметров медленной индукции флуоресценции. Оптимальная интенсивность источника, используемого в конструкции комбинированного прибора для возбуждения флуоресценции, составляет $850 \pm 60 \text{ Вт/м}^2$.

Список литературы:

1. Будаговская О.Н. Экспериментальная оптимизация спектрального состава излучателей комбинированного оптического прибора для оценки функционального состояния листьев растений по критериям удельной фотосинтетической активности и относительному содержанию хлорофилла// Наука и Образование. 2022. №2.
2. Будаговская О.Н. Теоретический расчет интенсивностей зондирующих потоков комбинированного оптического прибора для оценки функционального состояния листьев растений по критериям удельной фотосинтетической

активности и относительному содержанию хлорофилла// Наука и Образование. 2022. №3

3. Kautsky H., Franck U. Chlorophyllfluoreszenz und Kohlensäureassimilation // Biochemische Zeitschrift. 1943. Z. 315. S.139-232.

4. Веселовский В.А., Веселова Т.В. Люминесценция растений. Теоретические и прикладные аспекты. М.: Наука. 1990. 200 с.

UDC 62:535.8:634

**INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF THE PARAMETERS
OF THE SLOW INDUCTION OF CHLOROPHYLL FLUORESCENCE
AND OPTICAL PERMEABILITY OF PLANT LEAVES ON THE
INTENSITY OF THE PROBING RADIATION**

Olga N. Budagovskaya

doctor of technical Sciences, leading researcher Engineering Center

Federal research Center named after I. V. Michurin

Michurinsk State Agrarian University

budagovsky@mail.ru

Michurinsk, Russia

Annotation. Linear ranges of watt-ampere characteristics of LEDs used in a combined device for measuring photosynthetic activity and relative chlorophyll content have been determined. The dependence of the parameters of the slow induction of fluorescence of intact plant leaves on the intensity of probing radiation has been studied. The optimal values of the power density of the emitter of the blue region of the spectrum, designed to evaluate the parameters of slow induction of fluorescence, are revealed. The optimal intensity of the source used in the design of the combined device for fluorescence excitation is $850 \pm 60 \text{ W/m}^2$.

Keywords: radiation intensity, watt-ampere characteristic of emitters, slow induction of chlorophyll fluorescence, plant leaves.

Статья поступила в редакцию 16.02.2023; одобрена после рецензирования 20.03.2022; принята к публикации 30.03.2023.

The article was submitted 16.02.2023; approved after reviewing 20.03.2022; accepted for publication 30.03.2023.