

*На правах рукописи*



**Абделхамид Махмуд Абделхамид Абделтаваб**

**ОПТИЧЕСКИЙ СПОСОБ И УСТРОЙСТВО  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ ЗРЕЛОСТИ ТОМАТОВ**

Специальность 05.20.02 – «Электротехнологии и  
электрооборудование в сельском хозяйстве»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Мичуринск – наукоград РФ

2022

Работа выполнена на кафедре «Автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева).

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Судник Юрий Александрович**

**Официальные оппоненты:** **Башилов Алексей Михайлович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», кафедра «Теоретическая электротехника», профессор

**Кондратьева Надежда Петровна**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия», кафедра «Автоматизированный электропривод», профессор

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

Защита диссертации состоится 29 июня 2022 года в 14-00 на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.179.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» по адресу: 393760, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101, корпус 1, зал заседаний диссертационных советов, тел./факс (47545) 3-88-13, доб. 3-82, E-mail: [dissov@mgau.ru](mailto:dissov@mgau.ru).

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет» и на сайте [www.mgau.ru](http://www.mgau.ru), с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации [www.vak.ed.gov.ru](http://www.vak.ed.gov.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, с указанием индекса, почтового адреса, телефона, электронной почты и сайта организации, фамилии, имени, отчества лица, подготовившего отзыв, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

Михеев Николай Владимирович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследований.** Среди распространенных овощных культур томату принадлежит первое место в мире по площадям (более 4,7 млн. га) и второе место по объемам потребления. Россия занимает 12-е место (2,9 млн. т), а Египет - 5-е место (6,62 млн. т) по валовому сбору томатов в мире.

Зрелость томатов – базовый показатель, связанный с оценкой их качества. Поэтому достоверный и оперативный контроль степени зрелости томатов является актуальной и практически значимой задачей сегодняшнего дня. В настоящее время известные методы такого контроля основаны на измерении цвета томатов. Таким методам присущи недостатки, низкая оперативность, сложность и дороговизна оборудования для контроля степени зрелости томатов.

В данном исследовании предложен способ такого контроля, исключающий недостатки существующих методов и основанный на измерении интенсивности быстрой флуоресценции хлорофилла томатов в зависимости от их степени зрелости.

**Цель исследования** - разработка оптического способа и устройства для контроля степени зрелости томатов.

### **Задачи исследования:**

1. Анализ существующих методов и средств для контроля степени зрелости томатов.
2. Разработка математических моделей интенсивностей быстрой флуоресценции хлорофилла томатов в зависимости от их степени зрелости.
3. Разработка устройства для контроля степени зрелости томатов по их интенсивности быстрой флуоресценции хлорофилла.
4. Проведение экспериментальных исследований разработанного устройства.
5. Оценка технико-экономической эффективности устройства для контроля степени зрелости томатов.

### **Научная новизна работы:**

- разработка новых математических моделей интенсивности быстрой флуоресценции хлорофилла томатов в зависимости от их степени зрелости;
- разработка нового устройства для контроля степени зрелости томатов.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Предложены способ и математические модели для оценки степени зрелости томатов по интенсивности их быстрой флуоресценции хлорофилла. Такие модели могут быть использованы для анализа физиологических состояний и контроля качества, степени зрелости плодов различных сельскохозяйственных культур. Перспективы настоящей работы заключаются в том, что результаты исследования могут быть применены в НИИ сельскохозяйственного профиля, фермерских хозяйствах и учебных заведениях.

**Методология и методы исследования.** В работе использованы графо – аналитические и математические методы статистики, планирования эксперимента, а также дифференциальный, дисперсионный и регрессионный анализы.

### **На защиту выносятся:**

- математические модели интенсивностей быстрой флуоресценции хлорофилла томатов в зависимости от их степени зрелости;
- устройство для контроля степени зрелости томатов;
- результаты экспериментальных исследований и технико-экономическая эффективность применения такого устройства.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты исследований внедрены в отделе технологий и инновационных проектов Федерального исследовательского центра картофеля имени А.Г. Лорха, селекционной станции имени Н.Н. Тимофеева, а также в учебном процессе кафедры электрооборудования и электротехнических систем ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный заочный университет».

**Научная апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на: международной научной

конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию А.В. Леонтовича (Сборник статей. / М. – Издательство РГАУ-МСХА, г. Москва, 2019 г.); международной научно- практической конференции «Наука без границ и языковых барьеров» ( Орловский ГАУ, 2019 г.); международной научной конференции, посвященной 125-летию со дня рождения В.С. Немчинова, (Сборник статей. Выпуск 292 Часть I / М. – Издательство РГАУ – МСХА, 2020 г.); IV национальной научно-практической конференции (Кузбасская ГСХА. – Кемерово, 2020 г.); международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 160-летию В.А. Михельсона (Сборник статей. Том 1/ М. – Издательство РГАУ-МСХА, 2020 г.).

**Публикации.** По материалам исследований опубликовано 12 научных работ, в том числе 4 статьи в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в Scopus и 6 статей по материалам докладов на международных конференциях.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 93 наименований. Объем диссертации – 99 страниц, содержит 20 таблиц и 32 рисунка.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, дана общая характеристика работы, изложены цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость результатов исследований, основные положения, выносимые на защиту.

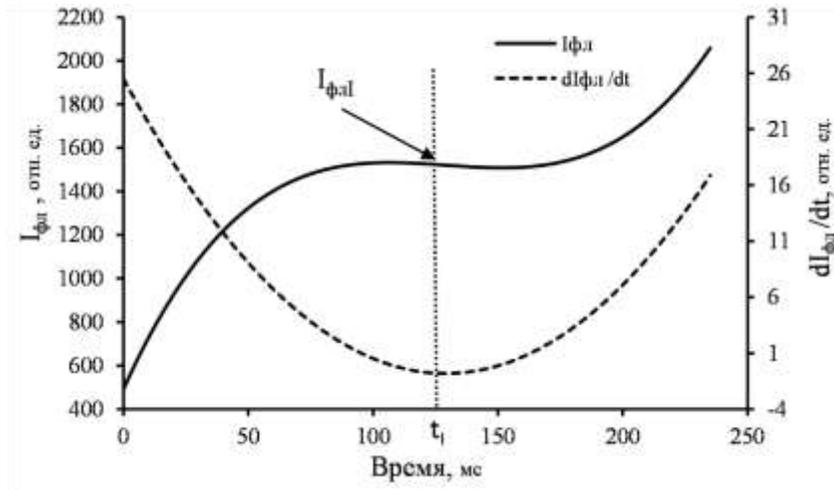
**В первой главе** «Обзор существующих методов и средств для контроля степени зрелости томатов» приведен анализ известных способов и устройств для неразрушающего контроля, используемых для оценки степени зрелости плодов томатов. В настоящее время наиболее широко используется на практике метод цветовой оценки зрелости томатов. Известны также отдельные исследования по контролю зрелости томатов с использованием явления медленной индукции хлорофилла.

Известным методам присущи низкая оперативность контроля, сложность

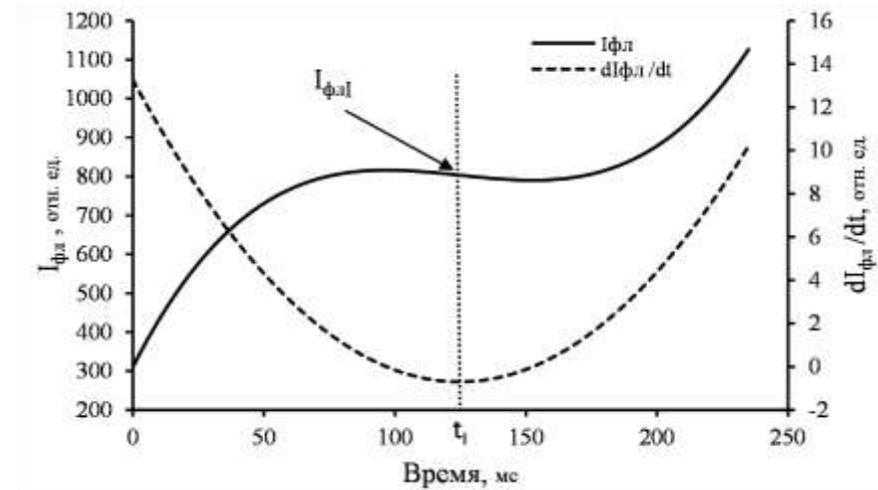
и дороговизна оборудования. В работе предложен способ оценки степени зрелости томатов, основанный на контроле интенсивности (коррелирующей со зрелостью томатов) быстрой флуоресценции хлорофилла томатов. Такой способ исключает недостатки существующих методов и средств контроля степени зрелости томатов.

**Вторая глава** посвящена разработке математических моделей быстрой флуоресценции хлорофилла томатов. Такие модели были получены на основе результатов экспериментальных исследований, в которых были определены табличные данные (точечные значения) и построены соответствующие им кривые (рисунок 1) зависимостей интенсивности флуоресценции хлорофилла ( $I_{\text{фл}}$ ) и их первых производных ( $dI_{\text{фл}}/dt$ ) во времени для сорта томатов «Алькасара» и их четырёх степеней зрелости (зелёных, бурых, розовых и красных). Из рисунка видно, что интенсивность флуоресценции хлорофилла начинает увеличиваться с течением времени до момента  $t_l$ , соответствующего значению  $I_{\text{фл}}$ , после которого тренд кривой начинает незначительно уменьшаться с последующим увеличением. В этом временном интервале первая производная  $dI_{\text{фл}}/dt$  кривой флуоресценции хлорофилла начинает изменяться от ее максимального до минимального значения времени  $t_l$ , соответствующему моменту перегиба кривой интенсивности  $I_{\text{фл}}$  флуоресценции хлорофилла. Этот момент соответствует первому минимуму времени  $t_l$  на кривой первой производной исходной кривой флуоресценции хлорофилла. Из рисунка 1 видно, что первая точка  $I_{\text{фл}}$  перегиба кривой интенсивности флуоресценции хлорофилла определяет ориентировочное время  $t_l = 126$  мс (что будет соответствовать средней частоте контроля, равной 7,9 Гц) для разных степеней зрелости томатов (рисунок 1а, 1б, 1в). Для красных же томатов (рисунок 1г) такая зависимость стационарная и незначительно (по амплитуде) изменяется во времени.

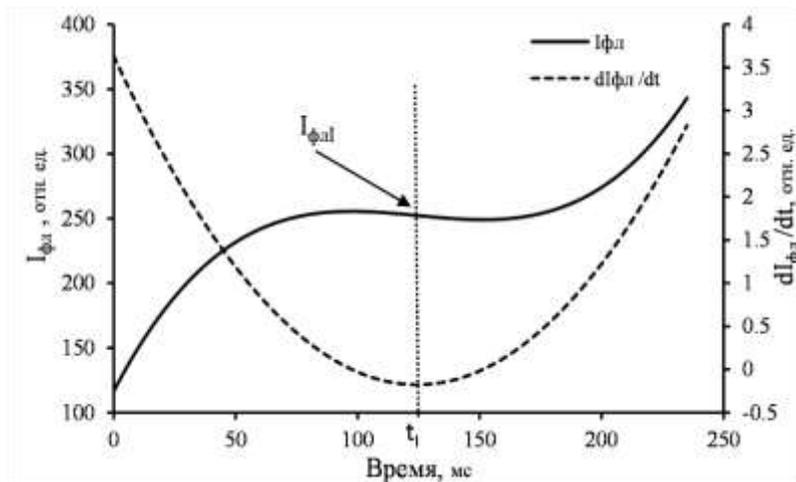
Контроль изменения во времени интенсивности быстрой флуоресценции хлорофилла томатов был проведен с использованием высокоточного флуориметра (модель ХЕ-РАМ, Heinz Walz, Германия). Для нахождения



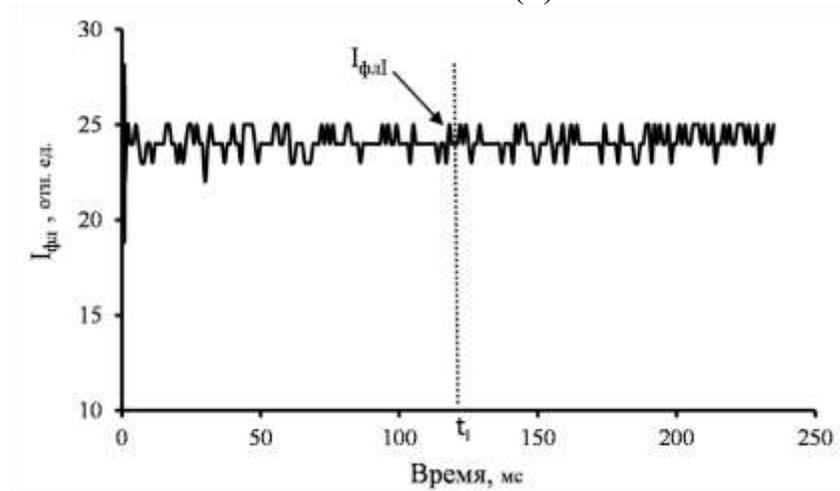
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 1– Кривые зависимостей интенсивности флуоресценции хлорофилла ( $I_{\phi л}$ ) и их первых производных ( $dI_{\phi л}/dt$ ) для томатов сорта «Алькасара»: а) степень зрелости – «зелёная»; б) степень зрелости- «бурая»; в) степень зрелости- «Розовая»; г) степень зрелости- «красная».

аналитических выражений графических зависимостей, полученных в результате проведенных экспериментальных исследований, был применен регрессионный анализ с использованием полиномиальных уравнений и математической компьютерной программы «Mathematica v.12». Для оценки порядка полиномов при определении аналитических выражений (регрессионных уравнений), соответствующих полученным графическим зависимостям (кривым изменения интенсивностей флуоресценции хлорофилла во времени) с использованием критерия Фишера (при уровне его значимости 95%) были определены полиномиальные уравнения третьей степени:

$$I_{фл} = a_3 t^3 - a_2 t^2 + a_1 t + c, \text{ при } 0 \leq t < 250 \text{ мс.}$$

где  $I_{фл}$  - интенсивность флуоресценции хлорофилла, отн. ед.;  $t$  - время, мс;  $a_1, a_2, a_3, c$  - постоянные коэффициенты. Время  $t_I$  в первой точке перегиба кривой интенсивности флуоресценции хлорофилла (минимальное время оперативного контроля степени зрелости томатов) было рассчитано (таблица 1) путем вычисления ее второй производной (при этом,  $d^2 I_{фл} / dt^2 = 0$ ).

Виды уравнений кривых  $I_{фл} = f(t)$  (их математические модели) сорта томата «Алькасара» для разных степеней его зрелости приведены в таблице 1.

Таблица 1. Уравнения математических моделей сорта томата «Алькасара» для разных степеней его зрелости.

Сорт томатов	Степень зрелости	Уравнения математических моделей
Алькасара	зелёная	$I_{фл} = 0,000525 t^3 - 0,2033 t^2 + 25,45 t + 494$
		$dI_{фл}/dt = 0,001574 t^2 - 0,4066 t + 25,45$
		$d^2 I_{фл} / dt^2 = 0,003149 t - 0,4066 (t_I = 129 \text{ мс})$
	бурая	$I_{фл} = 0,000299 t^3 - 0,1119 t^2 + 13,26 t + 309$
		$dI_{фл} / dt = 0,000897 t^2 - 0,2237 t + 13,26$
		$d^2 I_{фл} / dt^2 = 0,001793 t - 0,2237 (t_I = 124 \text{ мс})$
	розовая	$I_{фл} = 0,000082 t^3 - 0,0306 t^2 + 3,64 t + 116$
		$dI_{фл} / dt = 0,000246 t^2 - 0,0613 t + 3,64$
		$d^2 I_{фл} / dt^2 = 0,000492 t - 0,0613 (t_I = 124 \text{ мс})$
	красная	$I_{фл1k} = 24 \pm 5$

Таким образом, уравнение в общем виде математической модели для сорта томатов «Алькасара» будет иметь вид (при этом,  $t_{Icp} = 126$  мс):

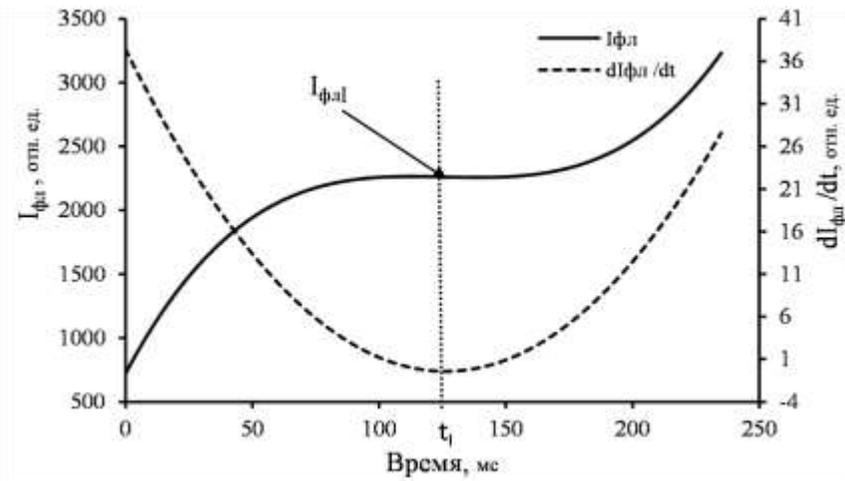
$$I_{\phi л 1} = a_3 t^3 - a_2 t^2 + a_1 t + c,$$

где,  $a_3 = 0,000525$ ;  $a_2 = 0,2033$ ;  $a_1 = 25,45$ ;  $c = 494$  (степень зрелости- зелёная);  $a_3 = 0,000299$ ;  $a_2 = 0,1119$ ;  $a_1 = 13,26$ ;  $c = 309$  (степень зрелости- бурая);  $a_3 = 0,000082$ ;  $a_2 = 0,0306$ ;  $a_1 = 3,64$ ;  $c = 116$  (степень зрелости- розовая);  $I_{\phi л 1k} = 24 \pm 5$  (степень зрелости- красная). По аналогии разработаны математические модели для сортов томатов «Лезгинка» и «Розанчик». На рисунке 2 приведены кривые зависимостей флуоресценции хлорофилла ( $I_{\phi л}$ ) и их первых производных ( $dI_{\phi л}/dt$ ) от времени для сорта «Лезгинка».

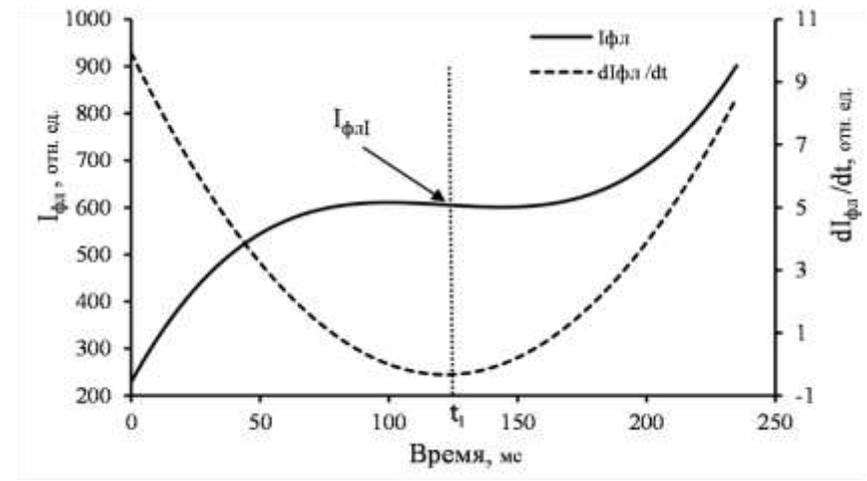
Виды уравнений кривых  $I_{\phi л 2} = f(t)$  (их математические модели) сорта томата «Лезгинка» для разных степеней его зрелости приведены в таблице 2.

Таблица 2. Уравнения математических моделей сорта томата «Лезгинка» для разных степеней его зрелости.

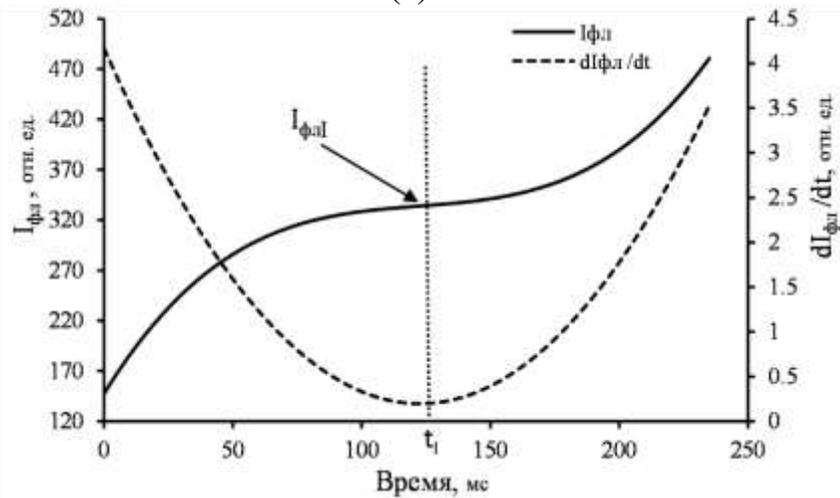
Сорт томатов	Степень зрелости	Уравнения математических моделей
Лезгинка	зелёная	$I_{\phi л} = 0,000790 t^3 - 0,2994 t^2 + 37,40 t + 721$
		$dI_{\phi л}/dt = 0,002370 t^2 - 0,5989 t + 37,40$
		$d^2I_{\phi л}/dt^2 = 0,004741 t - 0,5989 (t_I = 126 \text{ мс})$
	бурая	$I_{\phi л} = 0,000230 t^3 - 0,0842 t^2 + 9,92 t + 229$
		$dI_{\phi л}/dt = 0,000691 t^2 - 0,1684 t + 9,92$
		$d^2I_{\phi л}/dt^2 = 0,001381 t - 0,1684 (t_I = 122 \text{ мс})$
	розовая	$I_{\phi л} = 0,000088 t^3 - 0,032369 t^2 + 4,16 t + 147$
		$dI_{\phi л}/dt = 0,000264 t^2 - 0,0647 t + 4,16$
		$d^2I_{\phi л}/dt^2 = 0,000528 t - 0,0647 (t_I = 122 \text{ мс})$
	красная	$I_{\phi л 2k} = 55 \pm 5$



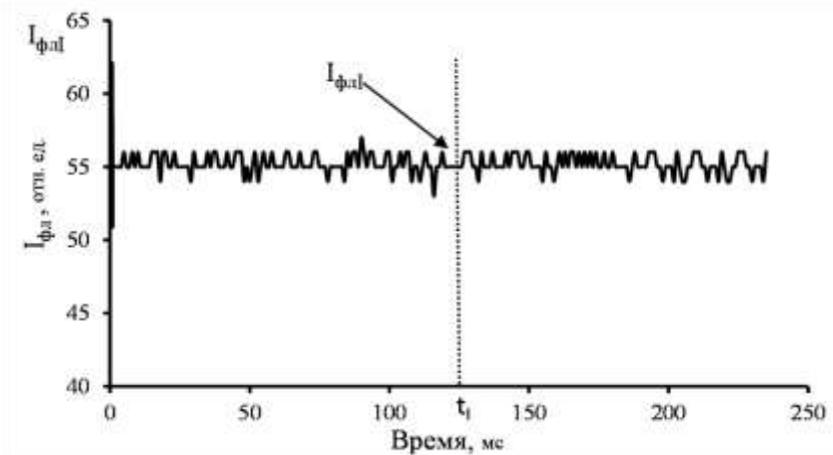
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 2 – Кривые зависимостей интенсивности флуоресценции хлорофилла ( $I_{\phi л}$ ) и их первых производных ( $dI_{\phi л}/dt$ ) для сорта «Лезгинка»: а) степень зрелости – «зелёная»; б) степень зрелости- «бурая»; в) степень зрелости- «Розовая»; г) степень зрелости- «красная».

Уравнение в общем виде математической модели для сорта томатов «Лезгинка» будет иметь вид (при этом,  $t_{Icp} = 123$  мс):  $I_{\phi л 2} = a_3 t^3 - a_2 t^2 + a_1 t + c$ ,  
 где,  $a_3 = 0,000790$ ;  $a_2 = 0,2994$ ;  $a_1 = 37,40$ ;  $c = 721$  (степень зрелости- зелёная),  $a_3 = 0,000230$ ;  $a_2 = 0,0842$ ;  $a_1 = 9,92$ ;  $c = 229$  (степень зрелости- бурая),  $a_3 = 0,000088$ ;  $a_2 = 0,032369$ ;  $a_1 = 4,16$ ;  $c = 147$  (степень зрелости- розовая),  $I_{\phi л 2k} = 55 \pm 5$  (степень зрелости- красная).

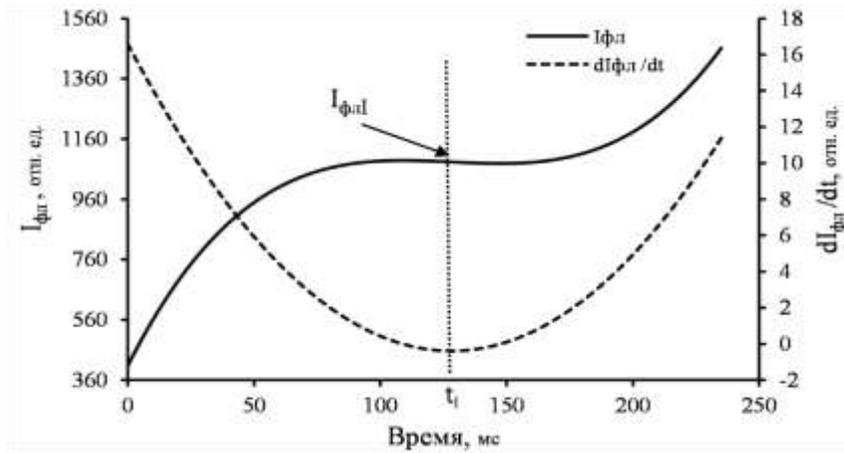
На рисунке 3 приведены кривые зависимостей флуоресценции хлорофилла ( $I_{\phi л}$ ) и их первых производных ( $dI_{\phi л} / dt$ ) от времени для сорта «Розанчик».

Виды уравнений кривых  $I_{\phi л 3} = f(t)$  (их математические модели) сорта «Розанчик» для разных степеней его зрелости приведены в таблице 3.

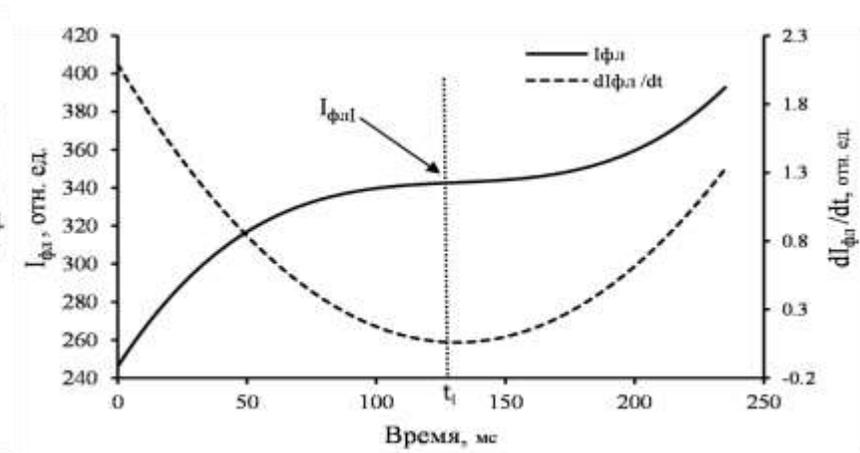
Таблица 3. Уравнения математических моделей сорта «Розанчик» для разных степеней его зрелости.

Сорт томатов	Степень зрелости	Уравнения математических моделей
Розанчик	зелёная	$I_{\phi л} = 0,000344 t^3 - 0,1322 t^2 + 16,56 t + 409$
		$dI_{\phi л} / dt = 0,001032 t^2 - 0,2645 t + 16,56$
		$d^2 I_{\phi л} / dt^2 = 0,002063 t - 0,2645 (t_I = 128 \text{ мс})$
	бурая	$I_{\phi л} = 0,000039 t^3 - 0,0154 t^2 + 2,09 t + 246$
		$dI_{\phi л} / dt = 0,000118 t^2 - 0,0309 t + 2,09$
		$d^2 I_{\phi л} / dt^2 = 0,000235 t - 0,0309 (t_I = 131 \text{ мс})$
	розовая	$I_{\phi л} = 0,000055 t^3 - 0,0232 t^2 + 3,32 t + 111$
		$dI_{\phi л} / dt = 0,000167 t^2 - 0,0464 t + 3,32$
		$d^2 I_{\phi л} / dt^2 = 0,000333 t - 0,0464 (t_I = 139 \text{ мс})$
	красная	$I_{\phi л 3k} = 33 \pm 5$

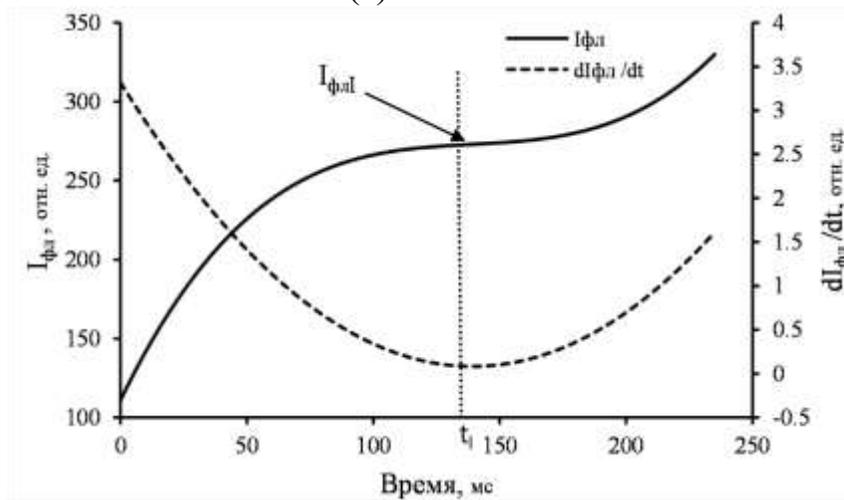
Уравнение в общем виде математической модели для сорта томатов «Розанчик» будет иметь вид (при этом,  $t_{Icp} = 129$  мс):  $I_{\phi л 3} = a_3 t^3 - a_2 t^2 + a_1 t + c$ ,  
 где,  $a_3 = 0,000344$ ;  $a_2 = 0,1322$ ;  $a_1 = 16,56$ ;  $c = 409$  (степень зрелости- зелёная),  $a_3 = 0,000039$ ;  $a_2 = 0,0154$ ;  $a_1 = 2,09$ ;  $c = 246$  (степень зрелости- бурая),  $a_3 = 0,000055$ ;  $a_2 = 0,0232$ ;  $a_1 = 3,32$ ;



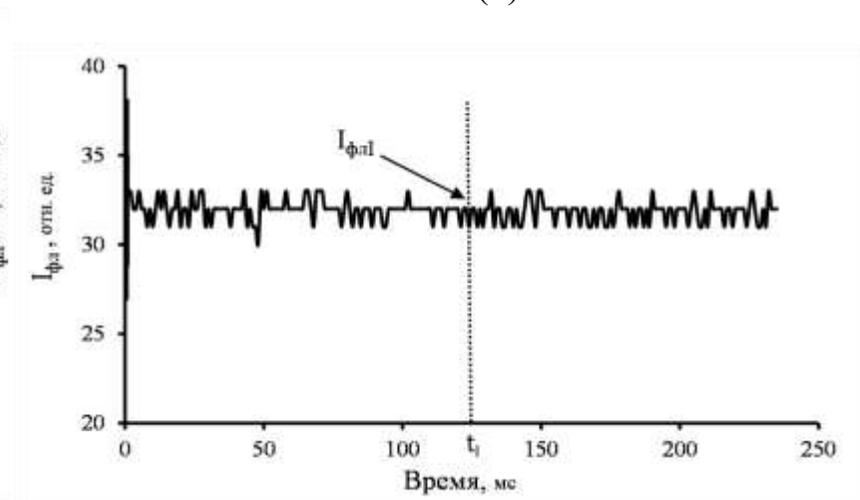
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 3 – Кривые зависимостей интенсивности флуоресценции хлорофилла ( $I_{\phi л}$ ) и их первых производных ( $dI_{\phi л}/dt$ ) для сорта «Розанчик»: а) степень зрелости – «зелёная»; б) степень зрелости- «бурая»; в) степень зрелости- «Розовая»; г) степень зрелости- «красная».

$c = 111$  (степень зрелости- розовая),  $I_{\text{флзк}} = 33 \pm 5$  (степень зрелости- красная).

На основе полученных математических моделей интенсивности флуоресценции хлорофилла для различных сортов томатов и их степеней зрелости разработаны усредненные (для всех, исследованных в работе, сортов томатов) для различных степеней зрелости математические модели:

**- усреднённая математическая модель для зеленых томатов (разных сортов)**

$$I_{\text{фл ср зел}} = a_{\text{ср3}} t^3 + a_{\text{ср2}} t^2 + a_{\text{ср1}} t + a_{\text{ср0}},$$

где,  $I_{\text{фл ср зел}}$  = средняя интенсивность флуоресценции хлорофилла для разных сортов зеленых томатов;  $t$ - время, мс;  $a_{\text{ср3}}$ ,  $a_{\text{ср2}}$ ,  $a_{\text{ср1}}$ ,  $a_{\text{ср0}}$  - средние коэффициенты интенсивности флуоресценции хлорофилла зеленых томатов;  $a_{\text{ср3}} = 0,000553$ ;  $a_{\text{ср2}} = 0,2117$ ;  $a_{\text{ср1}} = 26,47$ ;  $a_{\text{ср0}} = 541$ ,  $t_{\text{ср.зел}} = 128$  мс).

**- усреднённая математическая модель для бурых томатов (разных сортов)**

$$I_{\text{фл ср бур}} = b_{\text{ср3}} t^3 + b_{\text{ср2}} t^2 + b_{\text{ср1}} t + b_{\text{ср0}},$$

где,  $I_{\text{фл ср бур}}$  = средняя интенсивность флуоресценции хлорофилла для разных сортов бурых томатов;  $t$ - время, мс;  $b_{\text{ср3}}$ ,  $b_{\text{ср2}}$ ,  $b_{\text{ср1}}$ ,  $b_{\text{ср0}}$  = средние коэффициенты интенсивности флуоресценции хлорофилла бурых томатов;  $b_{\text{ср3}} = 0,000189$ ;  $b_{\text{ср2}} = 0,0705$ ;  $b_{\text{ср1}} = 8,42$ ;  $b_{\text{ср0}} = 262$ ,  $t_{\text{ср бур}} = 125$  мс.

**- усреднённая математическая модель для розовых томатов (разных сортов)**

$$I_{\text{фл ср роз}} = c_{\text{ср3}} t^3 + c_{\text{ср2}} t^2 + c_{\text{ср1}} t + c_{\text{ср0}},$$

где,  $I_{\text{фл ср роз}}$  - средняя интенсивность флуоресценции хлорофилла для разных сортов розовых томатов;  $t$ - время, мс;  $c_{\text{ср3}}$ ,  $c_{\text{ср2}}$ ,  $c_{\text{ср1}}$ ,  $c_{\text{ср0}}$  = средние коэффициенты интенсивности флуоресценции хлорофилла розовых томатов;  $c_{\text{ср3}} = 0,000075$ ;  $c_{\text{ср2}} = 0,0287$ ;  $c_{\text{ср1}} = 3,70$ ;  $c_{\text{ср0}} = 125$ ,  $t_{\text{ср роз}} = 133$  мс.

**- средняя интенсивность флуоресценции хлорофилла для красных томатов (разных сортов)**

$$I_{\text{фл ср к}} = 37 \pm 5.$$

Совокупность полученных математических моделей интенсивностей флуоресценции хлорофилла для всех сортов томатов позволила определить

среднее оптимальное время  $t_{lcp} = 129 \pm 4$  мс контроля степени зрелости томатов, которое необходимо реализовать в устройстве для такого контроля.

В третьей главе «Разработка устройства для контроля степени зрелости томатов» с учетом требуемых частотных диапазонов излученного  $f_u$  ( $f_u = 470 \pm 8$  нм) и сгенерированного  $f_c$  от плода томата ( $f_c = 650...820$  нм) световых потоков, их интенсивностей, оптимального времени  $t_l = 129 \pm 4$  контроля степени зрелости томатов была разработана функциональная схема (рис. 4) устройства для контроля степени зрелости томатов.

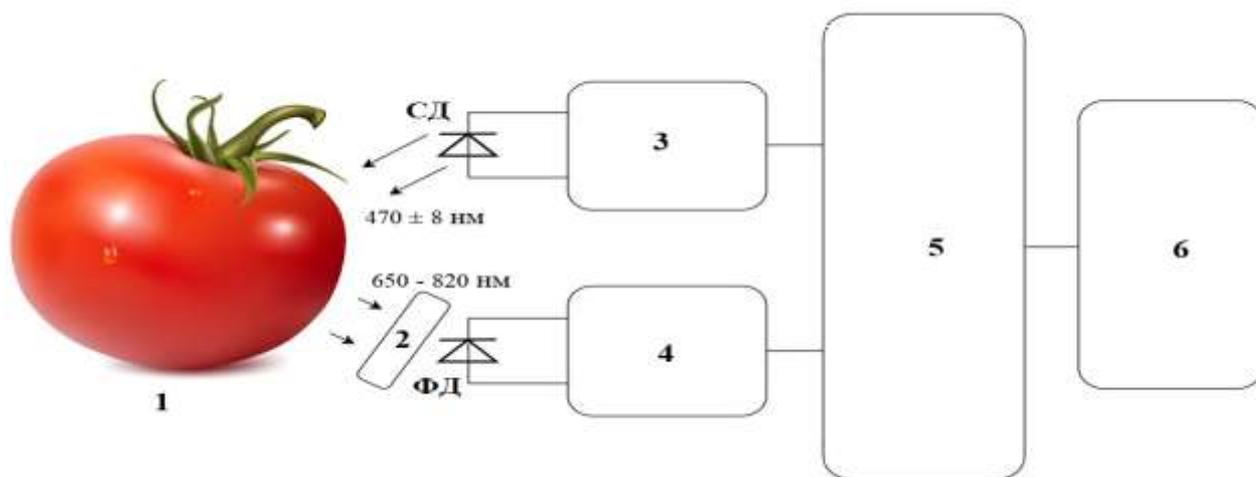


Рисунок 4 – Функциональная схема устройства для контроля степени зрелости томатов: 1 – объект исследования (томат), 2 – светофильтр, 3 – управляемый источник питания СД (светодиода, типа ARPL-3W-EPL40), 4 – усилитель для ФД (фотодиода, типа ФД-7К), 5 – микроконтроллер, 6 – компьютер.

Устройство работает следующим образом. Микроконтроллер 5 (на базе «Arduino») с установленной в нём программой формирует сигнал управления светодиодом 3, который направленно излучает световой поток с длиной волны  $470 \pm 8$  нм на объект 1 исследования (плод томат). Сгенерированный от плода световой поток, но уже с другой длиной волны ( $650...820$  нм) через светофильтр 2 поступает на фотодиод ФД. Сформированный в нем электрический сигнал через усилитель 4 поступает в микроконтроллер 5 и компьютер 6, в котором согласно разработанной программе происходит обработка сигнала светового потока с учётом уровней амплитуд и

спектрального его состава, излучённого и сгенерированного от плода томата 1 световых потоков.

Согласно разработанной функциональной схеме было изготовлено устройство для контроля степени зрелости томатов (рисунок 5).

При проведении экспериментальных исследований были использованы 3 ботанических сорта помидоров: «Алькасар», «Лезгинка», и «Розанчик» (выращенных в теплицах РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева) с различной окраской зрелых плодов: красного цвета («Алькасара» и «Лезгинка») и розового цвета «Розанчик».

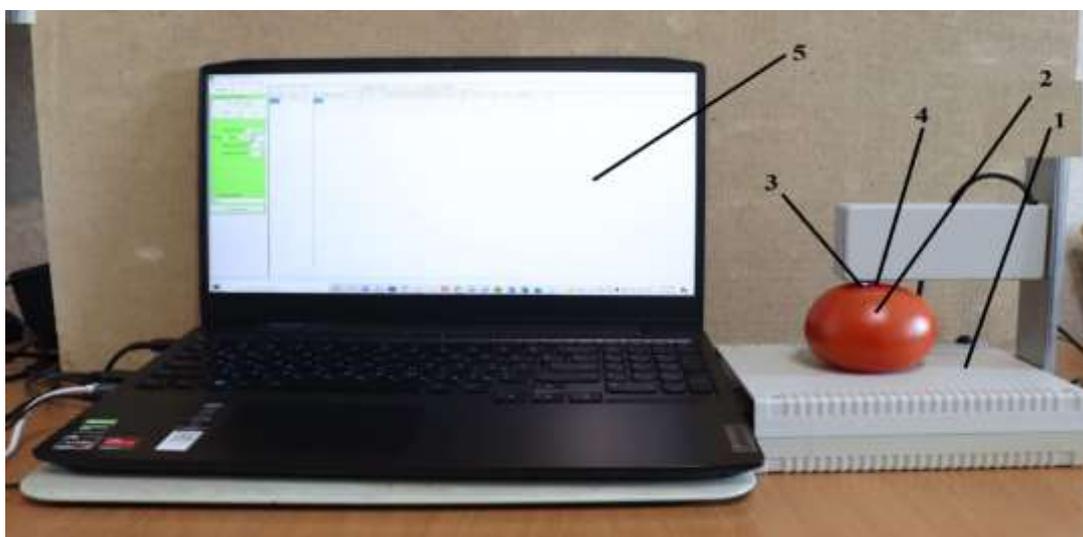


Рисунок 5 – Устройство для контроля степени зрелости томатов.

1 – прибор для измерения уровня флуоресценции хлорофилла; 2 - исследуемый плод томата; 3 – источник излучения (светодиод); 4 – ФД (фотодиод), 5 – компьютер с программным обеспечением.

Для проведения эксперимента был определён объём  $n_p$  выборочной совокупности томатов. Вначале была отобрана случайная выборка ( $N = 25$  томатов) и проведены на ней измерения, из которых были рассчитаны среднее ( $\bar{X} = 1360$ ) и стандартное отклонение ( $S_x = 370$ ) этой выборки.

Минимально необходимый объём  $n_p$  был определен условия равенства:

$$n_p = \left( \frac{t_{\gamma;n} \cdot S_x}{\Delta \cdot \bar{X}} \right)^2$$

где,  $t_{\gamma;n}$  - коэффициент Стьюдента,  $t_{\gamma=0,95;n=25} = 2,06$ ;  $\Delta$  - относительная погрешность определения среднего ( $\Delta=10\%$  или 0,1).

$$n_p = \left( \frac{t_{\gamma;n} \cdot S_x}{\Delta \cdot \bar{X}} \right)^2 = \left( \frac{2,06 \cdot 370}{0,1 \cdot 1360} \right)^2 = 32$$

**В четвертой главе** «Анализ полученных результатов и оценка технико-экономической эффективности устройства для контроля степени зрелости томатов» приведены результаты эксперимента по измерению медленной и быстрой индукции флуоресценции хлорофилла в зависимости от степени зрелости томатов трёх сортов «Алькасара», «Лезгинка» и «Розанчик».

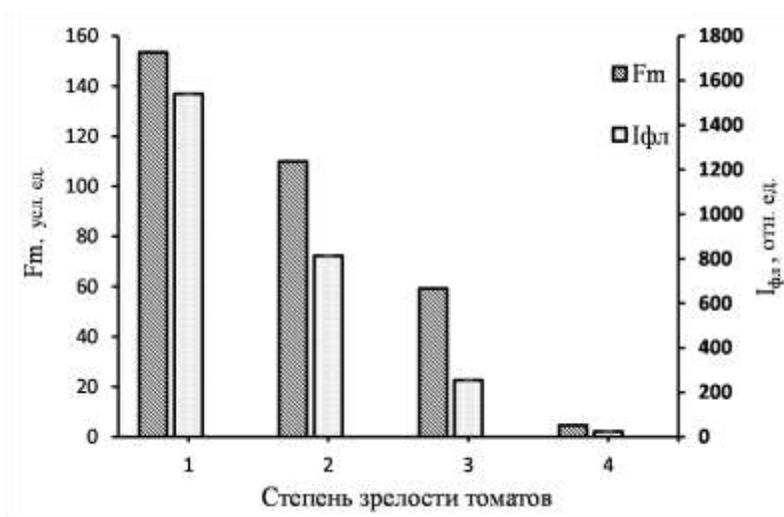
На рисунке 6 приведены диаграммы зависимостей быстрой (в сравнении с медленной) флуоресценции хлорофилла от степени зрелости томатов для сортов («Алькасара», «Лезгинка» и «Розанчик»).

Полученные диаграммы (Рис. 6) свидетельствуют о высокой корреляции зависимостей медленной  $F_m$  и быстрой  $I_{фл}$  флуоресценции хлорофилла для определённых сортов и степеней их зрелости томатов.

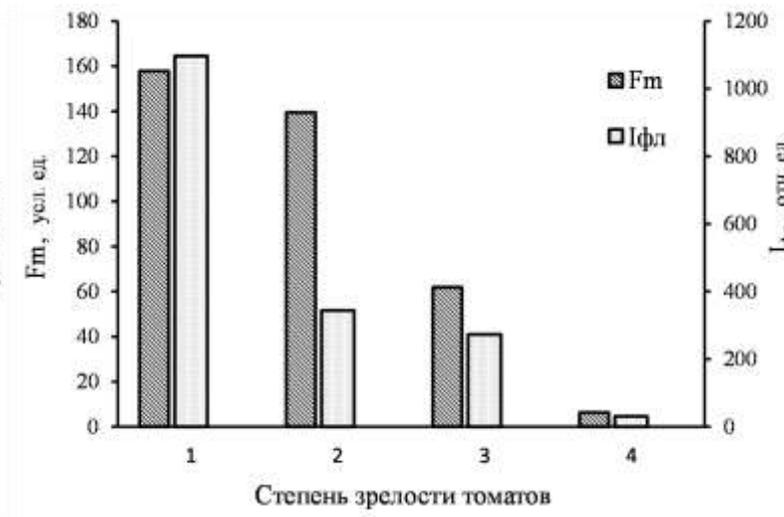
На рисунке 7 приведены результаты эксперимента по измерению интенсивности флуоресценции хлорофилла  $I_{фл}$  томатов от степени их зрелости для сортов («Алькасара», «Лезгинка» и «Розанчик»). В исследуемых сортах прослеживается закономерность, что по мере зрелости томатов снижение значения  $I_{фл}$  степень зеленой зрелости характеризуется высокими значениями  $I_{фл}$ . Напротив, степень полной зрелости имеет низкие значения  $I_{фл}$ .

На основе проведенных экспериментальных исследований получены математические выражения зависимостей интенсивности флуоресценции хлорофилла  $I_{фл}$  томатов от степени их зрелости для сортов «Алькасара», «Лезгинка» и «Розанчик».

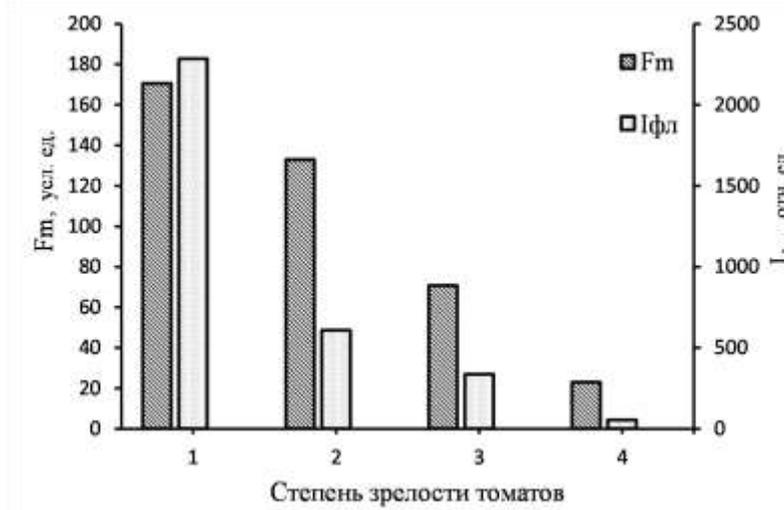
Такие зависимости позволяют достоверно проводить сортирование томатов определенных сортов по степени их зрелости.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 6 – Диаграммы зависимостей медленной  $F_m$  и быстрой  $I_{фл}$  флуоресценции хлорофилла для сортов томатов: а) сорта «Алькасара»; б) сорта «Лезгинка»; в) сорта «Розанчик».

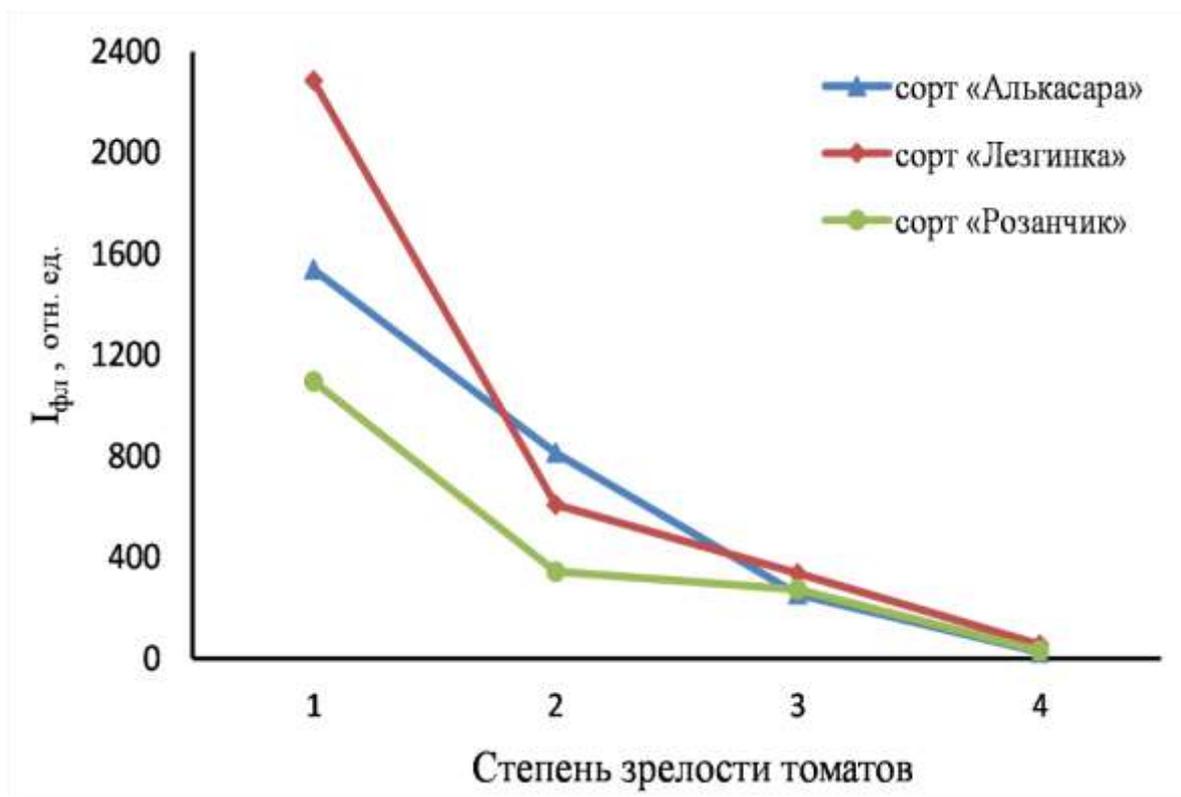


Рисунок 7 – Графические зависимости между интенсивностью флуоресценции хлорофилла  $I_{фл}$  томатов и степенью их зрелости (для сортов «Алькасара», «Лезгинка» и «Розанчик»).

Шкала степеней зрелости плодов томатов (Таблица 4) разработана для разных сортов томатов на основе зависимости их интенсивности флуоресценции хлорофилла ( $I_{фл}$ ) от степеней зрелости томатов.

Таблица 4. Шкала степеней зрелости томатов для разных их сортов

Степень зрелости томатов	$I_{фл}$ , отн. ед.
1 (зелёная)	$1640 \pm 600$
2 (бурая)	$588 \pm 235$
3 (розовая)	$288 \pm 44$
4 (красная)	$37 \pm 15$

Годовой экономический эффект от применения разработанного устройства составляет 536505 рублей, а срок окупаемости капитальных вложений – 0.17 года.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны способ и устройство для контроля степени зрелости томатов, обеспечивающие оперативность, достоверность и дешевизну такого контроля.

1. Установлено, что известным методам присущи недостаточные оперативность такого контроля, сложность и дороговизна оборудования. Предложены способ и устройство, исключающие недостатки существующих методов и средств контроля зрелости томатов и основанные на измерении уровня быстрой флуоресценции хлорофилла томатов в зависимости от их зрелости.

2. Разработаны математические модели интенсивностей быстрой флуоресценции хлорофилла различных сортов томатов в зависимости от степени их зрелости, которые описываются полиномами третьей степени.

3. Согласно полученным математическим моделям определено оптимальное время  $t_l = 129 \pm 4$  с контроля степени зрелости томатов.

4. Разработано устройство для контроля с таким оптимальным временем степени зрелости томатов по их интенсивностям быстрой флуоресценции хлорофилла.

5. По результатам экспериментальных исследований установлено, что применение устройства, разработанного по предложенному способу контроля зрелости томатов, существенно повышает оперативность такого контроля.

6. Использование разработанного устройства позволяет контролировать процесс сортирования по зрелости томатов с дополнительным доходом в 536505 руб. в год.

7. Разработанное устройство может быть использовано на автоматизированных пунктах сортирования томатов, яблок, плодов манго, картофеля и других.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.**

**Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. Абделхамид, М.А. Способ определения зрелости томатов на основе контроля их индукции флуоресценции хлорофилла / Ю.А. Судник, М.А. Абделхамид // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2020. – № 1(95). – С. 51-54.

2. Абделхамид, М.А. Технологические методы оценки зрелости томатов / М.А. Абделхамид, Ю.А. Судник // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2020. – № 2(39). – С. 93-98.

3. Абделхамид, М.А. Исследование медленной индукции флуоресценции хлорофилла для разделения плодов томатов по степени их зрелости / Ю.А. Судник, М.А. Абделхамид // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2020. – №3 (40). – С. 109-114.

4. Абделхамид, М.А. Автоматический контроль зрелости томатов с помощью быстрой флуоресценции хлорофилл / М.А. Абделхамид, Ю.А. Судник // Международный технико-экономический журнал. – №2. – 2022.

**Публикации в изданиях, индексируемых в международных цитатноаналитических базах данных Scopus**

5. Abdelhamid, M.A. Chlorophyll fluorescence for classification of tomato fruits by their maturity stage / M.A. Abdelhamid, Y.A. Sudnik, H.J. Alshinayyin, F. Shaaban // E3S Web Conf. – 2020. – № 193, 01065. doi: 10.1051/e3sconf/202019301065.

6. Abdelhamid, M.A. Non-destructive method for monitoring the ripening of tomatoes based on their induction of chlorophyll fluorescence / M.A. Abdelhamid, Y.A. Sudnik, H.J. Alshinayyin, F. Shaaban // J. of of Agricultural Engineering. – 2021. – №1 (52), 1098. doi: 10.4081/jae.2020.1098.

**В сборниках научных трудов и материалах конференций**

7. Абделхамид, М.А. Современные методы оценки зрелости томатов. Материалы международной научной конференции молодых учёных и  
20

специалистов, посвящённой 150-летию А.В. Леонтовича, г. Москва – 2019: Сборник статей. М.: Издательство РГАУ – МСХА, 2019. – С. 434–435.

8. Абделхамид, М. А. Chlorophyll fluorescence as an indicator of fruit ripening. Материалы международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию А.В. Леонтовича, г. Москва – 2019: Сборник статей. М.: Издательство РГАУ – МСХА, 2019. – С. 202–205.

9. Абделхамид, М.А. Rapid technical method for quality control of tomato fruits. Международная научно- практической конференции «Наука без границ и языковых барьеров», Орел: ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 2019 г. – С. 9–12.

10. Абделхамид, М.А. Automation of sorting tomatoes. Международная научная конференция профессорско-преподавательского состава, посвященная 125-летию со дня рождения В.С. Немчинова, г. Москва, Сборник статей. Выпуск 292 Часть I / М. – Издательство РГАУ – МСХА, 2020 г. – С. 138–140.

11. Абделхамид, М.А. Устройство для измерения степени зрелости томатов в зависимости от флуоресценции хлорофилла. Материалы IV национальной научно-практической конференции; ФГБОУ ВО Кузбасская ГСХА. – Кемерово, 2020 г. – С. 32–37.

12. Абделхамид, М.А. A device for measuring the slow induction of chlorophyll fluorescence in tomato. Материалы международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 160-летию В.А. Михельсона, г. Москва – 2020: Сборник статей. – Том 1. – Изд-во РГАУ-МСХА, 2020. – С. 390–392.

Подписано к печати 22.04.2022. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 1,2. Тираж 100 экз. Заказ № 733.

Отпечатано в АНО Редакция журнала «МЭСХ»:  
127474, Москва, Бескудниковский б-р, 23, корп. 1  
E-mail: t\_sams@mail.ru



