



**ФГБОУ ВО Российский государственный
аграрный университет – МСХА
имени К.А. Тимирязева**



**Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук**

ОПТИЧЕСКИЙ СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ ЗРЕЛОСТИ ТОМАТОВ

**Специальность: 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в
сельском хозяйстве**

Аспирант: Абделхамид Махмуд Абделхамид

Научный руководитель: Судник Ю. А.

профессор кафедры автоматизации и роботизации
технологических процессов имени академика И. Ф. Бородина

Существующие методы и средства для контроля зрелости и сортирования томатов

1. Лазерный метод

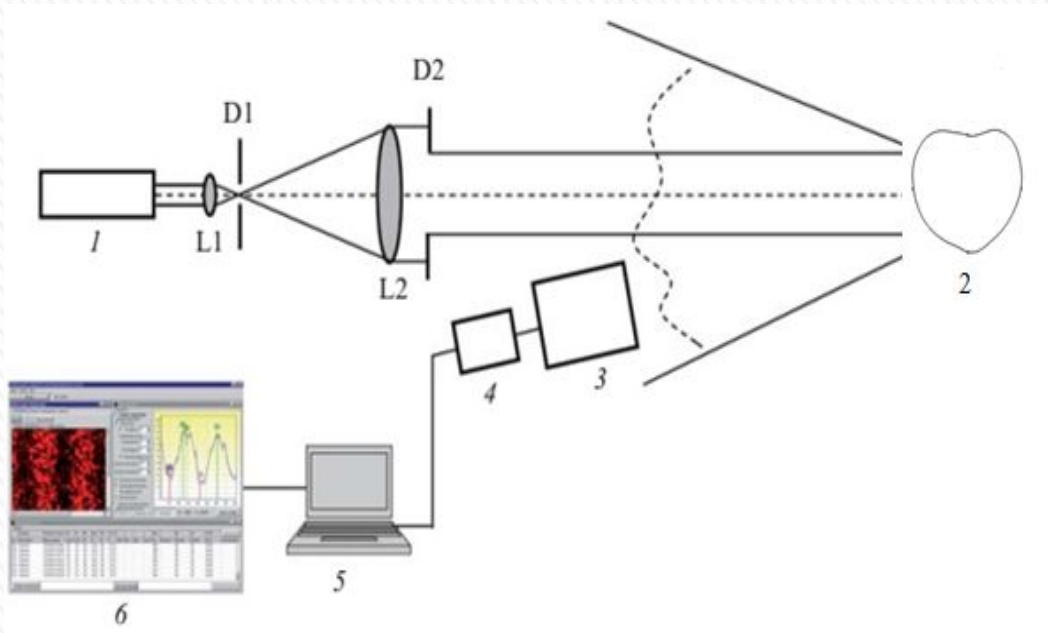


Рис. 1. Схема лазерной установки:

1- лазер; 2-плод томата; 3- поляризационный интерферометр ;4- CCD-камерой ;5-компьютер

2. Метод технического зрения (RGB)

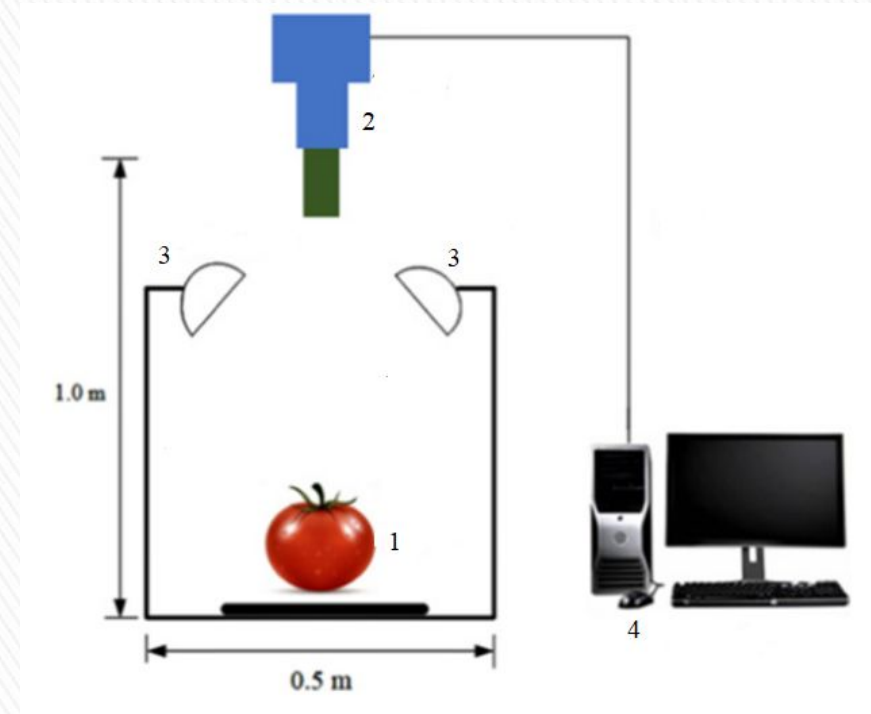
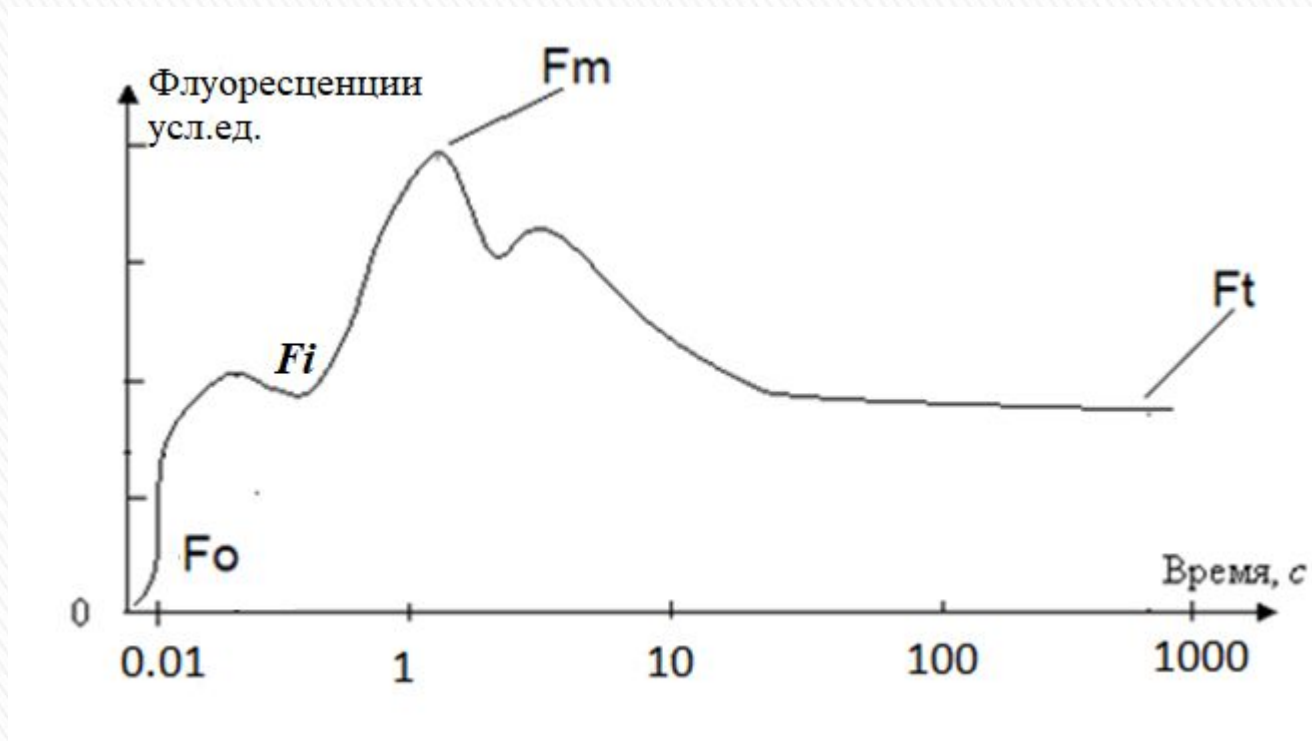


Рис. 2. Фотометрическая система устройства для контроля степени зрелости томатов: 1- плод; 2 – фотокамера; 3 - источник света; 4 - компьютер..



Кривая изменения флуоресценции хлорофилла во времени.

Fo- начальное значение флуоресценции;

Fm- максимальное значение флуоресценции;

Ft - стационарное значение флуоресценции,

Fi - оптимальное значение флуоресценции

Временной интервал быстрой флуоресценции – **Fo Fm (t < 1 с)**

временной интервал медленной флуоресценции – **Fm..... Ft (t > 1 с).**

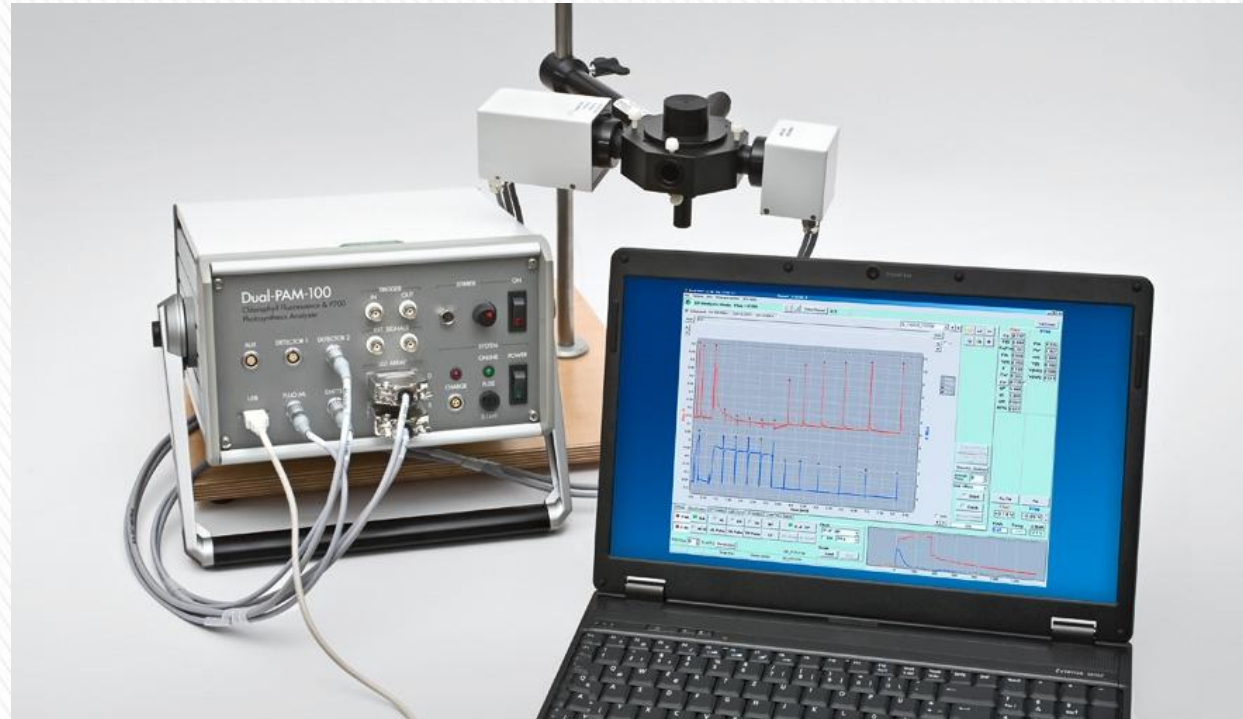


Рисунок. ПАМ-флуориметр DUAL-PAM, Walz, Германия.

Цель и задачи исследования

Цель - 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 флуоресценции хлорофилла томатов в зависимости от их степени зрелости.
3. Разработка устройства для контроля степени зрелости томатов по их интенсивности флуоресценции хлорофилла.
4. Проведение экспериментальных исследований разработанного устройства.
5. Оценка технико-экономической эффективности устройства для контроля степени зрелости томатов.

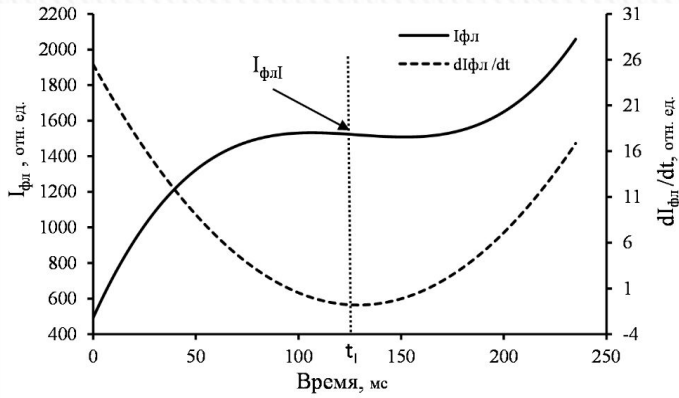
Научная новизна исследований

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

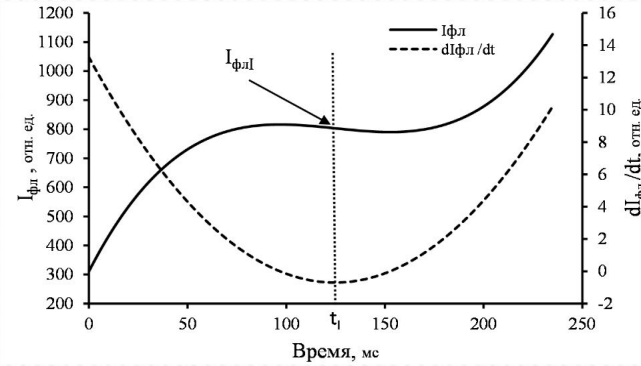
Положения, выносимые на защиту

- математические модели интенсивностей 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.

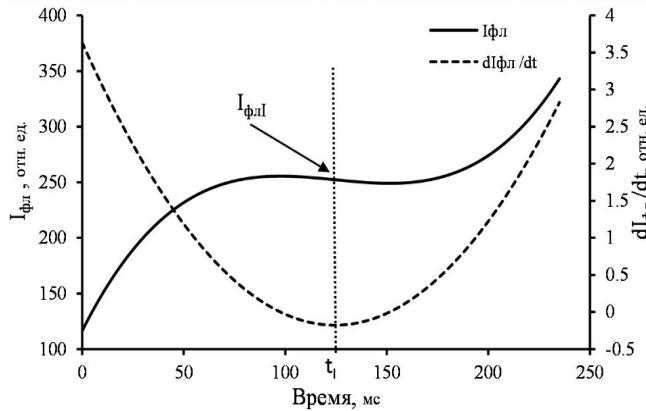
Математические модели кривых флуоресценции хлорофилла сорта “Алькасара” для разных степеней его зрелости



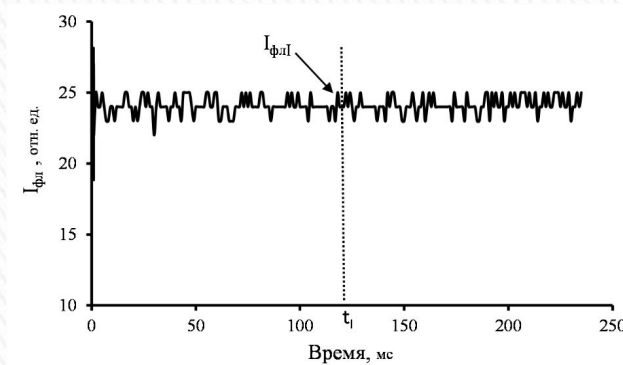
степень зрелости - зелёная



степень зрелости- бурая



степень зрелости- Розовая



степень зрелости- красная.

Сорт	Степень зрелости	Уравнения математических моделей	$F_p < F_{кр}$
Алькасара	зелёная	$I_{фл} = 0,000525 t^3 - 0,2033 t^2 + 25,45 t + 494$	$1,71 < 1,85$
		$dI_{фл}/dt = 0,001574 t^2 - 0,4066 t + 25,45$	
		$d^2 I_{фл} / dt^2 = 0,003149 t - 0,4066 (t_1=129 \text{ мс})$	
	бурая	$I_{фл} = 0,000299 t^3 - 0,1119 t^2 + 13,26 t + 309$	$1,69 < 1,85$
		$dI_{фл} / dt = 0,000897 t^2 - 0,2237 t + 13,26$	
		$d^2 I_{фл} / dt^2 = 0,001793 t - 0,2237 (t_1=124 \text{ мс})$	
	розовая	$I_{фл} = 0,000082 t^3 - 0,0306 t^2 + 3,64 t + 116$	$1,65 < 1,85$
		$dI_{фл} / dt = 0,000246 t^2 - 0,0613 t + 3,64$	
		$d^2 I_{фл} / dt^2 = 0,000492 t - 0,0613 (t_1=124 \text{ мс})$	
красная		$I_{фл1к} = 24 \pm 5$	

Уравнение в общем виде математической модели для сорта томатов “Алькасара”

будет иметь вид

$$I_{фл} = a_3 t^3 - a_2 t^2 + a_1 t + c.$$

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);

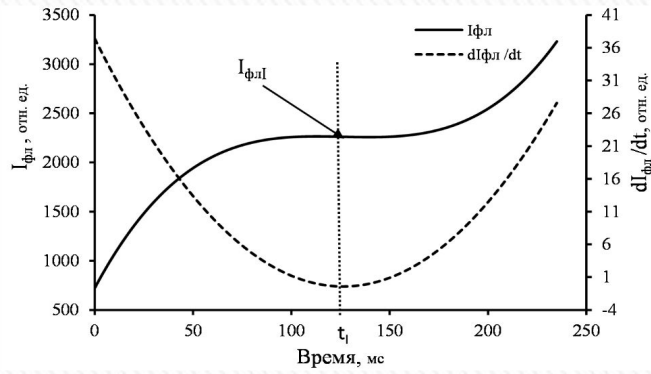
$a_3 = 0,000082$; $a_2 = 0,0306$; $a_1 = 3,64$; $c = 116$ (степень зрелости- розовая);

$I_{фл1к} = 24 \pm 5$ (степень зрелости- красная),

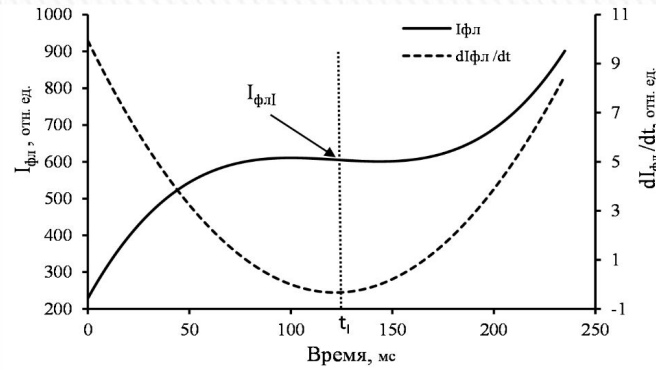
(при этом, $t_{Icp} = 126 \text{ мс}$):

Кривые зависимостей интенсивности флуоресценции хлорофилла ($I_{фл}$) и их первых производных ($d I_{фл} / dt$) во времени для сорта “Алькасара

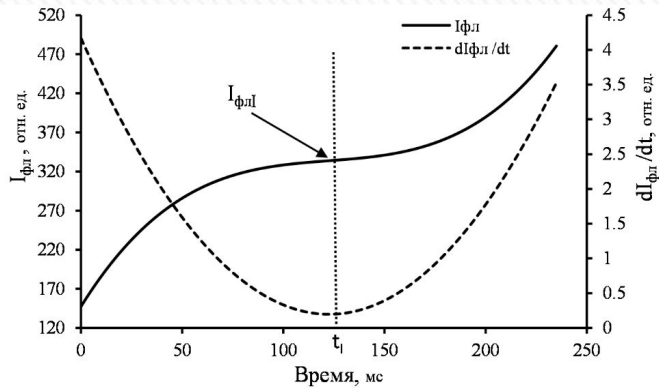
Математические модели кривых флуоресценции хлорофилла сорта “Лезгинка” для разных степеней его зрелости



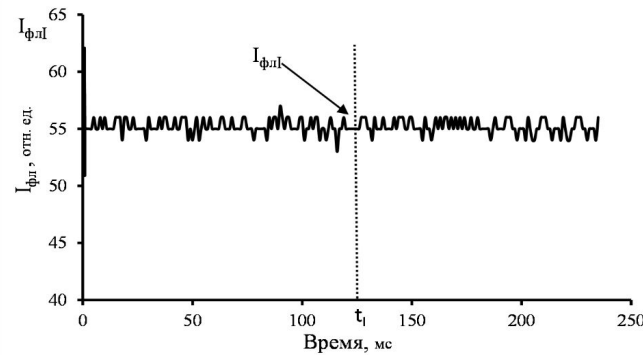
степень зрелости - зелёная



степень зрелости- бурая



степень зрелости- Розовая



степень зрелости- красная.

Сорт	Степень зрелости	Уравнения математических моделей	$F_p < F_{кр}$
Лезгинка	зелёная	$I_{фл} = 0,000790 t^3 - 0,2994 t^2 + 37,40 t + 721$	$1,73 < 1,85$
		$dI_{фл}/dt = 0,002370 t^2 - 0,5989 t + 37,40$	
		$d^2I_{фл}/dt^2 = 0,004741 t - 0,5989 (t_I=126 \text{ мс})$	
	бурая	$I_{фл} = 0,000230 t^3 - 0,0842 t^2 + 9,92 t + 229$	$1,63 < 1,85$
		$dI_{фл}/dt = 0,000691 t^2 - 0,1684 t + 9,92$	
		$d^2I_{фл}/dt^2 = 0,001381 t - 0,1684 (t_I=122 \text{ мс})$	
розовая	$I_{фл} = 0,000088 t^3 - 0,032369 t^2 + 4,16 t + 147$	$1,70 < 1,85$	
	$dI_{фл}/dt = 0,000264 t^2 - 0,0647 t + 4,16$		
	$d^2I_{фл}/dt^2 = 0,000528 t - 0,0647 (t_I=122 \text{ мс})$		
красная		$I_{фл2k} = 55 \pm 5$	

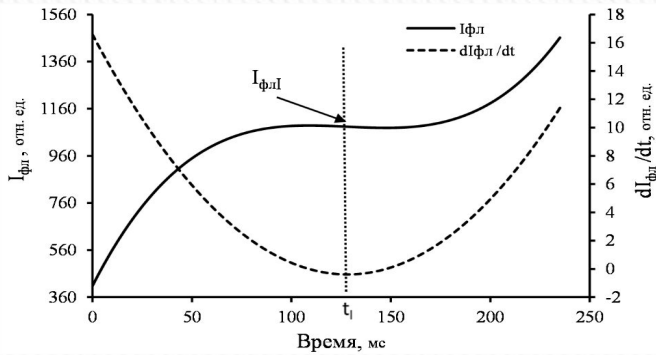
Уравнение в общем виде математической модели для сорта томатов “Лезгинка” будет иметь вид :

$$I_{фл2} = a_3 t^3 - a_2 t^2 + a_1 t + c,$$

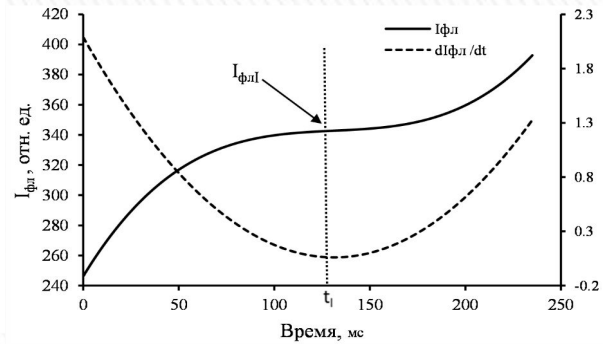
Где, $a_3 = 0,000790$; $a_2 = 0,2994$; $a_1 = 37,40$; $c = 721$ (степень зрелости- зелёная),
 $a_3 = 0,000230$; $a_2 = 0,0842$; $a_1 = 9,92$; $c = 229$ (степень зрелости- бурая),
 $a_3 = 0,000088$; $a_2 = 0,032369$; $a_1 = 4,16$; $c = 147$ (степень зрелости- розовая),
 $I_{фл2k} = 55 \pm 5$ (степень зрелости- красная), (при этом, $t_{Icp} = 123 \text{ мс}$)

Кривые зависимостей интенсивности флуоресценции хлорофилла (I_{фл}) и их первых производных (d I_{фл} /dt) во времени для сорта “Лезгинка

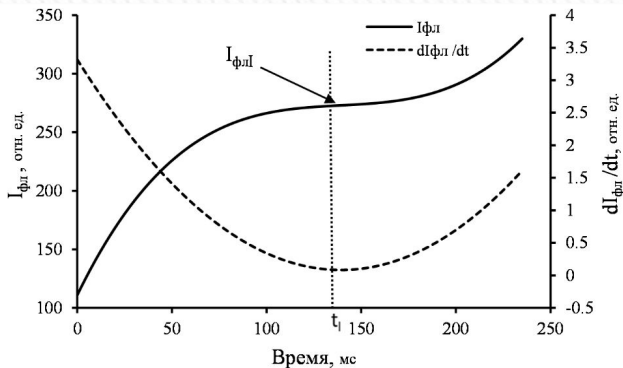
Математические модели кривых флуоресценции хлорофилла сорта “Розанчик” для разных степеней его зрелости



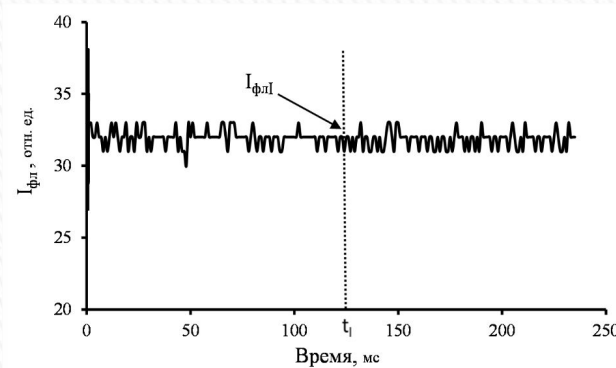
степень зрелости - зелёная



степень зрелости- бурая



степень зрелости- Розовая



степень зрелости- красная.

Сорт	Степень зрелости	Уравнения математических моделей	$F_p < F_{кр}$
Розанчик	зелёная	$I_{фл} = 0,000344 t^3 - 0,1322 t^2 + 16,56 t + 409$	$1,71 < 1,85$
		$dI_{фл}/dt = 0,001032 t^2 - 0,2645 t + 16,56$	
		$d^2I_{фл}/dt^2 = 0,002063 t - 0,2645 (t_1=128 \text{ мс})$	
	бурая	$I_{фл} = 0,000039 t^3 - 0,0154 t^2 + 2,09 t + 246$	$1,14 < 1,85$
		$dI_{фл}/dt = 0,000118 t^2 - 0,0309 t + 2,09$	
		$d^2I_{фл}/dt^2 = 0,000235 t - 0,0309 (t_1=131 \text{ мс})$	
розовая	$I_{фл} = 0,000055 t^3 - 0,0232 t^2 + 3,32 t + 111$	$1,51 < 1,85$	
	$dI_{фл}/dt = 0,000167 t^2 - 0,0464 t + 3,32$		
	$d^2I_{фл}/dt^2 = 0,000333 t - 0,0464 (t_1=139 \text{ мс})$		
красная		$I_{фл3к} = 33 \pm 5$	

Уравнение в общем виде математической модели для сорта томатов “Розанчик” будет иметь вид $I_{фл3} = a_3 t^3 - a_2 t^2 + a_1 t + c$, 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), $a_3 = 0,000055$; $a_2 = 0,0232$; $a_1 = 3,32$; $c = 111$ (степень зрелости- розовая), $I_{фл3к} = 33 \pm 5$ (степень зрелости- красная), (при этом, $t_{1cp} = 129$ мс)

Кривые зависимостей интенсивности флуоресценции хлорофилла ($I_{фл}$) и их первых производных ($dI_{фл}/dt$) во времени для сорта “Розанчик

Усреднённые математических моделей быстрой флуоресценции хлорофилла для различных сортов

ТОМАТОВ

для различных сортов томатов	Степень зрелости	Уравнения математических моделей
	зелёная	$I_{\text{фл ср зел}} = 0,000553 t^3 - 0,2117 t^2 + 26,47 t + 541,4$
		$d I_{\text{фл ср зел}} / dt = 0,001659 t^2 - 0,4234 t + 26,47$
		$d^2 I_{\text{фл ср зел}} / dt^2 = 0,003316 t - 0,4234 \quad (t_i=128 \text{ мс})$
	бурая	$I_{\text{фл ср бур}} = 0,000189 t^3 - 0,0705 t^2 + 8,42 t + 262$
		$d I_{\text{фл ср бур}} / dt = 0,00056 t^2 - 0,141 t + 8,42$
		$d^2 I_{\text{фл ср бур}} / dt^2 = 0,00112 t - 0,141 \quad (t_i=125 \text{ мс})$
	розовая	$I_{\text{фл ср роз}} = 0,000075 t^3 - 0,0287 t^2 + 3,70 t + 125$
		$d I_{\text{фл ср роз}} / dt = 0,000225 t^2 - 0,0574 t + 3,70$
		$d^2 I_{\text{фл ср., роз.}} / dt^2 = 0,00045 t - 0,0574 \quad (t_i=133 \text{ мс})$
красная	$d_{\text{ср}} = 37 \pm 5$	

Уравнение в общем виде математической модели для различных сортов томатов

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

где, $a_{\text{ср3}} = 0,000553$, $a_{\text{ср2}} = 0,2117$, $a_{\text{ср1}} = 26,47$, $a_{\text{ср0}} = 541$ (степень зрелости- зелёная)

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

где, $b_{\text{ср3}} = 0,000189$; $b_{\text{ср2}} = 0,0705$; $b_{\text{ср1}} = 8,42$; $b_{\text{ср0}} = 262$ (степень зрелости- бурая),

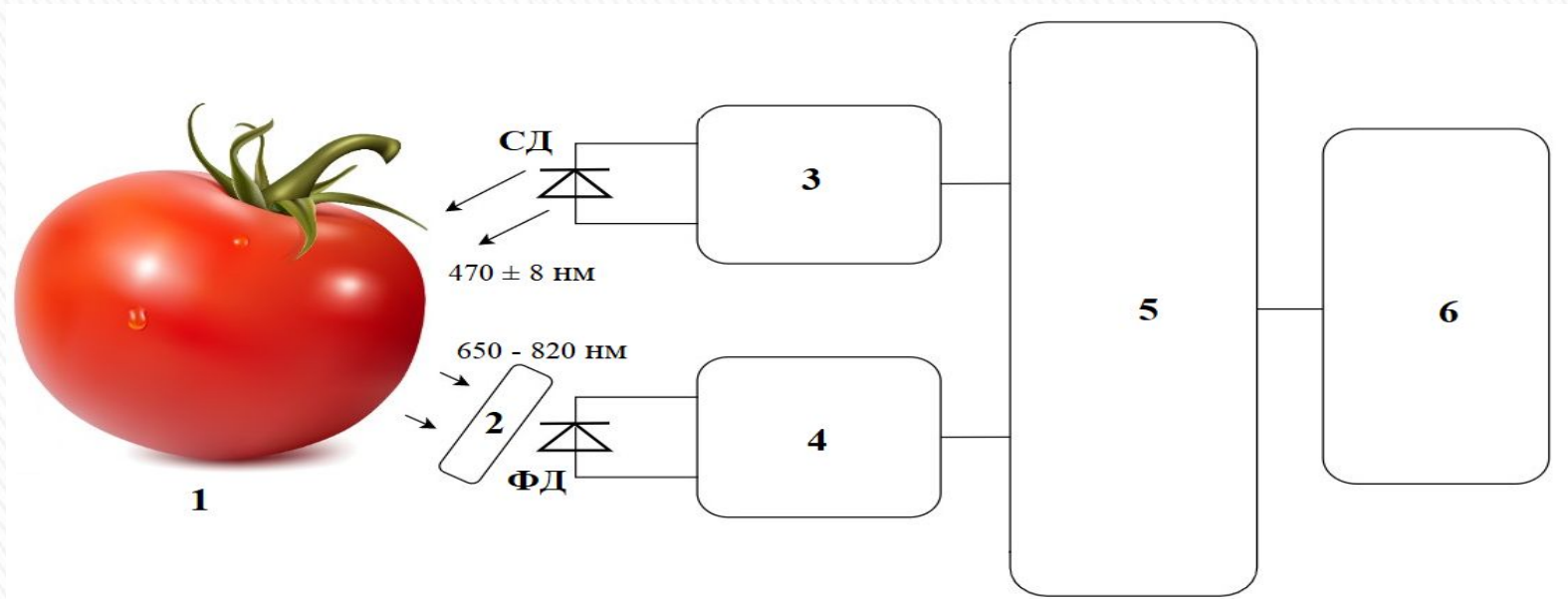
$$I_{\text{фл ср роз}} = c_{\text{ср3}} t^3 + c_{\text{ср2}} t^2 + c_{\text{ср1}} t + c_{\text{ср0}}$$

где, $c_{\text{ср3}} = 0,000075$; $c_{\text{ср2}} = 0,0287$; $c_{\text{ср1}} = 3,70$; $c_{\text{ср0}} = 125$ (степень зрелости- розовая),

$$I_{\text{флзк}} = 37 \pm 5 \text{ (степень зрелости- красная)}$$

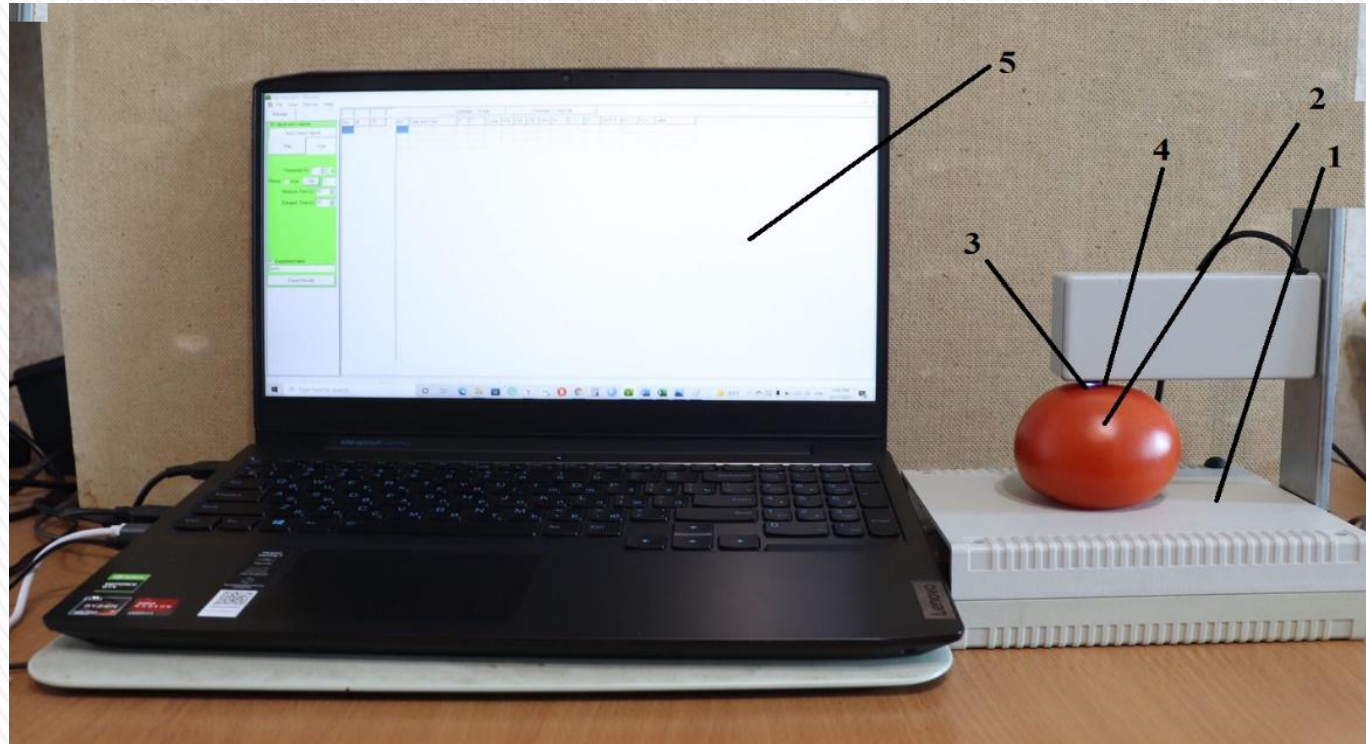
$$t_{\text{ср}} = 129 \pm 4 \text{ мс}$$

Функциональная схема устройства



Функциональная схема устройства для контроля степени зрелости томатов: 1 – объект исследования (томат), 2 – светофильтр, 3 – управляемый источник питания СД (светодиода), 4 – усилитель для ФД (фотодиод), 5 – микроконтроллер, 6 – компьютер.

Стенд для исследования плодов томатов



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

методика проведения экспериментальных исследований

1. Сбор томатов (в теплице).
2. Разделение томатов по степени зрелости (цвету кожуры плода).
3. Определение объема выборки томатов, n_p

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

где, $t_{\gamma;n}$ - коэффициент Стьюдента, $t_{\gamma=0,95;n=25} = 2,06$;

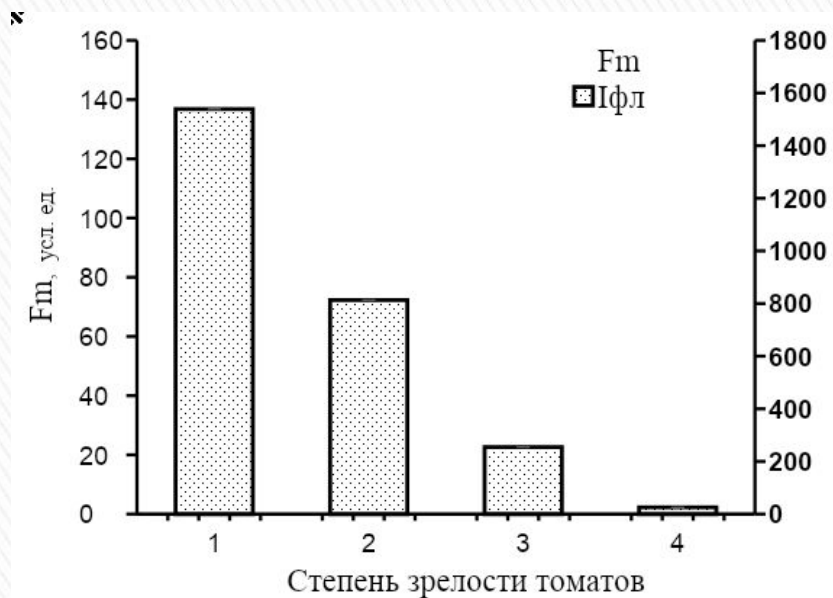
Δ – относительная погрешность определения среднего.

\bar{X} – средний

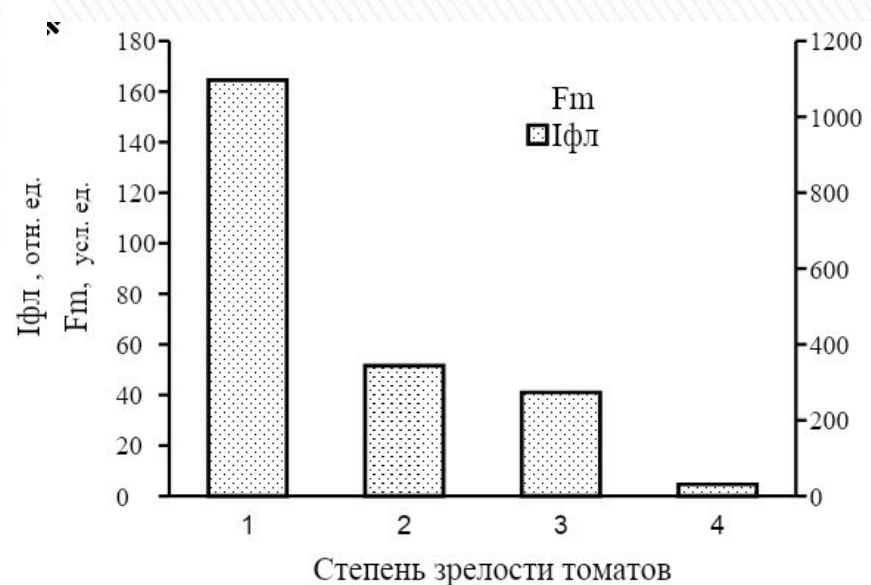
S_X – стандартное отклонение

4. Работа на стенде

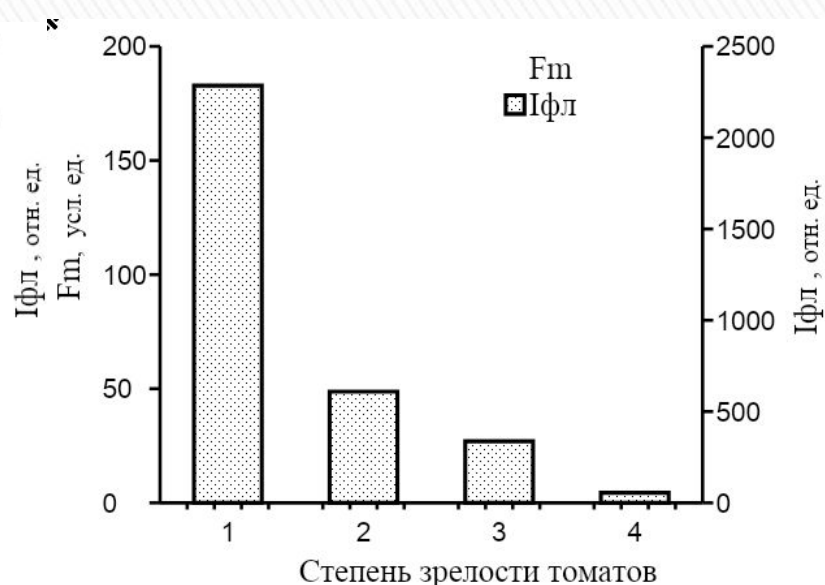
Результаты эксперимента по измерению $I_{фл}$ томатов в зависимости от степени их зрелости для сортов (Алькасара, Лезгинка и Розанчик).



Диаграммы зависимостей медленной F_m и быстрой $I_{фл}$ флуоресценции хлорофилла для сорта ль “Акасара”.

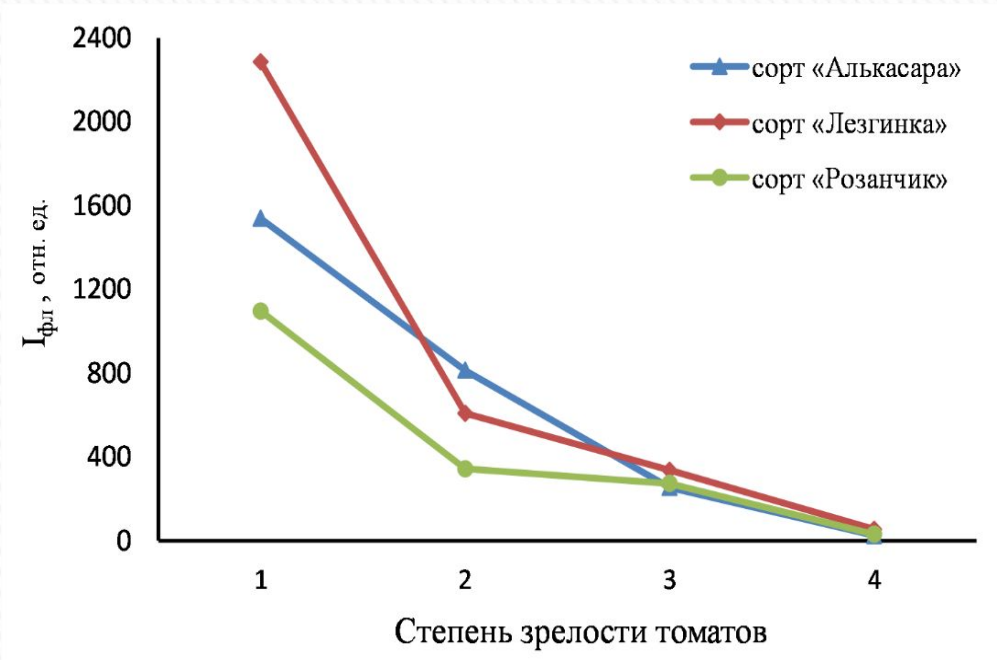


Диаграммы зависимостей медленной F_m и быстрой $I_{фл}$ флуоресценции хлорофилла для сорта “Лезгинка”.



Диаграммы зависимостей медленной F_m и быстрой $I_{фл}$ флуоресценции хлорофилла для сорта “Розанчик”.

Результаты эксперимента по измерению интенсивности $I_{фл}$ флуоресценции хлорофилла томатов в зависимости от степени их зрелости для сортов (Алькасара, Лезгинка и Розанчик).



Шкала степеней зрелости для разных сортов томатов

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

Графические зависимости между интенсивностью флуоресценции хлорофилла $I_{фл}$ томатов и степенью их зрелости (для сортов “Алькасара”, “Лезгинка” и “Розанчик”).

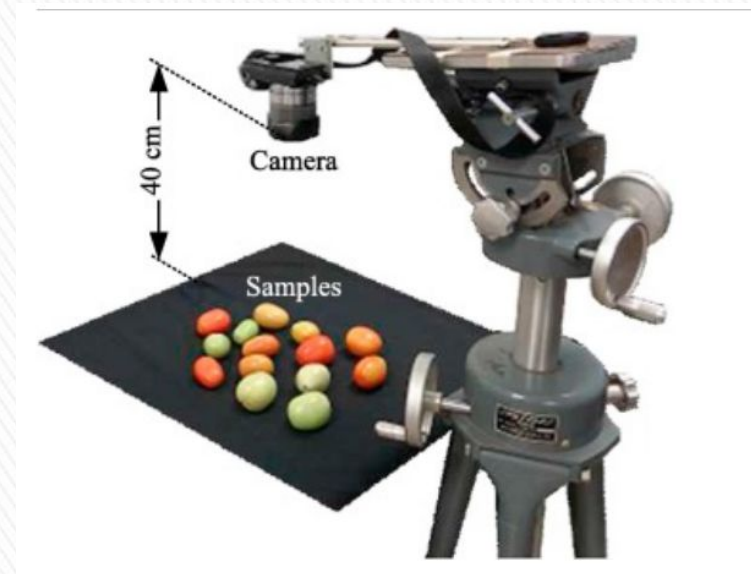
Оценка технико-экономической эффективности устройства

Показатели	Базовое устройство (Lpt-3k, Россия)	Предлагаемое устройство
Капитальные вложения, руб	120000	93600
Потребляемая мощность, Вт	400	300
Тариф на электроэнергию, руб	5.66	5.66
Продолжительность работы устройства, ч / год	1440	144
Обслуживающий персонал. чел	1	1
Часовая тарифная ставка, руб	185	185
Время измерения одного плода томата, с	1	0.1
Производительность, т/ч	0.828	8.280

Оценка технико-экономической эффективности устройства

Наименование показателей	Значение показателя, руб.	
	Базовое устройство	Предлагаемое устройство
1 .Размер кап. вложений (КВ)	120000	93600
2.Эксплуатационные затраты	610435	73930
- заработная плата	554622	55461
- амортизация	12000	9360
- отчисления на ремонт	6000	4680
- стоимость потребленной эл. энергии	815	244
- прочие	34553	4185
3. Годовой Дополнительный доход от экономии	536505	
4.Срок окупаемости, лет	0.17	

Базовое устройство



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 и достоверность такого контроля, сложность и дороговизна оборудования. Предложен 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 флуоресценции хлорофилла различных сортов томатов в зависимости от степени их зрелости, которые описываются полиномами третьей степени.
3. Согласно полученным математическим моделям определено оптимальное время $t_I = 129 \pm 4$ мс контроля степени зрелости томатов.
4. Разработанное устройство для контроля степени зрелости томатов по их интенсивностям флуоресценции хлорофилла.
5. По результатам экспериментальных исследований установлено, что применение устройства, разработанного по предложенному способу контроля зрелости томатов, существенно повышает оперативность и достоверность 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 сортировочных пунктах томатов, яблок, плодов манго, лимонов, картофеля, и других.

Публикации

По материалам наших исследований опубликовано **12** научных работ, в том числе **4** статьи в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК РФ и в международной базе данных – **2** статьи (Scopus) и **6** статей по материалам докладов на международных конференциях.

Спасибо за ваше
внимание