

Автоматический контроль зрелости томатов с использованием быстрой флуоресценции хлорофилла (Судник Ю.А., Махмуд А. Абделхамид)

Зрелость является одним из наиболее важных факторов, связанных с оценкой качества томатов. Общие показатели зрелости включают такие физические свойства как цвет кожицы, упругость мякоти, размер, форма, содержание влаги и хлорофилла [77].

Хлорофилл - важный пигмент, содержащийся во всех растительных тканях, которые содержат хлоропласты, и необходимый для роста растений. После полной дифференциации пластид в хлоропласты, уровень хлорофилла становится высоким, что позволяет отдельным частям растения лучше поглощать свет. Когда плод достигает состояния зеленой зрелости, хлоропласт снова дифференцируется в хромопласт или другие типы протопластов, разлагающих хлорофилл [78].

Во время созревания плодов томата происходят различные изменения на физиологическом, биохимическом и молекулярном уровнях. Хлоропласты в плодоносящем околоплоднике преобразуются в хромопласты, и цвет поверхности плода меняется с зеленого на красный. Это изменение цвета хорошо характеризуется деградацией хлорофилла и накоплением каротиноидов, в основном ликопина. Однако, содержание хлорофилла в красных спелых плодах томатов значительно уменьшается в процессе созревания, но не всегда исчезает полностью [79], [80]. Контроль флуоресценции хлорофилла - неразрушающий и быстрый метод, который используется для оценки степени зрелости фруктов и овощей. Цель работы - разработка оптического метода и устройства для автоматического контроля степени спелости томатов с использованием быстрой флуоресценции хлорофилла.

В экспериментальном исследовании использовался сорт томата

«Лезгинка» (выращенный в теплицах РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева) с 4 –мя стадиями зрелости (зеленая, розовеющая, розовая, красная).

Разработка математических моделей интенсивности быстрой флуоресценции хлорофилла томата сорта «Лезгинка». Модели были получены на основе результатов экспериментальных исследований, в которых были определены табличные данные и построены соответствующие кривые (рисунок 43) зависимости интенсивности флуоресценции хлорофилла ($I_{\text{ф}}$) и их первых производных ($dI_{\text{ф}}/dt$) от времени для томатов сорта «Лезгинка» и их четырех степеней зрелости (зеленой, розовеющей, розовой и красной). Из рисунка видно, что интенсивность флуоресценции хлорофилла начинает увеличиваться со временем до момента, когда t_1 соответствует значению $I_{\text{ф}}$, после чего начинает незначительно уменьшаться с последующим увеличением. В этот промежуток времени первая производная $dI_{\text{ф}}/dt$ кривой флуоресценции хлорофилла начинает изменяться от своего максимального до минимального значения времени t_1 , соответствующего моменту перегиба кривой интенсивности флуоресценции хлорофилла $I_{\text{ф}}$. Этот момент соответствует первому минимуму времени t_1 на кривой первой производной исходной кривой флуоресценции хлорофилла. На рисунке 43 показано, что первая точка $I_{\text{ф}}$ перегиба кривой интенсивности флуоресценции хлорофилла определяет время $t_1 = 123 \pm 5$ мс (что будет соответствовать контрольной частоте 8,11 Гц) для различных степеней зрелости томатов (рисунок 43а, 43б, 43с). Для красных томатов (рисунок 43д) эта зависимость незначительно (по амплитуде) изменяется со временем.

Изменение интенсивности флуоресценции хлорофилла томатов со временем отслеживалось с помощью высокоточного флуориметра (модель ХЕ-РАМ, Heinz Walz, Германия) [81].

Для нахождения аналитических выражений для графических зависимостей, полученных в результате экспериментальных исследований, применялся регрессионный анализ с использованием полиномиальных уравнений и математической компьютерной программы «Mathematica v.12».

Для оценки порядка полиномов при определении аналитических выражений (уравнений регрессии), соответствующих полученным графическим зависимостям (кривым изменения интенсивности флуоресценции хлорофилла во времени) с помощью критерия Фишера (при уровне значимости 95%) определены полиномиальные уравнения третьей степени:

$$I_f = a_3 t^3 - a_2 t^2 + a_1 t + c, \quad 0 \leq t < 250 \text{ ms}; \quad (98)$$

где I_f - интенсивность флуоресценции хлорофилла, отн. ед; t - время, мс; a_1 , a_2 , a_3 , c - постоянные коэффициенты.

Виды уравнений кривых $I_f = f(t)$ сорта «Лезгинка» для различных степеней его зрелости приведены в таблице 15.

Таблица 15

Уравнения математических моделей сорта «Лезгинка» для разных степеней его зрелости

Сорт томатов	Степень спелости	Уравнения математических моделей
Лезгинка	Зелёный	$I_f = 0,000790 t^3 - 0,2994 t^2 + 37,40 t + 721$
		$dI_f/dt = 0,002370 t^2 - 0,5989 t + 37,40$
		$d^2I_f/dt^2 = 0,004741 t - 0,5989$ ($t_f=126$ мс)
	Розовеющий	$I_f = 0,000230 t^3 - 0,0842 t^2 + 9,92 t + 229$
		$dI_f/dt = 0,000691 t^2 - 0,1684 t + 9,92$
		$d^2I_f/dt^2 = 0,001381 t - 0,1684$ ($t_f=122$ мс)
	Розовый	$I_f = 0,000088 t^3 - 0,032369 t^2 + 4,16 t + 147$
		$dI_f/dt = 0,000264 t^2 - 0,0647 t + 4,16$
		$d^2I_f/dt^2 = 0,000528 t - 0,0647$ ($t_f=122$ мс)
	Красный	$I_{fl} = 55 \pm 5$

Уравнение в общем виде математической модели для сорта томатов «Лезгинка» будет иметь вид (при этом $t_{\text{сред}} = 123$ мс): $I_f = a_3 t^3 - a_2 t^2 + a_1 t + c$, где, $a_3 = 0,000790$; $a_2 = 0,2994$; $a_1 = 37,40$; $c = 721$ (зеленая стадия), $a_3 = 0,000230$; $a_2 = 0,0842$; $a_1 = 9,92$; $c = 229$ (стадия розовения), $a_3 = 0,000088$; $a_2 = 0,032369$; $a_1 = 4,16$; $c = 147$ (розовая стадия), $I_{\text{фл2к}} = 55 \pm 5$ (красная стадия).

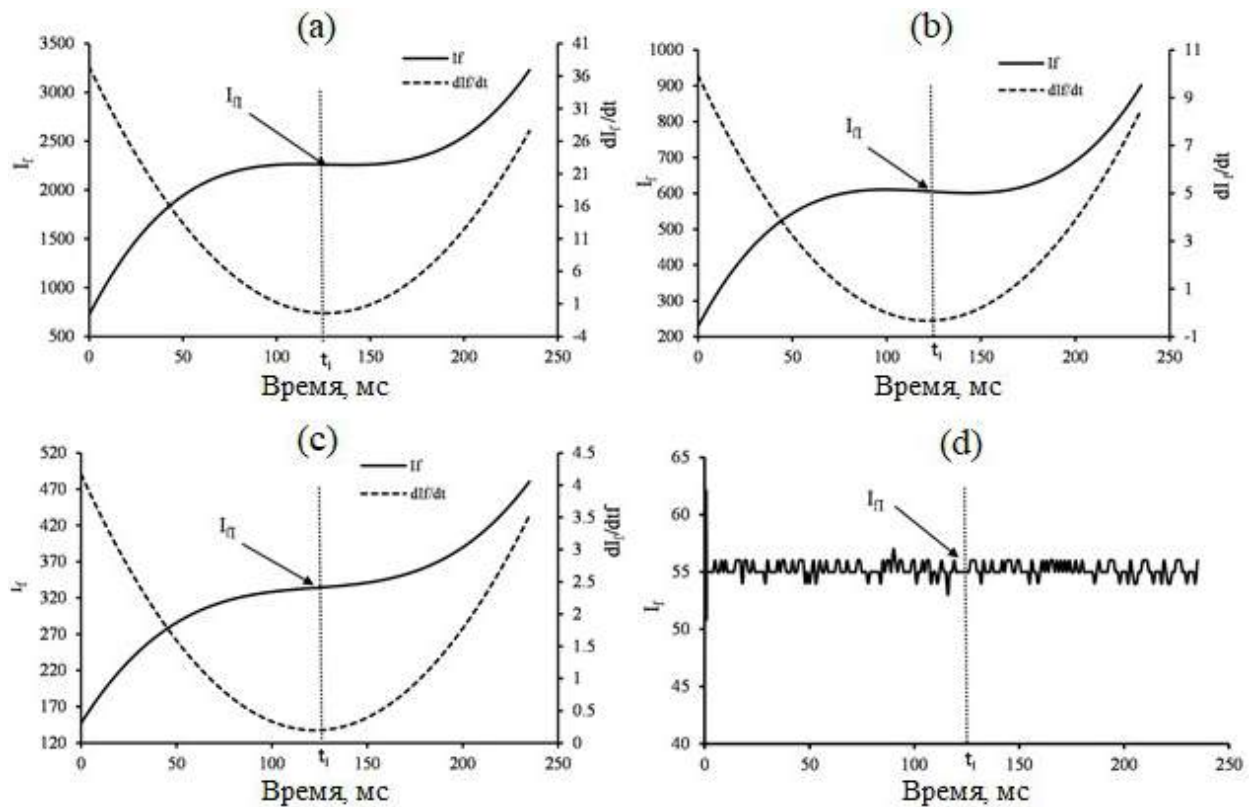


Рисунок 43. - Кривые зависимости интенсивности флуоресценции хлорофилла (FI) и их первые производные (dFI/dt) для томатов сорта «Лезгинка» четырех степеней зрелости: а) зеленая; б) розовеющая; в) розовая; д) красная

Разработка устройства для автоматического контроля степени зрелости томатов. С учетом необходимых частотных диапазонов излучаемого f_u ($f_u = 470 \pm 8$ нм) и генерируемого f_c плодами томата ($f_c = 650...820$ нм) световых потоков, их интенсивности, оптимального времени $t_1 = 123 \pm 5$ для контроля степени зрелости томатов была разработана функциональная схема (рисунок 44) устройства для автоматического контроля степени зрелости томатов.

Устройство работает следующим образом. Микроконтроллер 5 (на базе «Arduino») с установленной в нем программой формирует управляющий сигнал для светодиода 3, который направленно излучает световой поток с длиной волны 470 ± 8 нм на объект исследования 1 (плод томата). Световой поток, генерируемый плодом, но с другой длиной волны ($650...820$ нм) через

светофильтр 2 поступает на фотодиод PD. Сформированный в нем электрический сигнал через каскад усиления и согласования фотодиода ФД с микроконтроллером 4 поступает на микроконтроллер 5 и компьютер 6, в котором, согласно разработанной программе, обрабатывается сигнал светового потока с учетом уровней амплитуды и его спектрального состава, излучаемых и генерируемых от плода томата 1 световых потоков.

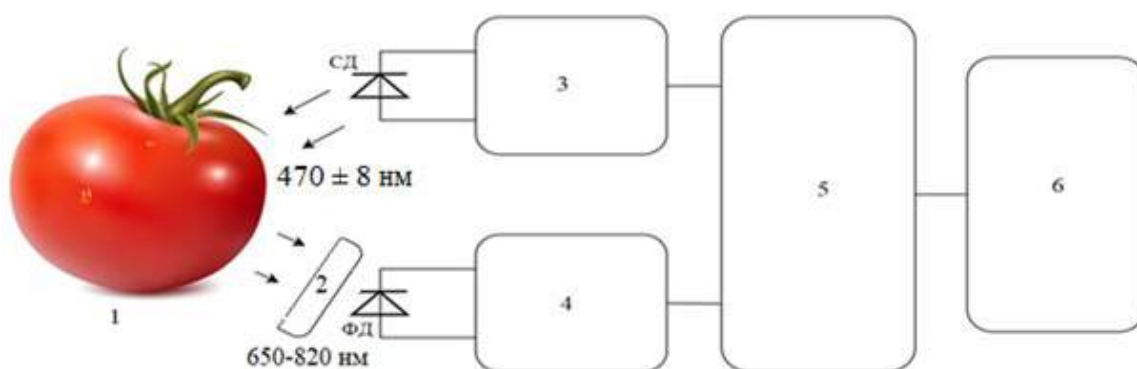


Рисунок 44. - Функциональная схема устройства для контроля степени зрелости томатов: 1 - объект исследования (томат), 2 - светофильтр, 3 - управляемый источник питания светодиода (светодиод, тип ARPL-3W-EPL40), 4 - усилитель для ФД (фотодиод, тип FD-7K), 5 - микроконтроллер, 6 - компьютер.

Для каждого плода томата с помощью разработанного прибора определялась интенсивность флуоресценции хлорофилла I_n . По результатам измерений во всех группах плодов томатов были определены уровни быстрой и медленной флуоресценции хлорофилла [81], после чего были определены средние значения интенсивности флуоресценции хлорофилла и время контроля степени зрелости томатов.

На рисунке 45 представлены графики зависимостей быстрой (по сравнению с медленной) флуоресценции хлорофилла от степени зрелости томатов сорта «Лезгинка». Анализ этих зависимостей показывает, что по мере созревания плодов томатов медленная F_m и быстрая I_n флуоресценции

хлорофилла уменьшаются. Для зеленой (первой степени) зрелости плоды томата характеризуются высокими значениями медленной F_m и быстрой F_i флуоресценций хлорофилла.

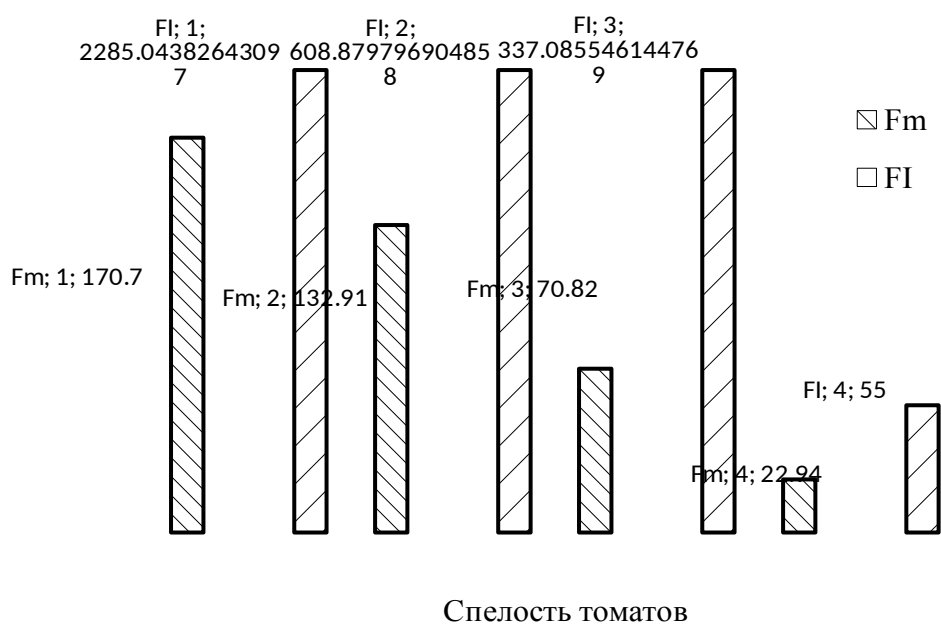


Рисунок 45. - Графики зависимостей медленной F_m и быстрой F_i флуоресценций хлорофилла для сорта «Лезгинка»

Стадия полной зрелости плодов томата характеризуется низкими значениями медленной F_m и быстрой F_i флуоресценций хлорофилла.

Полученные графики (рисунок 45) свидетельствуют о высокой корреляции между зависимостями медленной F_m и быстрой F_i флуоресценции хлорофилла для сорта «Лезгинка» и степенями зрелости томатов.

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований установлено, что использование разработанного (по предложенному способу) устройства для автоматического контроля степени зрелости томатов значительно повышает оперативность, эффективность и надежность такого контроля.