

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА НА РАЗВИТИЕ И УРОЖАЙНОСТЬ ТОМАТОВ В СИСТЕМЕ РАСТЕНИЕ-ПОЧВА-ВОЗДУХ

Игорь Болбот

*Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины
г. Киев, ул. Героев Оборона 15*

Igor Bolbot

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Аннотация. Рассмотрена математическая модель влияния теплового режима на развитие и урожайность томатов в системе растение-почва-воздух. Модель описывает качественные и количественные показатели роста и развития растения, которое находится в тесном взаимодействии с динамикой параметров окружающей среды в теплице.

Ключевые слова: математическая модель, тепловой режим, урожайность, томат, тепличное хозяйство.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Практический опыт эксплуатации автоматических систем управления в тепличных хозяйствах позволяет сделать вывод, что тепловой режим в теплице изменяется по случайному алгоритму, что затрудняет обеспечение ее оптимального значения [12, 17].

Эта особенность позволяет осуществить одноразовую настройку оборудования на постоянный оптимальный режим.

Кроме того, параметры таких систем изменяются во времени, что обусловлено изменением параметров объекта, а потому появилась актуальной проблема в разработке новой компьютерно-интегрированной системы управления технологическим процессом в промышленной теплице, которая будет учитывать влияние теплового режима на развитие и урожайность растения.

Автоматические системы управления такого типа в первую очередь должны принимать решения, основываясь на математических расчетах, которые бы учитывали влияние температуры воздуха на урожайность растения [13, 15].

Такой подход позволит установить, какую именно урожайность можем получить при соблюдении определенного уровня температуры воздуха в теплице.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Проанализированы источники о влиянии факторов окружающей среды на рост и урожайность томатов. Методика исследования основывается на изучении тепломассообменных процессов, протекающих в объекте закрытого грунта и влияют на показатели роста и развития растения.

Из всего разнообразия факторов, влияющих на урожайность, наиболее существенными являются тепломассообменные процессы. Анализ литературных источников [2, 4] свидетельствует о том, что все количество факторов, влияющих на растение можно свести к свету, теплу, воде, питательных веществ и углекислоты. Все эти факторы растение впитывает из окружающей среды, перерабатывает, частично усваивает и затем формируется урожай. Вполне естественно, чтобы весь этот поток энергии и массы, поступающей в растения, усваивался растением в оптимальных количествах. Для растения одинаково плохи и очень малые и очень большие порции воды, питательных элементов, тепла и т. д. Учитываем, что каждый из этих факторов является достаточно сложным и многокомпонентным, а одновременное их сочетание приводит к очень сложной системе, обуславливает формирование урожая в целом [5, 19].

Возьмем, световой фактор, рассмотрим его, можем назвать ряд величин, характеризующих световую энергию: освещенность, продолжительность солнечного света, суммарную радиацию и т.д. Рассмотрев тепловой фактор, можем перечислить ряд его характеристик, таких, как температура, количество тепла, теплофизические свойства и т. д. Причем каждый из этих величин, как в области света, так и в области тепла, можно отнести к самому растению, к почве и к воз-

духу, а также в различных сочетаний этих объектов.

В качестве единственного и наиболее влиятельного показателя возьмем некоторую особенность влияния факторов на развитие растения и урожайность. Рассмотрим влияние температуры воздуха, его критического значения, ниже или выше которого растение перестает нормально развиваться или даже погибает [3]. Будучи, безусловно существенным показателем холодостойкости или засухоустойчивости, критические температуры ни в коей мере не могут отразить всей сложности тепловых процессов в объекте закрытого грунта, которые охватывают теплообмен между растением и воздухом, растением и почвой, почвой и воздухом. Сумма температур за вегетационный период или иной отрезок времени, в течение которого протекают ответственные этапы развития культуры, представляет собой лишь итоговое значение, в которую входит множество тепловых явлений, имеющих место в системе растение-почва-воздух.

Для оценки количественной связи теплообеспечения системы растение-почва-воздух нужно исследовать тепловой баланс [6, 7]. Составим тепловой баланс в форме, которая позволит одним параметром характеризовать важнейшую сторону обменных процессов и притом отнести его ко всей системе в целом. Таким параметром может стать коэффициент обеспеченности урожайности.

Рассмотрим влияние температурного режима на урожайность томата, которая является одной из распространенных культур, выращиваемых в закрытом грунте. Одним из основных условий получения раннего и хорошего урожая томата является поддержание оптимального для растения температурного режима. В разные периоды роста и развития растение требует определенной температуры воздуха и почвы [9].

Необходимая температура для прорастания семян томата 24..26 °С. После появления первых бутонов на растении температуру днем поднимают до 17..18 °С, а ночью снижают до 16 °С. Температура воздуха и почвы для томата в значительной степени определяется освещенностью и содержанием в воздухе углекислого газа. В солнечную погоду летом 22..25 °С, в пасмурный день 20..22 °С,

ночью 16..18 °С. Ночную температуру всегда поддерживают ниже дневной. Особенно это важно в период роста плодов. Разница должна составлять не менее 5 °С. Это необходимо для того, чтобы ассимилированные растением за день вещества интенсивно не тратились ночью на дыхание [11].

При постоянной температуре 15 °С рост останавливается, а если температура будет меньше 10 °С, то рост полностью прекращается. Растение начинает быстро отмирать, если температура приближается к 0,5..0,8 °С. За несколько часов при такой температуре может произойти полное отмирание растения. При повышении температуры более 35 °С фотосинтез замедляется. При высокой температуре также нарушается опыление [16].

Температура почвы оказывает значительное влияние на все процессы жизнедеятельности растения. Если она ниже 14 °С, в корневой системе прекращается синтез веществ, необходимых для роста и развития бутонов. У томатов в отношении температуры прослеживается определенная закономерность. Чем она выше, тем быстрее наступает созревание, менее разветвленное соцветие, мелкие плоды и имеют меньше камер, длиннее междоузлие и т.д., что в конечном итоге приводит к раннему, но низкому общему урожаю. Напротив, при низких температурах получают более поздний, но большой урожай. Поэтому оптимальный температурный режим почвы и воздуха необходимо определять для конкретных условий выращивания растения [10].

Свет - это один из основных факторов, лимитирующих рост и развитие растений. Томат очень требователен к освещенности. Минимальная освещенность, при которой еще возможен вегетативный рост растения 2..3 тыс. лк. При освещенности ниже этого порога распад ассимилянтов на дыхание превысит их приход от фотосинтеза. При достаточном наличии солнечных лучей ускоряется развитие растений: они раньше цветут и плодоносят. При пасмурной, даже теплой погоде, цветение задерживается, и плодоношение наступает позже. При солнечном облученные 8 МДж (2,22 кВт·ч) в сутки и обычном содержании в воздухе CO₂ (0,03%), урожайности томатов (у) колеблется

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА НА РАЗВИТИЕ И УРОЖАЙНОСТЬ ТОМАТОВ В СИСТЕМЕ РАСТЕНИЕ-ПОЧВА-ВОЗДУХ

в пределах 40..150 грамм с одного куста в сутки и зависит от температуры воздуха в теплице (Θ), что представлено в таблице 1 [20], температура для фотосинтеза томата должна находиться в пределах 20..25 °С.

Таблица 1. Влияние температуры воздуха на урожайность томатов

Table 1. Effect of temperature on yield of tomatoes

Температура воздуха, (Θ), °С	10	11,5	13	14,5	16	17,5	19
Урожайность томатов, (у), грам.	40	61	81	100	114	125	134
Температура воздуха, (Θ), °С	20,5	22	23,5	25	26,5	28	
Урожайность томатов, (у), грам.	141	146	150	151	150	147	

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель исследований - на основе комбинированной физико-статистической схемы оценки и анализа явлений, протекающих в системе растение-почва-воздух, построить математическую модель влияния теплового режима на развитие растения и урожайность томатов.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Оценка урожайности сельскохозяйственной культуры с заданными генетическими качествами по обеспечению теплом сводится к решению уравнения вида:

$$Y = f(p), \quad (1)$$

где: p – обеспечение теплом.

Величина p представляет собой дробь, в знаменателе которой значится общее поступление тепла в теплицу, а в числителе - неосвоенная часть тепла которая остается в системе, используется ею и идет на формирование температуры воздуха, определяет

характер и состояние сельскохозяйственной культуры на каждой стадии ее развития. Структура величины p такая, что она изменяется в пределах от нуля до единицы. Если она равна нулю, то температура совсем не усваивается и не используется в теплице, и наоборот, если она приближается к единице, то имеет место условие полной аккумуляции данного фактора, который поступает в теплицу. Рассмотрим влияние температурного режима на развитие растения подробнее, для этого определим теплообеспечение растений:

$$p = \frac{\alpha}{\gamma} = \frac{Q_c + Q_d + Q_{co} - (LU + P + Q_{вип} + Q_{вид})}{Q_c + Q_d + Q_{co}}, \quad (2)$$

где: γ - весь теплоприток к системе растение-почва-воздух, который состоит из суммарной коротковолновой радиации Q_c и длинноволнового излучения атмосферы Q_d , поступления тепла от системы отопления Q_{co} ; α - составляет все тепло, которое поглощается почвой и растением, и промежуточным слоем воздуха, который заполнил промежутки между растениями, и состоит из LU - тепло, которое потрачено на суммарное испарение от растения, P - турбулентный поток тепла от поверхности, за которую принят уровень крон растений, $Q_{вип}$ и $Q_{вид}$ - радиационные потоки, обусловленные излучением и отражением той же поверхности.

Рассмотрим подробнее критерий p для этого введем понятие: теплоаккумуляции в слое произрастания растений, которая представляет собой величину $(c_s \Delta T)_s$, где c_s - теплоемкость воздушного слоя между растениями, ΔT - изменение температуры за период наблюдений; $(c_p^p \Delta T)_p$ - теплоаккумуляция самих растений, так как c_p^p - теплоемкость растительной массы, а ΔT в этой комбинации $(c_p^p \Delta T)_p$ представляет собой изменение температуры растений (средняя температура листьев разного яруса, стебля; $\left. \frac{\lambda \Delta T}{\Delta x} \right|_{x=a}$

- поток тепла в почве начиная с глубины $x=a$; λ - коэффициент теплопроводности грунта в слое $(a-\infty)$. Слой почвы глубиной $(0-a)$, в котором имеют место суточные колебания температуры и появляются вертикальные перепады, назовем его активным слоем по-

чвы. Кроме того $(c_n \Delta T)_n$ означает изменение содержания теплоты в верхнем слое корня ($\theta-a$), который содержит почву и корни растений.

Таким образом, числитель критерия p содержит сумму:

$$(c_6 \Delta T)_6 + (c_p^p \Delta T)_p + \frac{\lambda \Delta T}{\Delta x} \Big|_{x=a} + (c_n \Delta T)_n,$$

которая представляет собой при вычитании из всего поступления тепла $Q_c^{(H)} + Q_\theta^{(H)} + Q_{Co}$ величину, которая аккумулируется нашей системой (растение-почва-воздух) энергии. Знаменатель состоит из поступления тепла в систему от различных источников, составленный из суммарной коротковолновой и длинноволновой $Q_c^{(H)} + Q_\theta^{(H)}$ радиации, которая поступающей из атмосферы и системы отопления Q_{Co} до верхнего уровня растений.

Итак:

$$p = \frac{(c_p^p \Delta T)_p + (c_6 \Delta T)_6 + \frac{\lambda \Delta T}{\Delta x} \Big|_{x=a} + (c_n \Delta T)_n}{Q_c^{(H)} + Q_\theta^{(H)} + Q_{Co}} \quad (3)$$

Важно отметить, что все величины, которые влияют на теплообеспечение растений p измеряются существующими техническими средствами автоматики и входят в состав систем управления микроклиматом. Никаких вспомогательных неизвестных эмпирических индексов, констант, параметров не требуется для нахождения критерия обеспеченности урожая.

Рассматривая понятие урожай Y , нельзя упускать из виду принцип лимитирующих факторов, поскольку он облегчает реализацию физического или комбинированного метода исследования выращивания растения. Исходя из конкретных обстоятельств, влияющих на урожайность, способа выращивания, вида растения, фитоклиматического воздействия, необходимо провести оценку соотношения значимости главных и второстепенных факторов урожайности [1, 8].

По мере увеличения тепла, происходит рост урожая, но до определенного предела, после чего всякий рост температурного режима уже не дает никакого увеличения урожая (в количественном, качественном, стоимостном выражениях). Более того, состоится угасание урожая. Проведем исследование

[14, 18] влияния показателей температуры воздуха на урожайность томата, для этого используем полином второй степени:

$$Y(\Theta) = k_0 + k_1 \cdot \Theta + k_2 \cdot \Theta^2, \quad (4)$$

где: k_1, k_2, k_3 - коэффициенты полинома, Θ - значение температуры воздуха в теплице.

Коэффициенты полинома k_1, k_2, k_3 подлежат определению на основе обработки статистических данных, таким образом, чтобы сумма квадратов разности значений, полученные экспериментальным путем и значений функции должна быть наименьшей:

$$S_m = \sum_{i=1}^n [Y(\Theta_i) - y_i]^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

Построим разницу значений S_m :

$$S_m = \sum_{i=1}^n [(k_0 + k_1 \cdot \Theta + k_2 \cdot \Theta^2) - y_i]^2 \quad (6)$$

Определим частные производные и приравняем их к нулю, получим систему для определения неизвестных коэффициентов полинома k_1, k_2, k_3 :

$$\begin{cases} \frac{\partial S_m}{\partial k_0} = 2 \sum_{i=1}^n [(k_0 + k_1 \cdot \Theta + k_2 \cdot \Theta^2) - y_i] = 0, \\ \frac{\partial S_m}{\partial k_1} = 2 \sum_{i=1}^n [(k_0 + k_1 \cdot \Theta + k_2 \cdot \Theta^2) - y_i] \cdot \Theta = 0, \\ \frac{\partial S_m}{\partial k_2} = 2 \sum_{i=1}^n [(k_0 + k_1 \cdot \Theta + k_2 \cdot \Theta^2) - y_i] \cdot \Theta^2 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Получим систему уравнений:

$$\begin{cases} k_2 \sum_{i=1}^n \Theta_i^4 + k_1 \sum_{i=1}^n \Theta_i^3 + k_0 \sum_{i=1}^n \Theta_i^2 = \sum_{i=1}^n \Theta_i^2 \cdot y_i, \\ k_2 \sum_{i=1}^n \Theta_i^3 + k_1 \sum_{i=1}^n \Theta_i^2 + k_0 \sum_{i=1}^n \Theta_i = \sum_{i=1}^n \Theta_i \cdot y_i, \\ k_2 \sum_{i=1}^n \Theta_i^2 + k_1 \sum_{i=1}^n \Theta_i + n \cdot k_0 = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases} \quad (8)$$

Полученная система уравнений позволит нам найти коэффициенты полинома $k_1 = -158.38, k_2 = 24.9771, k_3 = -0.5037$, их нужно постоянно корректировать в связи с изменением уровня освещенности. Полученные показатели полинома подставим в уравнение (4) и построим зависимость влияния температуры воздуха на урожайность томата (рис. 1).

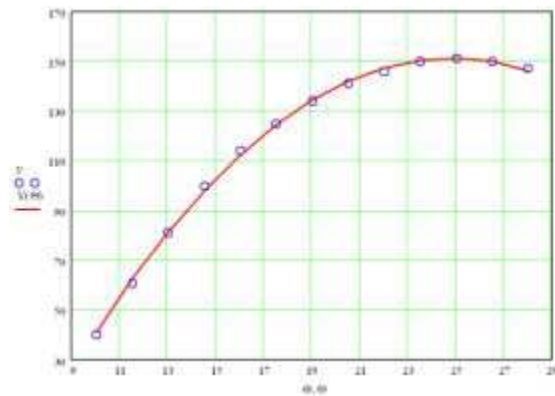


Рис. 1. Зависимость урожайности томатов от температуры воздуха в теплице.

ooo - опытные значения; ----- результаты аппроксимации по выражению (4)

Fig. 1. Dependence of the yield of tomatoes on the air temperature in the greenhouse.

ooo - research value; ----- – results of approximation by the expression (4)

Как уже отмечалось ранее, при изменении интенсивности солнечного облучения будет изменяться и урожайность, поэтому следует рассматривать урожайность томатов в системе растение-почва-воздух учитывая и интенсивность солнечного облучения.

В результате всей этой комбинированной физико-статистической схемы оценки и анализа явлений, которые исследуем, нужно выяснить, каким должен быть уровень теплообеспечения, чтобы получить оптимальную величину урожая Y учитывая экономические показатели.

ВЫВОДЫ

Установлено, что наиболее значительным фактором, который влияет на развитие и урожайность томатов является тепловой режим. Предложена математическая модель, влияния теплового режима на развитие и урожайность томатов в системе растение-почва-воздух, которая позволяет установить закономерность формирования урожая от изменения температуры воздуха, при увеличении тепла, происходит рост урожая, но до определенного предела, после чего всякий рост температурного режима уже не дает никакого увеличения урожая, как в количественном так и в качественном выражении, более того, происходит его угасание.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Aleshin V.D. 1980. Prikladnaja model produktivnosti pocesov. / Nauchno-tehnicheskij bjulleten po agrofizike, - Leningrad. № 42. - 45 - 52.
2. Aliev E. A. 1985. Vyiraschivanie ovoschej v gidroponnyh teplitsah. - M.: Urozhaj, - 160.
3. Alpatev A. B. 1976. Pomidory. - M. Moskovskij rabochij. - 284.
4. Brizgalova V. A. 1995. Ovoshevodstvo zaschischennogo grunta. - M.: Koloc. - 352.
5. Globusa A.M. 1968. Fizika sredy obitanija ractenij: Perev. s angl. - L.: Gidrometeoizdat. - 304.
6. Davitaja F.F. 1964. Prognoz obespechnosti teplom i nekotorye problemy sezonogo razvitija prirody. - M.: Gidrometeoizdat. - 131.
7. Draganov B. H., Kuznetsov V.A., Rudobashta C. P.. 1986. Teplotehnika i primenenie teploty v scelskom hozjajstve. - M.: API. - 463.
8. Juravleva V.V. 2008. Matematicheskie modeli protsessov reguljatsii v fiziologii ractenij // Izvestija, - Barnaul. Tom 1 - №57. - 43 - 57.
9. Kurtener D.A., Uckov I.B.. 1982. Klimaticheskie faktory i teplovoj rezhym v otkrytom i zaschischennom grunte. - L.: Gidrometeoizdat. - 235.
10. Lihatskij V. I. 1996. Ovochivnitstvo / V. I. Lihatskij, Ju. E. Burgart, V. D. Vacjanovich. Za red. V.I. Lihatskogo. - K.: Urozhaj. - 359.
11. Maksimov N.A. 1958. Kratkij kurs fiziologii ractenij. - M.: "Gosizdat s.h.literatury", - 562.
12. Opryshko A., Pasichnik N. 2012. Robototehicheskie sistemy dlja gorodskih teplichnyh hozjastv // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol. 14 - №3. - 222-225.
13. Poluektov R.A., Cmoljar E.I., Terleev V.V., Topaj A.G.. 2006. Modeli produkcionnogo protsessa selkohozjajstvennyh kultur - SPb.: - 290.
14. Sovetov B. Ja., Jakovlev S. A. 1998. Modelirovanie cictem. - M.: Vysshaja shkola, - 260.
15. Tornli Dj.G.M. 1982. Matematicheskie modeli v fiziologii ractenij / per. s angl. D.M. Grodzinskogo. - K.: Nauk. dumka, - 312.
16. Shishko G. G. 1993. Teplitsy i teplichnyie hozjajstva: Spravochnik / G.G. Shishko i.dr.; red. G.G. Shishko. - K.: Urozhaj, 424.

17. Kischak I., Havrysh V., Kulik A. 2011. Component of support of agricultural enterprises industrial hardware // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol. 13A. 153-159.
18. Koshkin D. 2011. The dynamic model of the greenhouse environment control system // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol. 13A. 189-195.
19. Stanghellini C. 1987. Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management: Ph. D. Dissertation. - Wageningen: Agricultural University, - 150.
20. Uzun Sezgin. 2007. The Effect of Temperature and Mean Cumulative Daily Light Intensity on Fruiting Behavior of Greenhouse-grown Tomato: [Elektron. recurc]. // The University of Ondokuz May's, Faculty of Agriculture, Department of Horticulture. - 132(4). 459-466. - Rejim doctupu: do jorn.: <http://journal.ashspublications.org/content/132/4/459.full.Pdf>

MATHEMATICAL MODEL INFLUENCE OF THERMAL REGIME ON GROWTH

Summary. The mathematical model impact of thermal regime on the development and yield of tomato in the system soil-plant-air. The model describes the qualitative and quantitative growth and development of plants that are in close interaction with the dynamic parameters of the environment in the greenhouse.

Key words: Mathematical model, thermal regime, crop, tomato, greenhouse farming.