

DOI

УДК 631.544.43:631.544.7

ОПЫТНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ТОЧЕК ТЕПЛИЦЫ

П.А. Смирнов, А.В. Тихонова

Реферат. В закрытом грунте основным накопителем тепла выступает почва, и рациональное его использование – весьма актуальная задача, которая может быть успешно решена только при полной автоматизации передачи не достающей тепловой энергии. Для этого в теплице достаточно определить следующие параметры: максимальные дневные температуры воздуха и почвы внутри и снаружи, распределение температурных максимумов в течение суток, взаимное расположение и время уравнивания температур воздушного и почвенного полупространства в теплице утром и вечером или точки реверса теплового потока. Температурные параметры определяли экспериментальным путем непрерывно с 10 по 20 апреля 2021 г., затем аппроксимировали в полиномиальные уравнения третьего порядка с достоверностью 0,92...0,96 и по ним проводили аналитические исследования. Максимумы дневных температур рассчитывали приравниванием первых производных нулю и решением квадратного уравнения. Суточные точки реверса тепла к почве и от почвы во времени определяли решением системы уравнений изменения температуры почвы и воздушного полупространства внутри теплицы (точки пересечения графиков). Аналогично из системы уравнений определяли критические точки во времени перехода температуры воздушного полупространства внутри теплицы в отрицательную зону ($t=0$ °C). По такой же методике проводили расчет оптимальных температур в теплице или моментов во времени включения и выключения источника тепла, для чего в систему уравнений вводили $t_{\text{отт}}$ для каждого возделываемого растения. Предложена дифференцированная система отопления теплицы по расходу тепла почвы, заключающаяся в обеспечении минимальной подачи дополнительного тепла во время дневного оптимума и максимальной в точках ночного минимума.

Ключевые слова: термодинамика теплицы, автоматическое управление теплицы, максимум температуры, реверс тепла, система уравнений, квадратное уравнение, кубическое уравнение.

Введение. Рациональное использование тепловой энергии теплицы – актуальная проблема растениеводства защищенного грунта, причем независимо от подотрасли: овощеводства, цветоводства, выращивания лекарственных и экзотических культур [1]. В этом направлении проводятся исследования как по отдельным культурам [2, 3], так и по отдельным временным промежуткам [3]. Постановка опыта, получение данных, разработка методов расчета и аналитическое определение числовых параметров критических температур – важнейшие задачи прикладной термодинамики теплиц как в России [4, 5], так и за рубежом [6, 7]. Например, для автоматического управления системами вентиляции в жаркое время и отопления в холодное величины этих показателей выступают решающими при правильной расстановке и корректировке управляющих факторов [4, 7].

Цель исследования – создание базы данных для автоматического регулирования температуры в теплице на основе изучения температурных процессов в среде и почве вне и внутри теплицы.

Условия, материалы и методы. Основным аккумулятором тепла внутри теплицы выступает почва. Поэтому для автоматизации ее теплового обеспечения достаточно определить следующие параметры во времени (задачи исследования) [1, 8]:

максимальные дневные температуры воздуха и почвы вне и внутри теплицы;

распределение максимумов температуры воздуха и почвы вне и внутри теплицы в течение суток и взаимное расположение;

точки уравнивания температур воздушного $t_{\text{в}}$ и почвенного $t_{\text{п}}$ полупространства ($t_{\text{в}}=t_{\text{п}}$) в теплице утром и вечером – точки реверса теплового потока;

оптимальный тепловой диапазон для каждого растения.

Для реализации перечисленных задач в апреле–мае 2021 г. были выполнены экспериментальные работы в двух традиционных теплицах с поликарбонатным покрытием [9, 10]. Место проведения опыта – личные подсобные хозяйства Янышского поселения Чебоксарского района Чувашской республики. Измерение температуры проводили прибором Digitalmultimeter DT700C с набором термопар, предварительно проверенных на одинаковые показания. В качестве контрольных измерителей использовали спиртовой и ртутный термометры. Две термопары постоянно располагались вне и внутри теплицы. Остальными (5 шт.) термопарами измеряли температуру почвы. Аналогичную методику использовали В.И. Максимов и др. [4].

Полученные диаграммы аппроксимированы в функции температуры среды от времени измерения с использованием программы «Excel 97-2003» с достоверностью не менее 0,90. Далее по полученным уравнениям проводили исследования с использованием дифференциального исчисления и систем уравнений с переводом в квадратные и кубические уравнения.

Добрачев Ю.П., Федотова Е.В. [5] в аналогичных исследованиях проводили измерение температуры каждые три часа, мы для повышения точности делали это каждые два часа

с перекрытием 10 мин из-за установления постоянного показания прибора Digitalmultimeter DT700C и спиртового термометра. Предварительные исследования с 1 по 10 апреля 2021 г. показали, что температура внутри теплицы различна по высоте измерения. Например, в 9.00 часов 08.04.21 г. на поверхности почвы она составила +9 °С, на высоте 0,9 м от поверхности почвы – +10 °С, 1,40 м и выше – +11°С. Поэтому все последующие измерения температуры внутри теплицы проводили на высоте её среднего значения, то есть 0,9...1,0 м, а вне теплицы – на расстоянии не менее 1,0 м от отражающих строений и поверхности почвы.

Также в ходе предварительных исследований было определено место измерения температуры почвы – посередине теплицы. Поскольку теплица в пространстве стационарна, а солнечная радиация изменяется по мере хода солнца в течение светлого периода суток,

на наш взгляд, это оптимальная точка. Измерения проводили тремя термопарами, расположенными в ряд по оси симметрии вдоль теплицы. За результат принимали одинаковое показание двух термопар. Почва к моменту основных измерений была в естественном состоянии, то есть после осенней перекопки за зиму осажденная и уплотненная.

Подбор и наладку приборов, определение точек измерения проводили согласно ранее разработанной методике [11], к изучению температурного режима теплиц (рис. 1) приступили в октябре 2020 г., а основные исследования проведены в апреле 2021 г.

Результаты и обсуждение. В ходе предварительных опытов установлено [12], что нагрев воздуха в теплице в солнечные дни выше, чем в окружающей среде почти в 2 раза. При этом в роли аккумулятора тепла при сушке сена или других продуктов выступают сами продукты внутри теплицы и почва.

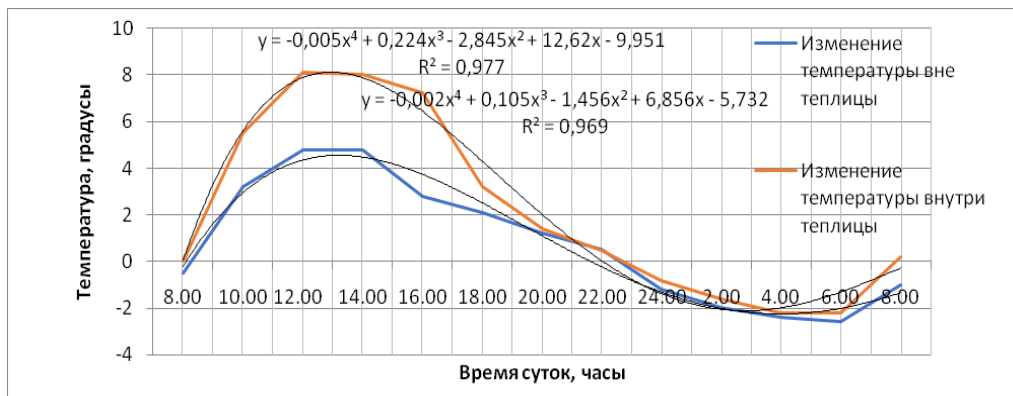


Рис. 1 – Динамика суточного температурного режима теплицы в облачный осенний день [8]

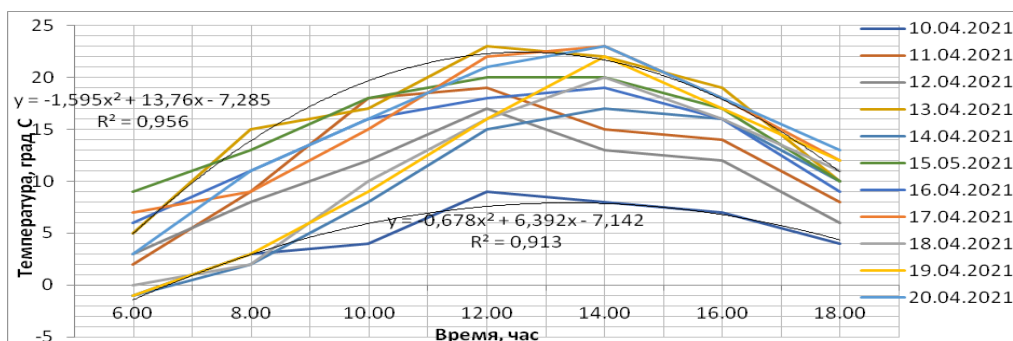
Графики предварительного исследования с достаточной достоверностью аппроксимации (0,98 и 0,97) описывают полиномиальные уравнения не ниже четвертого порядка [13]. Это создает трудности при дальнейших расчетах.

Поэтому при проведении основных исследований было принято решение об измерении и фиксации только дневной температуры и уменьшении тем самым порядка полиномиального уравнения (рис. 2).

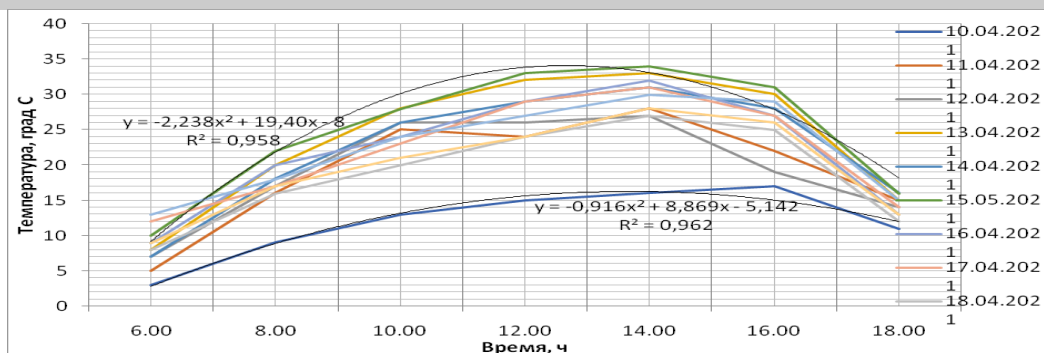
Температура поверхности почвы не всегда достоверно отражает её истинное значение из-за наличия таких возмущающих факторов, как неравномерная конвекция внутри теплицы,

временное затенение участка каркасом теплицы, особенно вблизи стен или других препятствий, и др. В ходе предварительных исследований установлено, что наиболее достоверная информация по температуре почвы достигается при ее измерении на глубине 5,0 см, на которой и размещали датчики температуры (термопары).

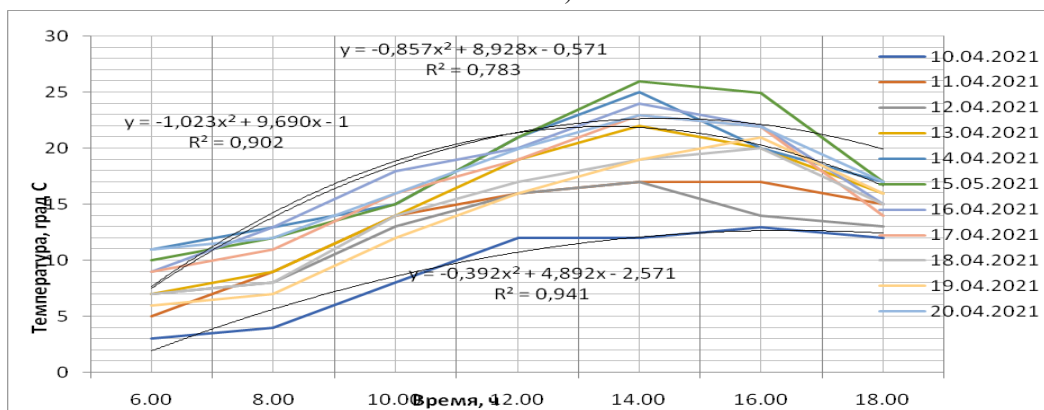
Анализ графиков, построенных по данным, полученным в ходе экспериментальных измерений температуры (рис. 2), свидетельствует, что наиболее стабильна температура внутреннего воздушного полупространства теплицы и почвы. Диаграммы воздушного полупространства вне теплицы имеют больший разброс.



а)



б)



в)

Рис. 2 – Графики изменения температуры окружающего воздуха (а), внутри теплицы (б) и почвы на глубине 5 см в теплице (в)

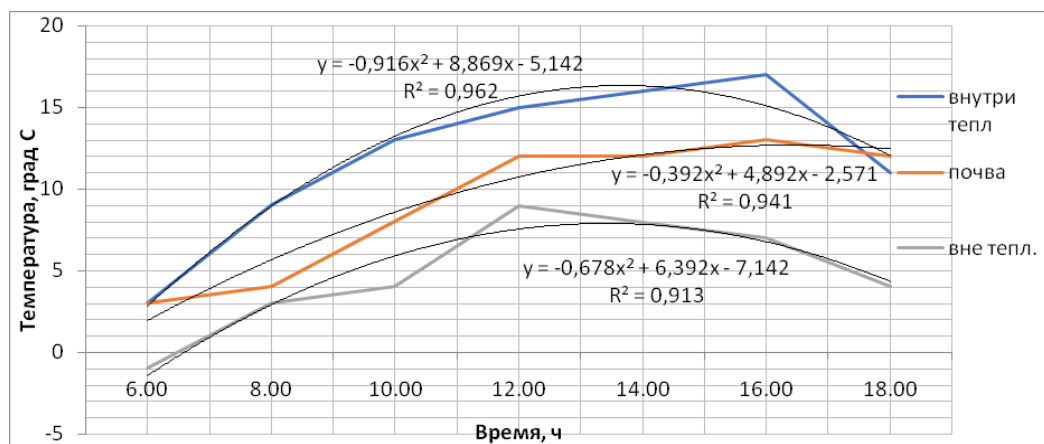


Рис. 3 – Графики изменения температуры воздушного полупространства внутри теплицы, почвы на глубине 5 см в теплице и окружающей среды вне теплицы 10.04.2021 г.

Время точки перегиба (максимальная температура) графиков находили по первой производной, приравняв её к нулю [13]. Например, для диаграммы от 10.04.21 г. (рис. 3) для воздушного полупространства внутри теплицы:

$$y' = (-0,916x^2 + 8,869x - 5,142)' = 0;$$

$$-1,832x + 8,866 = 0;$$

$x = 4,87$ по аргументу, а при переводе в часы и минуты $t = 13$ ч 44,4 мин.

Далее аналогично находили время остальных точек перегиба. Для температуры почвы на глубине 5 см:

$$y' = (-0,392x^2 + 4,892x - 2,571)' = 0;$$

$$-0,784x + 4,892 = 0;$$

$x = 6,2$ по аргументу, а при переводе в часы и минуты $t = 16$ ч 24 мин.

Время максимума для наружного воздуха:

$$y' = (-0,678x^2 + 6,392x - 7,142)' = 0;$$

$$-1,356x + 6,392 = 0;$$

$x = 4,714$ по аргументу, а при переводе в часы и минуты $t = 13$ ч 25,7 мин.

Системы уравнений динамики температур внутри теплицы и почвы на глубине 5 позволяют определить точное время

реверса потока тепла от почвы в воздушное полупространство и обратно [12, 13]:

$$\begin{cases} y = -0,916x^2 + 8,869x - 5,142; \\ y = -0,392x^2 + 4,892x - 2,571. \end{cases}$$

Суммированием системы уравнений получим квадратное уравнение:

$$-0,524 x^2 + 3,977x - 2,571=0.$$

Корни квадратного уравнения:

$$x_1=6,876, \text{ соответственно } t_1=17 \text{ ч } 45 \text{ мин}; \\ x_2=0,714 \text{ или } t_2=5 \text{ ч } 16 \text{ мин}.$$

Таким образом, при $t_1=17$ ч 45 мин начинается реверс тепла из почвы в воздушное полупространство теплицы, при $t_2=5$ ч 16 мин происходит изменение

направления потока тепла обратно в почву.

Однако, на наш взгляд, более важным будет предельное значение температуры ($t=0^\circ\text{C}$ или $y=0$), при котором необходимо включать вечером или выключать утром отопление теплицы. Для этого решаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} y = -0,916x^2 + 8,869x - 5,142; \\ y = 0. \end{cases}$$

Корни уравнения $x_1=-0,54$ ($t_1=5$ ч 26 мин) $x_2=10,23$ ($t_2=24$ ч 28 мин). При этом точку $x_2(t_2)$ перехода в отрицательные температуры внутреннего помещения теплицы следует считать приближенной, поскольку ночная динамика тепловых потоков иная, что было отмечено в ходе исследования предыдущего года (см. рис. 1).

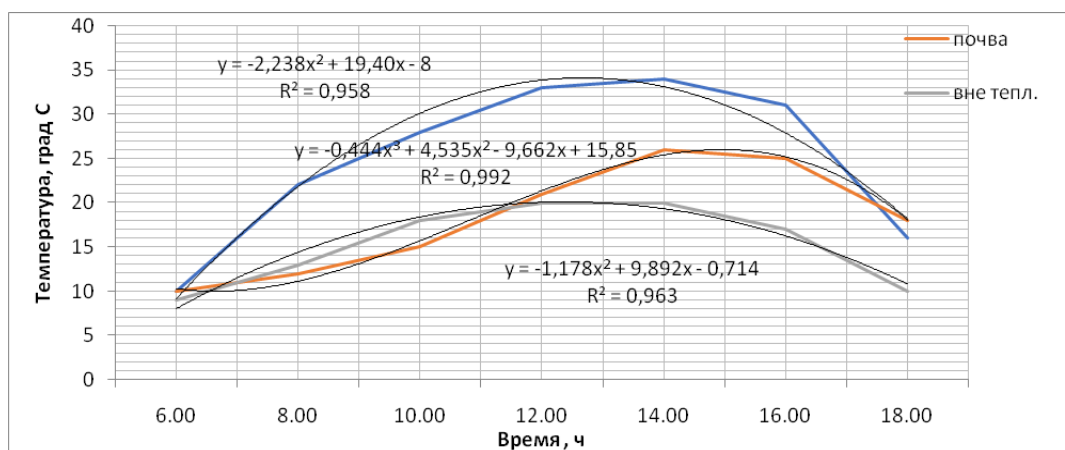


Рис. 4 – Графики изменения температуры воздушного полупространства внутри теплицы, почвы на глубине 5 см в теплице и окружающей среды вне теплицы (15.04.2021 г.)

Аналогичное решение по точкам перегиба для диаграмм от 15.04.21 г. время максимальной температуры воздушного полупространства внутри теплицы:

$$y' = (-2,238x^2 + 19,40x - 8)' = 0;$$

$x=4,334$ по аргументу, а при переводе в часы и минуты $t=12$ ч 40 мин.

Время наибольшей температуры почвы в теплице получено из уравнения:

$$y' = (-0,444x^3 + 4,535x^2 - 9,662x + 15,85)' = 0; \\ -1,416x^2 + 9,618x - 10,43=0,$$

$x=5,43$ по аргументу, а при переводе в часы и минуты $t=14$ ч 51,6 мин.

Время максимальной температуры окружающей среды вне теплицы определили по производной:

$$y' = (-1,178x^2 + 9,892x - 0,714)' = 0; \\ x=4,199 \text{ по аргументу, а при переводе в часы и минуты } t=12 \text{ ч } 24 \text{ мин}.$$

Точки пересечения диаграмм изменения температуры почвы и воздушного полупространства определяли из системы уравнений:

$$\begin{cases} y = -2,238x^2 + 19,40x - 8; \\ y = -0,444x^3 + 4,535x^2 - 9,662x + 15,85. \end{cases}$$

Общее кубическое уравнение:

$$-0,444 x^3 + 6,773 x^2 - 29,062x + 23,85=0.$$

Действительные корни кубического уравнения: $x_1=7,0$ или $t_1=18$ ч 00 мин, $x_2=1,07$ или $t_2=6$ ч 09 мин.

Система уравнений, выражающая переход в отрицательные температуры внутри теплицы ($t_{\text{вп}}=0^\circ\text{C}$):

$$\begin{cases} y = -2,238x^2 + 19,40x - 8; \\ y = 0. \end{cases}$$

Корни уравнения: $x_1=-0,394$ ($t_1=5$ ч 12 мин) $x_2=9,06$ ($t_2=22$ ч 07 мин).

Аналогично получены числовые значения указанных точек для исследований, проведенных 20.04.2021 г. (рис.5).

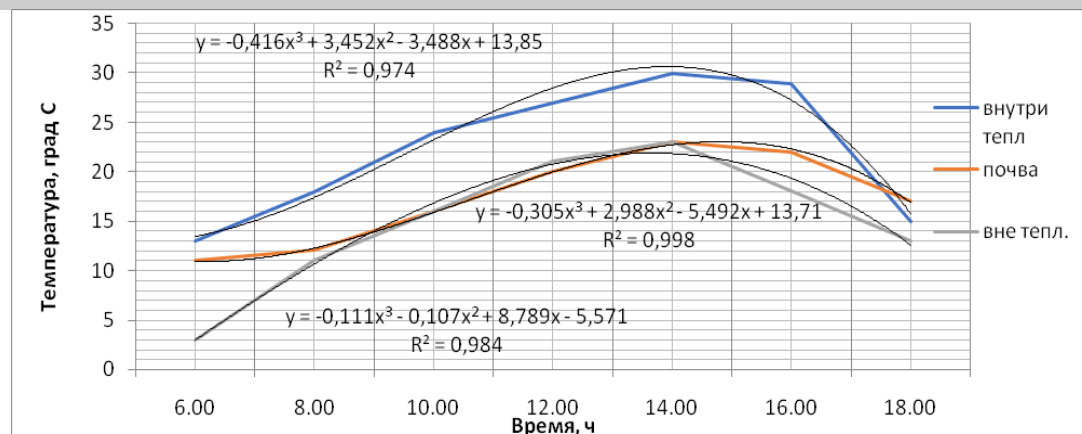


Рис. 5 – Графики изменения температуры воздушного полупространства внутри теплицы, почвы на глубине 5 см в теплице и температуры окружающего воздуха вне теплицы (20.04.2021 г.)

Решение по точкам перегиба для диаграмм от 20.04.21 г следующее. Время максимальных температур воздушного полупространства внутри теплицы: $x=4,97$ и $t=13$ ч 56 мин; почвы внутри теплицы: $x=5,425$ и $t=14$ ч 51 мин; окружающего воздуха вне теплицы: $x=4,826$ и $t=13$ ч 31 мин.

Далее решением системы кубических уравнений температур воздушного полупространства и почвы внутри теплицы получаем точки пересечения диаграмм (точки реверса тепловых потоков):

$$\begin{cases} y = -0,416x^3 + 3,452x^2 - 3,488x + 13,85; \\ y = -0,305x^3 + 2,988x^2 - 5,492x + 13,71. \end{cases}$$

Действительные корни системы кубических уравнений: $x_1=6,55$ или $t_1=17$ ч 06 мин; $x_2=-0,07$ или $t_2=5$ ч 02 мин.

Решением системы уравнений перехода критической температуры воздушного полу-

пространства внутри теплицы ($t_{пр}=0$ °С) получаем корни (время): $x_1=-2,21$ ($t_1=1$ ч 35 мин) $x_2=7,77$ ($t_2=19$ ч 32 мин).

Аналогично можно обработать остальные диаграммы за все дни эксперимента. Таким образом, внутреннее воздушное полупространство внутри теплицы нагревается на 25...30 минут позже, чем в окружающей среде вне теплицы, а динамика температуры почвы еще более инертна и запаздывает, по сравнению с максимальным нагревом окружающей среды, на 2,0...3,5 ч.

В пределах рассматриваемого небольшого промежутка времени (с 10.04.21 по 20.04.21) продолжительность аккумуляции тепла почвой и его расходования приблизительно равны и составляет около 12 ч.

Однако за 20 дней (до 30.04.21 г.) продолжительность аккумуляции уже увеличивается до 12 ч 25 мин. при времени расхода 11 ч 35 мин.

Таблица 1 – Оптимальные режимы температуры для основных культур защищенного грунта (по [14]), °С

Культура	От посева до появления всходов	Первые 4...7 дней после всходов		В последующее время		
		день	ночь	солнечный день	пасмурный день	ночь
Капуста белокочанная, брюссельская, савойская	20	6...10	6...10	14...18	12...16	6...10
Капуста цветная	20	6...10	6...10	16...18	12...16	8...10
Томаты	20...25	12...15	8...10	20...25	15...18	8...12
Перцы, баклажаны	25	13...16	8...10	20...25	15...20	10...13
Огурцы, кабачки	25	15...17	12...14	19...20	17...19	12...14
Лук-порей, сельдерей	20	13...16	8...10	18...20	15...18	8...10

Диапазоны оптимальных температурных режимов (табл. 1 и 2) существенно отличаются как по культурам, так и по сортам, что требует создания регулируемых режимов для каждой культуры в отдельной теплице.

Для мелких товаропроизводителей возможен вариант с разделением теплицы на герметичные отсеки для отдельных культур [15].

Поскольку исследования проводили ранней весной, суточная температура для посева и до появления всходов (табл. 1) 10.04.21 г. не соответствует рекомендуемой даже для самых холодостойких культур (капуста, лук, сельдерей).

Внутри теплицы с дневным обогревом

солнечной радиацией стабильное повышение температуры воздушного полупространства до необходимого для посадки этих культур уровня в 2021 г. отмечали 17 апреля (см. рис. 1а), а температуры почвы в 2022 г. – 14 апреля. Следовательно, при посадке до этого срока необходимо дополнительное отопление.

Для не отапливаемой теплицы целесообразна пересадка рассады, выращенной в стабильных теплых условиях, в начале апреля поскольку температура почвы и воздушного полупространства теплицы достаточна для ее развития, за исключением рассады томатов, перца и баклажан.

Таблица 2 – Рекомендуемые режимы температур для культур защищенного грунта (по [1]), °С

Культура	Воздух						Почва	
	до плодоношения			в период плодоношения			до пло- доноше- ния	в период плодоно- шения
	день		ночь	день		ночь		
	сол- нечно	пас- мурно		сол- нечно	пас- мурно			
Огурец (зимне-весенний)	22...24	20...22	17...18	24...28	22...24	19...20	20...24	20...24
Огурец (осенний)	25...26	20...22	19...20	21...23	19...21	17...19	22...24	20...22
Томат (зимне-весенний)	22...24	19...20	16...17	24...26	20...22	18...19	18...20	18...20
Томат (осенний)	24...26	18...20	16...17	24...26	20...22	18...19	18...20	18...20
Салат кочанный	20...23	16...18	10	18...20	14...16	10...12	15...16	15...16
Редис	20...22	7...9	5...6	18	14	8...10	15...16	15...16
Капуста пекинская	20	14...16	12...13	20	17...18	15...16	15...16	15...16
Укроп, шпинат	17...18	8...10	5...6	18...20	16...18	10...12	15...16	15...16
Капуста цветная	-	-	-	16...22	14...16	10...14	15...16	15...16
Лук репчатый на перо	-	-	-	25	20	15...17	18...20	18...20

Аналогично методами математического анализа на примере томата весеннего определяли критические точки рекомендуемых температур среды и почвы (см. табл. 2) и температуры внутреннего полупространства теплицы и почвы, посаженного 15.04.21 г. (рис.4).

Системы уравнений для воздушной среды:

$$\begin{cases} y = -2,238x^2 + 19,40x - 8; \\ y = 20. \end{cases}$$

для почвы:

$$\begin{cases} y = -0,4444x^3 + 4,5357x^2 - 9,6627x + 15 \\ y = 18. \end{cases}$$

Корни первой системы уравнения $x_1=6,84$ ($t_1=17ч 41 мин$), $x_2=1,83$ ($t_2=7ч 40 мин$), второй – $x_1=7,003$ ($t_1=18ч 7 мин$), $x_2=3,405$ ($t_2=10ч 49 мин$). Таким образом, оптимальная температура воздушного полупространства внутри теплицы и почвы для большинства растений закрытого грунта (см. табл. 1 и 2) на 15.04.21 г.

отмечается всего в течение 7...10 ч, что, безусловно, требует включения отопления после t_1 и отключения отопления после t_2 . Причем оно должно быть дифференцированным в плане обеспечения: в точках t_1 и t_2 – минимальным, а в точке ночного минимума – максимальным.

Максимальная полуденная температура воздушного полупространства в этот день в теплице уже приближается к 34...35 °С, которая превышает диапазон оптимальных температур растений (см. табл. 1 и 2). Сейчас она используется не рационально.

Выводы. Опытным путем определена динамика температурного режима воздушного полупространства вне и внутри теплицы и почвы на глубине 5,0 см внутри теплицы в светлое время суток.

Полученные данные аппроксимированы в полиномы третьего порядка от времени суток, аналитически определено время точки максимума, точек пересечения графиков температуры почвенного и воздушного

полупространства теплицы (время прямого потока и реверса тепла). Также определено время наступления критической температуры $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и оптимальной температуры согласно агробиологическим требованиям растений в теплице. Полученные результаты служат базой автоматизации теплового обеспечения теплицы.

Литература

1. Методические рекомендации по технологическому проектированию теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады РД-АПК 1.10.09.01-14. М.: Департамент научно-технологической политики и образования Минсельхоза России, 2014. 108 с
2. de Gelder A., Kempkes F. Raaphorst M.G.M. Energy saving greenhouse systems for sweet pepper production // *Acta Hort.* 2020. Vol. 1296. P. 535–540. doi: 10.17660/ActaHortic.2020.1296.69.
3. The Influence of Different Cooling Systems on the Microclimate, Photosynthetic Activity and Yield of a Tomato Crops (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in Mediterranean Greenhouses / M.Á. Moreno-Teruel, F.D. Molina-Aiz, A. López-Martínez, et al. // *Agronomy*. 2022. 12. No. 2. 524. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/2/524> (дата обращения: 17.09.2022).
4. Анализ преимуществ систем обеспечения теплового режима локальных рабочих зон на основе газовых инфракрасных излучателей по сравнению с традиционными конвективными системами отопления / В.И. Максимов, Т.А. Нагорнова, Н.И. Куриленко и др. // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332. № 9. С. 128–141.
5. Добрачев Ю.П., Федотова Е.В. Факторный анализ влияния температурного режима на урожайность риса // *Природообустройство*. 2021. № 5. С. 44–51. doi: 10.26897/1997-6011-2021-5-44-51.
6. Innovative technologies for an efficient use of energy / J.C. Bakker, S.R. Adams, T. Boulard, et al. // *Acta Hort.* 2008. Vol. 801. P. 49–62. doi: 10.17660/ActaHortic.2008.801.1.
7. Innovations in greenhouse systems - energy conservation by system design, sensors and decision support systems / S. Hemming, J. Balendonck, J.A. Dieleman, et al. // *Acta Hort.* 2017. Vol. 1170, P. 1-16. URL: https://www.actahort.org/books/1170/1170_1.htm (дата обращения: 17.09.2022). doi: 10.17660/ActaHortic.2017.1170.1.
8. Kuroyanagi, T. Prediction of leakage rate of a greenhouse using computational fluid dynamics. *Acta Hort.* 2017. Vol. 1170. P. 87–94. doi: 10.17660/ActaHortic.2017.1170.9.
9. ГОСТ Р 56712-2015. Панели многослойные из поликарбоната. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2016. 28 с.
10. Greenhouse and screenhouse cover materials: literature review and industry perspective / M. Teitel, H. Vitoshkin, F. Geoola, et al. // *Acta Hort.* 2018. Vol. 1227. P. 31–44. doi: 10.17660/ActaHortic.2018.1227.4.
11. Смирнов П. А., Виеру Т. П. Экспериментальные данные термодинамических процессов в помещениях мансардного типа для яровизации картофеля // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2017. № 4 (46). С. 32–36.
12. Смирнов П.А. Тихонова А.В., Хашимова И.М. Экспериментальное изучение расширенного использования теплицы в мелкотоварном производстве // *Вестник Чувашского ГСХА*. 2020. № 4 (15). С. 109–115.
13. Бронштейн И. Н. Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука, 1986. 544 с.
14. Справочник агронома Нечерноземной зоны / В.С. Алексашова, В.И. Анискин, Б.П. Асякин и др.; под ред. Г.В. Гуляева. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1990. 574 с.
15. Экспериментальные исследования температуры нагрева тепличных облучательных установок / Н. П. Кондратьева, Д. А. Филатов, П. В. Терентьев, Б. Г. Зиганшин // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2020. – Т. 15. – № 1(57). – С. 76-80.

Сведения об авторах:

Смирнов Петр Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических машин и комплексов, e-mail: smirnov_p_a@mail.ru
 Тихонова Алена Валерьевна, студент магистратуры, e-mail: tikhonova421@yandex.ru
 Чувашский государственный аграрный университет, Чебоксары, Россия.

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL DETERMINATION OF CRITICAL TEMPERATURE POINTS OF THE GREENHOUSE P.A. Smirnov, A.V. Tikhonova

Abstract. In greenhouse, soil is the main heat accumulator, and its rational use is a very urgent task, which can be successfully solved only with full automation of the transfer of the missing thermal energy. To do this, it is enough to determine the following parameters in the greenhouse: the maximum daily temperatures of air and soil inside and outside, the distribution of temperature maxima during the day, the relative position and time of balancing the temperatures of the air and soil half-space in the greenhouse in the morning and in the evening, or the point of reversal of the heat flow. The temperature parameters were determined experimentally over a continuous 11 days, then approximated to third-order polynomial equations with a reliability of 0.92 ... 0.96, and analytical studies were carried out on them. The daily temperature maxima were calculated by equating the first derivatives to zero and solving the quadratic equation. The daily points of heat reversal to the soil and from the soil in time were determined by solving the system of equations for changing the temperature of the soil and the air half-space inside the greenhouse (points of intersection of the graphs). Similarly, from the system of equations, critical points were determined in the time of transition of the temperature of the air half-space inside the greenhouse to the negative zone ($t=0^{\circ}\text{C}$). The same method was used to calculate the optimal temperatures in the greenhouse or the moments in time of switching on and off the heat source, for which t_{opt} was introduced into the system of equations for each cultivated plant. A differentiated heating system for the greenhouse is proposed in terms of soil heat consumption, which consists in ensuring the minimum supply of additional heat during the daytime optimum and the maximum at nighttime minimum points.

Key words: greenhouse thermodynamics, automatic greenhouse control, maximum temperature, heat reversal, system of equations, quadratic equation, cubic equation.

References

1. Metodicheskie rekomendatsii po tekhnologicheskomu proektirovaniyu teplits i teplichnykh kombinatov dlya vyrashchivaniya ovoshchei i rassady RD-APK 1.10.09.01-14. [Guidelines for the technological design of greenhouses and greenhouse complexes for growing vegetables and seedlings RD-APK 1.10.09.01-14]. Moscow: Departament nauchno-tekhnologicheskoi politiki i obrazovaniya Minsel'khoza Rossii. 2014; 108 p.
2. de Gelder A, Kempkes F, Raaphorst M.G.M. Energy saving green-house systems for sweet pepper production. *Acta Hort.* 2020; Vol.1296. 535-540 p. doi: 10.17660/ActaHortic.2020.1296.69.
3. Moreno-Teruel MA, Molina-Aiz FD, López-Martínez A. The influence of different cooling systems on the microclimate, photosynthetic activity and yield of a tomato crops (*Lycopersicon esculentum Mill.*) in Mediterranean Greenhouses. [Internet]. *Agronomy*. 2022; 12(2). 524 p. [cited 2022, September 17]. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/2/524>.
4. Maksimov VI, Nagornova TA, Kurilenko NI. [Analysis of the advantages of systems for ensuring the thermal regime of local working areas based on gas infrared emitters in comparison with traditional convective heating systems]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*. 2021; Vol.332. 9. 128-141 p.
5. Dobrachev YuP, Fedotova EV. [Factor analysis of the influence of the temperature regime on the yield of rice]. *Prirodoobustroistvo*. 2021; 5. 44-51 p. doi: 10.26897/1997-6011-2021-5-44-51.
6. Bakker JC, Adams SR, Boulard T. Innovative technologies for an efficient use of energy. *Acta Hort.* 2008; Vol.801. 49-62 p. doi: 10.17660/ActaHortic.2008.801.1.
7. Hemming S, Balendonck J, Dieleman JA. Innovations in greenhouse systems - energy conservation by system design, sensors and decision support systems. [Internet]. *Acta Hort.* 2017; Vol.1170, 1-16 p. [cited 2022, September 17]; https://www.actahort.org/books/1170/1170_1.htm. doi: 10.17660/ActaHortic.2017.1170.1.
8. Kuroyanagi T. Prediction of leakage rate of a greenhouse using computational fluid dynamics. *Acta Hort.* 2017; Vol.1170. 87-94 p. doi: 10.17660/ActaHortic.2017.1170.9.
9. GOST R 56712-2015. Paneli mnogosloynnye iz polikarbonata. Tekhnicheskie usloviya. [Multilayer panels made of polycarbonate. Specifications]. Moscow: Standartinform. 2016; 28 p.
10. Teitel M, Vitoshkin H, Geoola F. Greenhouse and screenhouse cover materials: literature review and industry perspective. *Acta Hort.* 2018; Vol.1227. 31-44 p. doi: 10.17660/ActaHortic.2018.1227.4.
11. Smirnov PA, Vieru TP. [Experimental data of thermodynamic processes in mansard-type rooms for potato vernalization]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017; 4 (46). 32-36 p.
12. Smirnov PA, Tikhonova AV, Khashimova IM. [Experimental study of the expanded use of the greenhouse in small-scale production]. *Vestnik Chuvashskogo GSKhA*. 2020; 4 (15). 109-115 p.
13. Bronshtein IN, Semendyaev KA. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov*. [Handbook of mathematics for engineers and students of higher educational institutions]. Moscow: Nauka. 1986; 544 p.
14. Aleksashova VS, Aniskin VI, Asyakin BP, Gulyaev GV. *Spravochnik agronoma Nechernozemnoi zony*. [Reference book of the agronomist of the Non-Chernozem zone]. Moscow: Agropromizdat. 1990; 574 p.
15. Experimental studies of the heating temperature of greenhouse irradiators / N. P. Kondratieva, D. A. Filatov, P. V. Terentiev, B. G. Ziganshin // *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*. - 2020. - T. 15. - No. 1 (57). - S. 76-80.

Authors:

Smirnov Petr Alekseevich – Ph.D. of Technical sciences, associate professor of the Department of Transport and Technological Machines and Complexes, e-mail: smirnov_p_a@mail.ru
 Tikhonova Alena Valerievna – Master's student, e-mail: tikhonova421@yandex.ru
 Chuvash State Agrarian University, Cheboksary, Russia.