

УДК 681.516.32
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-59-68
EDN: CDPHLB

Л. А. ПАЮК¹
Н. А. ВОРОНИНА¹
А. Д. УМУРЗАКОВА¹
Е. Е. ЛАЗУТКИНА¹
К. В. ХАЦЕВСКИЙ²

¹ Национальный исследовательский
Томский политехнический
университет,
г. Томск

² Омский государственный
технический университет,
г. Омск

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МИКРОКЛИМАТОМ ТЕПЛИЧНОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ

Работа посвящена разработке и исследованию автоматической системы управления микроклиматом тепличного комплекса пятого поколения, которая построена на основе аппарата нечеткой логики и позволяет автоматизировать процессы управления с использованием последних разработок в этой области. В ходе работы уточнено понятие «микроклимат тепличного комплекса» для региона зоны рискованного земледелия при выращивании крупноплодной земляники в закрытом грунте.

Ключевые слова: микроклимат тепличного хозяйства, аппарат нечёткой логики, зашторивание, проветривание, капельный полив, досветка, автоматическое управление.

Введение. В современных условиях нестабильности рынка важно нарастить темпы развития собственных тепличных хозяйств, как мелких, так и средних, которые сегодня бурно развиваются [1]. Согласно [2] за последние пять лет инвестиции в данной отрасли сельского хозяйства превысили 200 млрд рублей, было введено в эксплуатацию или начаты работы по строительству более 1,1 тыс. га теплиц.

Всё это ведет к независимости от импортируемой продукции сельхозназначения.

Тепличное хозяйство сегодня — это объект, который имеет большие площади (от 1 Га до 100 Га), развитую инфраструктуру, отдельное электро- и энергопотребление, систему хранения и транспортировки готовой продукции. Кроме того, имеется целый комплекс для анализа получаемого продукта с точки зрения его товарного вида и наличия полезных микроэлементов и витаминов. Все важные для потребителя характеристики готового продукта обеспечиваются системой микроклимата, которая учитывает целый ряд параметров и под-

держивает их на оптимальном уровне, а именно: освещённости, влажности воздуха и почвы, кислотности почвы, температуры внутри помещения. Все это обязательно происходит в реальном времени при помощи современных систем управления. Важно отметить, что одновременно с этим применяются на практике самые передовые технологии выращивания того или иного продукта сельхозназначения, например, интенсивные методы выращивания [3], которые позволяют минимизировать временной интервал созревания и увеличить урожайность.

Для достижения наибольшего урожая с минимальными энерго- и ресурсозатратами в тепличном комплексе (ТК) используется современная автоматическая система управления микроклиматом (АСУМ), которая позволяет значительно повысить урожайность выращиваемой сельхозкультуры [4].

Следует отметить, что использование современных технологий и автоматизации процессов контроля за процессами, протекающими в тепличном комплексе, позволяют минимизировать затраты труда и привлекают высококвалифицированных молодых специалистов. Построенная по последнему слову техники и технологий современная теплица невозможна без продуманной и надежной системы управления.

Считаем, что вопрос исследования энергоэффективности и надёжности микроклимата тепличного комплекса является актуальным.

При проектировании и строительстве ТК следует в первую очередь определить такие параметры, как климатические условия региона (место строительства), световую зону (Ш), вид и срок выращивания сельхоз культуры, далее наличие или отсутствие скважины, высоковольтной линии электропередач и подъездных путей [5].

Краткая теоретическая часть. Считается, что для достижения максимального урожая любой агрокультуры в закрытом грунте необходимо поддерживать требуемые параметры микроклимата внутри ТК. Отметим, что разные авторы (Пешко М. С., Змиева К. А.) включают в понятие «микроклимат тепличного комплекса» свои параметры, влияющие на эффективность тепличного комплекса в целом. Поэтому уточним данное понятие и выделим основные параметры для создания оптимального микроклимата при выращивании овощных и ягодных культур [6].

Каждый из рассматриваемых параметров является неотъемлемой частью системы микроклимата теплицы. Остановимся кратко на каждом из них:

1. Освещение — сложный комплекс мероприятий для достижения требуемого уровня освещённости технологического помещения по выращиванию агрокультуры в разные моменты развития растения. Современные технологии в данной области позволяют создавать и поддерживать необходимые условия микроклимата при использовании фитоламп как основного источника света [7, 8].

2. Система капельного полива — система подачи и распределения воды с микроэлементами, которая обеспечивает питание корней растений [9, 10]. Растворение удобрений производится в отдельных баках в соответствии с химической совместимостью удобрений. Полученный питательный раствор проходит очистку в системе на основе дискового фильтра.

3. Содержание углекислого газа в воздухе ТК — это важная составляющая в процессе роста и развития агрокультуры [6]. Диоксид углерода не имеет

цвета и запаха, но прекрасно фиксируется системой датчиков, установленных снаружи и внутри ТК.

4. Температура — основной параметр, который изменяется как от внешних условий, так и внутренних. На различных этапах развития растений температура должна корректироваться, мониторинг данного параметра должен производиться каждую минуту.

5. Кислотность почвы — зависит от состава почвы, её насыщенности микроэлементами, влажности и температуры в техническом помещении тепличного хозяйства.

6. Влажность — также сложный показатель системы микроклимата, но оказывающий значительное влияние на развитие агрокультуры на всех этапах его развития. Чаще всего используют автоматические распылители, реже ручное разбрызгивание воды.

Применение АСУМ, согласно [11–13], экономит от 15 до 25 % тепла, увеличивая урожайность сельхозкультуры, значительно повышает культуру производства и выводит на новый качественный уровень условия труда. Использование АСУМ в ТК, позволяет обеспечивать высокую точность требуемых параметров микроклимата с учетом внешних условий и решаемых задач в полном объеме. В режиме реального времени системами мониторинга и управления ТК отслеживаются следующие процессы:

- сбор метеорологических данных;
- мониторинг и управление системой отопления теплиц;
- управление форточной вентиляцией;
- управление рециркуляционными вентиляторами;
- управление системами дозирования углекислого газа, поддержание уровня концентрации углекислого газа в объеме теплиц;
- контроль и управление системой ассимиляционного освещения;
- управление горизонтальными шторными экранами.

Данные, которые получают с датчиков внутри и снаружи тепличного комплекса, в режиме реального времени передаются на монитор компьютера, планшета или телефона работника, чтобы потом быть проанализированными [3, 6].

Крупноплодная земляника (садовая) относится к многолетним травянистым растениям, вес одной ягоды достигает от 35 до 100 г, подвержены некоторым типичным болезням при выращивании в закрытом грунте, а именно: фитофтороз, ксантоз, мучнистая роса, гниль.

В зависимости от сорта ягоды, его особенностей необходимо соответствующим образом настраивать АСУМ в ТК для получения максимальной урожайности и минимальных затрат. Здесь необходима помощь агротехнолога, который настраивает и корректирует работу данной системы исходя из опыта работы.

Весь период жизни растения можно разделить на три цикла:

- I — посадка, 25 дней;
- II — цветение, около 20 дней;
- III — плодоношение.

Исходя из анализа вышеприведенных данных, можно сделать вывод, что наибольшее влияние на микроклимат тепличного комплекса оказывают следующие параметры: температура, влажность и содержание CO_2 .

Параметры для микроклимата

Цикл	T (температура)		M (влажность)		Q (CO ₂)	
	теория	практика	теория	практика	теория	практика
I	не менее 11 °С	13°С	90 %	68 % – 75 %	900 ppm	850 ppm
II	18°С – 22°С	22°С	75 % – 80 %	70 % – 77 %	800 ppm	810 ppm
III	20°С – 25°С	23°С	85 % – 90 %	75 % – 80 %	1100 ppm	980 ppm

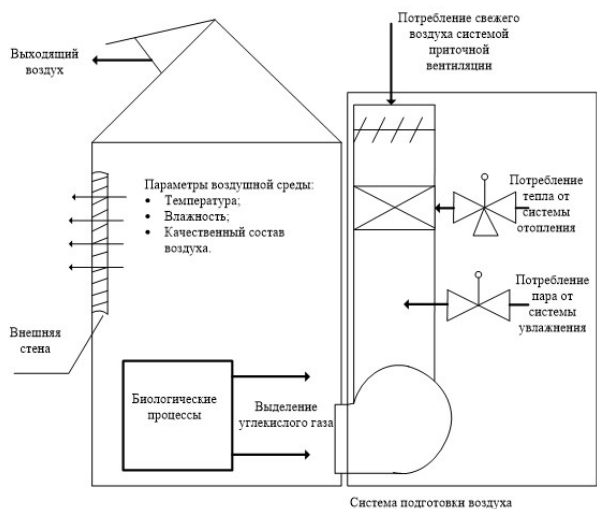


Рис. 1. Объект управления

Приведены (табл. 1) практические рекомендации по поддержанию основных параметров микроклимата для крупноплодной земляники.

Все выше обозначенные параметры для поддержания оптимального микроклимата в тепличном комплексе легко контролируются при помощи системы приточно-вытяжной вентиляции, с предварительной подготовкой воздуха (прогрев его при низкой температуре вне тепличного комплекса до приемлемого значения) и системы по регулировке влажности (рис. 1). Для этих целей используется промышленный кондиционер с высокой кратностью воздухообмена, с системой контроля химического состава воздуха (контроль уровня CO₂) [9].

Математическая модель для тепличного комплекса строится по принципу «чёрного ящика», т.к. присутствует ряд входных и выходных параметров, которые математически можно связать опосредованно. К выходным параметрам теплицы отнесём: температуру T_i , уровень углекислого газа M_{CO_2} , относительную влажность воздуха ϕ_i , освещённость L_i , которые зависят от управляющих и возмущающих воздействий и конфигурации тепличного комплекса [6].

Определим изменение температуры воздуха внутри тепличного комплекса (та часть, где происходит выращивание агрокультуры) T_i при помощи уравнения теплового баланса:

$$\rho_a C_a V \left(\frac{dT_i}{dt} \right) = Q_{heat} + Q_{short} - Q_{conv.cond} - Q_{infiltr} - Q_{long}, \quad (1)$$

где ρ_a — плотность воздуха внутри тепличного комплекса, кг·м⁻³;

C_a — удельная теплоёмкость воздуха внутри тепличного комплекса, Дж (кг·К);

V — внутренний объём тепличного комплекса, м³;

T_i — температура воздуха внутри тепличного комплекса, °С;

Q_{heat} — тепловые поступления от системы обогрева, Вт;

Q_{short} — тепловые поступления от солнечного излучения, Вт;

$Q_{conv.cond}$ — тепловые потери, возникающие при конвекции и кондукции теплового потока, Вт;

$Q_{infiltr}$ — инфильтрационные тепловые потери, Вт;

Q_{long} — тепловые потери, вызванные длинноволновым излучением, Вт.

Поступление тепла от солнечного излучения определим по формуле:

$$Q_{short} = \alpha_c \tau_c S I, \quad (2)$$

где α_c — коэффициент поглощающей способности солнечной радиации;

τ_c — коэффициент пропускания покрытия;

S — площадь поверхности теплицы, м²;

I — солнечная радиация, Вт·м⁻².

Подачу свежего воздуха из вне тепличного комплекса определим по формуле:

$$R = VwS_c, \quad (3)$$

Далее запишем уравнение баланса влаги внутри теплицы:

$$\rho_a V \left(\frac{dX_i}{dt} \right) = G_{in} X_a - X_i + G_{for}, \quad (4)$$

где X_i — абсолютная влажность воздуха внутри тепличного комплекса, кг_{H₂O}/кг_{возд.};

X_a — абсолютная влажность воздуха снаружи тепличного комплекса, кг_{H₂O}/кг_{возд.};

G_{for} — расход пара внутри тепличного комплекса, который распыляется при помощи форсунок принудительно, кг_{H₂O}/с.

Для связи абсолютной влажности воздуха с её относительным значением в тепличном комплексе воспользуемся следующим соотношением:

$$\phi = \left(\frac{X}{X_{np}} \right) 100\%, \quad (5)$$

где X_{np} — абсолютная влажность насыщенного пара, кг_{H₂O}/кг_{возд.};

Работу нечеткого регулятора можно свести к базе правил, которая описывает основные особен-

Оптимальные технологические режимы выращивания крупноплодной земляники

Температура	Влажность	Содержание CO ₂	Примечание
°С	%	ppm	
12–17	88–90	850–900	Оптимальные параметры
22	75–80	800	Оптимальные параметры
20–25	85–90	900–1100	Оптимальные параметры
18–23	75–85	–	Общее требование к крупноплодной землянике

ности работы данного регулятора и подкреплена теоретическими и практическими данными, полученными при выращивании крупноплодной земляники. Данные правила задают условия выполнения определенных критериев, которые либо попадают в область корректных параметров, либо нет. Они ограничивают систему автоматического управления микроклиматом тепличного комплекса и задают корректные режимы её работы в зависимости от внешних факторов и этапов развития, выращиваемой культуры [14, 15].

Работу систем подачи воздуха, зашторивания, полива и распыления влаги внутри тепличного комплекса автоматизируем для наибольшей эффективности при помощи контроллера с интеллектуальным управлением, который описан базой правил для каждого отдельного параметра [12, 15–20].

Приведём (табл. 2) параметры микроклимата для производства ягодной продукции, а именно крупноплодной земляники.

Обобщая теоретические (табл. 2) и практические данные, формулируем основные правила-стратегии, которые отражают логику выбора температурного режима с учетом температуры воздуха снаружи ТК в зимний период [11]:

1. При температуре воздуха снаружи ТК ниже $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ — придерживаемся номинальной температуры процесса выращивания крупноплодной земляники.

2. При температуре воздуха снаружи ТК ниже $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ — придерживаемся немного пониженного значения температуры при выращивании крупноплодной земляники.

3. При значении температуры снаружи ТК около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ — придерживаемся немного повышенной температуры при выращивании крупноплодной земляники.

Полученные три правила-стратегии соответствуют для контроллера следующим режимам работы по контуру температуры (в зимний период), а именно:

— температура около $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ (обычное состояние) — правило 1,

— температура около $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже (холодно) — правило 2,

— температура около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (тепло) — правило 3.

Температура в тепличном комплексе тесно связана с влажностью, поэтому при повышенных значениях температуры снаружи комплекса необходимо понижать значение влажности, а при пониженных температурах — наоборот, поддерживать номинальное значение последнего. С учётом коррекции влажности внутри тепличного комплекса управляющие стратегии для микроконтроллера будут более детальными с поправкой на влажность внутри технологического помещения. Правила-стратегии 1 и 2

поддерживают уровень влажности на номинальном уровне, при действии правила 3 устанавливаем новый режим — «немного пониженный» [13].

Следующий параметр системы микроклимата, концентрация CO₂, является важным фактором, но учитывается опосредованно. Он определяет во многом внешний вид продукции (влияет более чем на 30 %). Изменение концентрации CO₂ как внутри тепличного комплекса, так и снаружи осуществляется при помощи контроля системы вентиляции.

Добавленные в основные правила (1, 2, 3) условия по концентрации CO₂ в тепличном комплексе привносят дополнительные условия в стратегии технологического режима работы контроллера. Кратко обозначим основные моменты:

— концентрация CO₂ устанавливается на отметке «пониженная», если температура окружающей среды составляет около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (правило 3).

— концентрация CO₂ устанавливается на отметке «повышенная», если колебания температуры находятся на отметке около $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (правило 2).

— концентрация CO₂ устанавливается на отметке «номинальная» при наружной температуре окружающей среды около $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (правило 1).

После учёта концентрации CO₂ в наружном воздухе и влияния влажности внутри тепличного комплекса правила-стратегии для логического контроллера примут следующий вид:

1. Если температура снаружи ТК «номинальная», а содержание CO₂ снаружи ТК так же соответствует этому значению, то необходимо обеспечить несколько повышенную температуру процесса выращивания крупноплодной земляники в сочетании с немного пониженной влажностью воздуха и содержанием CO₂ внутри ТК.

2. Если фиксируется значение температуры снаружи ТК, соответствующее отметке — «номинальная температура», а содержание CO₂ снаружи ТК как «повышенное», то требуется обеспечить немного повышенную температуру процесса выращивания крупноплодной земляники, при этом немного понизить влажность воздуха и содержание углекислого газа в внутри ТК.

3. Если зафиксирована датчиками температура снаружи ТК как «пониженная», а наружное содержание CO₂ имеет «номинальное» значение, то необходимо выдерживать номинальные параметры при выращивании крупноплодной земляники.

4. Если датчиками температуры снаружи ТК зафиксировано значение, соответствующее понятию «пониженная температура», а содержание CO₂ — «повышенное», то система контроля настраивается таким образом, чтобы параметры микроклимата при выращивании крупноплодной земляники для температуры и влажности имели «номинальные»

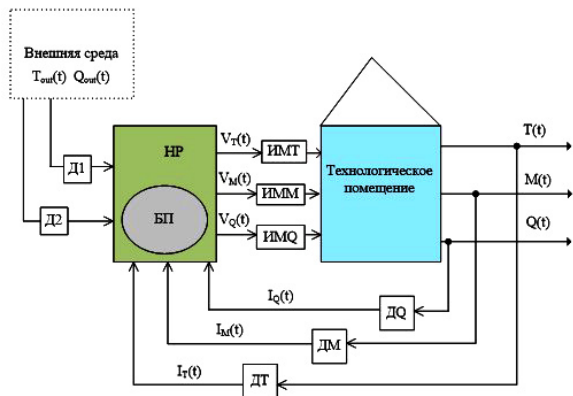


Рис. 2. Система управления: НР — нечёткий регулятор, БП — база правил

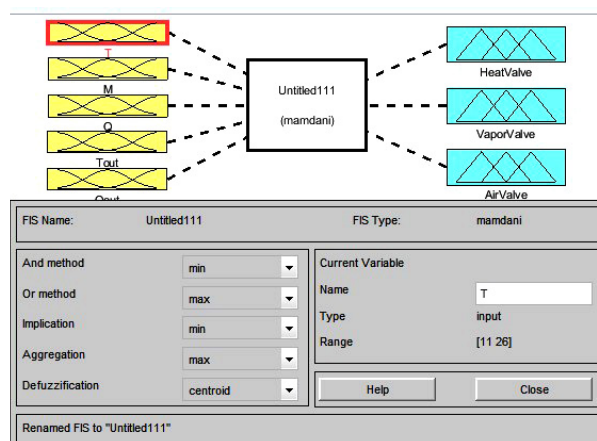


Рис. 3. Нечёткий регулятор, реализованный в Matlab

Таблица 3

Описание состояния параметров микроклимата и управления им в терминах нечеткого управления

Физическая величина	Значение величины	Лингвистическая переменная	Термы лингвистической переменной	Характеристика термы
Температура воздуха в технологическом помещении, °С	12...18	Температура процесса	<i>n</i>	пониженная
	17...19		<i>sn</i>	немного пониженная
	21...23		<i>z</i>	номинальная
	22...24		<i>sp</i>	немного повышенная
	23...25		<i>p</i>	повышенная
	24...25		<i>bp</i>	завышенная
Влажность воздуха, %	70...75	Влажность воздуха	<i>n</i>	пониженная
	75...80		<i>sn</i>	немного пониженная
	85...90		<i>z</i>	номинальная
	90...95		<i>sp</i>	немного повышенная
Концентрация CO ₂ в воздухе, ppm	400...600	Содержание углекислого газа	<i>bn</i>	заниженное
	400...700		<i>n</i>	пониженное
	700...800		<i>sn</i>	немного пониженное
	800...900		<i>z</i>	номинальное
	900...1000		<i>sp</i>	немного повышенное
	1000...1100		<i>p</i>	повышенное
	1100...1200		<i>bp</i>	завышенное
	1200...1300		<i>bbp</i>	значительно завышенное
Наружная температура, °С	-35...-15	Наружная температура	<i>bn</i>	заниженная
	-30...-3		<i>n</i>	пониженная
	-15...-3		<i>z</i>	номинальная
Наружная концентрация CO ₂ , ppm	370...500	Наружная концентрация углекислого газа	<i>z</i>	номинальная
	500...390		<i>p</i>	повышенная
Скорость открытия/закрытия исполнительных механизмов, мм/с	-100...-10	Упр. T Упр. M Упр. Q	C1	закрывать
	-10...10			
	10...100			

значения, при этом следует «немного повысить» содержание диоксида углерода внутри ТК.

5. Если при фиксации системой датчиков снаружи ТК температура оказывается в зоне «заниженная», а наружное содержание углекислого газа, напротив, «номинальное», то система контроля должна вывести параметры микроклимата ТК

на следующие значения: «немного пониженную» температуру процесса выращивания, «номинальную» влажность и «повышенное» содержание диоксида углерода внутри ТК.

6. Если температура снаружи ТК «заниженная», а наружное содержание диоксида углерода находится на отметке — «повышенное», то контрол-

лер выводит требуемые параметры микроклимата на следующие значения: «немного пониженное» значение температуры процесса выращивания крупноплодной земляники, «номинальной» влажности и «завышенным» содержанием диоксида углерода внутри помещения ТК [14].

Как видно из описания, все правила-стратегии дополняют друг друга, иногда определяя основной режим работы при разных исходных данных снаружи тепличного комплекса. Например, режим повышенной экономии энергоресурсов при наружной температуре воздуха « $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ » в зимний период в ущерб качеству продукции, устанавливает правило 5 и, наоборот, правило 1 — режим работы систем в экономически выгодных условиях при номинальной температуре наружного воздуха и номинальном значении влажности воздуха внутри ТК [10, 11].

Представлена система управления контроллера с нечёткими параметрами микроклимата тепличного комплекса при выращивании крупноплодной земляники (рис. 2), разработанного на основе правил-стратегий, описанных выше.

Структура контроллера формируется из блока правил, условий реализации различных режимов работы вентиляции, освещения, зашторивания, станции по выработке углекислого газа, анализе текущих параметров с датчиков, выше обозначенных элементов, с выбором оптимального режима работы систем в ТК для достижения максимальной производительности.

Нечеткий регулятор определяет управляющие воздействия: по температуре — $VT(t)$, влажности — $VM(t)$ и содержанию углекислого газа внутри ТК — $VQ(t)$ для соответствующих исполнительных механизмов в каналах управления $T(t)$, $M(t)$ и $Q(t)$. В результате устанавливаются необходимые параметры АСУМ, которые соответствуют условиям функционирования процесса выращивания крупноплодной земляники и поддерживаются автоматически с одновременным мониторингом всех изменений и условий функционирования ТК [6].

Нечеткий регулятор, реализованный в Matlab (рис. 3), имеет пять входных и три выходных лингвистических переменных, они выбирают оптимальный режим для каждого параметра по алгоритму Мамдани. В качестве функции принадлежности использовали «треугольную» функцию, которая представляет собой непрерывную линию. Аналитически такую функцию можно записать в виде выражения (6), а также представить графиком функции принадлежности (рис. 4) для температуры « T » при характеристике термы соответствующей «номинальной» (z , табл. 3).

$$f\Delta(x, a, b, c) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{array} \right\}, \quad (6)$$

где x — текущий параметр; a, b, c — некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения, упорядоченные выражением: $a \leq b \leq c$. Здесь a, c — интервал, b — вершина треугольника (мода b).

Входные лингвистические переменные запишем следующим образом: « T » — температура процесса выращивания крупноплодной земляники; « M » — влажность; « Q » — концентрация углекислого газа

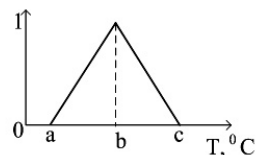


Рис. 4. График функции принадлежности для температуры « T »: $a = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$, $c = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$, $b = 1$

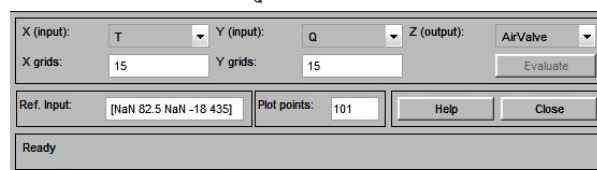
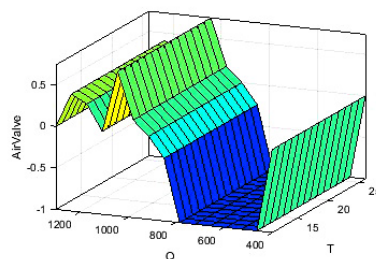


Рис. 5. Зависимость температуры и концентрации углекислого газа

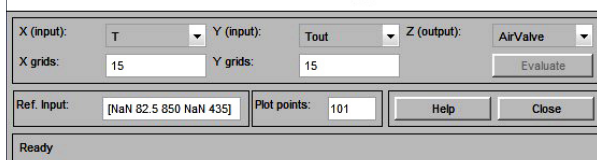
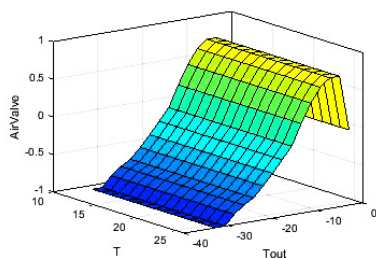


Рис. 6. Зависимость температуры внутри помещения и снаружи тепличного комплекса

в процессе выращивания крупноплодной земляники; « $Tout$ » — температура воздуха снаружи ТК; « $Qout$ » — содержание углекислого газа в воздухе, поступающего в систему вентиляции.

Выходами модели нечеткого регулятора являются лингвистические переменные, которые обозначим так: «HeatValve» — управляющее воздействие по контуру отопления; «VaporValve» — управляющее воздействие по контуру увлажнения; «AirValve» — управляющее воздействие по контуру проветривания.

На основе правил-стратегий (шесть основных) и модели нечеткого регулятора (рис. 4) была сформирована схема управления для системы микроклимата в терминах. Она отражает полную работу контроллера для исследуемого объекта (табл. 3).

Результаты экспериментов. К результатам анализа полученных данных можно отнести влияние

температуры и концентрации углекислого газа на управляющее воздействие по контуру проветривания и температуры внутри помещения и снаружи тепличного комплекса по тому же контуру, которые приведены ниже (рис. 5, 6).

Для роста растения требуется оптимальное содержание углекислого газа CO_2 на уровне 800 ppm и температуры внутри помещения 17°C (рис. 5), если эти значения превышены, то включается система принудительной вентиляции.

Зависимость температур, при понижении наружной температуры, ниже -15°C , температура внутри тепличного комплекса возрастает (рис. 6), таким образом, включается принудительная система вентиляции воздуха.

Выводы. Разработанная математическая модель микроклимата теплицы для выращивания клубники (виктории) учитывает максимально возможное количество факторов, влияющих на формирование микроклимата тепличного комплекса. При математическом описании микроклимата использованы уравнения теплового баланса, баланса влажности внутреннего воздуха и баланса концентрации углекислого воздуха в углекислом газе. Была разработана база правил, которая состоит из 78 наименований, на основании которых были построены 3D модели, наглядно отображающие работу систем: отопления, проветривания и увлажнения. Анализ полученных данных показал, что внутри тепличного комплекса, а именно в той части, где происходит выращивание крупноплодной земляники, можно уменьшить температуру на разных этапах её развития на 1°C , что приведет к уменьшению затрат на обогрев.

Библиографический список

1. Импортзамещение в тепличной отрасли России — факторы развития // Агробизнес. URL: <https://www.agbz.ru/articles/importozameshchenie-v-teplichnoy-otrasli-rossii-factory-razvitiya/> (дата обращения: 15.02.2023).
2. Волкова И. Н. Тепличная отрасль хозяйства России и факторы, влияющие на ее развитие и размещение // Географическая среда и живые системы. 2021. № 1. С. 93–109. DOI: 10.18384/2712-7621-2021-1-93-109. EDN: WOQICA.
3. Боярцева В. К. Микроклимат теплиц. Справочник садовода. 2010. 420 с.
4. Соболев А. В. Эффективность регулирования микроклимата в теплицах с помощью электричества // Вестник КрасГАУ. 2014. № 4. С. 154–156. EDN: RXMUDJ.
5. Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. Санкт-Петербург: Невский диалект, 2001. 557 с. ISBN 5-7940-0069-4.
6. Системы управления микроклиматом // Профит-Агро. URL: <http://profit-agro.ru/sistemy/sistemy-upravleniya-mikroklimatom/> (дата обращения: 10.03.2023).
7. Семенов В. Г., Крушель Е. Г. Математическая модель микроклимата теплицы // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2009. № 6 (54). С. 32–35. EDN: KUАНMF.
8. Белов С. М. Система охлаждения в тепличных комплексах. Микроклимат в теплицах // Аспирант. 2021. № 5 (62). С. 55–58. EDN: ELFHPU.
9. Кульмаиринов С. А., Калабаев А. А. Новый подход управления режимами микроклимата в теплицах // Синергия наук. 2021. № 59. С. 308–327. EDN: QZACBF.
10. Цокур Д. С. Система стабилизации кислотности почвы при выращивании томатов в условиях закрытого грунта // Научный журнал КубГАУ. 2013. № 93. С. 998–1020. EDN: PWFDDQK.

11. Пешко М. С. Адаптивная система управления параметрами микроклимата процессов производства и хранения пищевых продуктов: автореф. дис ... канд. техн. наук. Москва, 2015. 22 с.

12. Змиева К. А. Автоматическая система контроля и регулирования микроклимата тепличного комплекса // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: тр. Восьмой Всероссийской науч.-практ. конф., Новокузнецк, 20–21 ноября 2018 г. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2018. С. 49–53. EDN: YPJFU.

13. Юран С. И., Вершинин М. Н. Совершенствование системы регулирования микроклимата на основе нечеткой логики // Вестник НГИЭИ. 2019. № 9 (100). С. 33–45. EDN: FYYJWA.

14. Аверкин А. Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта: книга по требованию. Москва, 2013. 312 с.

15. Панфилов А. Э., Крушель Е. Г. Применение Matlab-приложения PDEarr для моделирования динамических процессов с распределенными параметрами // Инновационные технологии в обучении и производстве: материалы XVI Всерос. заоч. науч.-практ. конф. В 3-х т. Камышин, 22–25 ноября 2021 г., Волгоград: Изд-во ВолГТУ, 2021. Т. 1. С. 118–121. EDN: LOETOQ.

16. Шилкина С. В., Фокина Е. Н. Контроллер нечёткой логики в управлении технологическими процессами // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15, № 1 (59). С. 106–114. EDN: YTMENS.

17. Ali R. B., Aridhi E., Mami A. [et al.]. Fuzzy logic controller of temperature and humidity inside an agricultural greenhouse // 7th International Renewable Energy Congress. Hammamet, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/IREC.2016.7478929.

18. Mohamed S., Hameed I. A. A GA-Based Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Greenhouse Climate Control System // Alexandria Engineering Journal. 2018. Vol. 57 (2). P. 773–779. DOI: 10.1016/j.aej.2014.04.009.

19. Nicolosi G., Volpe R., Messineo A. An Innovative Adaptive Control System to Regulate Microclimatic Conditions in a Greenhouse // Energies. 2017. Vol. 10, no. 5. P. 1–17. DOI: 10.3390/en10050722.

20. Li G., Tang L., Zhang X. [et al.]. Factors affecting greenhouse microclimate and its regulating techniques // 8th International Conference on Environment Science and Engineering. Barcelona, 2018. Vol. 167. P. 12–19. DOI: 10.1088/1755-1315/167/1/012019.

ПАЮК Любовь Анатольевна, кандидат технических наук, доцент Отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета (ТПУ), г. Томск.

SPIN-код: 3333-1750

AuthorID (РИНЦ): 555556

AuthorID (SCOPUS): 57160434900

Адрес для переписки: pla@tpu.ru

ВОРОНИНА Наталья Алексеевна, кандидат технических наук, доцент Отделения электроэнергетики и электротехники ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 3176-9091

AuthorID (РИНЦ): 790645

ORCID: 0000-0001-9327-6441

AuthorID (SCOPUS): 57159363700

ResearcherID: I-9992-2018

Адрес для переписки: voronina@tpu.ru

УМУРЗАКОВА Анара Даукеновна, кандидат технических наук, старший преподаватель Отделения электроэнергетики и электротехники ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 8079-5187

AuthorID (РИНЦ): 834837

AuthorID (SCOPUS): 56485976200

Адрес для переписки: granat_72@mail.ru

ЛАЗУТКИНА Елена Евгеньевна, старший преподаватель Отделения электроэнергетики и электротехники ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 5709-4911

AuthorID (РИНЦ): 891147

AuthorID (SCOPUS): 56486119300

ResearcherID: AAI-5296-2020

Адрес для переписки: see@tpu.ru

ХАЦЕВСКИЙ Константин Владимирович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 7219-6033

AuthorID (РИНЦ): 465857

ORCID: 0000-0001-9504-1312

AuthorID (SCOPUS): 56503931800

ResearcherID: A-4002-2016

Адрес для переписки: xkv-post@rambler.ru

Для цитирования

Паюк Л. А., Воронина Н. А., Умурзакова А. Д., Лазуткина Е. Е., Хацевский К. В. Система управления микроклиматом тепличного комплекса на базе нечёткой логики // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 59–68. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-59-68.

Статья поступила в редакцию 04.12.2023 г.

© Л. А. Паюк, Н. А. Воронина, А. Д. Умурзакова,

Е. Е. Лазуткина, К. В. Хацевский

GREENHOUSE CLIMATE CONTROL SYSTEM BASED ON FUZZY LOGIC

Paper is devoted to development and research of the fifth generation greenhouse climate automatic control system. This system is based on fuzzy logic toolbox and it allows to automate control processes using the latest developments in this field. In the work the concept of «microclimate of greenhouse complex» for the region of the risky agricultural zone when growing large strawberries in a closed ground.

Keywords: greenhouse climate, fuzzy logic toolbox, curtaining, aeration, drip irrigation, lighting, automatic control.

References

1. Importozameshcheniye v teplichnoy otrasli Rossii – faktory razvitiya [Import substitution in the Russian greenhouse industry — development factors] // Agrobiznes. *Agribusiness*. URL: <https://www.agbz.ru/articles/importozameshchenie-v-teplichnoy-otrasli-rossii-factory-razvitiya/> (accessed: 15.02.2023). (In Russ.).
2. Volkova I. N. Teplichnaya otrasl' khozyaystva Rossii i faktory, vliyayushchiye na ee razvitiye i razmeshcheniye [Greenhouse industry of Russia and factors influencing its development and localization] // Geograficheskaya sreda i zhivyye sistemy. *Geographical Environment and Living Systems*. 2021. No. 1. P. 93–109. DOI: 10.18384/2712-7621-2021-1-93-109. EDN: WOQICA. (In Russ.).
3. Boyartseva V. K. Mikroklimat teplits. Spravochnik sadovoda [Greenhouse microclimate. Gardener's Guide]. 2010. 420 p. (In Russ.).
4. Sobolev A. V. Effektivnost' regulirovaniya mikroklimata v teplitsakh s pomoshch'yu elektrichestva [The efficiency of the microclimate regulation in greenhouses with the help of electricity] // Vestnik KrasGAU. *The Bulletin of KrasGAU*. 2014. No. 4. P. 154–156. EDN: RXMUDJ. (In Russ.).
5. Olsson G., Piani D. Tsifrovyye sistemy avtomatizatsii i upravleniya [Digital automation and control systems]. Saint Petersburg, 2001. 557 p. ISBN 5-7940-0069-4. (In Russ.).
6. Sistemy upravleniya mikroklimatom [Climate control systems] // Profit-Agro. *Profit-Agro*. URL: <http://profit-agro.ru/sistemy/sistemy-upravleniya-mikroklimatom/> (accessed: 10.03.2023). (In Russ.).
7. Semenov V. G., Krushel E. G. Matematicheskaya model' mikroklimata teplitsy [Mathematical model of a microclimate of a greenhouse] // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. *Izvestia Volgograd State Technical University*. 2009. No. 6 (54). P. 32–35. EDN: KUAHMF. (In Russ.).
8. Belov S. M. Sistema okhlazhdeniya v teplichnykh kompleksakh. Mikroklimat v teplitsakh [Cooling system in greenhouse complexes. Microclimate in greenhouses] // Aspirant. 2021. No. 5 (62). P. 55–58. EDN: ELFHPU. (In Russ.).
9. Kulmamirov S. A., Kalabayev A. A. Novyy podkhod upravleniya rezhimami mikroklimata v teplitsakh [A new approach to managing microclimate regimes in greenhouses] // Sinergiya nauk. *Synergy of Sciences*. 2021. No. 59. P. 308–327. EDN: QZACBF. (In Russ.).
10. Tsokur D. S. Sistema stabilizatsii kislotnosti pochvy pri vyrashchivanii tomatov v usloviyakh zakrytogo grunta [The stabilization system of soil acidity when growing tomatoes in a greenhouse] // Nauchnyy zhurnal KubGAU. *Scientific Journal of KubSAU*. 2013. No. 93. P. 998–1020. EDN: PWFQDK. (In Russ.).
11. Peshko M. S. Adaptivnaya sistema upravleniya parametrami mikroklimata protsessov proizvodstva i khraneniya pishchevykh produktov [Adaptive system for controlling microclimate parameters of food production and storage processes]. Moscow, 2015. 22 p. (In Russ.).
12. Zmiyeva K. A. Avtomaticheskaya sistema kontrolya i regulirovaniya mikroklimata teplichnogo kompleksa [Automatic system for monitoring and regulating the microclimate of a greenhouse complex] // Avtomatizirovannyy elektroprivod i promyshlennaya elektronika. *Automated Electric Drive and Industrial Electronics*. Novokuznetsk, 2018. P. 49–53. EDN: IYPJFU. (In Russ.).
13. Yuran S. I., Vershinin M. N. Sovershenstvovaniye sistemy regulirovaniya mikroklimata na osnove nechetkoy logiki [Improvement of the microclimate control system based on fuzzy logic] // Vestnik NGIEI. *Bulletin NGIEI*. 2019. No. 9 (100). P. 33–45. EDN: FYYJWA. (In Russ.).
14. Averkin A. N. Nechetkiye mnozhestva v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta: kniga po trebovaniyu [Fuzzy sets in control models and artificial intelligence: book on demand]. Moscow, 2013. 312 p. (In Russ.).

15. Panfilov A. E., Krushel E. G. Primeneniye Matlab-prilozheniya PDEapp dlya modelirovaniya dinamicheskikh protsessov s raspredelennymi parametrami [Using the Matlab application PDEapp for modeling dynamic processes with distributed parameters] // *Innovatsionnyye tekhnologii v obuchenii i proizvodstve. Innovative Technologies in Training and Production*. Volgograd, 2021. Vol. 1. P. 118–121. EDN: LOETOQ. (In Russ.).

16. Shilkina S. V., Fokina E. N. Kontroller nechetkoy logiki v upravlenii tekhnologicheskimi protsessami [The controller of fuzzy logic in the management of technological processes] // *Vestnik SibADI. The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018. Vol. 15, no. 1 (59). P. 106–114. EDN: YTMCNS. (In Russ.).

17. Ali R. B., Aridhi E., Mami A. [et al.]. Fuzzy logic controller of temperature and humidity inside an agricultural greenhouse *Environmental Science // 7th International Renewable Energy Congress*. Hammamet, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/IREC.2016.7478929. (In Engl.).

18. Mohamed S., Hameed I. A. A GA-Based Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Greenhouse Climate Control System // *Alexandria Engineering Journal*. 2018. Vol. 57 (2). P. 773–779. DOI: 10.1016/j.aej.2014.04.009. (In Engl.).

19. Nicolosi G., Volpe R., Messineo A. An Innovative Adaptive Control System to Regulate Microclimatic Conditions in a Greenhouse // *Energies*. 2017. Vol. 10, no. 5. P. 1–17. DOI: 10.1039/en10050722. (In Engl.).

20. Li G., Tang L., Zhang X. [et al.]. Factors affecting greenhouse microclimate and its regulating techniques // *8th International Conference on Environment Science and Engineering*. Barcelona, 2018. Vol. 167. P. 12–19. DOI: 10.1088/1755-1315/167/1/012019. (In Engl.).

PAYUK Lyubov Anatolyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electric Power Engineering and Electrical Engineering Department, Tomsk Polytechnic University (TPU), Tomsk.

SPIN-code: 3333-1750

AuthorID (RSCI): 555556

AuthorID (SCOPUS): 57160434900

Correspondence address: pla@tpu.ru

VORONINA Natalya Alekseyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electric

Power Engineering and Electrical Engineering Department, TPU, Tomsk.

SPIN-code: 3176-9091

AuthorID (RSCI): 790645

ORCID: 0000-0001-9327-6441

AuthorID (SCOPUS): 57159363700

ResearcherID: I-9992-2018

Correspondence address: voronina@tpu.ru

UMURZAKOVA Anara Daukenovna, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Electric Power Engineering and Electrical Engineering Department, TPU, Tomsk.

SPIN-code: 8079-5187

AuthorID (RSCI): 834837

AuthorID (SCOPUS): 56485976200

Correspondence address: granat_72@mail.ru

LAZUTKINA Elena Evgenyevna, Senior Lecturer of Electric Power Engineering and Electrical Engineering Department, TPU, Tomsk.

SPIN-code: 5709-4911

AuthorID (RSCI): 891147

AuthorID (SCOPUS): 56486119300

ResearcherID: AAI-5296-2020

Correspondence address: see@tpu.ru

KHATSEVSKIY Konstantin Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 7219-6033

AuthorID (RSCI): 465857

ORCID: 0000-0001-9504-1312

AuthorID (SCOPUS): 56503931800

ResearcherID: A-4002-2016

Correspondence address: xkv-post@rambler.ru

For citations

Payuk L. A., Voronina N. A., Umurzakova A. D., Lazutkina E. E., Khatsevskiy K. V. Greenhouse climate control system based on fuzzy logic // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 2 (190). P. 59–68. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-59-68.

Received December 04, 2023.

© L. A. Payuk, N. A. Voronina, A. D. Umurzakova,
E. E. Lazutkina, K. V. Khatsevskiy