

УДК 004.383.4:631.338.4
DOI 10.17513/snt.40440

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ И ВОДОСНАБЖЕНИЯ АЭРОАКВАПОННОЙ УСТАНОВКИ

Нечипоренко А.Ю., Пиотровский Д.Л.

ФГБОУ ВО «Российский технологический университет», Москва,
e-mail: piotrovsky2005@yandex.ru

В работе представлено исследование по разработке имитационной модели системы вентиляции и водоснабжения для аэроаквапонной установки. Исследование включает математическое моделирование процессов теплообмена в условиях выращивания картофеля в аэроаквапонной установке. Разработана комплексная модель, включающая системы управления компрессорно-конденсаторным блоком, трубчатыми электронагревателями и парогенератором. Эти элементы играют ключевую роль в поддержании оптимальных температурных и влажностных режимов внутри установки. Определены оптимальные технологические параметры работы системы для различных режимов функционирования: осушения, увлажнения и поддержания заданных параметров микроклимата. В ходе исследования получены коэффициенты настройки пропорционально-интегральных регуляторов для управления клапанами бассейна, компрессорно-конденсаторным блоком, трубчатыми электронагревателями и парогенератором. Эти коэффициенты обеспечивают точное и эффективное регулирование, что позволяет минимизировать отклонения от заданных параметров и поддерживать стабильность микроклимата. Установлены критические параметры системы, включая минимальный порог положения клапанов водоснабжения. Практическая значимость работы заключается в создании эффективного инструмента для анализа и оптимизации работы систем микроклимата аэроаквапонных установок. Это способствует повышению их энергоэффективности и продуктивности, что открывает новые возможности для сельского хозяйства и позволяет более рационально использовать ресурсы при выращивании сельскохозяйственных культур в контролируемых условиях.

Ключевые слова: аэроаквапоника, имитационная модель, система вентиляции, система водоснабжения, математическое моделирование, микроклимат, теплообмен, автоматическое управление

DEVELOPMENT OF SIMULATION MODEL OF VENTILATION AND WATER SUPPLY SYSTEM OF AERO AQUAPONIC INSTALLATION

Nechiporenko A.Yu., Piotrovskiy D.L.

Russian Technological University, Moscow, e-mail: piotrovsky2005@yandex.ru

The paper presents a study on the development of a simulation model of ventilation and water supply system for aero aquaponic plant. The study includes mathematical modeling of heat and mass transfer processes under conditions of potato growing in aero aquaponic plant. A complex model including control systems of compressor-condenser unit, tubular electric heaters and steam generator is developed. These elements play a key role in maintaining optimal temperature and humidity conditions inside the plant. Optimal technological parameters of the system operation for different modes of functioning: dehumidification, humidification and maintenance of specified microclimate parameters are determined. In the course of the research the adjustment coefficients of proportional-integral regulators for controlling the basin valves, compressor-condenser unit, tubular electric heaters and steam generator were obtained. These coefficients provide accurate and efficient regulation, which allows minimizing deviations from the set parameters and maintaining microclimate stability. Critical system parameters are established, including the minimum position threshold of the water supply valves. The practical significance of the work lies in the creation of an effective tool for analysis and optimization of microclimate systems of aero aquaponic plants. This contributes to improving their energy efficiency and productivity, which opens new opportunities for agriculture and allows for a more rational use of resources in growing crops under controlled conditions.

Keywords: aeroaquaponics, simulation model, ventilation system, water supply system, microclimate, mathematical modeling, heat and mass transfer, automatic control

Введение

В современных условиях развития сельскохозяйственной отрасли особую актуальность приобретает разработка инновационных технологий выращивания сельскохозяйственных культур [1, 2]. Одним из перспективных направлений является аэроаквапоника [3, 4] – интегрированная система, объединяющая принципы аэропо-

ники и аквакультуры, позволяющая существенно повысить эффективность производства сельскохозяйственной продукции.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания энергоэффективных систем микроклимата для аэроаквапонных установок, обеспечивающих оптимальные условия выращивания растений и содержания гидробионтов [5, 6].

Существующие решения [7, 8] не всегда позволяют достичь требуемого уровня автоматизации и контроля параметров среды, что негативно сказывается на продуктивности системы в целом.

Методы исследования включают математическое моделирование [9], численные методы расчета параметров микроклимата, построение психометрических диаграмм [10], а также методы компьютерного моделирования систем автоматического управления.

Научная новизна работы заключается в разработке комплексного подхода к моделированию систем микроклимата [11] аэроаквапонных установок с учетом сезонных изменений внешних условий и фаз развития растений. Предложенная методика позволяет создать адаптивную систему управления, обеспечивающую оптимальные условия выращивания сельскохозяйственных культур [12, 13].

Цель исследования – получение имитационной модели системы вентиляции и водоснабжения для анализа их работы в условиях аэроаквапонной установки.

Материалы и методы исследования

Все исследования проводились на базе РТУ МИРЭА, расположенного по адресу: г. Москва, пр-т Вернадского, д.78.

В ходе исследования был применен комплексный подход к математическому моделированию процессов тепломассообмена в аэроаквапонной установке [14]. Исследование включало численные методы расчета параметров микроклимата, построение психометрических диаграмм Молье и компьютерное моделирование систем автоматического управления. Особое внимание было уделено разработке и настройке пропорционально-интегральных регуляторов для управления клапанами бассейна, компрессорно-конденсаторным блоком, трубчатыми электронагревателями и парогенератором [15]. Методология исследования учитывала реальные параметры системы: объем помещения до 1000 м³, количество растений (100 кустов картофеля), характеристики теплового излучения и параметры испарения влаги при различных сезонных условиях. В результате был создан комплексный инструмент для анализа и оптимизации работы систем микроклимата аэроаквапонных установок.

Результаты исследования и их обсуждение

Исходными данными будем считать помещение объемом до 1000 м³, поделенное пополам, с одной сотней кустов картофеля.

При этом учитываем, что весь объем помещения должен продуваться не менее чем за час. Также примем во внимание, что верхняя зона получает инфракрасное тепловое излучение в размере 150 Вт, а также каждый куст картофеля в активной фазе вегетации выделяет до 1,8 л воды в час, и поскольку происходит адиабатическое увлажнение, то температура соответственно снижается. Для зимнего периода Центрального федерального округа России принимаем значение энтальпии 29,3, а среднесуточной температуры -26 °С, для летнего периода энтальпия равняется 54, а среднесуточная температура 26 °С [7].

На основе полученных ранее данных [3] и выдвинутых технических условиях для каждой из фаз [5] каждой зоны предлагается произвести полный расчет микроклимата. В табл. 1 представлен расчет для верхней камеры на первой фазе зимой.

Рассмотрим подробнее действия в расчете. Под номером 1 описаны параметры воздуха, поступающие непосредственно в помещение, другими словами – требования. Под номером 2 указывается воздух на выходе из помещения после воздействия ламп. Эти данные переписываются в столбик 6, а в столбике 5 указываются среднесуточные параметры зимой, указанные ранее как требования. Да, эти параметры могут быть и другими, но система изначально разрабатывается на средние (максимальные по модулю) значения. В столбике 7 отображаются параметры воздуха в камере смешивания. Так как нет острой необходимости перегонять весь воздух целиком, большая его часть сохраняется в системе, тем самым экономя ресурсы и стабилизируя систему от скачков. В столбике 8 отображаются параметры воздуха после нагрева, как мы видим, в результате нагрева стремительно падает влажность, что соответствует значениям, полученным на психометрической диаграмме Молье, представленным на рис. 1 слева. В столбике 9 отображается воздух после его увлажнения парогенератором, что полностью соответствует требованиям в столбике 1.

В табл. 2 представлен расчет для летнего времени при тех же фазе и помещении.

Первые семь столбиков по своей сути являются похожими, только имеют другие значения. В столбике 8 происходит процесс охлаждения с побочным осушением воздуха, что компенсируется парогенератором в столбике 9. Психометрическая диаграмма Молье для данного процесса представлена на рис. 1 справа.

Далее рассмотрим расчет для второй фазы зимнего периода (табл. 3).

Таблица 1

Расчет для верхней камеры на первой фазе зимой

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура	°С	23,0	23,9			-26	23,9	4,8	23	23
Влажность	%	52	49			100	49	100	31	52
Влагосодержание	г/кг	9,2	9,2			0,4	9,2	5,4	5,4	9,2
Энтальпия	кДж/кг	46,7	47,6			-25,4	47,5	18,3	36,9	46,7
Расход	м³/ч	500	500			200	300	500	500	500

Источник: составлено авторами.

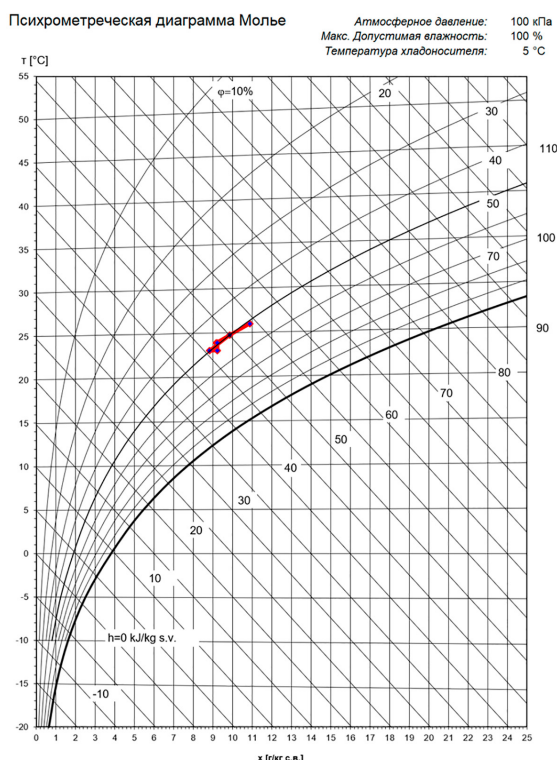
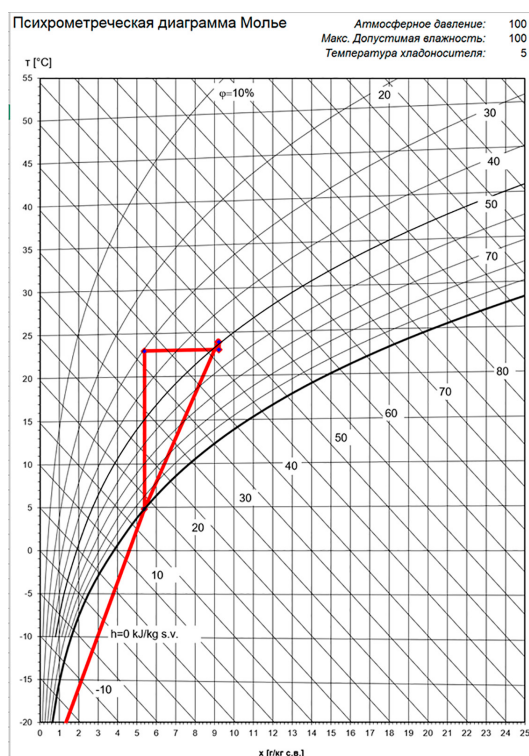
Рис. 1. Психометрическая диаграмма Мольте для верхней камеры на первой фазе
Источник: составлено авторами

Таблица 2

Расчет для верхней камеры на первой фазе летом

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура	°С	23,0	23,9			26	23,9	24,7	23	23
Влажность	%	52	49			51	49	50	50	52
Влагосодержание	г/кг	9,2	9,2			10,9	9,2	9,9	8,8	9,2
Энтальпия	кДж/кг	46,7	47,6			54	47,5	50,1	45,7	46,7
Расход	м³/ч	500	500			200	300	500	500	500

Источник: составлено авторами.

Как видно в таблице, помимо подогрева от ламп происходит адиабатическое увлажнение в столбике 3, что обусловлено ранее описанным испарением влаги с поверхности листьев картофеля.

Далее рассмотрим расчет для второй фазы летнего периода (табл. 4).

Несмотря на то, что после смешивания воздуха температура ниже уставки в столбике 8 происходит охлаждение воздуха,

но уже с целью осушения, компенсируя температуру в столбике 9 нагревателем. Психометрические диаграммы Молье соответствующие фазе 2 представлены на рис. 2.

В табл. 5 и 6 представлены расчеты для третьей фазы зимой и летом соответственно, а диаграммы отличаются лишь численно, поэтому рассмотрению не подлежат.

Таблица 3

Расчет для верхней камеры на второй фазе зимой

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура	°C	21,0	21,9	17,4		-26	17,4	3,6	21	21,0
Влажность	%	54	51	82		100	82	100	32	54
Влагосодержание	г/кг	8,5	8,5	10,3		0,4	10,3	4,9	4,9	8,5
Энтальпия	кДж/кг	42,7	43,6	43,6		-25,4	43,6	16,1	33,8	42,7
Расход	м³/ч	500	500	500		200	300	500	500	500

Источник: составлено авторами.

Таблица 4

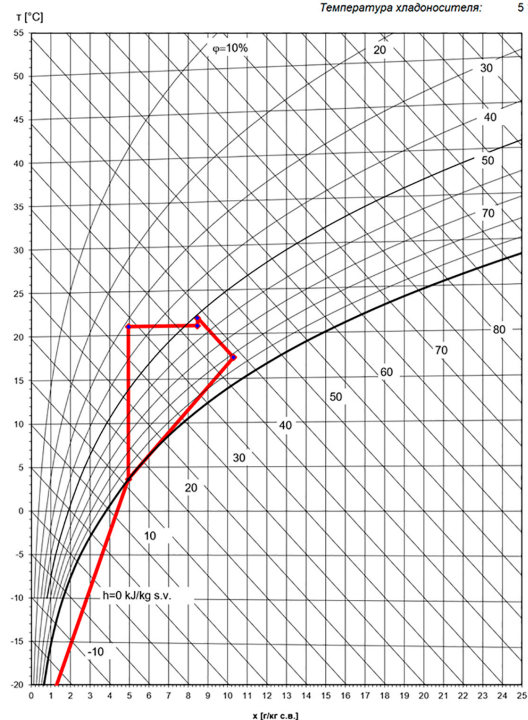
Расчет для верхней камеры на второй фазе летом

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура	°C	21,0	21,9	17,4		26	17,4	20,8	18,2	21,0
Влажность	%	54	51	82		51	82	68	64	54
Влагосодержание	г/кг	8,5	8,5	10,3		10,9	10,3	10,5	8,5	8,5
Энтальпия	кДж/кг	42,7	43,6	43,6		54	43,6	47,8	39,8	42,7
Расход	м³/ч	500	500	500		200	300	500	500	500

Источник: составлено авторами.

Психометрическая диаграмма Молье

Атмосферное давление: 100 кПа
Макс. Допустимая влажность: 100 %
Температура хладоносителя: 5 °C



Психометрическая диаграмма Молье

Атмосферное давление: 100 кПа
Макс. Допустимая влажность: 100 %
Температура хладоносителя: 5 °C

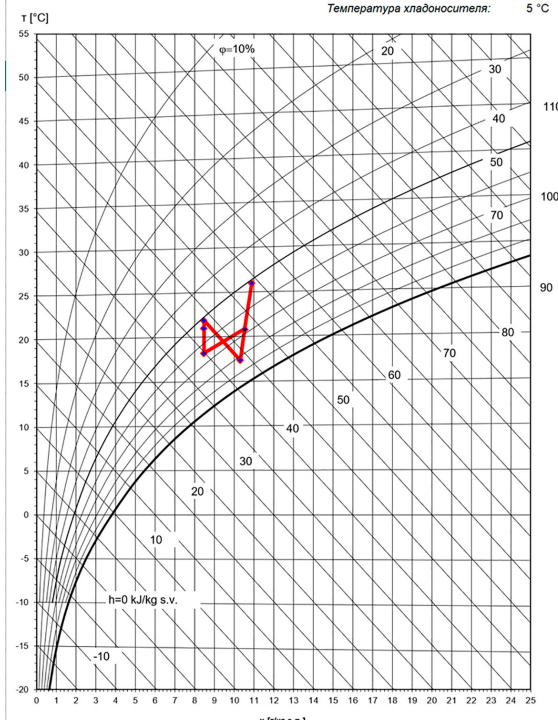


Рис. 2. Психометрическая диаграмма Молье для верхней камеры на второй фазе
Источник: составлено авторами

Таблица 5

Расчет для верхней камеры на третьей фазе зимой

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура	°С	19	19,9	15,3		-26	15,3	1,8	19	19
Влажность	%	51	48	81		100	81	100	32	51
Влагосодержание	г/кг	7,1	7,1	8,9		0,4	8,9	4,4	4,4	7,1
Энтальпия	кДж/кг	37,1	38	38		-25,4	38	12,8	30,2	37,1
Расход	м³/ч	500	500	500		200	300	500	500	500

Источник: составлено авторами.

Таблица 6

Расчет для верхней камеры на третьей фазе летом

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура	°С	19	19,9	15,3		26	15,3	19,6	16,2	19
Влажность	%	51	48	81		51	81	67	60	51
Влагосодержание	г/кг	7,1	7,1	8,9		10,9	8,9	9,7	7	7,1
Энтальпия	кДж/кг	37,1	38	38		54	38	44,4	34	37,1
Расход	м³/ч	500	500	500		200	300	500	500	500

Источник: составлено авторами.

Таблица 7

Расчет для нижней камеры зимой

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура	°С	-26	14	14						
Влажность	%	100	4	50						
Влагосодержание	г/кг	0,4	0,4	85						
Энтальпия	кДж/кг	-25,4	15	26,8						
Расход	м³/ч	500	500	500						

Источник: составлено авторами.

Таблица 8

Расчет для нижней камеры летом

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура	°С	26	14	14						
Влажность	%	51	36	50						
Влагосодержание	г/кг	10,9	3,6	5						
Энтальпия	кДж/кг	54	23,1	26,8						
Расход	м³/ч	500	500	500						

Источник: составлено авторами.

Расчеты для нижней камеры существенно проще, так как камера смешивания отсутствует в силу огромного количества влаги на выходе из системы и, как показано в табл. 7 и 8, составляет всего 3 столбца. Для зимнего периода исходный воздух подогревается и увлажняется, а для летнего охлаждается и увлажняется соответственно.

Диаграмма Молье на данных рисунках имеет простейшую прямолинейную форму и в демонстрации не нуждается.

На основании полученных в ходе аналитического исследования количественных данных (табл. 1–8), отражающих динамику изменения параметров микроклимата в различных фазах и климатических условиях,

осуществим переход к имитационному моделированию функционирования системы, численно повторяющему ранее полученные значения в реперных точках.

В рамках оптимизации параметров ПИ-регулятора представляется целесообразным сформулировать локальный критерий, учитывающий как быстродействие системы, так и качество переходного процесса. Данный критерий заключается в минимизации времени достижения установившегося режима при строгом соблюдении условия монотонности переходного процесса, исключающей возникновение колебаний. Математически это можно представить как задачу оптимизации, где целевая функция включает время регулирования и штрафные функции за отклонение от монотонного поведения системы. Такой подход позволяет достичь оптимального баланса между скоростью реакции регулятора и устойчивостью системы управления, что особенно важно при работе с объектами, чувствительными к колебаниям регулируемой величины или при работе с объектами, имеющими большую инертность, например, при работе ККБ [10, 11].

Для получения коэффициентов ПИ регулятора воспользуемся блоком «Оптимизатор» пакета SimInTech, параметры которого представлены на рис. 3.

Проанализируем имитационную модель, иллюстрирующую функционирование компрессорно-конденсаторного блока (ККБ) и трубчатого электронагревателя (ТЭН) в контексте вентиляционной установки для аэроавапонной системы, как представлено на рис. 4.

Если необходимо выполнить задачу поддержания температуры внутри системы, то достаточно функционирования лишь одного из блоков, при этом уставка будет совпадать. График работы, соответствующий данному примеру, представлен на рис. 4.

Стоит отметить, что трубчатый электронагреватель (ТЭН) не активен, в то время как компрессорно-конденсаторный блок (ККБ) функционирует и поддерживает заданную температуру. Однако также важно контролировать уровень влажности. Для увлажнения воздуха необходимо внедрить отдельный пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор. В случае осушения можно использовать зависимость влажности от температуры через диаграмму Молье.

Как следует из приведенного примера, для достижения необходимого уровня влажности требуется переохлаждение воздуха до 18,2 °С, после чего его следует вернуть к установленным значениям при 21 °С.

В результате моделирования был получен график, представленный на рис. 5.

Если требуется увеличение влажности воздуха, то необходимо использовать парогенератор, поскольку, в отличие от адиабатического увлажнителя воздуха, он не влияет на температуру воздуха.

Для функционирования парогенератора требуется подача воды через клапан, управляемый пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором. Чем больше воды содержится в баке с графитовыми стержнями, тем интенсивнее происходит выделение пара.

В результате моделирования был получен график, представленный на рис. 6.



Название	Имя	Формула	Значение
Абсолютная точность подбора значений выходов	yabserror	[0.01,0.01]	[0.01 , 0.01]
Выдача информации о процессе оптимизации	printoptinfo		☒ Да
Выставить начальную точку вручную	manualpoint		☐ Нет
Максимальное количество повторных моделирований при ра...	maxiter	200	200
Максимальные значения входных критериев оптимизации	umax	[3,1.3]	[3 , 1.3]
Максимальные значения выходов блока	ymax	[10,20]	[10 , 20]
Метод оптимизации	optmethod		Симплекс
Минимальные значения входных критериев оптимизации	umin	[0.1,0.1]	[0.1 , 0.1]
Минимальные значения выходов блока	ymin	[0,1,0.1]	[0 , 1 , 0.1]
Начальное приближение выходов блока	x0	[0.1,0.1]	[0.1 , 0.1]
Начальное приращение выходов	dparams	[0.1,0.1]	[0.1 , 0.1]
Периодичность анализа критериев оптимизации при расчёте ...	optstep	1	1
Режим оптимизации параметров	optmode		По полному переходном...
Тип суммарного критерия оптимизации	usumtype		Квадратичный

Рис. 3. Настройка блока «Оптимизатор»



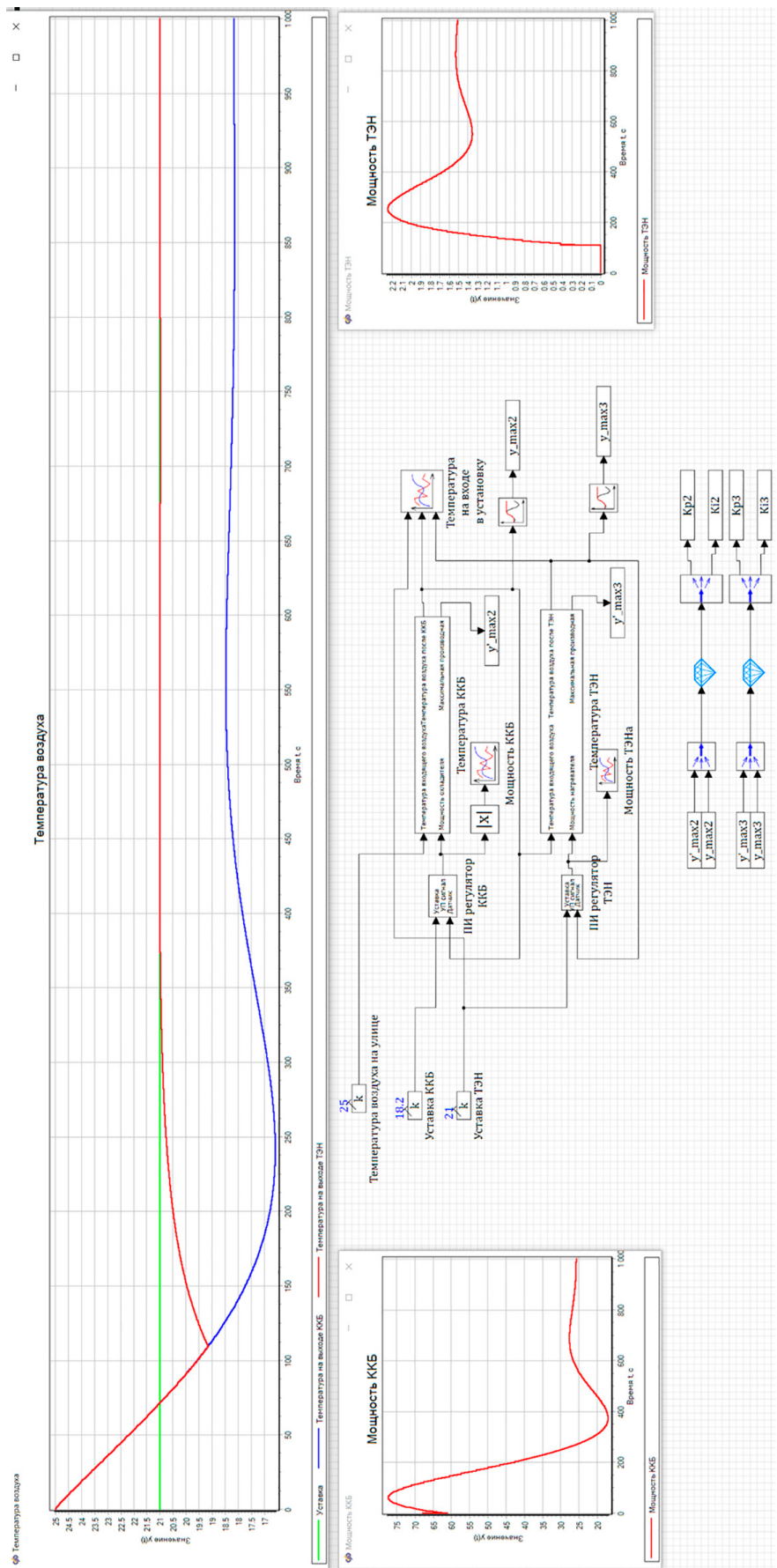


Рис. 5. Моделирование системы при осушении
Источник: составлено авторами

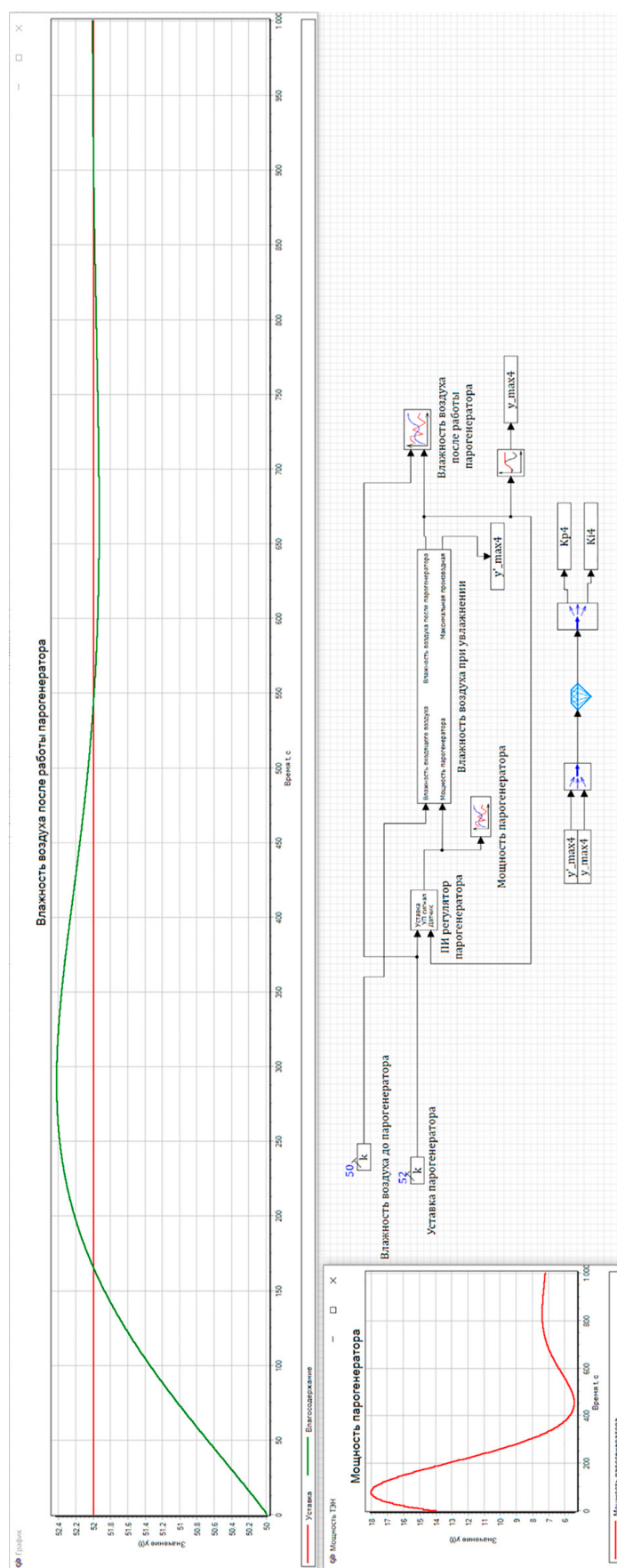


Рис. 6. Моделирование системы при увлажнении
Источник: составлено авторами

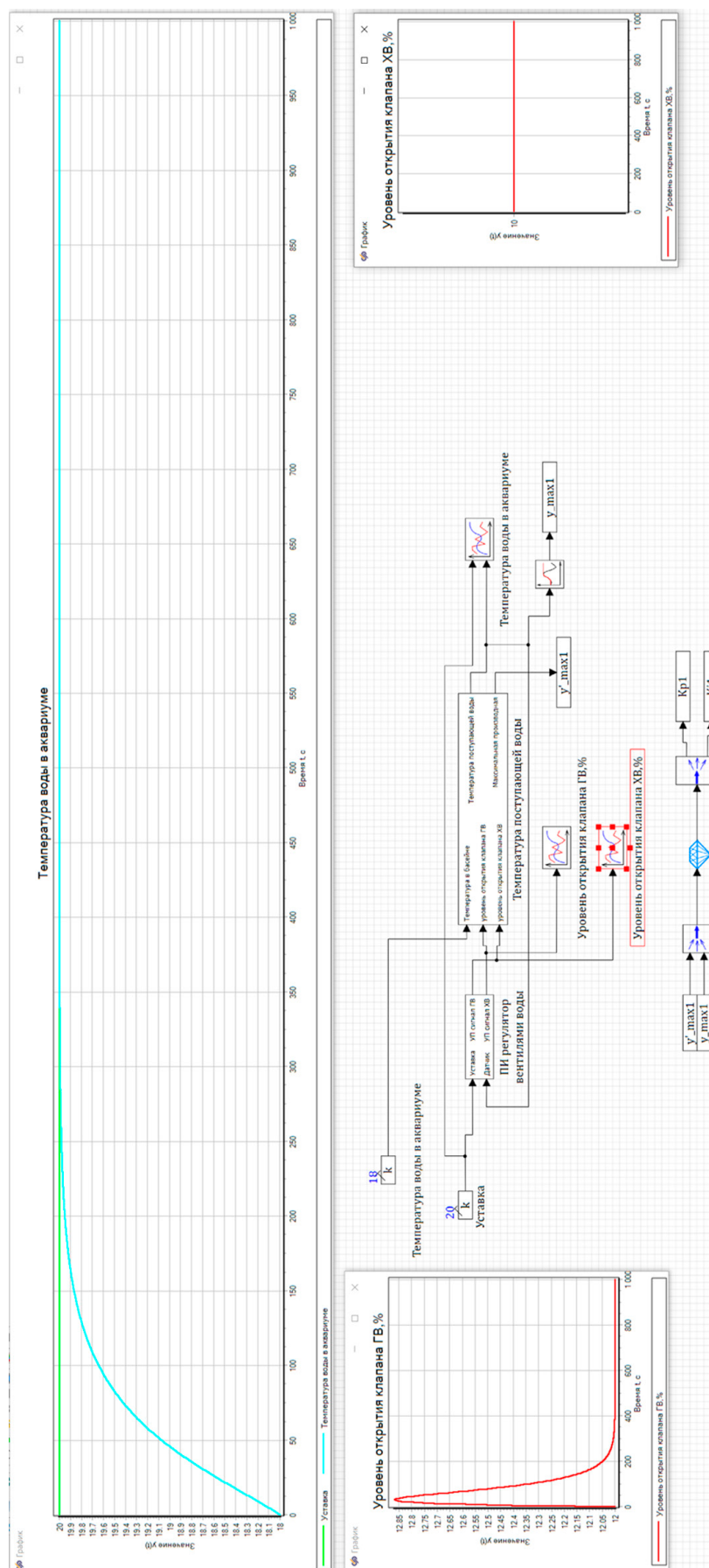


Рис. 7. Моделирование системы долива воды в аквариум
 Источник: составлено авторами

Моделирование системы подачи воды в аквариум представлено на рис. 7.

Важно подчеркнуть, что для клапанов горячего и холодного водоснабжения (ГВ и ХВ) установлен минимальный порог в 10% от их максимальной пропускной способности. Это обусловлено необходимостью не только поддержания заданной температуры, но и обеспечения стабильного уровня воды в системе.

При достижении требуемой температуры система может столкнуться с ограничением, связанным с невозможностью дальнейшего добавления воды при текущем минимальном протоке. Таким образом, минимальный порог положения клапана в 10% становится критическим параметром, обеспечивающим баланс между поддержанием температуры и уровнем воды в системе.

В результате моделирования и работы блока «Оптимизатор» были получены следующие коэффициенты для ПИ регуляторов:

- для клапанов бассейна $P = 6$; $I = 0,1$;
- для ККБ $P = 9$; $I = 0,15$;
- для ТЭН $P = 9$; $I = 0,15$;
- для парогенератора $P = 7$; $I = 0,1$.

Заключение

В ходе проведенного исследования была успешно разработана комплексная имитационная модель системы вентиляции и водоснабжения для аэроаквапонной установки. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

– Создана имитационная модель, учитывающая особенности тепломассообмена в различных зонах установки, включая верхнюю и нижнюю камеры, а также систему подачи воды в аквариум.

– Проведено моделирование работы основных компонентов системы: компрессорно-конденсаторного блока (ККБ), трубчатого электронагревателя (ТЭН) и парогенератора. Определены оптимальные режимы их функционирования в зависимости от сезонных условий и фаз развития растений.

– Установлены критические параметры системы, включая минимальный порог положения клапанов горячего и холодного водоснабжения (10% от максимальной пропускной способности), обеспечивающий баланс между поддержанием температуры и уровнем воды в системе.

Список литературы

1. Терентьева Е.В., Ткаченко О.В. Аэропонный способ получения мини-клубней картофеля // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2017. № 1. С. 75–84. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aeroponnyy-sposob-polucheniya-mini-klubney-kartofelya> (дата обращения: 19.05.2025).
2. Терентьева Е.В., Ткаченко О.В. Получение мини-клубней картофеля аэропонным способом // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2018. № 4. С. 61–72. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-mini-klubney-kartofelya-aeroponnyy-sposobom> (дата обращения: 19.05.2025).
3. Нечипоренко А.Ю., Пиотровский Д.Л. Математическое моделирование процесса аэроаквапонии с определением оптимальных технологических параметров // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 11. С. 75–79. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40213> (дата обращения: 19.05.2025). DOI: 10.17513/snt.40213. EDN: KUOUYZ.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686770 Российская Федерация. Программа расчета оптимальных параметров функции множества переменных: № 2024686186: заявл. 02.11.2024; опубл. 12.11.2024 / А.Ю. Нечипоренко, Д.Л. Пиотровский, А.С. Кладов. EDN: OLTNDH.
5. Эскобар Х.П., Сандоваль А.А., Биензи П.М., Саласар Х.Д. Здания вертикальных ферм в умных городах // Системные технологии. 2020. № 1 (34). С. 73–76. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zdaniya-vertikalnyh-ferm-v-umnyh-gorodah> (дата обращения: 19.05.2025). EDN: TURTJR.
6. Мартиросян Ю.Ц., Кособрухов А.А., Мартиросян В.В. Аэропонные технологии в безвирусном семеноводстве – преимущества и перспективы // Достижения науки и техники АПК. 2016. № 10. С. 47–51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aeroponnye-tehnologii-v-bezvirusnom-semenovodstve-preimushchestva-i-perspektivy> (дата обращения: 19.05.2025). EDN: WWRMXX.
7. Сашина А.Д., Березина А.О., Майданов Н.А., Алимурадов А.К. Обзор способов и перспективы развития информационно-измерительных и управляющих систем выращивания растений в условиях городской среды // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 4 (46). С. 32–42. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-sposobov-i-perspektivy-razvitiya-informatsionno-izmeritelnyh-i-upravlyayuschih-sistem-vyraschivaniya-rasteniy-v-usloviyah> (дата обращения: 19.05.2025). DOI: 10.21685/2307-5538-2023-4-4.
8. Моргунов А.П., Киргизова И.В. Блок управления дозированной подачи питательного раствора в промышленной аэропонной установке // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. № 1. С. 181–184. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/blok-upravleniya-dozirovannoy-podachi-pitatelnogo-rastvora-v-promyshlennoy-aeroponnoy-ustanovke> (дата обращения: 19.05.2025). DOI: 10.25206/20310-9793-2018-6-1-181-184.
9. Ленченко С.О., Львов Ю.Б. Динамика гидрохимических показателей воды УЗВ при интегрированном выращивании рыбы и растений // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 12–1 (114). С. 134–136. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-gidrohimicheskikh-pokazateley-vody-uzv-pri-integrirovannom-vyraschivani-ryby-i-rasteniy> (дата обращения: 19.05.2025). DOI: 10.23670/IRJ.2021.114.12.021.
10. Шматов Д.П., Дахин С.В., Тимошинова Т.С. Моделирование процессов тепломассообмена при парообразовании в потоке высокотемпературного газа // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. № 12–1. С. 106–109. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-protsessov-teplomassoobmena-pri-paroobrazovanii-v-potoke-vysokotemperaturnogo-gaza> (дата обращения: 19.05.2025).
11. Таланов В.Д., Архангельская Е.Л. Разработка программно-методического комплекса автоматического регулирования системы теплоснабжения жилого района // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2007. № 2. С. 47–48. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-programmno-metodicheskogo-kompleksa-avtomaticheskogo-regulirovaniya-sistemy-teplosnabzheniya-zhilogo-rayona> (дата обращения: 19.05.2025).

12. Смирнов В.В., Яворовский Ю.В., Сенников В.В. Устройство для повышения эффективности работы централизованной системы теплоснабжения // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2018. № 5. С. 17–25. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustroystvo-dlya-povysheniya-effektivnosti-raboty-tsentralizovannoy-sistemy-teplosnabzheniya> (дата обращения: 19.05.2025).

13. Бадьин А.В., Сусяев В.И., Саркисян А.С., Казанин В.А., Ланин Е.В., Южаков М.С. Применение системы удаленного мониторинга динамики атмосферных параметров в Сибирском ботаническом саду Томского государственного университета // Экосистемы. 2023. № 34. С. 5–14. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-sistemy-udalennogo-monitoringa-dinamiki-atmosfernyh-parametrov-v-sibirskom-botanicheskom-sadu-tomskogo-gosudarstvennogo> (дата обращения: 19.05.2025).

14. Гордеев Д.Г., Греченева А.В., Самусенко А.С. Автоматизированная система аэропного выращивания на основе технологии искусственного интеллекта // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 502–508. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizirovannaya-sistema-aeropnogo-vyraschivaniya-na-osnove-tehnologii-iskusstvennogo-intellekta> (дата обращения: 19.05.2025). DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-502-503.

15. Аникина И.Н., Хутинаев О.С., Султумбаева А.К. Аэропоника как фактор повышения коэффициента размножения меристемного картофеля // European science. 2017. № 6 (28). С. 40–44. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aeroponika-kak-faktor-povysheniya-koeffitsienta-razmnozheniya-meristemnogo-kartofelya> (дата обращения: 19.05.2025).