

УДК 004:502.057

DOI 10.17513/snt.40460

ВЫБОР СТРАТЕГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ АЭРОАКВАПОННОЙ УСТАНОВКОЙ

¹Нечипоренко А.Ю., ²Пиотровский Д.Л.¹РТУ МИРЭА «Российский технологический университет», Москва²РТУ МИРЭА «Российский технологический университет», Москва,

e-mail: piotrovsky2005@yandex.ru.

В статье рассматривается проблема создания эффективных систем управления аэроаквапонными установками – замкнутых экосистем для совместного выращивания растений и водных организмов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки автоматизированных систем управления для повышения производительности и экономической эффективности таких установок. Целью исследования является определение управляющих воздействий для технологического процесса выращивания картофеля в аэроаквапонной установке. В работе использовались методы математического моделирования, включая разработку дифференциальных уравнений для описания температурных режимов и влажности в камерах установки, а также параметров водной среды в аквариуме. Особое внимание уделено анализу нелинейности и нестационарности системы, что потребовало применения численных методов управления. В результате исследования были разработаны комплексные математические модели технологических процессов, протекающих в аэроаквапонной установке. Созданы модели контроля температуры и влажности в камерах для разных сезонов эксплуатации, учитывающие процессы испарения и увлажнения. Разработаны модели управления pH в аквариуме с учетом влияния аммиака и необходимости обновления воды. Проанализирована взаимосвязь управляющих сигналов, что позволило определить необходимость использования ПИ-регуляторов для точного поддержания параметров. Полученные результаты позволяют создать эффективную систему автоматического управления аэроаквапонной установкой, обеспечивающую оптимальные условия для выращивания картофеля. Разработанные математические модели и рекомендации по выбору управляющих параметров могут быть использованы для создания автоматизированных систем управления аналогичными установками.

Ключевые слова: аэроаквапоника, математическая модель, автоматическое управление, температурные режимы, влажность воздуха, системы управления, автоматическое управление

TO THE CHOICE OF CONTROLLABLE PARAMETERS OF AERO AQUAPONIC SYSTEM

¹Nechiporenko A.U., ²Piotrovsky D.L.¹Russian Technological University, Moscow²Russian Technological University, Moscow, e-mail: piotrovsky2005@yandex.ru.

The article discusses the problem of creating effective control systems for aeroponic installations—closed ecosystems for the joint cultivation of plants and aquatic organisms. The relevance of the research is due to the need to develop automated control systems to increase the productivity and economic efficiency of such installations. The aim of the study is to analyze the control system of an aeroponic installation using the example of potato cultivation. The work used mathematical modeling methods, including the development of differential equations to describe temperature regimes and humidity in the installation chambers, as well as the parameters of the aquatic environment in the aquarium. Particular attention was paid to the analysis of the nonlinearity and non-stationarity of the system, which required the use of numerical control methods. As a result of the research, comprehensive mathematical models of the technological processes of the aeroponic installation were developed. Models for controlling temperature and humidity in the chambers for different seasons of operation were created, taking into account the processes of evaporation and humidification. Models for controlling the pH in the aquarium were developed, taking into account the influence of ammonia and the need to renew the water. The interrelationship of control signals was analyzed, which made it possible to determine the need to use PI controllers to accurately maintain the parameters. The results obtained make it possible to create an effective automatic control system for an aeroponic installation, providing optimal conditions for growing potatoes. The developed mathematical models and recommendations for selecting control parameters can be used to create automated control systems for similar installations.

Keywords: aeroponics, mathematical model, automatic control, temperature regimes, air humidity, control systems, automatic control

Введение

Аэроаквапонные установки представляют собой замкнутые экосистемы, в которых происходит взаимосвязанное выращивание растений и водных организмов [1, 2]. В таких системах растения получают пи-

тательные вещества из воды, обогащенной продуктами жизнедеятельности рыб, а растения, в свою очередь, очищают воду. Это позволяет создать практически безотходное производство с высокой эффективностью использования ресурсов [3, 4].

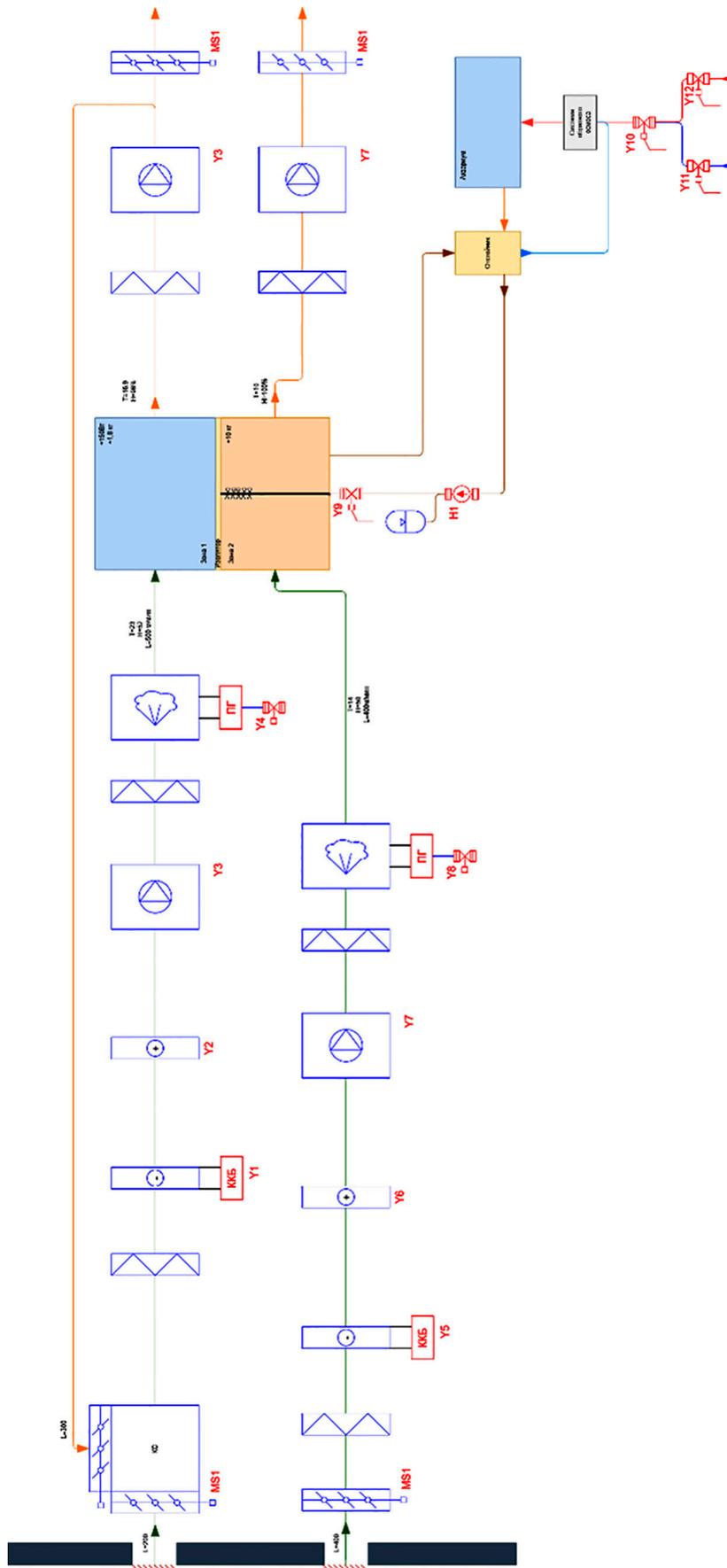


Схема вентиляции и водоснабжения аэроквадронной установки
 Источник: составлено авторами

Особое значение аэроаквапоника приобретает в условиях городских территорий, где ограничен доступ к земельным участкам [5]. Кроме того, данная технология позволяет осуществлять круглогодичное выращивание сельскохозяйственных культур независимо от климатических условий, что делает ее особенно привлекательной для промышленного применения [6].

Практическая ценность исследования выражается в том, что его результаты могут быть использованы для разработки систем автоматического управления аэроаквапонными установками. Это, в свою очередь, приведет к увеличению их производительности и будет способствовать экономической целесообразности.

Цель исследования – определение управляющих воздействий для технологического процесса выращивания картофеля в аэроаквапонной установке.

Материалы и методы исследования

Все исследования проводились на базе Российского технологического университета МИРЭА.

На рисунке представлена схема вентиляции и водоснабжения аэроаквапонной установки. Вентиляционная подсистема выполнена по двухкамерной схеме [5] с последовательным расположением компонентов в приточном контуре: регулируемая воздушная заслонка, камера смешивания для верхней камеры установки, фильтрующий элемент грубой очистки воздуха, компрессорно-конденсаторный блок (обозначения Y1, Y5), трубчатый электронагреватель (Y2, Y6), вентилятор (Y3, Y7), фильтр тонкой очистки воздуха и парогенератор (Y4, Y8). В вытяжном контуре реализована аналогичная конфигурация оборудования: фильтр очистки воздуха, вентилятор и регулируемая воздушная заслонка. Водяная подсистема включает в себя рыбоводный аквариум, резервуар-отстойник для загрязненной воды, осмотическую установку водоочистки, регулирующие клапана и насосный агрегат высокого давления (Н1) с гидроаккумулятором.

Методологическая база включает разработку дифференциальных уравнений для

описания изменения температуры и влажности в верхней и нижней камерах, а также параметров водной среды в аквариуме. Особое внимание уделяется анализу нелинейности и нестационарности системы, что требует применения численных методов управления. В работе используются пропорционально-интегральные регуляторы для контроля кондиционеров, трубчатых электронагревателей, парогенераторов и клапанов подачи воды, а также рассматривается возможность применения дискретного управления для некоторых элементов системы. Исследование учитывает сезонность работы установки, что позволяет создать эффективную систему управления технологическими процессами выращивания картофеля [7, 8].

Для обеспечения точности и надежности управления проведен детальный анализ взаимосвязей между управляющими сигналами и их влиянием на различные параметры системы [9, 10]. Моделирование включает разработку систем уравнений, описывающих тепловой и материальный баланс, взаимосвязь концентрации аммиака и pH, а также температурный режим воды в аквариуме.

Результаты исследования и их обсуждение

Поскольку система является двухкамерной [1], следует рассматривать каждую камеру по отдельности.

Также стоит учитывать сезонность работы установки, так как в зимний сезон процесс изменения температуры значительно отличается от изменений ее в летний сезон [11, 12].

Классический подход получения математической модели технологического процесса базируется на уравнениях материального и теплового баланса. Исходные уравнения (1), (3), (8), (13) и (15) составлены авторами в соответствии с особенностями функционирования установки (рисунок).

Исходным уравнением для получения модели «подача воздуха – температура в верхней камере летом» является уравнение теплового баланса без учета тепловых потерь, которое будет иметь вид:

$$v_{kl} \times C_{воз} \times (T_{тэн1} - T_{ккб1} + T_{кc}) \times dt = (m_6 \times C_6) \times dT_{кл1}, \quad (1)$$

где v_{kl} – массовый расход воздуха, продуваемого через верхнюю камеру, л/с; $C_{воз}$ – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(°C * кг); $T_{тэн1}$ – температура воздуха после трубчатого электронагревателя (ТЭН), °C; $T_{ккб1}$ – температура воздуха после теплообменника компрессорно-конденсаторного блока (ККБ), °C; $T_{кc}$ – температура воздуха после камеры смешивания с вытяжным воздухом, °C; m_6 – масса ботвы, кг; C_6 – удельная теплоемкость ботвы, Дж/(°C * кг); $dT_{кл1}$ – приращение температуры воздуха в верхней камере летом за время dt , °C.

Запишем выражение для определения приращения температуры в верхней камере:

$$dT_{к1} = \frac{v_{к1} * C_{воз} * (T_{тн1} - T_{ккб1} + T_{кc})}{m_6 * C_6} * dt. \quad (2)$$

Расход среды в общем виде определяется выражением:

$$q = q_{max} * A_0 * \sqrt{P_m - P_{атм}}, \quad (3)$$

где q – массовый расход среды через регулирующий орган, кг/с; q_{max} – массовый расход среды через регулирующий орган при перепаде давления на нем 0,1 МПа, кг/(Па * с); A_0 – степень открытия регулирующего органа; P_m – давление в магистрали, Па; $P_{атм}$ – атмосферное давление, Па.

Подставляя в формулу (2) выражение (3), без учета инерционности исполнительного механизма, получаем искомое дифференциально выражение:

$$\frac{dT_{к1}}{dt} = \frac{v_{к1} * C_{воз} * (T_{тн1} * Y_2 - T_{ккб1} / Y_1 + T_{кc})}{m_6 * C_6} * Y_3, \quad (4)$$

где Y_1 – управляющий сигнал мощностью ККБ; Y_2 – управляющий сигнал мощностью ТЭНа; Y_3 – управляющий сигнал мощностью двигателей, обеспечивающих газообмен в верхней камере.

Поскольку в зимний период единственное отличие в работе – это отсутствие осушения и охлаждения [13, 14], то ККБ в расчетах не учитывается и выражение (4) будет иметь вид:

$$\frac{dT_{к31}}{dt} = \frac{v_{к1} * C_{воз} * (T_{тн1} * Y_2 + T_{кc})}{m_6 * C_6} * Y_3, \quad (5)$$

где $dT_{к31}$ – приращение температуры воздуха в верхней камере зимой за время dt , °С.

Так как нижняя камера отличается от верхней только отсутствием камеры смешивания и распылением дополнительной влаги (питательного раствора), то уравнения для летнего (4) и зимнего (5) режимов будут иметь вид:

$$\frac{dT_{к12}}{dt} = \frac{v_{к2} * C_{воз} * (T_{тн2} * Y_6 - T_{ккб2} / Y_5) + q_{c1} * C_{в} * T_{в} * Y_9}{m_k * C_k} * Y_7, \quad (6)$$

где q_{c1} – массовый расход воды через клапан аэрационной системы, л/с; $C_{в}$ – удельная теплоемкость воды, Дж/(°С * кг); $T_{в}$ – температура воды, поступающей в систему, °С; $dT_{к12}$ – приращение температуры воздуха в нижней камере летом за время dt , °С; Y_5 – управляющий сигнал мощностью ККБ; Y_6 – управляющий сигнал мощностью ТЭНа; Y_7 – управляющий сигнал мощностью двигателей, обеспечивающих газообмен в нижней камере; Y_9 – управляющий сигнал клапаном аэрации.

С учетом указанных выше особенностей работы в зимний период получаем, что выражение (8) будет иметь вид:

$$\frac{dT_{к32}}{dt} = \frac{v_{к2} * C_{воз} * T_{тн2} * Y_6 + q_{c1} * C_{в} * T_{в} * Y_9}{m_k * C_k} * Y_7, \quad (7)$$

где $dT_{к32}$ – приращение температуры воздуха в нижней камере зимой за время dt , °С.

Исходным уравнением для получения модели по каналу «переосушение и увлажнение воздуха – влажность воздуха в верхней камере летом» является уравнение материального баланса, имеющее вид:

$$v_{к1} * (V_{вх1} - V_{вых1}) * dt = (P_{увл1} - m_{конд1} + m_{кc}) * dH_{к1}, \quad (8)$$

где $v_{к1}$ – массовый расход воздуха, продуваемого через верхнюю камеру, л/с; $V_{вх1}$ – начальное влагосодержание воздуха на входе, г/кг; $V_{вых1}$ – конечное влагосодержание воздуха на выходе, г/кг; $P_{увл1}$ – производительность увлажнителя, л/с; $m_{конд1}$ – масса конденсата на выходе ККБ, л/с; $m_{кc}$ – приращение влагосодержания после камеры смешивания, л; $dH_{к1}$ – приращение влажности в верхней камере установки за время dt , учитывающее естественное испарение влаги с поверхности листьев летом, кг.

Подставляя в формулу (10) выражение (3), без учета инерционности исполнительного механизма, получаем искомое дифференциально выражение:

$$\frac{dH_{\text{кл1}}}{dt} = \frac{P_{\text{увл1}} * Y_4 - m_{\text{конд1}} * Y_1 + m_{\text{кв}} * Y_3}{(V_{\text{вх}} - V_{\text{вых}}) * v_{\text{к1}}}, \quad (9)$$

где Y_1 – управляющий сигнал мощностью ККБ; Y_3 – управляющий сигнал мощностью двигателей, обеспечивающих газообмен в верхней камере; Y_4 – управляющий сигнал клапаном подачи воды для повышения влажности входящего в верхнюю камеру воздуха.

С учетом указанных выше особенностей работы в зимний период получаем, что выражение (9) будет иметь вид:

$$\frac{dH_{\text{кз1}}}{dt} = \frac{P_{\text{увл1}} * Y_4 + m_{\text{кв}}}{(V_{\text{вх1}} - V_{\text{вых1}}) * v_{\text{к1}}} * Y_3, \quad (10)$$

где $dH_{\text{кз1}}$ – приращение влажности в верхней камере установки за время dt , учитывающее естественное испарение влаги с поверхности листьев зимой, кг.

Так как нижняя камера отличается от верхней только отсутствием камеры смешивания и распылением дополнительной влаги (питательного раствора), то уравнения для летнего (9) и зимнего (10) режимов будут иметь вид:

$$\frac{dH_{\text{кл2}}}{dt} = \frac{P_{\text{увл2}} * Y_8 - m_{\text{конд2}} * Y_5 + m_{\text{рпр}} * Y_9}{(V_{\text{вх2}} - V_{\text{вых2}}) * v_{\text{к2}}} * Y_7, \quad (11)$$

где $m_{\text{рпр}}$ – масса распыленного питательного раствора, л/с; $dH_{\text{кл2}}$ – приращение влажности в нижней камере установки за время dt , учитывающее естественное испарение влаги с поверхности листьев летом, кг; Y_5 – управляющий сигнал мощностью ККБ; Y_7 – управляющий сигнал мощностью двигателей, обеспечивающих газообмен в нижней камере; Y_8 – управляющий сигнал клапаном подачи воды для повышения влажности входящего в нижнюю камеру воздуха; Y_9 – управляющий сигнал клапаном аэрации.

$$\frac{dH_{\text{кз2}}}{dt} = \frac{P_{\text{увл2}} * Y_8 + m_{\text{рпр}} * Y_9}{(V_{\text{вх2}} - V_{\text{вых2}}) * v_{\text{к2}}} * Y_7, \quad (12)$$

где $dH_{\text{кз2}}$ – приращение влажности в верхней камере установки за время dt , учитывающее естественное испарение влаги с поверхности листьев зимой, кг.

Экспериментальные данные указывают на необходимость поддержания постоянного уровня рН в течение всего периода выращивания, поскольку его отклонения от оптимального значения существенно влияют на продуктивность. Постоянный контроль рН осуществляется в аквариуме с рыбами.

Рыбы в процессе жизнедеятельности [15] выделяют аммиак (NH_3), который, взаимодействуя с водой, образует гидроксид аммония (NH_4OH), что приводит к повышению рН в зависимости от концентрации. Концентрация аммиака и рН связаны уравнением Генри. При температуре 22–24°C и нормальном атмосферном давлении:

$$dpH = \left(10 - pKa + \log \left(\frac{\Delta[\text{NH}_3]}{\Delta[\text{NH}_4^+]}} \right) \right) * dt, \quad (13)$$

где dpH – изменение показателя рН раствора; $\Delta[\text{NH}_3]$ – изменение концентрации аммиака; $\Delta[\text{NH}_4^+]$ – изменение концентрации ионов аммония; pKa – диссоциационная константа основания конкретного соединения (для NH_3 равна примерно 9,25).

Поскольку NH_3 является слабым соединением, концентрация ионов аммония приблизительно равна концентрации аммиака. При концентрации NH_3 в 1 моль/л рН составляет 9,25, что значительно выше оптимального уровня.

Для поддержания оптимального рН необходимо его постоянное снижение. Это достигается мониторингом рН и регулярным обновлением воды. Грязная вода направляется в отстойники для получения концентрата аммиака, а лишняя вода смешивается с внешней водой, проходит через системы обратного осмоса, минерализации и аэрации, после чего возвращается в аквариум с заданным рН.

В концентрат аммиака добавляются минеральные вещества для получения оптимального раствора по питательным веществам и рН.

Подставляя в формулу (13) выражение (3), без учета инерционности исполнительного механизма, получаем искомое дифференциально выражение:

$$\frac{dpH}{dt} = \left(10 - pKa + \log \left(\frac{\Delta[NH_3]}{\Delta[NH_4^+]} \right) \right) * Y_{10}, \quad (14)$$

где Y_{10} – управляющий сигнал клапаном подачи воды в аквариум.

Исходным управлением для получения модели «Изменение температуры подаваемой воды – температура в аквариуме» является уравнение теплового баланса без учета тепловых потерь, которое будет иметь вид:

$$V_{\text{воды}} * C_{\text{воды}} * dT_{\text{ак}} = \left(Q_{\text{гв}} * C_{\text{воды}} * (T_{\text{гв}} - T_{\text{ак}}(t)) + Q_{\text{хв}} * C_{\text{воды}} * (T_{\text{хв}} - T_{\text{ак}}(t)) \right) dt \quad (15)$$

где $V_{\text{воды}}$ – общий объем воды, л; $C_{\text{воды}}$ – удельная теплоемкость воды, Дж/(°C * кг); $Q_{\text{гв}}$ – объем горячей воды, поступающей в аквариум, л/мин; $Q_{\text{хв}}$ – объем холодной воды, поступающей в аквариум, л/мин; $T_{\text{гв}}$ – температура горячей воды, °C; $T_{\text{хв}}$ – температура холодной воды, °C; $T_{\text{ак}}(t)$ – температура воды в аквариуме в момент времени dt , °C; $dT_{\text{ак}}$ – приращение температуры воды в аквариуме за время dt , °C.

Запишем выражение для определения приращения температуры в аквариуме:

$$dT_{\text{к1}} = \frac{Q_{\text{гв}} * C_{\text{воды}} * (T_{\text{гв}} - T_{\text{ак}}(t)) + Q_{\text{хв}} * C_{\text{воды}} * (T_{\text{хв}} - T_{\text{ак}}(t))}{V_{\text{воды}} * C_{\text{воды}}} * dt. \quad (16)$$

Подставляя в формулу (16) выражение (3), без учета инерционности исполнительного механизма, получаем искомое дифференциально выражение:

$$\frac{dT_{\text{ак}}}{dt} = \left(\frac{Q_{\text{гв}} * C_{\text{воды}} * (T_{\text{гв}} - T_{\text{ак}}(t))}{q_{\text{ак}}} * Y_{12} + \frac{Q_{\text{хв}} * C_{\text{воды}} * (T_{\text{хв}} - T_{\text{ак}}(t))}{q_{\text{ак}}} * Y_{11} \right) Y_{10}, \quad (17)$$

где Y_{10} – управляющий сигнал клапаном подачи воды в аквариум; Y_{11} – управляющий сигнал открытия клапана с холодной водой; Y_{12} – управляющий сигнал открытия клапана с горячей водой.

В качестве переменных состояния для предполагаемой системы управления процессом выращивания картофеля принимаем:

- x_1 – температура воздуха в верхней камере, $T_{\text{к1}}$;
- x_2 – температура воздуха в нижней камере, $T_{\text{к2}}$;
- x_3 – влажность воздуха в верхней камере, $H_{\text{к1}}$;
- x_4 – влажность воздуха в нижней камере, $H_{\text{к2}}$;
- x_5 – уровень рН в аквариуме, pH ;
- x_6 – температура воды в аквариуме, $T_{\text{ак}}$.

Проанализируем полученные уравнения (1–17) математических моделей с добавленными управляющими параметрами и преобразуем их в форму дифференциальных уравнений первого порядка относительно первой производной переменной состояния. Для упрощения последующей работы введем новые обозначения.

Так, для модели изменения температуры воздуха в верхней камере летом получаем:

Так, для модели изменения температуры воздуха в верхней камере зимой получаем:

$$\dot{x}_1 = a_1 b_1 Y_2 Y_3 - a_1 b_2 Y_3 / Y_1 + a_1 b_3 Y_3, \quad (18)$$

где $a_1 = \frac{v_{\text{к1}} * C_{\text{воз}}}{m_6 * C_6}$; $b_1 = T_{\text{тн1}}$; $b_2 = T_{\text{ккб1}}$; $b_3 = T_{\text{кк}}$.

Для модели изменения температуры воздуха в верхней камере зимой получаем:

$$\dot{x}_1 = a_1 b_1 Y_2 Y_3 + a_1 b_3 Y_3. \quad (19)$$

Для модели изменения температуры воздуха в нижней камере летом получаем:

$$\dot{x}_2 = a_2 a_3 b_4 Y_6 Y_7 - a_2 a_3 b_5 Y_7 / Y_5 + a_2 a_4 Y_9 Y_7, \quad (20)$$

где $a_2 = \frac{1}{m_3 * C_3}$; $a_3 = v_{к2} * C_{воз}$;

$$a_4 = q_{c1} * C_b * T_b; \quad b_4 = T_{гн2}; \quad b_5 = T_{кк62}.$$

Для модели изменения температуры воздуха в нижней камере зимой получаем:

$$\dot{x}_2 = a_2 a_3 b_4 Y_6 Y_7 + a_2 a_4 Y_9 Y_7. \quad (21)$$

Для модели изменения влажности воздуха в верхней камере летом получаем:

$$\dot{x}_3 = a_5 b_6 Y_4 Y_3 - a_5 b_7 Y_1 Y_3 + a_5 b_8 Y_3, \quad (22)$$

где $a_5 = \frac{1}{(V_{вх1} - V_{вых1}) * v_{к1}}$;

$$b_6 = P_{увл1}; \quad b_7 = m_{конд1}; \quad b_8 = m_{кв}.$$

Для модели изменения влажности воздуха в верхней камере зимой получаем:

$$\dot{x}_3 = a_5 b_6 Y_4 Y_3 + a_5 b_8 Y_3. \quad (23)$$

Для модели изменения влажности воздуха в нижней камере летом получаем:

$$\dot{x}_4 = a_6 b_9 Y_7 Y_8 - a_6 b_{10} Y_5 Y_7 + a_6 b_{11} Y_9 Y_7, \quad (24)$$

где $a_6 = \frac{1}{(V_{вх2} - V_{вых2}) * v_{к2}}$;

$$b_9 = P_{увл2}; \quad b_{10} = m_{конд2}; \quad b_{11} = m_{рпр}.$$

Для модели изменения влажности воздуха в нижней камере зимой получаем:

$$\dot{x}_4 = a_6 b_9 Y_7 Y_8 + a_6 b_{11} Y_9 Y_7. \quad (25)$$

Для модели изменения параметра pH воды в аквариуме получаем:

$$\dot{x}_5 = b_{12} Y_{10}, \quad (26)$$

где

$$b_{12} = 10 - pKa + \log \left(\frac{\Delta[NH_3]}{\Delta[NH_4^+]} \right).$$

Для модели изменения температуры воды в аквариуме получаем:

$$\dot{x}_6 = b_{13} Y_{11} Y_{10} + b_{14} Y_{12} Y_{10}, \quad (27)$$

где

$$b_{13} = \frac{Q_{хв} * C_{воды} * (T_{хв} - T_{ак}(t))}{q_{ак}};$$

$$b_{14} = \frac{Q_{гв} * C_{воды} * (T_{гв} - T_{ак}(t))}{q_{ак}}.$$

Из полученных уравнений наглядно видно, что многие управляющие сигналы пересекаются друг с другом по воздействию на систему. С учетом этого систему уравнений, которая описывает перемещение системы в пространстве переменных состояния, представим как:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 2a_1 b_1 Y_2 Y_3 - a_1 b_2 Y_3 / Y_1 + 2a_1 b_3 Y_3 \\ \dot{x}_2 = 2a_2 a_3 b_4 Y_6 Y_7 - a_2 a_3 b_5 Y_7 / Y_5 + 2a_2 a_4 Y_9 Y_7 \\ \dot{x}_3 = 2a_5 b_6 Y_4 Y_3 - a_5 b_7 Y_1 Y_3 + 2a_5 b_8 Y_3 \\ \dot{x}_4 = 2a_6 b_9 Y_7 Y_8 - a_6 b_{10} Y_5 Y_7 + 2a_6 b_{11} Y_9 Y_7 \\ \dot{x}_5 = b_{12} Y_{10} \\ \dot{x}_6 = b_{13} Y_{11} Y_{10} + b_{14} Y_{12} Y_{10} \end{cases} \quad (28)$$

Система уравнений (28) моделирует движение объекта в пространстве состояний. Ввиду наличия произведений переменных состояний, которые изменяются в процессе функционирования системы, данная система характеризуется как нелинейная и нестационарная. В такой форме невозможно найти аналитическое решение задачи оптимального управления, поэтому целесообразно применять численные методы. При этом важно учитывать вопросы существования и оптимальности решения.

Проанализируем систему, поведение которой определяется формулой (28). В управляющей подсистеме определена область регулирования Y . Приемлемыми способами управления являются любые кусочно-непрерывные функции $Y(t) = (Y_1(t), \dots, Y_{12}(t))$, значения которых находятся в пределах области Y . В фазовом пространстве X выделены начальная точка x_0 и целевая точка x_1 .

Выбор типов управляющих воздействий

Дискретное управление	Непрерывное управление
У3, У7 (вентиляторы)	У1, У5 (ККБ)
У9 (клапан подачи воды в нижнюю камеру)	У2, У6 (ТЭН)
У10 (клапан подачи воды в аквариум)	У4, У8 (парогенератор)
	У11 (клапан подачи холодной воды)
	У12 (клапан подачи горячей воды)

Примечание: составлено авторами.

Траектория движения системы $(\overline{Y(t)}, x(t))$ от начального момента до времени T считается оптимальной, если она обеспечивает переход из начального состояния x_0 в конечное x_1 за минимальное время и с наилучшим качеством управления, выраженным в минимуме функционала. Для каждой фазы процесса выращивания картофеля в аэроаквапонной установке можно сформировать стратегию управления.

Проведенные экспериментальные исследования в области управления процессом аэроаквапонии в установке (рисунок) позволили сформировать практические рекомендации по выбору типов управляющих воздействий (таблица).

Полученные уравнения для летнего периода (4), (6), (9), (11), (14), (17) и зимнего периода (5), (7), (10), (12), (14), (17) с точностью 94,3% (для лета) и 92,7% (для зимы) описывают динамику исследуемых процессов. Сравнение производилось с экспериментальными данными, полученными авторами в период с июля по сентябрь 2024 г. и с декабря по февраль 2025 г.

Заключение

В ходе исследования были разработаны комплексные математические модели технологических процессов аэроаквапонной установки для выращивания картофеля. Модели описывают температурные режимы в камерах установки для разных сезонов эксплуатации, учитывают нелинейность и нестационарность системы, что требует применения численных методов управления. Созданы модели контроля влажности воздуха с учетом процессов испарения и увлажнения, а также модель управления рН в аквариуме, учитывающая влияние аммиака и необходимость обновления воды. Разработаны математические описания температурных режимов воды в аквариуме с учетом подачи горячей и холодной воды. Анализ показал взаимосвязь управляющих сигналов, что требует использования ПИ-регуляторов для точного поддержания параметров в заданных пределах.

Список литературы

1. Нечипоренко А.Ю., Пиотровский Д.Л. Математическое моделирование процесса аэроаквапонии с определением оптимальных технологических параметров // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 11. С. 75-79. DOI: 10.17513/snt.40213. EDN: KUOUYZ. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40213> (дата обращения: 19.05.2025).
2. Нечипоренко А.Ю., Пиотровский Д.Л., Кладов А.С. 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. EDN: OLTNDH.
3. Нуридинов Я.А., Ярова Э.Т., Мальчихина О.Г., Тоболова Г.В., Колошина К.А. Продуктивность меристемного картофеля в искусственных средах аэропонных и гидропонных установок // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 6 (80). С. 102-106. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/produktivnost-meristemnogo-kartofelya-v-iskusstvennyh-sredah-aeroponnyh-i-gidroponnyh-ustanovok> (дата обращения: 19.05.2025).
4. 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. EDN: TUTJRN. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zdaniya-vertikalnyh-ferm-v-umnyh-gorodah> (дата обращения: 19.05.2025).
5. 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. DOI: 10.23670/IRJ.2021.114.12.021. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-gidrohicheskikh-pokazateley-vody-uzv-pri-integrirovannom-vyraschivanii-ryby-i-rasteniy> (дата обращения: 19.05.2025).
6. Юрина Н.А. Использование аквапонного метода // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 10-1 (112). С. 73-76. DOI: 10.23670/IRJ.2021.112.10.012. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-akvaponnogo-metoda> (дата обращения: 19.05.2025).
7. Калайда М.Л., Борисова С.Д. Аквапоническое выращивание рыбы и овощей // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК. 2024. № 2. С. 126-129. DOI: 10.24412/2311-6447-2024-2-126-129. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/akvaponicheskoe-vyraschivanie-ryby-i-ovoschey> (дата обращения: 19.05.2025).
8. Найденов С.В., Домашенко Ю.Е., Васильев С.М. Регулирование водного режима осушительно-увлажнительных систем в пределах Садковского магистрального канала // Природообустройство. 2019. № 2. С. 34-40. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-2-34-40. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/regulirovanie-vodnogo-rezhima-osushitelno-uvlazhnitelnyh-sistem-v-predelah-sadkovskogo-magistralnogo-kanala> (дата обращения: 19.05.2025).
9. Хутинаев О.С., Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Манохина А.А., Шабанов Н.Э., Колесова О.С. Выращивание миниклубней картофеля и топинамбура в условиях во-

дно-воздушной культуры с использованием искусственного освещения // *Агроинженерия*. 2018. № 4 (86). С. 7-14. DOI: 10.26897/1728-7936-2018-4-7-14 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vyraschivanie-miniklubney-kartofelya-i-topinambura-v-usloviyah-vodno-vozdushnoy-kultury-s-ispolzovaniem-iskusstvennogo-osvescheniya> (дата обращения: 19.05.2025).

10. Колтунов Л.И., Гольцов Ю.А., Кижук А.С. Математические модели комплексного исследования закономерностей электростатических устройств фильтрации и ионизации воздуха // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2017. № 10. С. 154-160. DOI: 10.12737/article_59cd0c69ca3b13.11132870. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskie-modeli-kompleksnogo-issledovaniya-zakonomernostey-elektrostaticheskikh-ustroystv-filtratsii-i-ionizatsii-vozdruha> (дата обращения: 19.05.2025).

11. Бройда В.А. Оценка эффективности регулирования естественной вентиляции // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2004. №1 (2). С. 76-78. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-regulirovaniya-estestvennoy-ventilyatsii> (дата обращения: 19.05.2025).

12. Ядарова О.Н., Федоров Е.О., Гильденберг Б.М., Сучков В.О., Славутский Л.А. Комплексный контроль параметров регулирования системы вентиляции с заслонками // *Вестник Чувашского университета*. 2016. №3. С. 149-154.

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnyy-kontrol-parametrov-regulirovaniya-sistemy-ventilyatsii-s-zaslonkami> (дата обращения: 19.05.2025).

13. Левицкий Ж. Г., Нурғалиева А.Д. Управление расходами воздуха в вентиляционной сети с активным регулятором // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2011. № 4. С. 23-27. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-rashodami-vozdruha-v-ventilyatsionnoy-seti-s-aktivnym-regulyatorom> (дата обращения: 19.05.2025).

14. Ершов С.В., Сергеева Т.Е. Исследование интеллектуально адаптивной системы автоматического контроля микроклимата // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2013. № 12-2. С. 82-88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-intellektualno-adaptivnoy-sistemy-avtomaticheskogo-kontrolya-mikroklimata> (дата обращения: 19.05.2025).

15. Корниенко С.В., Кизеров А.А., Горлов И.Ф. Вентиляция с нагнетанием или разряжением воздуха в помещениях для животных // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2025. № 1 (79). С. 282-293. DOI: 10.32786/2071-9485-2025-01-29. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ventilyatsiya-s-nagnetaniem-ili-razryazheniem-vozdruha-v-pomescheniyah-dlya-zhivotnyh> (дата обращения: 19.05.2025).