

УДК 004.942:66.012–52
PACS 02.70.–с; 82.20.Wt

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ АТМОСФЕРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БОКСА МФР ОДЭК

Кривобородько В.А.¹, Егорова О.В., Ливенцов С.Н., Ливенцова Н.В.

(ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск),

Фейгин А.И., Шмидт О.В.

(АО «Прорыв», г. Москва)

Контакты: Вадим Александрович Кривобородько; vak99@tpu.ru

Актуальность. Для разработки цифрового двойника модуля фабрикация-рефабрикация (МФР) ядерного топлива (смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива) в рамках проекта «Прорыв» особое значение, из-за пирогенности СНУП-топлива и высоких требований к точности контроля газовой среды, имеет имитационное моделирование (ИМ) технологических боксов с инертной атмосферой.

Цель работы – создание математической модели, воспроизводящей динамику параметров газовой среды технологического бокса МФР, работу систем управления и аварийных защит.

Материалы и методы. Ключевые требования к модели: ИМ аварийных режимов работы при разгерметизации корпуса бокса, отказе арматуры, снижении эффективности фильтров; ИМ систем автоматического регулирования и аварийных защит; ИМ динамических изменений параметров газовой среды внутри технологического бокса; расчет гидродинамических параметров в трубопроводных системах. Математическая модель основана на уравнениях материального и теплового балансов, состояния идеального газа, а также на гидродинамических расчетах и включает подмодели: газовой среды в боксе; гидравлической сети; клапанов, датчиков и регуляторов.

Результаты. Тестирование разработанной математической модели проведено в KT-Nimfa для следующих сценариев: штатный вывод бокса в рабочий режим (расход Ar 3,2–6 м³/ч); аварийный режим (подача входного газа с O₂ 500 ppm). Относительная погрешность времени выхода на рабочий режим для камер объемом 38,5 и 102 м³ – 8,3 и 6,5% соответственно. Срабатывание защит в аварийном режиме (O₂ в боксе более 50 ppm) прошло корректно. Модель использована в задачах цифровизации по программе «Приоритет-2030» Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Заключение. Имитационную математическую модель предполагается применять для оптимизации параметров работы бокса установки прессования таблеток СНУП-топлива, отладки и модернизации алгоритмов управления и защит, обучения персонала. Предстоит верификация и валидация модели на экспериментальных данных, адаптация ее для других установок.

Ключевые слова: проект «Прорыв», модуль фабрикация-рефабрикация (МФР), смешанное нитридное уран-плутониевое (СНУП) топливо, цифровой двойник (ЦД), инертная атмосфера, компьютерная имитационная модель, имитационное моделирование (ИМ), система автоматического управления (САУ), KT-Nimfa, БРЕСТ-ОД-300, технологический бокс

Для цитирования: Кривобородько В.А., Егорова О.В., Ливенцов С.Н., Ливенцова Н.В., Фейгин А.И., Шмидт О.В. Модель процесса управления параметрами атмосферы технологического бокса МФР ОДЭК. – Атомная энергия, 2025, т. 138, вып. 5, с. 285–290.

Финансирование. Работу выполняли в рамках программы «Приоритет-2030» по проекту ЭЭЗ-039-198-2025 ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Потенциальный конфликт интересов. О.В. Шмидт – член редколлегии журнала «Атомная энергия», заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье. Остальные авторы также заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ВВЕДЕНИЕ

Проект «Прорыв»², реализуемый Государственной корпорацией «Росатом», предполагающий промышленную реализацию замкнутого ядерного топливного цикла на базе реакторов на быстрых нейтронах, нацелен на масштабную цифровизацию создаваемых в рамках проекта опытно-демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК) IV поколения и промышленного энергетического комплекса. Применение технологий цифрового двойника (ЦД) [1] позволяет добиться большей эффективности на эта-

пах создания и эксплуатации производств. В связи с этим ведется разработка ЦД³ модуля фабрикация-рефабрикация (МФР) ядерного топлива, а именно смешанного нитридного уран-плутониевого топлива (СНУП-топлива), для инновационного реактора на быстрых нейтронах БРЕСТ-ОД-300 (АО «Сибирский химический комбинат», г. Северск).

Особенность производства СНУП-топлива – чувствительность нитридного порошка к окислению, которое может привести к выпуску некачественного топлива или производственным авариям вследствие

¹Аспирант очного отделения аспирантуры в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

²<https://proryv2020.ru/>

³<https://strana-rosatom.ru/2022/04/14/u-energokompleksa-s-reaktorom-brest-300/>

его пирофорности. Следовательно, необходимо поддержание инертной атмосферы, поэтому одним из ключевых элементов ЦД [2, 3] служат модели боксов с инертной атмосферой⁴. Особую важность представляет интеграция всех подсистем в единую цифровую модель. Существующие CFD-модели боксов [4, 5] имеют высокие требования к вычислительным ресурсам, сложны для встраивания моделей систем управления параметрами атмосферы боксов и аварийных защит. Следовательно, разработка такой модели остается актуальной задачей.

Цель работы состояла в создании математической модели, воспроизводящей динамику параметров газовой среды, работу систем управления и аварийных защит защитного бокса.

ОБЪЕКТ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Технологический бокс установки прессования таблеток СНУП-топлива был выбран в качестве объекта моделирования. Идущий в нем технологический процесс предусматривает поддержание в боксе инертной газовой среды со следующими значениями: разрежение не менее 200 Па, концентрация кислорода и водяного пара не более 50 ppm. Параметры атмосферы регулируются при помощи узлов подачи азота и отвода газа (УПА и УОГ соответственно): УПА включает регулятор расхода, фильтры, датчики концентрации кислорода и влажности; УОГ представляет собой вытяжную вентиляцию с аэрозольным фильтром и датчиком перепада давления. Качество атмосферы в боксе проверяется узлом анализа газа (УАГ), состоящим из датчиков расхода, концентраций кислорода и влажности, побудителя расхода. Локальная система управления регулирует расход инертного газа (азота) и давление в боксе, изменяя степень открытия запорных и регулирующих клапанов УПА и УОГ.

ТРЕБОВАНИЯ К МОДЕЛИ

На основе детального анализа физического объекта определены ключевые функциональные требования к модели. Она должна обеспечивать следующие операции:

- моделирование динамических изменений параметров газовой среды внутри бокса: давления и температуры, концентрации компонентов среды;
- расчет гидродинамических параметров в трубопроводных системах;
- работу систем автоматического регулирования и аварийных защит;
- имитацию аварийных режимов работы в случае разгерметизации корпуса бокса, отказа арматуры, снижения эффективности фильтрующих элементов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Модель процесса управления параметрами атмосферы бокса описывается совокупностью подмоделей, выделенных для уменьшения системной связности и обеспечения возможности поэтапной модернизации в ходе дальнейшей верификации и валидации. Информационная структура модели представлена на рис. 1. Ее основные физические параметры: $P_{\text{задан}}$ — заданное значение давления в боксе, Па; w_{O_2} , $w_{\text{H}_2\text{O}}$, $w_{\text{O}_2}^{\text{УАГ}}$, $w_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{УОП}}$ — концентрация (масс. доля.) кислорода и водяных паров газа в боксе и узлах линий анализа газа и отбора проб соответственно; P — давление в боксе, Па; T — температура в боксе, °C; $Q_{\text{вх}}$, $Q_{\text{вых}}$ — расходы газа на входе и выходе бокса соответственно, Па; $\Delta P_{\text{ФЗ}}$ — перепад давления на фильтре, Па; $P_{\text{дат}}$, $Q_{\text{дат}}$ — измеренные датчиками давление в боксе (Па) и расход (м³/с) на входе бокса соответственно. Параметры: $\text{Par}_{\text{кл}}$, $\text{Par}_{\text{рег.кл}}$, $\text{Par}_{\text{бокс}}$, $\text{Par}_{\text{ГС}}$, $\text{Par}_{\text{дат}}$, $\text{Par}_{\text{ЛАГ}}$, $\text{Par}_{\text{АЗ}}$ — векторы параметров моделей; $\text{flag}_{\text{р.р}}^{\text{рег}}$ — флаг типа режима регулирования: ручной или автоматический; $\text{flag}_{\text{ис}}^{\text{кл}}$, $\text{flag}_{\text{ис}}^{\text{рег.кл}}$, $\text{flag}_{\text{ис}}^{\text{бокс}}$, $\text{flag}_{\text{ис}}^{\text{дат}}$ — флаги наличия нештатной работы оборудования; $\text{flag}_{\text{АЗ}}$ — вектор флагов аварийных защит; u — управляющее воздействие регулятора расхода; $n_{\text{кл.и}}^{\text{кл.и}}$, $n_{\text{рег.кл.и}}^{\text{рег.кл.и}}$ — заданные значения и действительные степени открытия запорного и регулирующих клапанов.

Модель бокса проводит расчет основных параметров газовой среды внутри бокса: давление (P , Па), температуру (T , К) и концентрацию азота, кислорода и водяных паров газа (w_{N_2} , w_{O_2} , $w_{\text{H}_2\text{O}}$ соответственно), масс. доля. Модель рассчитывает также расход воздуха при имитации разгерметизации. Все вычисления выполняются с учетом текущих значений расходов подаваемого ($Q_{\text{вх}}$, м³/с) и отводимого ($Q_{\text{вых}}$, м³/с) газа, рассчитываемых моделью гидравлической сети (ГС). Значения физических и конструктивных характеристик ГС и бокса формируют векторы параметров моделей ($\text{Par}_{\text{ГС}}$, $\text{Par}_{\text{бокс}}$).

Математическое описание модели бокса основано на уравнениях материального, теплового балансов и уравнении состояния идеального газа [6, 7], решаемых методом Эйлера. Из уравнения общего материального баланса получено соотношение для расчета скорости изменения массы газовой смеси в боксе ($m(t)$):

$$\frac{dm(t)}{dt} = \rho_{\text{вх}} Q_{\text{вх}}(t) - \rho_{\text{см}} (Q_{\text{вх}}^1(t) + Q_{\text{вх}}^2(t)) + \text{flag}_{\text{ис}}^{\text{бокс}} Q_m^{\text{отв}}(t),$$

где $\rho_{\text{вх}}$, $\rho_{\text{см}}$ — плотности газа, подаваемого в бокс и газовой смеси в боксе, кг/м³; $Q_{\text{вх}}$, $Q_{\text{вх}}^1$, $Q_{\text{вх}}^2$ — объемные расходы газа на входе и на выходе из бокса через УОГ и ремонтную вентиляцию соответственно, м³/с;

⁴Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ 2023689097, Российская Федерация. Модуль имитации атмосферы в боксе учебной версии цифрового двойника. ФГАОУ ВО НИ ТПУ / О.В. Егорова, А.И. Фейгин, В.А. Кривобородько и др. Рег. 26.12.2023; заявл. № 2023688925 26.12.2023; опубли. 26.12.2023. <https://onlinepatent.ru/software/2023689097/>

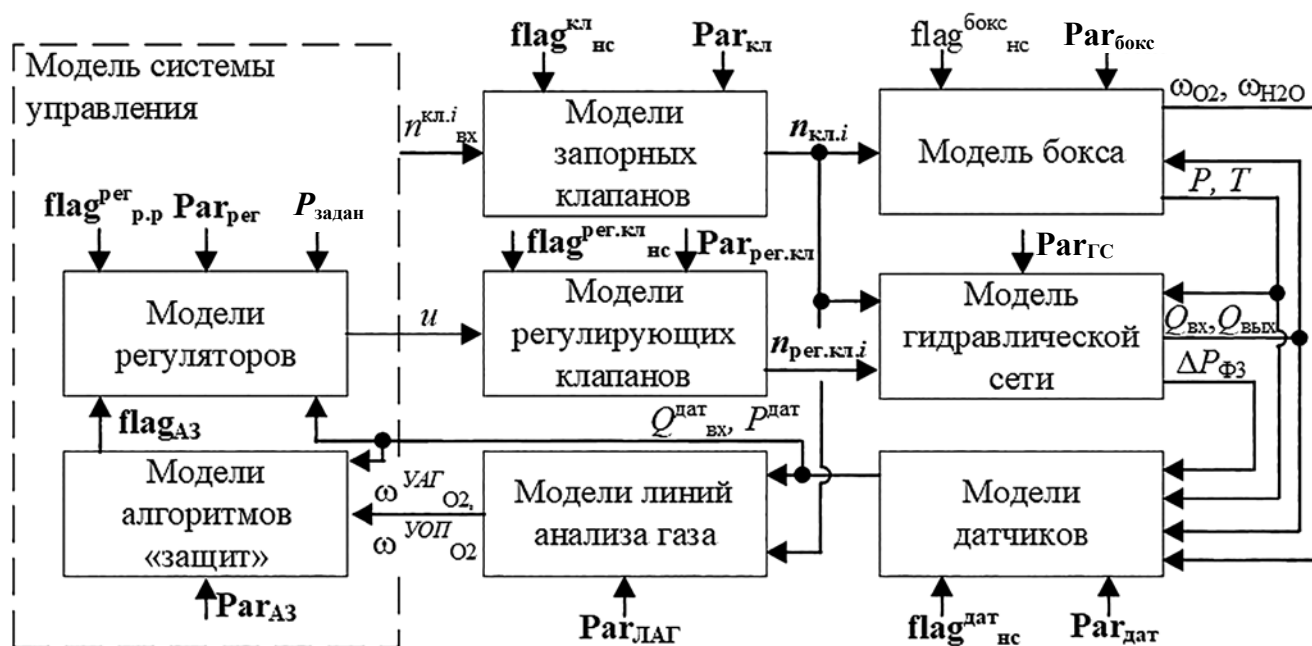


Рисунок сделан авторами на основе собственных данных

Рис. 1. Информационная структура модели процесса управления параметрами атмосферы технологического бокса установки прессования таблеток смешанного нитридно-уран-плутониевого топлива

$\text{flag}_{\text{нс}}^{\text{бокс}}$ — коэффициент, используемый при имитации нештатной ситуации (разгерметизация бокса); $Q_m^{\text{отв}}$ — массовый расход притока воздуха в бокс из атмосферы локализирующего укрытия при разгерметизации бокса, кг/с.

Приток воздуха в бокс принимается как расход через отверстие круглого диаметра (d , м) и рассчитывается по следующему выражению при условии, что давление в локализирующем укрытии ($P^{\text{лок}}$) больше, чем в боксе [8]:

$$Q_m^{\text{отв}}(t) = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2k}{k-1}} \frac{P^{\text{лок}}}{\sqrt{RT^{\text{лок}}(t)}} \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{P(t)}{P^{\text{лок}}}\right)^{\frac{2}{k-1}} - \left(\frac{P(t)}{P^{\text{лок}}}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, & \text{при } \frac{P(t)}{P^{\text{лок}}} > \left(\frac{2k}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \sqrt{\left(\frac{2k}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}} - \left(\frac{2k}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, & \text{при } \frac{P(t)}{P^{\text{лок}}} \leq \left(\frac{2k}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases}$$

где k — показатель адиабаты газа; R — удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К); $T^{\text{лок}}$ — температура газа в локализирующем укрытии.

Для расчета скоростей изменения основных компонентов газовой среды в боксе используется соотношение:

$$\frac{d\omega_i(t)}{dt} = \frac{1}{m(t)} \left(\rho_{\text{вх}} \omega_i^{\text{вх}} Q_{\text{вх}}(t) - \rho_{\text{см}} \omega_i(t) (Q_{\text{вых}}^1(t) + Q_{\text{вых}}^2(t)) + \text{flag}_{\text{бокс}}^{\text{бокс}} \omega_i^{\text{возд}} Q_m^{\text{отв}}(t) - \frac{dm(t)}{dt} \omega_i(t) \right),$$

где $\omega_i^{\text{вх}}$, $\omega_i(t)$, $\omega_i^{\text{возд}}$ — концентрация i -го компонента в газе, подаваемом в бокс, внутри бокса и в атмо-

сфере локализирующего укрытия соответственно, масс. доля.

Расчет давления газовой смеси в боксе провели, исходя из уравнения Менделеева—Клапейрона. Расчет скорости изменения температуры — по уравнению теплового баланса, записанного для газовой среды в боксе:

$$\frac{dT(t)}{dt} = (\Phi_1(t) - \Phi_2(t) - \Phi_3(t) + \text{flag}_{\text{нс}}^{\text{бокс}} \Phi_4(t)) \times \left(\frac{1}{m(t)c_{\text{см}}(t)} \right) - \frac{dm(t)}{dt} \cdot \frac{T(t)}{m(t)} - \frac{dc_{\text{см}}(t)}{dt} \cdot \frac{T(t)}{c_{\text{см}}(t)}, \quad (1)$$

где Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 , Φ_4 — потоки тепла, вносимого с подаваемым газом в бокс, уносимого отводимым газом из бокса, поступающего из окружающей среды через стенки бокса, вносимого воздухом при имитации разгерметизации бокса соответственно, Дж/с; $c_{\text{см}}$ — удельная теплоемкость газовой смеси в боксе, Дж/(кг·К).

Выражение (1) получено при допущении, что удельные теплоемкости компонентов в моделируемом диапазоне значений температуры газовой смеси в боксах меняются несущественно.

Моделирование работы запорной и регулирующей арматуры реализовано при помощи выражений, определяющих фактическую степень открытия клапанов, на основе: заданных управляющих сигналов; состояния системы (наличие нештатной работы), задаваемого векторами флагов ($\text{flag}_{\text{нс}}^{\text{кл}}$, $\text{flag}_{\text{нс}}^{\text{рег.кл}}$). Параметрами моделей запорных и регулирующих клапанов ($\text{Par}_{\text{рег.кл}}$, $\text{Par}_{\text{кл}}$) являются флаги наличия электропривода, время открытия и закрытия клапанов (для клапанов с электроприводами), пропускная способность.

Модель гидравлической сети выполняет расчет основных гидравлических параметров УПА и УОГ в зависимости от ряда параметров: давление на входе УПА и коллекторе вытяжной вентиляции УОГ, температура газовой среды, давление в боксе, степень открытия клапанов. В основе математической модели лежит расчет суммарных потерь давления на элементах трубопроводной системы [9] с применением метода Ньютона–Рафсона:

$$\begin{cases} P_{\text{вх}} - P = \Delta P_{\text{Ф1}} + \Delta P_{\text{рд}} + \Delta P_{\text{рег.кл1}} + \Delta P_{\text{Ф2}} + \Delta P_{\text{кл1}} + \\ + \Delta P_{\text{УПА}}^{\text{труб}}, \\ P - P_{\text{вых}}^i = \Delta P_{\text{Ф3}} + \Delta P_{\text{рег.кл2}} + \Delta P_{\text{кл2}} + \Delta P_{\text{УОГ}}^{\text{труб}}, \\ P_{\text{вх}} = P_{\text{уст}}^{\text{вх}}, \text{ при } P_{\text{вх}} > P_{\text{уст}}^{\text{вх}}, \end{cases}$$

где $P_{\text{вх}}$ — давление во входном коллекторе УПА, Па; $\Delta P_{\text{Ф1}}, \Delta P_{\text{Ф2}}, \Delta P_{\text{Ф3}}$ — потери давления на фильтрах, Па; $\Delta P_{\text{рег.кл1}}, \Delta P_{\text{рег.кл2}}$ — перепад давления на регулирующих клапанах УПА и УОГ соответственно, Па; $\Delta P_{\text{кл1}}, \Delta P_{\text{кл2}}$ — перепад давления на запорных кранах УПА и УОГ соответственно, Па; $\Delta P_{\text{УПА}}^{\text{труб}}, \Delta P_{\text{УОГ}}^{\text{труб}}$ — суммарный перепад давления на трубопроводах УПА и УОГ соответственно, Па; $P_{\text{вых}}^i$ — давление в коллекторе УОГ, Па; $P_{\text{уст}}^{\text{вх}}$ — установленное значение давления на регуляторе давления УПА, Па.

Потеря давления на запорной арматуре ($\Delta P_{\text{кл1}}, \Delta P_{\text{кл2}}$) рассчитывается по следующему выражению, с учетом линейной пропускной характеристики:

$$\Delta P_{\text{кли}} = 10^5 \left(\frac{Q_i}{K_{\text{в}}^{\text{кл.и}} \frac{n_{\text{кл.и}}}{100\%}} \right)^2,$$

где Q_i — расход газа, протекающего через i -й шаровый кран, м³/с; $K_{\text{в}}^{\text{кл.и}}$ — максимальная условная пропускная способность i -го шарового крана, м³/с; $n_{\text{кл.и}}$ — процент открытия i -го шарового крана, %.

Перепады давления на фильтрах определены $\Delta P_{\text{Фi}}$ при помощи аппроксимации расходных характеристик фильтров из паспортных данных. Потеря давления на регулирующих клапанах УПА и УОГ определяется по соотношению:

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{рег.кл.и}} = R_{\text{рег.кл.и}} (Q_i)^2, \\ \Delta P_{\text{рег.кл.и}} = \frac{\Delta P_{\text{рег.кл.и}}}{\zeta_{\text{рег.кл.и}} Q_{100}^i \frac{n_{\text{рег.кл.и}}}{100\%}} (Q_i)^2, \end{cases}$$

где $\zeta_{\text{рег.кл.и}}$ — коэффициент, использованный при имитации нештатной ситуации и связанный с уменьшением пропускной способности клапана.

Величина расхода при полностью открытом i -м регулирующем клапане рассчитывается по соотношению⁵:

$$Q_{100}^i = \begin{cases} \frac{5140 K_{\text{в}}^{\text{рег.кл.и}}}{\sqrt{\rho^i T^i}}, \text{ при } \Delta P_{\text{рег.кл.и}} \leq \frac{P_{\text{вх}}^i}{2}, \\ \frac{2570 P_{\text{вх}}^i K_{\text{в}}^{\text{рег.кл.и}}}{\sqrt{\rho^i T^i}}, \text{ при } \Delta P_{\text{рег.кл.и}} > \frac{P_{\text{вх}}^i}{2}, \end{cases}$$

где $K_{\text{в}}^{\text{рег.кл.и}}$ — максимальная условная пропускная способность i -го регулирующего клапана; ρ^i, T^i — плотность (кг/м³) и температура газа (°C), проходящего через i -й клапан, соответственно; $P_{\text{вх}}^i, P_{\text{вых}}^i$ — давление газа на входе и выходе i -го клапана соответственно, МПа.

Модели датчиков имитируют выдачу измеренных значений технологических параметров в пределах шкал измерения реальных измерительных приборов (параметры моделей датчиков (**Par_{дат}**) — векторы шкал измерения датчиков, предусмотренных локальной системой управления установки):

$$Y_{\text{дат}}^i(t) = \begin{cases} C_i Y_i(t), \text{ при } Y_{\text{нг}}^i \leq Y_i(t) \leq Y_{\text{вг}}^i, \\ Y_{\text{нг}}^i \text{ при } Y_i(t) < Y_{\text{нг}}^i, \\ Y_{\text{вг}}^i \text{ при } Y_i(t) > Y_{\text{вг}}^i; \end{cases}$$

где $Y_i(t)$ и $Y_{\text{дат}}^i(t)$ — значения i -й переменной (выданные моделью датчика), полученные из моделей бокса и ГС соответственно; C_i — коэффициент преобразования; $Y_{\text{вг}}^i, Y_{\text{нг}}^i$ — нижняя и верхняя границы шкал измерения i -й переменной.

Модели линий анализа газа имитируют работу узлов контроля качества подаваемого в бокс газа, отбора проб и анализа газа в УОГ. В частности, имитируют выдачу полученных из моделей датчиков значений концентраций кислорода и паров воды, расходов анализируемого газа в трубопроводных линиях узлов контроля качества в зависимости от расхода через узел. Расчет расходов газа в линиях УОП и УАГ выполняется в соответствии со вторым законом Кирхгофа [9]. Расчет перепадов давлений на побудителях выполняется на основе аппроксимации их паспортных характеристик производительности. Параметры моделей линий анализа газа (**Par_{лаг}**) — текущая активность и характеристики производительностей побудителей расхода.

Модели регулятора давления имитируют работу алгоритмов автоматического управления. Модели рассчитывают требуемую степень открытия регулирующего клапана УПА ($u, \%$), необходимую для достижения заданного значения давления в боксе ($P_{\text{задан}}, \text{Па}$), по значениям расхода газа и давления в боксе, взятых из моделей датчиков. Параметры законов регулирования (**Par_{рег}**) и флаг выбора ручного

⁵ГОСТ 34437—2018. Арматура трубопроводная. Методика экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик. <https://docs.cntd.ru/document/1200161332>

или автоматического режима регулирования ($\text{flag}_{\text{р.р.}}^{\text{пер}}$, $\text{flag}_{\text{а.р.р.}}^{\text{пер}}$) формируют параметры моделей регуляторов.

Модель аварийных защит реализует автоматизированное управление запорной арматурой на основе анализа критических параметров технологического процесса. Алгоритмы защиты используют входные данные от измерительных систем: текущее давление в боксе ($P_{\text{дат}}$), расход газа на входе ($Q_{\text{дат}}^{\text{лат}}$), а также концентрацию кислорода, измеренную в узлах анализа газа ($\omega_{\text{O}_2}^{\text{УАГ}}$) и отбора проб ($\omega_{\text{O}_2}^{\text{УОП}}$). На основе этих параметров система определяет необходимое положение запорных клапанов в соответствии с заданной логикой срабатывания. Конфигурация защитных алгоритмов задается вектором граничных значений ($\text{Par}_{\text{АЗ}}$), включающим пороговые величины для всех контролируемых параметров.

ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

В программном комплексе КТ-Nimfa [10] проведено тестирование модели для различных сценариев эксплуатации бокса. Качественная проверка работоспособности модели в ходе вычислительных экспериментов показала корректность воспроизведения моделью изменений основных технологических параметров. Смоделирован вывод бокса объемом 38,5 и 102 м³ в рабочий режим с параметрами расхода аргона 3,2 и 6 м³/ч соответственно. Динамика изменения концентрации кислорода представлена на рис. 2.

Относительная погрешность времени выхода на заданную концентрацию кислорода (сравнительно с [4]) составила 8,3 и 6,5% для камер объемом 38,5 и 102 м³ соответственно. Поведение систем регулирования оценивалось в нештатной ситуации: при подаче некачественного газа с содержанием O₂ 500 ppm. Как видно на рис. 3, после увеличения концентрации кислорода во входном газе в момент времени 100 с

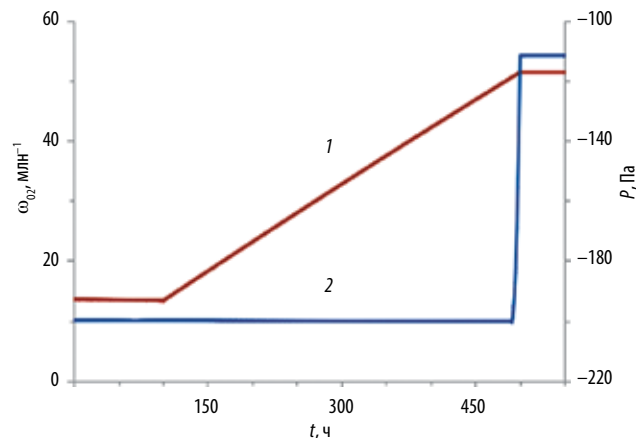


Рисунок сделан авторами

Рис. 3. Изменение концентрации (массовой доли) кислорода ω_{O_2} (1) и давления P (2) в боксе. В момент времени $t = 100$ с происходит резкий рост концентрации O₂ внутри бокса

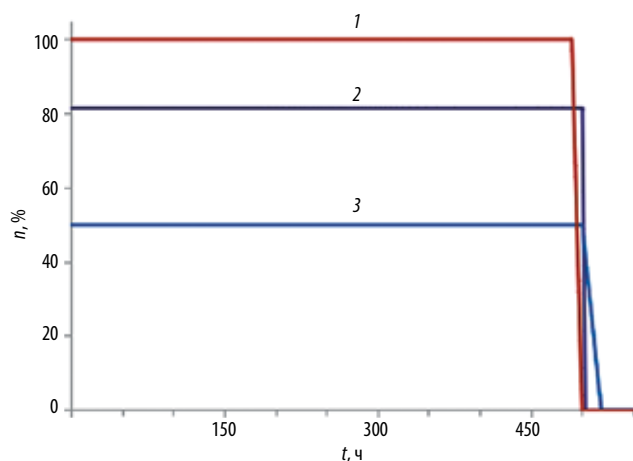


Рисунок сделан авторами

Рис. 4. Изменение степени открытия клапанов (n) во времени (t): 1 – запорных на линиях узлов подачи азота и отвода газа; 2 – регулятора расхода; 3 – регулирующих на линии узла отвода газа

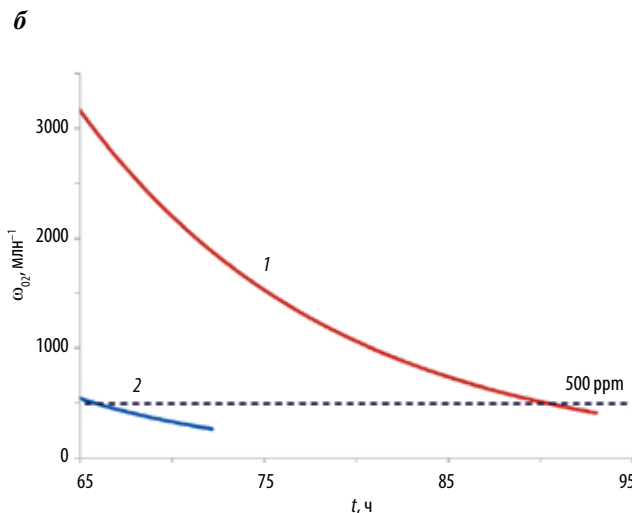
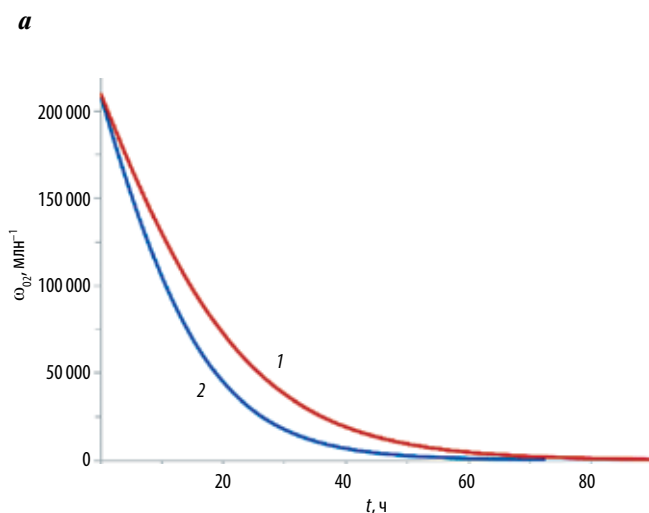


Рисунок сделан авторами на основе тестирования в КТ-Nimfa (ООО «КТ-КОМПЛЕКС») [10]

Рис. 2. Динамика изменения во времени (t) концентрации O₂ (а) и увеличенный (до 95 ч) участок графика (б) для бокса объемом: 1 – 102 м³; 2 – 38,5 м³

происходит резкий рост концентрации O_2 внутри бокса.

При достижении критического значения концентрации кислорода 50 ppm происходит автоматическое прекращение подачи инертного газа и закрытие запорных клапанов (рис. 4). Повышение давления в боксе связано с непропорциональным уменьшением расхода через УПА и УОГ вследствие разности исходных положений штоков клапанов и скоростью их закрытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель демонстрирует приемлемую точность и воспроизводимость при имитации рабочих и аварийных режимов. Полученные результаты свидетельствуют о корректности принятых физико-математических подходов и реализованных

алгоритмов. Для повышения достоверности моделирования требуются верификация и валидация моделей газораспределения в линиях подачи инертного газа и вентилирования, а также экспериментальные исследования поведения системы при реальных сценариях разгерметизации.

Разработанная модель использована в рамках реализации проекта ЭЭЗ-039-198-2025 программы «Приоритет-2030». Полученные результаты свидетельствуют о возможности практического использования модели для решения задач оптимизации технологических режимов эксплуатации бокса установки прессования таблеток СНУП-топлива, настройки систем автоматического регулирования, подготовки оперативного персонала и учебного процесса в рамках работы с цифровым двойником производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Grieves M. Origins of the digital twin concept. — Florida Institute of Technology, 2002, v. 8, p. 3–20.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>
- Sokolov B., Ivanov D., Dolgui A. Scheduling in industry 4.0 and cloud manufacturing. Springer Cham, 2020. 273 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-43177-8>
- Rosen R., von Wichert G., Lo G., Bettenhausen K.D. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. — IFAC-PapersOnLine, 2015, v. 48, iss. 3, p. 567–572.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- Кузьмин И.В., Лещенко А.Ю., Носов А.В. и др. Создание технологических камер большого объема с инертной атмосферой высокой чистоты для пирохимической переработки отработавшего топлива. — Атомная энергия, 2023, т. 135, вып. 1–2, с. 27–31.
<https://www.elibrary.ru/aqxhnt>
- Шамсутдинов Р.Н., Павлов С.В., Лещенко А.Ю. и др. CFD-моделирование теплофизических параметров печи карбо-термического синтеза нитридов урана и плутония. — Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2021, т. 10, № 2, с. 151–161.
<https://www.elibrary.ru/kxfrqq>
<https://doi.org/10.1134/S2304487X21020103>
- Гартман Т.Н., Клушин Д.В. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов: учеб. пособие. М.: Академкнига, 2006. 415 с.
<https://www.elibrary.ru/qnedzd>
- Беренгартен М.Г., Пикулин Ю.Г., Воронина В.Э. Общая химическая технология: учеб. пособие. Краснодар: Новация, 2021. 110 с.
<https://www.elibrary.ru/fxouyr>
- Меренков А.П., Хасилев В.Я., Сидлер В.Г. и др. Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985. 280 с.
<https://www.elibrary.ru/rtynpv>
- Свид. 2024614688 о государственной регистрации программы для ЭВМ, Российская Федерация. Компьютерная технология моделирования ядерного топливного цикла и автоматики (КТ-Nimfa). Версия 2.0 / А.О. Плетнев, С.Н. Ливенцов, О.В. Егорова и др.; правообладатель ООО «КТ-КОМПЛЕКС»; заявл. 15.02.2024; опубл. 28.02.2024.
<https://elibrary.ru/uhpepy>

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам и руководству ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и АО «Прорыв» за плодотворное обсуждение и помощь в работе.

Вклад авторов

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Наибольший вклад распределен следующим образом: В.А. Кривобородько и О.В. Егорова — работа с источниками литературы, написание текста рукописи, программирование, анализ данных; С.Н. Ливенцов — дизайн исследования, редактирование статьи; Н.В. Ливенцова — разработка дизайна статьи; А.И. Фейгин, О.В. Шмидт — предоставление материалов.

Идентификаторы авторов

Кривобородько Вадим Александрович: SPIN-код 1735-2304; AuthorID 123083

Егорова Ольга Викторовна: SPIN-код 7696-0953; AuthorID 571757; ResearcherID H-8479-2017; Scopus AuthorID 57192978853; ORCID ID 0000-0002-6707-662X

Ливенцов Сергей Николаевич: SPIN-код 6877-7914; AuthorID 520941; ResearcherID ABC-6749-2020; Scopus AuthorID 50161932500; ORCID ID 0000-0002-8508-4797

Ливенцова Нина Владимировна: SPIN-код 7773-5888; AuthorID 571758; ResearcherID ABC-4286-2020; Scopus AuthorID 57191709834; ORCID ID 0000-0002-6320-9421

Фейгин Александр Ильич: SPIN-код 7773-5888; AuthorID 571758; ResearcherID ABC-4286-2020; Scopus AuthorID 57191709834; ORCID ID 0000-0002-6320-9421

Шмидт Ольга Витальевна: SPIN-код 1193-6995; AuthorID 221001; ResearcherID ABC-6749-2020; Scopus AuthorID 6602943571; ORCID ID 0000-0002-4762-1782