

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ В ЗАЩИТНЫХ БОКСАХ

Кривобородько В.А., Ливенцов С.Н., Ливенцова Н.В., Егорова О.В.
ТПУ, ИЯТШ, АЗ-38, vak99@tpu.ru
ТПУ, ИЯТШ ОЯТЦ, профессор, liventsov@tpu.ru
ТПУ, ИЯТШ ОЯТЦ, доцент, liventsovanina@tpu.ru
ТПУ, ИЯТШ ОЯТЦ, доцент, nagaizeva@tpu.ru

Введение

В настоящее время осуществляется стратегия цифровизации промышленности. Проект «Прорыв», реализуемый госкорпорацией Росатом, также связан с проводимой политикой цифровизации. В связи с этим ведется разработка цифрового двойника установки прессования линии изготовления таблеток, являющейся частью модуля фабрикации СНУП-топлива ОДЭК на площадке СХК. Применение технологии цифрового двойника позволит смоделировать возможные нештатные ситуации на этапе пуско-наладочных работ и эксплуатации оборудования, подобрать оптимальные значения технологических параметров и добиться большей эффективности производства. Ключевым элементом цифрового двойника является модель объекта-оригинала – установки прессования. Оборудование установки помещено в защитные боксы. В боксах поддерживается инертная атмосфера с требуемым значением давления, концентраций кислорода и водяного пара. От состояния атмосферы зависит качество таблеток, а также безопасность проводимых в них технологических операций. Ввиду этого при имитации объекта-оригинала, кроме работы пресса, требуется моделировать состояние атмосферы в боксах.

Описание модели

Установка прессования включает бокс пресс-инструмента и соединенный с ним шлюзом перчаточный бокс загрузки/выгрузки лодочек. В боксах требуется поддерживать атмосферу азота с давлением разрежения не менее 200 Па и концентрациями кислорода и водяных паров не более 50 ppm. При разработке модели боксы рассматривались как единый бокс.

В результате анализа данного объекта были выявлены ключевые характеристики и параметры, которые необходимо учесть при создании его математической модели, что позволило в совокупности с целевым назначением цифрового двойника сформулировать требования к ней. Модель должна имитировать:

1. В динамическом режиме изменение переменных: давление внутри бокса; концентрации основных компонентов среды внутри бокса (азот, кислород и пары воды); температура среды в боксе; в зависимости от: расходов газа на входе и выходе бокса; начальных концентраций основных компонентов в среде бокса; изменения температуры окружающей среды.

2. Распределение расходов и потерь давления в сети трубопроводов, в зависимости от: степеней открытия запорной и регулирующей арматуры; давлений во входном и выходном общих коллекторах; давления внутри бокса.

3. Нештатные ситуации, связанные с разгерметизацией боксов и выходом из строя запорной и регулирующей арматуры.

4. Работу контуров регулирования расхода азота, давления и концентрации кислорода в боксе.

На основе анализа объекта моделирования и требований к модели была разработана ее информационная структура. Информационная структура модели представлена на рис. 1. При регулировании расхода газа и давления в боксе модель регулятора 1 осуществляет расчет необходимой степени открытия регулирующего клапана узла подачи инертного газа в бокс (u_1 , %) по заданному закону регулирования в зависимости от вычисленного в модели ГС расхода газа на входе в бокс (Q^m , м³/с) и его заданного значения ($Q_{\text{зад}}$, м³/с). Модель регулятора 2 осуществляет расчет необходимой степени открытия регулирующего клапана узла отвода газа из бокса (u_2 , %) по заданному закону регулирования в зависимости от вычисленного в модели бокса давления в боксе (P , Па) и его заданного значения ($P_{\text{зад}}$, Па). Параметрами моделей регуляторов 1 и 2 (Par^{Per1} , Par^{Per2}) являются параметры настройки законов регулирования. Состояния флагов $flag^{\text{Per1}}$ и $flag^{\text{Per2}}$ задают тип режима регулирования (ручной или автоматический) расхода азота и давления в боксе. В случае выбора ручного режима управления модели регуляторов 1 и 2 выдают степени открытия клапана, заданные значениями переменных u_1^r , % и u_2^r , % соответственно.

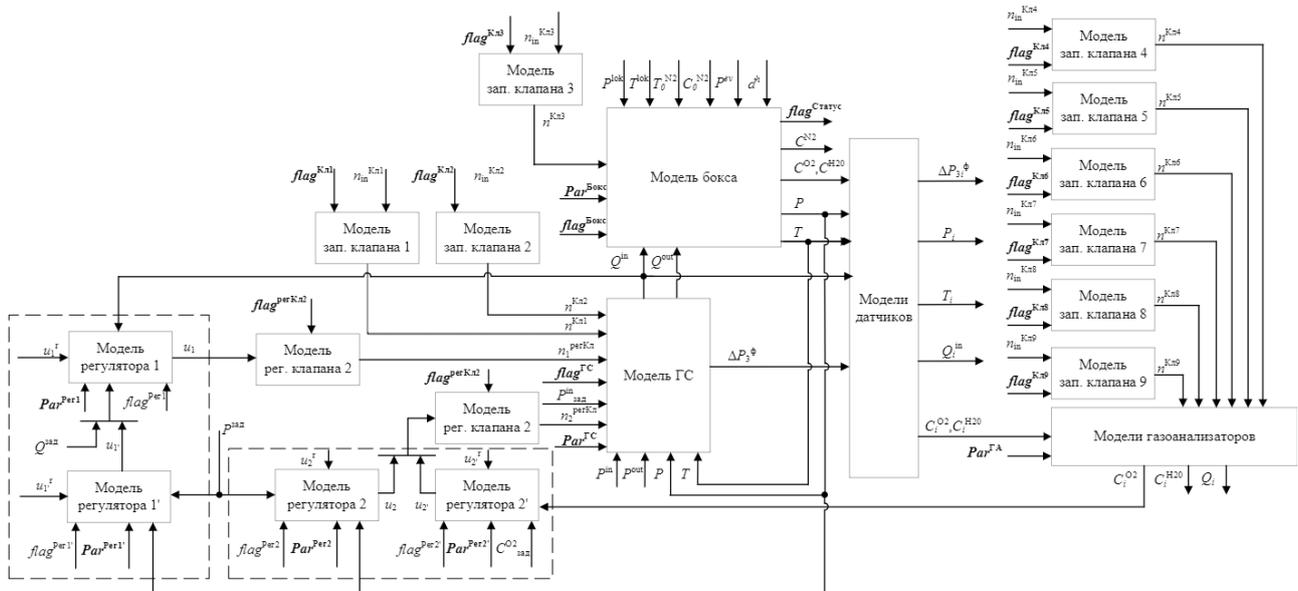


Рис. 1. Информационная структура модели состояния атмосферы в боксе при регулировании концентрации и давления в боксе:
 модель ГС – модель гидравлической системы обеспечения газом защитного бокса

При регулировании концентрации и давления в боксе модель регулятора 1' осуществляет расчет необходимого расхода (u_1 , м³/с), являющегося заданным значением расхода для модели регулятора 1, которая описана выше, по заданному закону регулирования в зависимости от вычисленного в модели бокса давления в боксе и его заданного значения. Модель регулятора 2' осуществляет расчет необходимой степени открытия регулирующего клапана узла отвода газа из бокса (u_2 , %) по заданному закону регулирования в зависимости от вычисленной в модели газоанализатора концентрации кислорода (C^{O_2} , ppm) и его заданного значения ($C^{O_2}_{зад}$, ppm).

Модели запорных клапанов имитируют выдачу действительных степеней их открытия в зависимости от заданных значений степеней запорных клапанов 1, 2, 3 ($n_{in}^{Kл1}$, %, $n_{in}^{Kл2}$, %, $n_{in}^{Kл3}$, %) и состояний векторов флагов нештатных ситуаций $flag^{Kл1}$, $flag^{Kл2}$, $flag^{Kл3}$ (аналогично для запорных клапанов 4–9).

Модели регулирующих клапанов 1 и 2 имитируют выдачу действительных степеней их открытия ($n_{in}^{perKл1}$, %, $n_{in}^{perKл2}$, %) в зависимости от степеней, рассчитанных моделями регуляторов 1 и 2 соответственно, и заданных состояний векторов флагов имитации нештатных ситуаций $flag^{perKл1}$, $flag^{perKл2}$.

Модели датчиков имитируют выдачу измеренных значений объемного расхода азота в линии подачи инертного газа в бокс (Q^m , м³/с), концентраций кислорода ($C_i^{O_2}$, ppm) и паров воды ($C_i^{H_2O}$, ppm), давления (P , Па) и температуры среды (T , °C) в боксе.

Модели газоанализаторов имитируют выдачу измеренных датчиками значений объемного расхода инертного газа, концентраций кислорода и паров воды в линии подачи инертного газа в бокс, в боксе и расхода газа (Q_i , м³/с), при отборе пробы из бокса. Параметрами моделей газоанализаторов (Par^{GA}) являются параметры побудителей расхода, наличие фильтров и их характеристики, наличие датчиков.

Приведенная информационная структура позволила разбить модель объекта-оригинала на совокупность подмоделей, что способствовало упрощению разработки математического описания. Математическое описание модели основано на уравнениях теплового и материального балансов, соотношениях для расчета потерь давления на местных гидравлических сопротивлениях трубопроводов, а также известных соотношениях, описывающих динамику регулирующей арматуры и работу систем автоматического управления.

Отсутствие на данный момент доступных значений контролируемых переменных с работающей установкой не позволяет провести численную проверку адекватности модели. Это обусловлено тем, что сама установка еще не была запущена в эксплуатацию, и, следовательно, нет данных для сравнения с моделью. Ввиду этого проводилась качественная проверка работоспособности модели. Для этого раз-

работана программа ее расчета и проведен ряд вычислительных экспериментов. В частности, осуществлена проверка корректности воспроизведения моделью изменения давлений, концентраций основных компонентов, температур среды и расходов защитной среды в боксах в штатном и нештатном режимах. Результаты показали, что характер поведения выходных переменных модели соответствует основным физическим закономерностям моделируемых процессов, при этом их значения входят в диапазоны, определенные в проекте установки.

Заключение

В результате анализа боксов установки прессования определены необходимые для моделирования переменные, сформулированы требования к модели боксов, составлена ее информационная структура, разработано математическое описание и проведена качественная оценка её работоспособности. Оценка показала адекватное поведение модели, соответствующее основным физическим закономерностям протекания процессов в боксах.

Предлагаемые возможности модели могут быть использованы для выбора оптимальных значений расхода защитной среды и разрежения в боксах в рабочем и подготовительном режимах с целью обеспечения допустимого содержания кислорода и паров воды в среде боксов, синтеза систем автоматического управления параметрами атмосферы в боксах, обучения оперативного персонала диагностике причин возникновения нештатных ситуаций в работе боксов и трубопроводной арматуры в компьютерных тренажерах для обучения операторов технологических процессов.

В дальнейшем планируются проведение численной оценки адекватности модели и работы по интеграции модели в программное обеспечение цифрового двойника.

Список использованных источников

1. Защитные боксы с инертной атмосферой для изготовления нитридного топлива. Текст: электронный // Научно-производственная фирма «Сосны»: сайт. – 2006–2023. – URL: <https://sosny.ru/radiaczionno-zashhitnyie-boksyi/zashhitnyie-boksyi-s-inertnoj-atmosferoj.html>.