

УДК 004.942

А. И. СИЛАКОВ¹, М. Л. УГРЮМОВ², А. С. ШМЕЛЕВ¹¹ НЦиР «Rizikon», Украина² Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПОИСКА И АНАЛИЗА ДЕФЕКТОВ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

Проведен анализ существующих методов обнаружения дефектов в технологических процессах на промышленных предприятиях. Предложен метод поиска дефектов посредством моделирования технологического процесса и гидравлической сети. Разработана методика поиска решений для устранения обнаруженных дефектов, которая основана на анализе результатов численного моделирования. Качество полученных результатов напрямую зависит от количества начальных условий, заданных в моделирующую программу. Описаны возможности программного комплекса. Представлены результаты численного моделирования, а также проведен их анализ.

Ключевые слова: безопасность, обнаружение дефектов, гидравлическая сеть, технологический процесс, математическое моделирование.

Введение

Безопасное ведение процессов, протекающих на современном предприятии, является неотъемлемой и весьма сложной задачей в его функционировании. Задача безопасного управления химико-технологическими системами в условиях наличия высоких температур и давлений, использования опасных химических реагентов и усложнения технологических схем является актуальной.

Для современных аппаратов с их системами управления очень важно во время их работы точное соблюдение всех технологических параметров, отсутствие ошибок в управлении и своевременное адекватное реагирование на отклонения, поиск и устранение причин их возникновения [1].

Решению данной задачи способствует создание инженерных компьютерных систем, моделирующих технологический процесс, которые позволяют произвести оценку качества работы технологической схемы в различных режимах работы.

Целями такого численного моделирования являются: анализ различных переменных состояния технологического оборудования для получения информации, позволяющей судить о безопасности предприятия в целом. Анализ при помощи моделирования физико-химических процессов и гидравлических сетей позволяет не только выделить «слабые места» на производстве, но и производить опрвление процессом таким образом, чтобы обеспечить максимальное количество целевого продукта, переработанного из сырья при минимальных затратах энергии.

Науко- и трудоемкость разработки моделирующих компьютерных программ сказывается как на длительности, так и на большой стоимости выполняемых проектов, что и объясняет причину низкой обеспеченности предприятий подобными программными комплексами.

Цель статьи – проанализировать существующие методы обеспечения безопасности на производстве, разработать архитектуру программного комплекса и методику поиска дефектов, а также их устранения.

1. Существующие методы поиска, анализа и устранения дефектов

Современные программно-инженерные комплексы (ПИК) для обеспечения безопасности на производстве делятся на два типа – использующие активные и пассивные методы поиска, анализа и устранения дефектов (рис. 1). ПИК, использующие активные методы – системы управления и системы противоаварийной защиты. ПИК, использующие пассивные методы – программные комплексы для проектирования технологического оборудования и моделирующие компьютерные системы для поиска дефектов, оптимизации и тонкой настройки технологического процесса. Пассивные ПИК используют для настройки параметров активных ПИК посредством моделирования различных режимов работы технологического оборудования.

Активные методы поиска и анализа дефектов используются в работающей технологической системе для контроля переменных состояния и настрой-

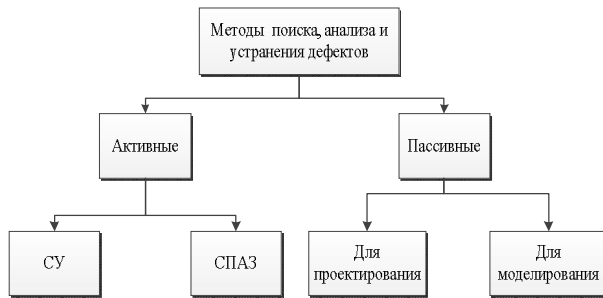


Рис. 1. Методы поиска, анализа и устранения дефектов

ки системы управления. Система управления (СУ) - группа технических и программных средств, предназначенных для автоматизации управления технологическим оборудованием на промышленных предприятиях [2]. В общем случае, система управления обеспечивает соответствие значений переменных состояния заданным путем тонкой подстройки регулирующих органов (PID-регуляторы), либо полным открытием, либо закрытием потоков (с использованием электродвигателей, отсекателей). Система противоаварийной защиты (СПАЗ) предназначена для предупреждения и предотвращения аварийных ситуаций, которые могут возникнуть во время работы технологической системы, как в результате влияния человеческого фактора, так и из-за сбоев в работе оборудования. Система противоаварийной защиты строится на специально сертифицированных для таких целей моделях программируемых контроллеров. Контроллеры имеют дублированную архитектуру, что в несколько раз повышает отказоустойчивость оборудования отвечающее за предотвращение аварийных ситуаций. Система противоаварийной защиты параллельно с основной системой управления следит за состояниями аварийных сигнальных датчиков, в случае срабатывания которых, СПАЗ разрывает управление задвижками и двигателями от основной СУ, в результате чего они останавливаются или закрываются [3].

Пассивные методы поиска и анализа дефектов – настройки СПАЗ и СУ, размеры, типы и виды аппаратов и трубопроводов, которые являются результатом работы программных комплексов для проектирования технологического оборудования и моделирования процесса. Данные методы позволяют как наладить работу технологического процесса, так и оптимизировать его, с учетом минимизации энерго- и ресурсозатрат, а также обеспечить поиск возможных дефектов и разработать решения по их устранению.

Процесс обеспечения безопасности на производстве начинается с его проектирования. Этап проектирования включает в себя как разработку от-

дельных аппаратов и трубопроводов, так и интеграцию разработанных дискретных модулей оборудования в общую технологическую схему производства. Затем рассчитываются прочностные характеристики используемых материалов, которые будут обеспечивать безопасность технологического процесса.

Настройки пуска, останова и рабочего режима технологического процесса производятся при помощи СУ, для которой рассчитаны поправочные коэффициенты, при помощи моделирующих компьютерных программ во время работ по проектированию и поиску дефектов.

В случае, когда необходимо внести изменения в уже существующий технологический процесс, необходимо произвести корректировочные расчеты для СУ и СПАЗ, которые позволят обеспечить безопасность процесса при новых значениях технологических параметров.

2. Математическое моделирование технологического процесса и гидравлической сети

Технологический процесс – это упорядоченная последовательность взаимосвязанных операций, выполняющихся с момента возникновения исходных данных до получения требуемого результата.

Технологическая схема – последовательное описание или графическое изображение последовательности технологических операций (процессов) и соответствующих им аппаратов, которые позволяют получить из сырья целевую продукцию. С помощью набора объектов технологической схемы создается графическая интерпретация – цифровой аналог производства. Моделирование технологических процессов структурно-сложных технологических схем невозможно без использования гидравлической сети. Гидравлическая сеть – двудольный граф, состоящий из ребер, узлов и вершин. В контексте технологической схемы элементы ориентированного графа олицетворяют следующие связи: вершина – объект технологической схемы, объем которого значительно больше объема трубопровода (резервуар, емкость и т. д.); узел – объект технологической схемы, объем которого сопоставим с объемом трубопровода (смеситель, коллектор и т. д.); ребро – объект технологической схемы, который соединяет узлы и ребра (трубопровод).

В процессе математического моделирования физико-химических процессов, протекающих в элементах структурно-сложных технологических систем, выполняются расчеты переменных состояния объектов технологической схемы с целью его детального изучения и дальнейшей корректировки СУ

и СПАЗ. Процесс моделирования технологической схемы можно разделить на несколько этапов: создание технологической схемы, сбор и ввод исходной информации об объектах; автоматизированное формирование гидравлической сети на базе технологической схемы; идентификация математической модели сети трубопроводов; расчет переменных состояния объектов; управление расчетом.

Для того, чтобы создать математическую модель сети трубопроводов (гидравлической сети), необходимо построить ориентированный граф и матрицу связности его ребер, а также собрать полную информацию о геометрических особенностях труб, физико-химических свойствах веществ и смесей, которые проходят по ним.

Теория построения гидравлической сети представлена в работе [4]. Там же предложен метод и реализующая его информационная технология построения гидравлических сетей на базе технологических схем, которая исключает участие пользователя в формировании матрицы связности узлов, вершин и ребер. Обмен информацией между расчетными модулями в процессе моделирования гидравлической сети и технологического процесса происходит автоматически.

Входными данными для моделирования гидравлической сети являются:

- гидравлические сопротивления участков трубопровода (коэффициенты, которые рассчитываются исходя из геометрических особенностей участков трубопровода);
- плотность вещества, протекающего по участку трубопровода;
- эквивалентный диаметр участка трубопровода;
- степень открытия вентиля на участке трубопровода;
- давление источника и приемника (начальные приближения для решения системы уравнений);
- связность ребер, узлов и вершин.

Выходными данными – результатами моделирования гидравлической сети являются:

- расход смеси на каждом из участков трубопровода;
- давления в узлах трубопровода (точках смешения/деления потока) [5].

Гидравлическое сопротивление каждого участка трубопровода рассчитывается в зависимости от режима течения смеси, но в общем случае оно обусловлено как сопротивлением трения, так и местными сопротивлениями.

На рис. 2 представлены этапы работ, которые необходимо произвести с использованием разработанного программного комплекса для моделирования технологического процесса и гидравлической

сети, для поиска, анализа и устранения дефектов, а также настройки технологического процесса на оптимальный режим.

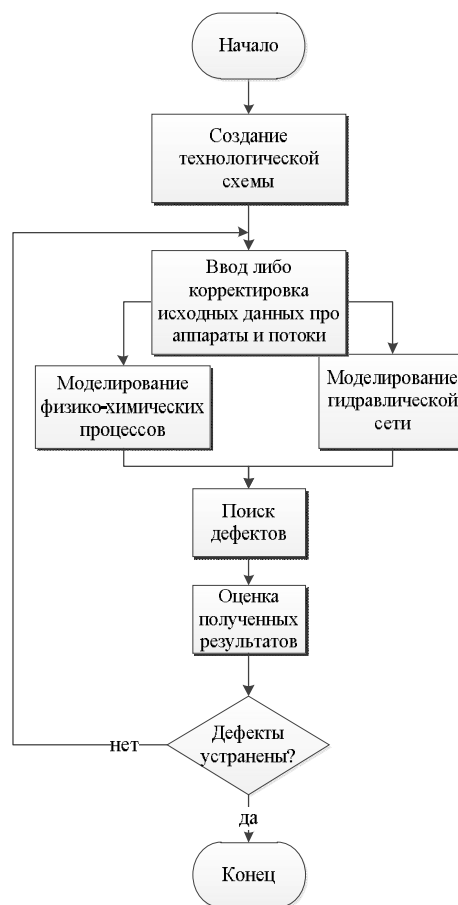


Рис. 2. Алгоритм поиска дефектов

Результаты моделирования технологического процесса и гидравлической сети, в зависимости от входных данных и внесенных возмущений, могут различаться. При этом модель должна обеспечивать минимальную погрешность, чтобы при переносе настроек на СУ и СПАЗ, результирующие параметры обеспечили безопасную работу производства [6].

3. Результаты численного моделирования

Численное моделирование гидравлической сети и физико-химических процессов подразумевают расчет контролируемых переменных состояния при заданных начальных условиях. Например, необходимо оценить скорость снижения давления в аппарате при открытии предохранительного клапана и сравнить её с предельно допустимой. Для этого, необходимо задать геометрические параметры аппаратов и трубопроводов, состав смеси, начальные значения температур, давлений и т.д. Результатами

расчета физико-химических процессов будут новые значения параметров смеси, скорости поступления и вытекания смеси из аппарата в аппарат, а также давления в узлах схемы.

На рис. 3 и рис. 4 представлены результаты численного моделирования гидравлической сети при аварийном сбросе вещества через клапан. Результаты численного моделирования показали, что линейная скорость выходящей из аппарата смеси равна 2,96 м/с. Паспортные данные аппарата допускают линейную скорость истечения до 70 м/с, на основе чего можно сделать вывод, что такой сброс является безопасным.

Список сетей	Аппарат	Давление, атм
Сеть №0	E-285	0.1
Сеть №1	GA-105	0.1
Сеть №2	E-191	0.2337036
Сеть №3	E-192	0.2673575
Сеть №4	E-188	0.975
Сеть №5	E-187	1.0533222
Сеть №6	E-129	1.0576634
Сеть №7	E-130	1.0670543
Сеть №8	EA-101-3	1.0734901
Сеть №9	EA-101-2	1.0737021
Сеть №10	EA-101-1	1.0797619
Сеть №11	E-131	1.0797766
Сеть №12	EA-306 ДБО-3	1.0797895
Сеть №13	E-201	1.0865482
Сеть №14	E-202	1.0864393
Сеть №15	E-203	1.0857854
Сеть №16	ABO EC-101A-G	1.0842306
Сеть №17		
Сеть №18		

Рис. 3. Распределение давлений в узлах технологической схемы

Объект:С-3

Свойства потока	
Давление, атм	8.92641
Доля пара	0.9999999
Линейная скорость, м/с	2.9669555
Расход моль/с	198.099896
Расход тонн/час	55.6345334
Расход м³/с	0.83895139
Температура, °C	200

Рис. 4. Переменные состояния и скорость поступления смеси в аппарат

Модули расчета физико-химических процессов и гидравлической сети динамически обмениваются информацией после каждой итерации расчета посредством системы автоматической стыковки переменных. Результаты расчета одной итерации являются начальными приближениями для последующей.

На рис.5 представлены результаты моделирования физико-химических процессов, в данном случае – численные значения параметров, которые рас-

считаны в моделях смешения, разделения веществ, поиска давления температуры и т.д.

Давление жидкости, атм	9.0039
Давление, атм	8.89367
Масса смеси, Кг	11471.062
Молей всего	54227.4475
Степень заплнн. жидкостью, %	18.6746111
Температура, °C	197.602
Уровень жидкости, м	1.120476671

Рис. 5 Переменные технологического процесса

Для того, чтобы определить возможные дефекты в технологической системе, необходимо внести возмущения в её работу и отследить рассчитанные значения, сравнив их с предельно допустимыми. В том случае, если какая-либо переменная выходит за пределы допустимых значений – необходимо на основе анализа результатов моделирования с помощью программного комплекса определить причины этих изменений, а также внести изменения в настройках СУ и СПАЗ, чтобы при произведенных воздействиях контролируемые переменные состояния не выходили за пределы допустимых значений.

4. Практическое применение численного моделирования

Для того, чтобы разработать надежную безопасную технологическую систему, устойчивую к возмущениям, необходим анализ возможных дефектов и пересмотр возможных конфигураций для СУ и СПАЗ.

К наиболее важным преимуществам компьютерного моделирования технологических процессов относятся возможности:

- причинно-следственного анализа для выбора оптимального варианта технологического процесса, соответствующего поставленным целям;
- нахождения оптимальных режимов работы оборудования для получения желаемой производительности установок и желаемого качества продуктов;
- оценки влияния изменения характеристик сырья, сбоев в работе и остановки оборудования на безопасность, надежность и рентабельность установки;
- расчета и проверки параметров системы управления в режиме динамического моделирования;
- контроля состояния оборудования;
- оценки таких дефектов оборудования, как загрязнение теплообменников и захлебывание тарелок ректификационных колонн путем моделирования и

мониторинга переменных состояния оборудования реальной установки.

Таким образом, разработка современных технологических процессов и оптимальная эксплуатация действующих производств невозможна без применения моделирующих компьютерных программ, обеспечивающих высокую точность определения переменных состояния технологических процессов и позволяющих без значительных материальных и временных затрат проводить анализ этих процессов. Такие численные исследования имеют огромное значение не только для проектирования с помощью САПР, но и для функционирования существующих производств, так как позволяют учесть влияние внешних факторов (изменение состава сырья, изменение требований к конечным и промежуточным продуктам и т.д.) на показатели действующих производств и разработать безопасную систему управления на основе моделирования процесса в режиме реального времени.

Обычно моделирующие компьютерные программы также называют симуляторами. В общем случае с применением современных симуляторов технологических процессов решаются следующие задачи:

- анализ, оптимизация и синтез технологических систем для проектируемых и действующих производств;
- исследование поведения технологических систем в режиме реального времени для синтеза систем управления и противоаварийной защиты с целью поиска возможных дефектов и повышения надежности этих систем.

Заключение

Современное развитие технологии производств и требования к безопасности стимулируют развитие систем компьютерного моделирования гидравлических сетей и технологических процессов.

Моделирование физико-химических процессов и гидравлических сетей в режиме реального времени позволяет не только проводить анализ переменных состояния технологического процесса производства, но и выявить дефекты, а также произвести необходимые расчеты по оценке эффективности возможных способов их устранения.

Разработан метод моделирования гидравлических сетей и технологических процессов, позволяющий определять и анализировать переменные состояния технологической системы, в том числе при наличии дефектов.

В дальнейшем планируется применение численного моделирования для создания компьютерных тренажерных комплексов, которые служат для

обучения персонала производства в различных пред- и аварийных ситуациях.

Литература

1. Ицкович, Э. Л. Управление функционированием АСУ химико-технологическим производством [Текст] / Э. Л. Ицкович, М. В. Левин, Т. Б. Потапова // *Приборы и системы управления*, 1987. – С. 28-33.
2. Кафаров, В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств. Учеб. пособие для вузов [Текст] / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. – М. : Высш. шк., 1991. – 400 с.
3. Поляков, С. А. Математические модели и моделирование объектов машиностроительного производства [Текст] : учебное пособие / С. А. Поляков. – Издательство Московского государственного открытого университета, 2011. – 104 с.
4. Формализация представления гидравлических сетей структурно-сложных технологических систем на основе элементной базы стандартных модулей [Текст] / А. И. Силаков, М. Л. Угрюмов, А. С. Шмелев, В. Е. Стрелец // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*. – Харьков, 2015. – Вып. 70. – С. 93-101.
5. *Chemical Engineering Dynamics [Text]* / J. Ingham, I. J. Dunn, E. Heinzle, I. E. Prenosil, J. B. Snape, 2007. – P. 79-91.
6. Luyben, W. L. *Process modeling simulation and control for chemical engineers Second edition [Text]* / W. L. Luyben. – 2013. – P. 89-98.

References

1. Itskovich, E. L., Levin, M. V., Potapova, T. B. *Upravlenie funkcionirovaniem ASU himiko-tehnologicheskimi proizvodstvom [Manage the operation of ASC chemical technology production]* *Instruments and systems management*. 1987. pp. 28-33.
2. Kafarov, V. V., Glebov, M. B. *Matematicheskoe modelirovanie osnovnykh processov himicheskikh proizvodstv [Mathematical modeling of major chemical production processes]*. Moscow, Textbook for High Schools Publ., 1991. 400 p.
3. Polyakov, S. A. *Matematicheskie modeli i modelirovanie obyektov mashinostroitel'nogo proizvodstva [Mathematical models and modeling facilities of machine-building production]*. Publishing of the Moscow State Open University, 2011. 104 p.
4. Silakov, A. I., Ugryumov, M. L., Shmelev, A. S., Strelets, V. E. *Formalizatsiya predstavleniya gidravlicheskikh setey strukturno-slozhnykh tehnologicheskikh sistem na osnove elementnoy bazu standartnykh moduley [The formalization of the submission of*

hydraulic networks structurally complex technological systems based on element base of standard modules]. *Public information and computer integrated technologies*, Collection of scientific papers, 2015, Issue 70, pp. 93-101.

5. Ingham, J., Dunn, I. J., Heinzle, E., Prenosil, I. E., Snape, J. B. *Chemical Engineering Dynamics*. 2007. pp. 79-91.

6. Luyben, W. L. *Process modeling simulation and control for chemical engineers Second edition*, 2013. pp. 89-98.

Поступила в редакцію 12.02.2016, рассмотрена на редколлегии 14.04.2016

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І ГІДРАВЛІЧНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПОШУКУ І АНАЛІЗУ ДЕФЕКТІВ НА ВИРОБНИЦТВІ

А. І. Сілаков, М. Л. Угрюмов, О. С. Шмелев

Проведено аналіз існуючих методів виявлення дефектів в технологічних процесах на промислових підприємствах. Запропоновано метод пошуку дефектів за допомогою моделювання технологічного процесу і гідравлічної мережі. Розроблено методику пошуку рішень для усунення виявлених дефектів, яка заснована на аналізі результатів чисельного моделювання. Якість отриманих результатів безпосередньо залежить від кількості початкових умов, заданих в моделюючу програму. Описано можливості програмного комплексу. Представлені результати чисельного моделювання, а також проведено їх аналіз.

Ключові слова: безпека, виявлення дефектів, гідравлічна мережа, технологічний процес, математичне моделювання.

MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND HYDRAULIC NETWORKS FOR SEARCH AND ANALYZING OF DEFECTS ON THE MANUFACTURE

A. I. Silakov, M. L. Ugryumov, A. S. Shmelev

The analysis of existing methods of detecting defects in manufacturing processes at industrial plants has been carried out. A method of finding defects by simulating the technological process and the hydraulic network has been proposed. A method of searching for solutions to eliminate detected defects, which is based on the analysis of numerical simulation results, has been developed. The quality of the obtained results depends on the quantity of initial conditions specified in the simulation program. The features of the software package are described. Numerical simulation results are presented and also their analysis is performed.

Key words: security, detection of defects, hydraulic network, technological process, mathematical modeling.

Сілаков Артем Игоревич – engineer-programmer, НЦиР «Rizikon», Северодонецк, Украина, e-mail: silakov3@gmail.com.

Угрюмов Михаил Леонидович – д-р техн. наук, профессор Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ugryumov.m@mail.ru.

Шмелев Александр Сергеевич – ведущий научный сотрудник НЦиР «Rizikon», Северодонецк, Украина, e-mail: asshmel@mail.ru.

Silakov Artyom Igorevich – engineer-programmer RCsR «Rizikon», Severodonetsk, Ukraine, e-mail: silakov3@gmail.com.

Ugryumov Mihail Leonidovich – doctor of technical sciences, professor, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: ugryumov.m@mail.ru.

Shmelev Aleksandr Sergeevich – leader researcher RCsR «Rizikon», Severodonetsk, Ukraine, e-mail: asshmel@mail.ru.