

## СТРУКТУРА ТРЕНАЖЕРНО-ОБУЧАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛТОГО ФОСФОРА

О.В. Ершова, Т.Б. Чистякова (СПБГТИ)

*Рассматриваются вопросы разработки тренажерно-обучающего комплекса (ТОК), предназначенного для получения навыков управления процессом производства фосфора оперативно-техническим персоналом. Реализация ТОК осуществлена средствами программного пакета для полной многоуровневой автоматизации Factory Suite.*

**Введение**

Современное производство желтого фосфора характеризуется высокой насыщенностью разнообразного оборудования и сложностью технологических приемов для ведения процесса на всех стадиях. Кроме того, ТП производства фосфора является материало- и энергоемким, экологически- и потенциально опасным в силу используемого сырья, получаемых продуктов, наличия воспламеняющихся веществ и газов. В такой ситуации очевидно, что оперативно-технический персонал должен обладать высокой квалификацией.

В настоящее время растет интерес промышленности к современным компьютерным средствам подготовки персонала для эксплуатации сложных ТП и систем управления с целью снижения влияния "человеческого фактора". Последнее десятилетие отмечено широким распространением систем компьютерного тренинга операторов ТП, которое стало возможным благодаря качественно новым информационным технологиям [1], к числу которых относятся системы диспетчерского управления на основе сбора данных (SCADA-системы).

Для повышения качества ведения процесса производства фосфора необходим тренажер, предназначенный для обучения персонала эффективным приемам управления и приобретения навыков поведения в нештатных ситуациях. Для описания объекта управления в тренажер включены различные типы моделей: модель представления знаний (МПЗ) о нештатных ситуациях ТП, математическая модель (ММ) для обучения оптимальному управлению, а также динамические мнемосхемы, отображающие информацию о процессе в виде, приближенном к интерфейсам промышленных систем управления. Обучение персонала позволит снизить непроизводительные потери и число аварийных ситуаций, повысить экономическую эффективность ТП.

**Характеристика среды разработки**

Разработка тренажера осуществлялась с использованием программного пакета Factory Suite фирмы Wonderware, предназначенного для решения задач автоматизации на всех уровнях управления предприятием [2]. Factory Suite позволяет: непосредственно управлять ТП с помощью УСО, ПЛК (InControl); реализовывать супервизорное управление и визуализацию, создавать современные АРМ операторов ТП (SCADA-система InTouch); хранить данные в БД РВ и передавать их между различными компонентами и приложениями (IndustrialSQL Server); осуществлять передачу информации через Internet/Intranet из InTouch, БД алармов, серверов ввода/вывода (Suite Voyager); разрабатывать АРМ механика, технолога (Active Factory Suite); управлять основными производ-

ственными фондами (Avantis) и решать другие производственные задачи. Автоматизация средствами таких пакетов, как Factory Suite, "устраняет" существовавший ранее разрыв между различными уровнями управления, обеспечивая обмен данными на базе стандартных или специальных протоколов передачи информации.

Компонент Factory Suite SCADA-система InTouch в настоящее время является одним из наиболее распространенных. InTouch включает набор стандартных функций таких, как сбор и обработка первичной информации от устройств нижнего уровня; создание ПО систем автоматизации; регистрация сигналов об аварийных ситуациях; визуализация представления информации в виде мнемосхем, графиков, гистограмм, библиотеки графических объектов и т. п.; обмен данными между задачами в РВ; архивирование данных; генерация отчетов и др.

Таким образом, InTouch имеет набор необходимых инструментов для реализации функций тренажера: создания динамических мнемосхем, отвечающих современным требованиям; разработки БД для хранения информации в РВ, определения переменных процесса как алармовых для выявления нештатных ситуаций (НС); программной реализации ММ на языке скриптов или путем подключения модулей, созданных, например, в среде Borland C++Builder; организации протоколов обучения; возможности работы в сети с несколькими обучаемыми; формирования АРМ инструктора; формирования сценариев обучения поведению в различных НС. InTouch позволяет наблюдать за ТП или процессом обучения через Internet, что перспективно с точки зрения создания систем открытого образования.

**Характеристика, анализ и описание ТП**

Процесс производства фосфора включает следующие стадии: подготовки сырья и инертного газа, составление шихты, получение фосфора, изготовление и эксплуатация самоспекающихся электродов, приготовления электродной массы и содового раствора, очистки печного газа в электрофильтрах, конденсации фосфора из печного газа, транспортировки печного газа, выпуск шлака, феррофосфора и их последующая переработка для нужд народного хозяйства.

Производство фосфора осуществляется на печной установке, центральным агрегатом которой является фосфорная электропечь — твердофазный химический реактор. На вход печи подается шихта, под действием высокой (до 1500 °С) температуры происходит взаимодействие компонентов, в результате чего образуются продукты плавки: шлак, феррофосфор и печной газ. Из последнего путем обеспыливания и конденсации выделяют фосфор. Для получения одной тонны фосфора расходуется около 15 т природного сырья

и 12 МВт·ч электроэнергии, поэтому необходимо эффективно управлять процессом и рационально использовать ресурсы.

Пожароопасность печи связана с тем, что продукты реакций — расплав и газы — покидают печь с температурами 1400 °С и 500 °С соответственно и с тем, что наличие 7% фосфина в печном газе приводит к его воспламенению при температуре 20 °С. Кроме того, сам фосфор самовоспламеняется на воздухе, поэтому хранят его под слоем воды. Взрывоопасность печи обусловлена наличием горючих компонентов в печном газе. Необходимо также обеспечение экологической безопасности данного процесса, поскольку его функционирование сопровождается выбросом в атмосферу вредных веществ и загрязнением сточных вод [3].

Эффективность оперативного управления процессом зависит от квалификации персонала и его адекватных действий при возникновении НС, ошибки которого могут привести к материальным потерям, связанным с порчей дорогостоящего технологического оборудования и выпуску недоброкачественной продукции. При нарушении нормального режима работы печи возможны прожог кожуха электрода, обрыв электрода, прожог футеровки и т. п., что приводит к останову печи. С точки зрения экологии, опасными являются обрушение шихты, повышение температуры печных газов, т. к. это влечет за собой увеличение количества вредных составляющих газа, выбрасываемых в атмосферу: фосфина, мышьяка, СО. При выбросе газа из сальников в цех попадает  $P_2O_5$  — ядовитый газ, возникающий при взаимодействии фосфора с кислородом воздуха цеха. Кроме того, при температуре печных газов свыше 500 °С не работают электрофильтры, что приводит к выбросу в атмосферу технологической пыли [3].

Тренажер имитирует работу печи, представляя ТП как объект управления (ОУ), характеризующийся совокупностью входных/выходных информационных потоков, управляющих и возмущающих воздействий, связанных ММ процесса.

Для описания ОУ необходимо информационное обеспечение тренажера, позволяющее анализировать информацию обо всех параметрах, распознавать ситуации выхода параметров за допустимые значения; ММ ТП, позволяющая определять значения управлений, обеспечивающих наилучшие значения технологических, экологических и технико-экономических показателей; МПЗ, позволяющая изучать причины возникновения НС и рекомендации по их устранению.

Информационное обеспечение ТП включает БД параметров, содержащую информацию о характеристиках сырья, электрических показателях и геометрических размерах печи, требованиях к качеству и количеству целевого продукта, значениях параметров состояния. БД является реляционной и имеет различные структуры таблиц (наборов атрибутов) для разных типов параметров: внутренних, ввода/вывода, аналоговых, дискретных и пр. На рис. 1 пример БД приведен для аналоговых параметров с опцией Details&Alarms, другие параметры, например, дискретные, имеют иной перечень полей.

В результате анализа параметров печи в качестве управляющих воздействий (U) определены расходы кварцита (B), кокса (C), и положение электрода (h), поскольку их изменения значительно влияют на выходные производственные показатели. Входными параметрами (X) являются составы сырья (фосфорита —  $a_i$ , кварцита —  $b_i$  и кокса —  $c_i$ ), его гранулометрический состав ( $r$ ), мощность печи (Q). Выходными параметрами (Y) являются количество целевого продукта ( $F_{факт}$ ), состав и количество газа (G), пыли ( $Pl_i$ ), шлака (Sh), феррофосфора (FF<sub>i</sub>), электрические величины, характеризующие состояние реакционного пространства ( $Z_j$ ), энергетические затраты на химические реакции ( $W_i$ ), производительность (N) и КПД печи ( $\eta$ ), температура (T) и давление (P) под сводом печи. Возмущающими воздействиями могут быть колебания химического и гранулометрического состава сырья, электрических параметров [4].

ММ ТП включает уравнения материально-энергетического баланса для стационарных режимов работы печной установки, которая является инерционным объектом. Материальный баланс (МБ) процесса составлен на основании учета компонентов, содержащихся в сырье, на входе и выходе с учетом протекающих химических реакций. Результатом решения системы алгебраических уравнений МБ являются состав шихты (соотношение фосфорита, кварцита и кокса — A, B, C соответственно), обеспечивающий производство целевого продукта требуемого качества, количество и состав продуктов плавки (шлака, феррофосфора, пыли, фосфора — Sh, FF, Pl, F), количество и состав печного газа (G) по составляющим (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>), пылевых уносов, потерь фосфора. В ходе процесса расходуется электродная масса (El), а под крышку печи подают газ (V), их количество учитывается в балансе. Входные (A, B, C, El, V) и выходные (Sh, FF, Pl, G, F) потоки рассчитываются в тоннах на одну тонну фосфора (т/т) [3], что позволяет использовать ММ для описания процесса в печах различной номинальной мощности. Реальные значения потоков рассчитываются в соответствии с фактической мощностью и производительностью печи.

Расчет расхода энергии на получение продукта осуществляется по уравнениям энергетического баланса с учетом затрат на реакции взаимодействия основных компонентов сырья и примесей, на нагрев продуктов плавки, газа и пыли, на плавление расплава, феррофосфора и термодинамических данных. По расходу энергии рассчитываются производительность печи и положение электрода.

Таким образом, ММ позволяет рассчитывать оптимальный состав шихты при использовании сырья различных месторождений и определять положение электрода для поддержания в заданных диапазонах электрических показателей функционирования печи.

Формализованное представление ТП может быть представлено как:  $Y=f(X, U, \Lambda)$ , где  $\Lambda$  — вектор коэффициентов ММ, учитывающий геометрические характеристики, мощность и производительность печи,  $Y=\{F_{факт}, T, P, G_i, Pl_i, Sh, FF_i, Z_j, W_i, N, \eta\}$  — вектор выходных параметров. Задача оптимального управ-

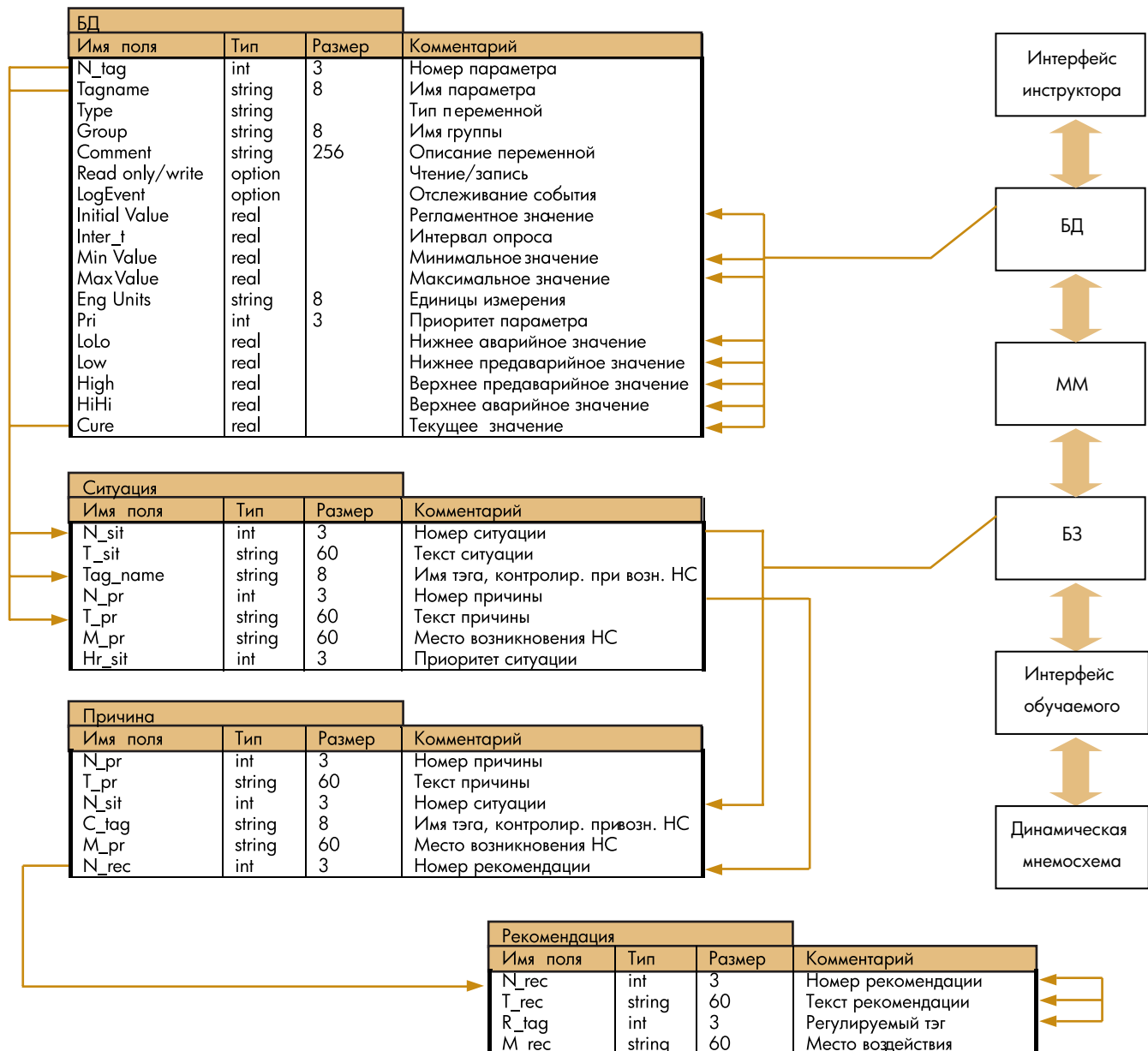


Рис. 1. Функционально-информационная структура тренажерно-обучающего комплекса

ления формулируется таким образом: определить значения управлений ( $B$ ,  $C$ ,  $h$ ), обеспечивающих максимальное количество фосфора ( $F_{\text{факт}}$ ) при соблюдении ограничений на значения выходных параметров ( $T$ ,  $I$ ,  $Z_j$ ,  $W_i$ ,  $\eta$ ).

Для описания нештатных ситуаций разработана МПЗ и база знаний (БЗ), содержащая перечни НС, причины их возникновения и рекомендации по их устранению и нормализации режима работы объекта. Эта информация является результатом анализа данных экспертов. БЗ включает описание 48 НС, 79 причин и 84 рекомендации. Описание БЗ представлено на рис. 1.

#### Структура тренажерно-обучающего комплекса

ТОК включает БД параметров процесса, ММ процесса, БЗ, внешний и внутренний интерфейсные модули обучаемого и инструктора, разработанные в SCADA-системе InTouch.

Интерфейс обучаемого подобен АРМ оператора ТП [5]. В него включены динамические мнемосхемы процесса, отображающие производство фосфора, сообщения об аварийных ситуациях, графики изменения значений параметров в реальном времени и статистические кривые, позволяющие просматривать историю изменения параметров [5].

По заданному инструктором сценарию обучаемый учится предотвращать аварии и отклонения производственных и экологических показателей от регламентированных значений. Интерфейс обучаемого позволяет ему выступать в роли оператора, наблюдать за функционированием ТП, изменять на мнемосхеме значения управляющих воздействий и изучать их влияние на значения выходных параметров, просматривать и анализировать результаты воздействий с помощью динамической мнемосхемы или путем просмотра БД, получать

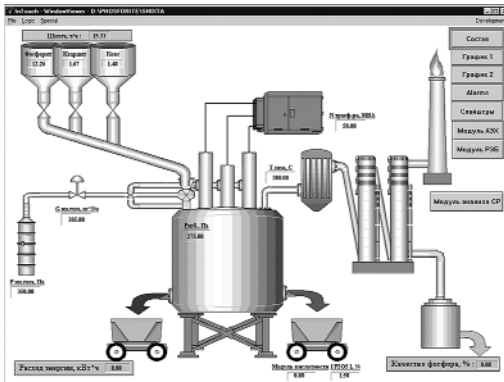


Рис. 2. Динамическая мнемосхема ТП

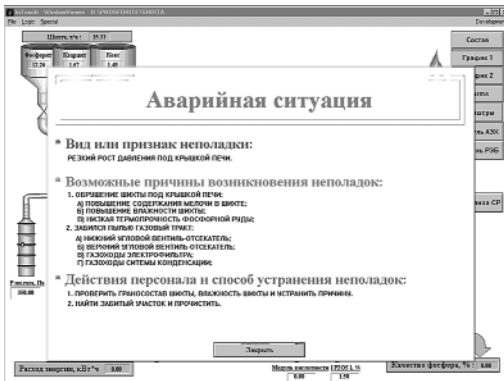


Рис. 3. Нарушение технологического режима

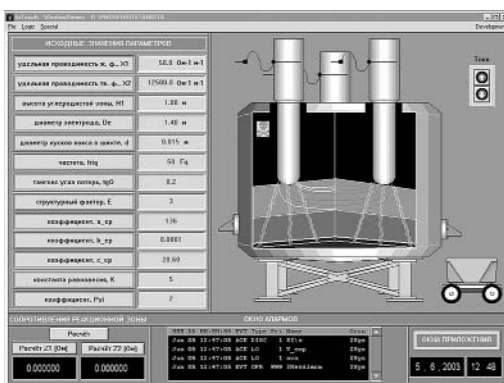


Рис. 4. Модуль анализа электрических характеристик

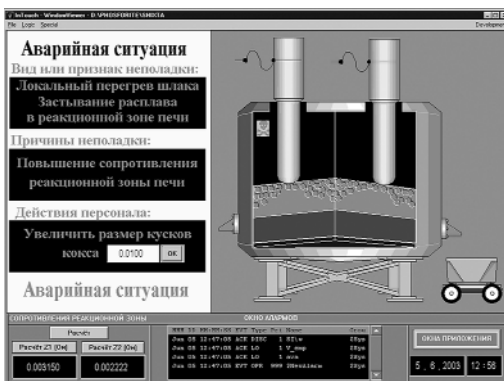


Рис. 5. Нарушение электрического режима

информацию о нештатных ситуациях, выяснять причины их возникновения, изучать способы и формировать навыки по их устранению.

В результате обучения с использованием тренажера обучаемый должен научиться производить выбор управляющих воздействий, обеспечивающих наилучшие значения выходных показателей, осуществлять управление процессом не допуская аварийных ситуаций и устранять нештатные ситуации в случае их возникновения.

Примеры интерфейсов мнемосхемы процесса, аварийных ситуаций, анализа электрического режима приведены на рис. 2, 3, 4, 5.

Для тестирования знаний обучаемого ТОК имеет интерфейс инструктора. Инструктор может следить за действиями в РВ или просматривать и оценивать протокол обучения. Возможности среды разработки позволяют создать распределенную систему обучения, при этом инструктор имеет возможность по сети наблюдать за действиями одного или нескольких обучаемых.

С помощью ТОК решаются следующие задачи: информирование и обучение персонала в области управления производством; бережение и экономия сырья, материалов и энергетических ресурсов; снижение брака, сокращение аварийных ситуаций; снижение экологических рисков для персонала, связанных с особой вредностью фосфорного производства.

**Заключение**

Использование Factory Suite позволило разработать ТОК, предназначенный для обучения оперативно-технического персонала эффективному управлению процессом производства фосфора, поведению в нештатных ситуациях и снижению рисков. Информацию о результатах обучения можно просматривать через Internet, используя Internet-портал Factory Suite. Комплекс полезен для подготовки технологов электротермических производств, специалистов по автоматизации, проектировщиков систем управления. ТОК внедрен в учебный процесс соответствующих кафедр Санкт-Петербургского государственного технологического института.

**Список литературы**

1. Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В. Типовой компьютерный тренажерный комплекс для обучения операторов ТП//Автоматизация в промышленности. 2003. №2.
2. Еришова О.В., Чистякова Т.Б., Лавров А.И. Использование компонентов Factory Suite для разработки интегрированных АСУ//Автоматизация. ПТС. Системы. Применения: Сб. трудов межд. семинара / ИПУ РАН, Москва, 2001.
3. Еришов В.А., Пименов С.Д. Электротермия фосфора. СПб: Химия, 1996.
4. Еришова О.В., Чистякова Т.Б. АСУ материально-энергетическими ресурсами производства фосфора// Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности "ЛЭ-РЭП-2002": Сб. трудов межд. научно-практич. конференции/ РХТУ им. Д.И. Менделеева, М. 2002. Т.3.
5. Еришова О.В., Лавров А.Б. Разработка InTouch-приложения АРМ оператора фосфорной печи// Компьютерное моделирование и оптимизация электротермических производств "Электротермия-2002": Сб. трудов научно-технич. совещания /СПбГТИ (ТУ), СПб. 2002.
6. Чистякова Т.Б., Бойкова О.Г., Блохина О.Ф. Принципы разработки тренажерно-обучающих комплексов для операторов потенциально-опасных ХТП (на примере процесса коксования) // Автоматизация в промышленности. 2003. №4.

*Еришова Ольга Владимировна – канд. техн. наук, доцент,  
Чистякова Тамара Балабековна – д-р техн. наук, проф.,  
зав. кафедрой "Системы автоматизированного проектирования и управления"  
Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).  
E-mail: erol@rambler.ru, sapr@ws01.sapru.ru*