КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССОМ СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР

Д. Н. Петров, Т. Б. Чистякова

*Кафедра систем автоматизированного проектирования и управления,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический
институт (технический университет)», petrov.dmitry@technolog.edu.ru;
г. Санкт-Петербург, Россия*

Ключевые слова: гибридная экспертная система; имитационное моделирование; обучение управлению; проектирование; углеродная наноиндустрия.

Аннотация: Представлено концептуальное описание сложного, потенциально-опасного процесса электродугового синтеза углеродных нанокластерных структур. Изложена архитектура и базовые функциональные элементы модульной компьютерной системы проектирования виртуальных моделей производственного объекта для обучения операторов управлению процессом синтеза углеродных нанокластерных структур. Сформулирована комплексная задача обучения управлению химико-технологическим процессом, исполняемая на базе полученного программного решения. Приведены этапы многостадийного процесса проектирования виртуальной модели и настройки компьютерной системы на материально-техническую базу промышленного предприятия в рамках апробации на примере модели реакторного участка, электродуговой установки Кречмера, промышленных и экспертных данных о процессе синтеза фуллерена C₆₀.

Введение

В настоящее время наблюдается стремительное развитие сложных киберфизических систем и технологий виртуальной реальности с их глубокой интеграцией в образовательные и производственные процессы [1, 2]. Вместе с этим ужесточаются требования к профессиональным качествам управленческо-производственного персонала, а, следовательно, требования к его подготовке. С каждым годом прогрессирует конкуренция между образовательными учреждениями за качество и стоимость образования, между производственными химико-технологическими предприятиями за качество и стоимость выпускаемой продукции.

С начала нового столетия перманентно повышается популярность научного тренда, продвигающего интеллектуальные иммерсионные тренажерные комплексы. Ведутся масштабные разработки и внедрения обучающих систем в наукоемких областях. Движущей силой данного направления является упрямая статистика, согласно которой 60 % аварий на производстве возникает по вине оператора [3]. По данным за 2020 год в ядерной энергетике, нефтегазовой промышленности, транспортной сфере процент аварий по вине персонала составляет не менее 50 %.

Публикации в области разработки научно-образовательных комплексов [4 – 6] объединяет обоснование необходимости разработки и внедрения в образование компьютерных систем для эффективной подготовки кадров, в том числе для химико-технологической индустрии. Это способствует интенсивному освоению профессиональных компетенций при планировании и реализации эффективного образовательного процесса [7]. Наиболее важными преимуществами, достигаемыми при использовании в обучении компьютерных систем, являются: безопасность обучения и отсутствие риска поломки промышленного оборудования, минимальные финансовые издержки, возможность планирования обучения без отрыва от производства.

Однако проект технической подготовки и разработки компьютерного обучающего комплекса – сложный, длительный и дорогостоящий процесс. Для предприятий малого или среднего бизнеса приобретение технологической платформы или разработка собственного программного решения может свести на «нет» экономический эффект от внедрения полученного решения. Затраты на восстановление утраченного оборудования и финансовый ущерб при простое производства могут быть несопоставимы с затратами на разработку программного продукта.

Рассмотрим компьютерную систему проектирования виртуальных моделей для задач обучения управлению химико-технологическими процессами, как продукт одного из наиболее рациональных способов разработки и внедрения программного научно-образовательного комплекса с удешевлением, доступностью, эргономикой и унификацией всех стадий подготовки и реализации задачи обучения.

Концептуальное описание электродугового синтеза фуллеренов

Фуллерен – аллотропная углеродная структура, открытая в 1985 году исследователями Робертом Керлом, Харольдом Крото, Ричардом Смолли. В наши дни динамика развития углеродной наноиндустрии обуславливает уникальность свойств фуллеренов и их производных, что позволяет применять их в синтезе материалов с принципиально новыми физическими и химическими характеристиками.

Электродуговой синтез фуллерена, разработанный в 1990 году учеными Кречмером, Лэмом, Фостиропулосом и Хаффманом, является наиболее производительным и основан на термическом разложении графита в ионизируемой инертным газом среде. Процесс происходит в фуллереновом реакторе Кречмера, технологическая схема потоков которого приведена на рис. 1, где приняты следующие обозначения: P1 – насос вакуумирования; P2 – газодувка; He – баллон с гелием; RM – реверсивный двигатель; SC – сажесборник (циклон); SF – сажевый фильтр; ES – источник напряжения; v_a – угловая скорость вала реверсивного двигателя, рад/с; G_c – расход хладагента, л/с; G_{He} – расход инертного газа из баллона He, м³/с; G_g – расход инертного газа через газодувку, л/с; G_{gc} – расход инертного газа через насос вакуумирования, л/с; U_a – напряжение, В; I_a – сила тока, А; L_e – межэлектродное расстояние, 10⁻³ м.

Материальные и энергетические потоки процесса: поток хладагента через охлаждающую рубашку, подаваемое на графитовые стержни анод и катод напряжение постоянного тока; циркуляция инертного газа по контуру через сажесборник SC и фильтр SF; вакуумирование реакторной камеры и запуск гелия в реакторную камеру из баллона He. Сырьем для стержней является дорогостоящий графит повышенной степени очистки. В качестве хладагента используется вода. Процесс является малотоннажным, периодическим, высокотемпературным (3500...8000 K). Синтез фуллерена проводится при давлении разряжения рабочего газа 220...450 торр.

Рис. 1. Технологическая схема электродугового синтеза фуллерена

В плазме электрической дуги в среде инертного газа низкого давления сжигаются графитовые электроды. Полученный нанодисперсный порошок – фуллереновая сажа потоком инертного газа выносится из реактора в циклон-сажесборник. Из фуллереновой сажи впоследствии экстрагируются целевые продукты, преимущественно фуллерены C_{60} и C_{70} .

Сложность в управлении электродуговым синтезом обусловлена термодинамической неустойчивостью плазмы и повышенным риском разгерметизации реактора. Электродуговой синтез фуллерена потенциально опасен, так как процесс проходит при высокой температуре в охлаждаемом реакторе, заполненном токсичным инертным газом. Из контура циркуляции инертного газа при его разгерметизации возможны выбросы нанодисперсной фуллереновой сажи, вызывающей поражение органов дыхания.

Архитектура и программное обеспечение компьютерной системы

Разработка программной системы возможна двумя способами. Первый способ – типовой или повторного применения. Система создается в среде моделирования (графической оболочке) из готовых элементов [8, 9]. Яркими представителями программных решений для типового проектирования являются: среда графического программирования LabVIEW (National Instruments, США), SIMUL8 (SIMUL8 Corporation, Бостон, США), среда разработки виртуальных лабораторий VirtualLab (ВГТУ, Волгоград), графическая оболочка для моделирования сложных динамических систем Model Vision Studium (СПбПУ, Санкт-Петербург). Недостаток типового способа разработки – наличие ограничений, накладываемых технологической платформой, не позволяющих разработку гибкого, перенастраиваемого программного комплекса. При планировании обучения на базе типового программного решения нередко возникают сложности перестройки на принципиально новую модель производства, даже в отношении той же области, той же сырьевой и технической базы.

Второй способ разработки программного обеспечения – канонический или оригинальный. Разрабатывается проблемно-ориентированный программный продукт, преимущественно с использованием RAD на объектно-ориентированном

языке высокого уровня (например, Microsoft Visual Studio: язык Visual C++, Visual C#, Visual Basic и др., Embarcadero RAD Studio: язык Delphi или C++ Builder, IntelliJ IDEA: язык Java, JavaScript, Python). Недостатки канонического способа: высокая стоимость и длительный срок разработки универсальной платформы. Каноническая разработка может быть нерентабельна для широкого спектра типовых решений.

С учетом вышеуказанных факторов предложен подход разработки проблемно-ориентированной обучающей компьютерной системы на основе унифицированных средств и технологий САПР. При этом основными требованиями к системе проектирования виртуальных моделей для задач обучения управлению являются: клиент-серверная архитектура с централизованным хранилищем, кросс-платформенность, модульная функциональная архитектура, интерактивный интерфейс конфигуратора моделируемого процесса, производственно-фреймовая модель представления знаний, 3D-окружение среды обучения, гибкая настройка на материально-техническую базу предприятия, дистанционный контроль над ходом образовательного процесса, в том числе в режиме реального времени и количественной оценкой компетенций обучаемого, поддержка графической оболочкой современных форматов 3D-моделей.

В качестве среды программирования выбрана Borland Delphi 8 с мощным графическим ядром GLScene на базе OpenGL [10]. Выбор обоснован наличием большого спектра VCL-компонентов и портируемостью на различные операционные системы.

Рациональным считается подключение в обучающее окружение 3D-моделей форматов 3DS, OBJ, DWG, по аналогии с популярными средами визуального моделирования, например, VIKING [11], ZWCAD [12] и другими, что упрощает и унифицирует процесс конфигурации системы обучения. При этом 3D-модели разрабатываются в сторонних средах, например, Autodesk 3D Studio Max, DS SolidWorks, АСКОН «Компас 3D» и т.д.

Информационное обеспечение компьютерной системы основано на реляционной серверной СУБД MySQL с доступом к данным посредством библиотеки функций для работы с БД ZeosLib от ZeosTeam.

Модульная архитектура компьютерной системы для обучения управлению процессом синтеза углеродных наноструктур изображена на рис. 2. Архитектура разделяет прикладное решение на четыре функциональные подсистемы – Диалоговый конструктор и 3D-конструктор производственного участка, Администрирование (А) и серверный сегмент, Интерфейс обучаемого.

Диалоговый конструктор включает модуль конфигуратора характеристик процесса – помещения H , оборудования E в помещении, материальных ресурсов S , целевых продуктов C , а также систему декларативных лимитирующих правил Q , формулирующих постановку задачи обучения и накладываемые ограничения на ее выполнение.

Модули управления и мониторинга интерфейса администратора реализуют вспомогательные административные функции, включающие анализ протоколов сессий и событий с оценкой качества выполнения поставленной задачи обучения.

3D-конструктор производственного участка включает инструменты для загрузки и позиционирования моделей помещения и оборудования, связывая их свойства с характеристиками моделируемого процесса передаточными правилами в виде скриптов с заданным интервалом активации.

Интерфейс обучаемого содержит разработанную управляемую 3D-модель реакторного участка, сопровождаемую служебными информационными панелями: исходных данных с постановкой задачи обучения, сообщениями от гибридной экспертной подсистемы (ГЭП), описанием технологического регламента, данными о текущей сессии обучения и текущими качественными показателями.

Рис. 2. Модульная архитектура компьютерной системы проектирования виртуальных моделей

Гибридная экспертная подсистема построена на базе продукционно-фрейм-вой модели представления знаний [7], которые формируются в интерактивном конструкторе в виде иерархии элементов в нотации Бэкуса–Наура:

$$\begin{aligned}
 &L\{ \\
 &NS_1\{R_1^{NS_1}\{W_1^{R_1NS_1}, W_2^{R_1NS_1}, \dots, W_k^{R_1NS_1}\}, R_2^{NS_1}\{W_1^{R_2NS_1}, W_2^{R_2NS_1}, \dots, W_k^{R_2NS_1}\}, \dots, \\
 &R_j^{NS_1}\{W_1^{R_jNS_1}, W_2^{R_jNS_1}, \dots, W_k^{R_jNS_1}\}\}, \\
 &NS_2\{R_1^{NS_2}\{W_1^{R_1NS_2}, W_2^{R_1NS_2}, \dots, W_k^{R_1NS_2}\}, R_2^{NS_2}\{W_1^{R_2NS_2}, W_2^{R_2NS_2}, \dots, W_k^{R_2NS_2}\}, \dots, \\
 &R_j^{NS_2}\{W_1^{R_jNS_2}, W_2^{R_jNS_2}, \dots, W_k^{R_jNS_2}\}\}, \\
 &\dots \\
 &NS_i\{R_1^{NS_i}\{W_1^{R_1NS_i}, W_2^{R_1NS_i}, \dots, W_k^{R_1NS_i}\}, R_2^{NS_i}\{W_1^{R_2NS_i}, W_2^{R_2NS_i}, \dots, W_k^{R_2NS_i}\}, \dots, \\
 &R_j^{NS_i}\{W_1^{R_jNS_i}, W_2^{R_jNS_i}, \dots, W_k^{R_jNS_i}\}\} \\
 &\}
 \end{aligned}$$

где NS_i – нештатные ситуации; $R_j^{NS_i}$ – причины возникновения нештатной ситуации NS_i ; $W_k^{R_jNS_i}$ – рекомендации по устранению причины $R_j^{NS_i}$ нештатной ситуации NS_i ; i, j, k – целые неотрицательные числа. $NS_i\{NST, PN, RNG\}$, где NST – текст нештатной ситуации; PN – инициатор нештатной ситуации; RNG – регламентный диапазон, в котором пребывает PN . Установлено пять возможных регламентных диапазонов: ниже критического минимального ($< LL$), от критического минимального до минимального ($LL-L$), от минимального до максимального ($L-M$), от максимального до максимального критического ($M-MM$) и выше максималь-

ного критического ($> MM$). $R_j^{NS_i} \{RT, PD, RNG, CV, CT\}$, где RT, PD – текст и определитель причины соответственно; RNG – регламентный диапазон, в котором пребывает PD ; CV – критическая скорость изменения значения определителя, ед/с; CT – критическое время пребывания значения определителя в диапазоне RNG . $W_k^{R_jNS_i} \{ORD, WT\}$, где ORD – порядковый номер рекомендации, формирующий последовательность исполнения; WT – текст рекомендации.

Математическое ядро включает компоненты и функции библиотеки RXLib, мощный скриптовый формульный интерпретатор eXrg и компонент для построения графиков и диаграмм TeeChartPro. Гибкость конфигурирования математического обеспечения достигается в работе с интегрированной библиотекой математических моделей, включающей интерактивный формульный редактор с проверкой синтаксиса. Возможные описания поведения моделируемого объекта:

- система обыкновенных дифференциальных уравнений вида $dY/dt = f(X, U, Y, t)$;

- система линейных алгебраических уравнений вида $Eq(X, Y) = 0$;

- отдельная формула вида $Y = f(X)$, где X – входные характеристики; U – варьируемые переменные; Y – качественные показатели моделируемого процесса.

3D-конструктор реакторного участка позволяет объединить функциональными связями 3D-модель промышленного объекта с математической моделью химико-технологического процесса. При этом используется объектно-ориентированный подход с разделением визуальных объектов окружения на статические и динамические. Статические объекты окружения не изменяют внешний вид и положение в управляемой 3D-модели реакторного участка. Свойства динамических объектов окружения (позиционные и визуальные) сопрягаются с переменными моделируемого процесса через передаточные правила. К позиционным свойствам объекта окружения относятся координаты в трехмерном пространстве C_X, C_Y, C_Z и углы вращения вокруг осей R_X, R_Y, R_Z ; к визуальным – видимость, масштаб по осям Z_X, Z_Y, Z_Z , базовый цвет C_B , диффузный цвет C_D , коэффициент отражения K_R , дисперсия K_D , текстура (в виде файла растрового изображения) и др.

Постановка задачи обучения выполняется при настройке поведения обучающего окружения в виде лимитирующих правил перехода системы из одного состояния в другое.

Передаточные и лимитирующие правила образуют конечный автомат (State Mashine), частный – для отдельного объекта окружения, описывающий его поведение, и общий – для всего окружения.

Протокол обучения – подсистема регистрации состояния моделируемой системы и поведения в ней обучаемого с заданным временным интервалом. По умолчанию интервал регистрации данных обучения в протокол равен 1 с. Используемая методика оценки качества обучения на базе виртуального тренажера представлена в публикации [13].

Процесс проектирования и настройки виртуальной модели

Процесс проектирования и настройки виртуальной модели является многостадийным. При планировании процесса подготовки кадров на базе полученной компьютерной системы проводится сбор сведений и аналитика технической E , H и материальной по сырью S и целевым продуктам C базы производства.

На примере промышленной электродуговой установки Кречмера и фуллера на C_{60} представлен процесс проектирования и настройки виртуальной модели для задач обучения управлению производственных кадров.

Стадия 1. Построение формализованного описания объекта моделирования и наполнение справочников условно-постоянной информации.

Формализованное описание моделируемого производственного участка и процесса синтеза фуллерена C_{60} представляется в векторной форме

$$Y=f(X, U, F),$$

где $X\{H, E, S, C, L, B, Q\}: H\{L^H, W^H, H^H, G_C^H, W_E^H, W_U^H\}, L^H, W^H, H^H$ – соответственно длина, ширина и высота помещения, м; G_C^H – расход воды в помещение, м³/с; W_E^H, W_U^H – мощность, Вт, и напряжение, В, электросети соответственно.

$E\{E_1, E_2, E_3, \dots, E_{EN}\}$, где E_i – используемое на производстве оборудование, $i \in [1, EN]$, EN – общее количество единиц оборудования; $E_i = \{E_i^G, E_i^T, E_i^E, E_i^C\}$ – характеристики i -го оборудования, $i \in [1; EN]$, $E_i^G, E_i^T, E_i^E, E_i^C$ – геометрические, технические, эксплуатационные и экономические характеристики оборудования соответственно. Пример: E_1 – электродуговой реактор Кречмера. $E_1^G\{V_C, S_W, L_R, T_W, \lambda\}$ – геометрические характеристики реактора, где V_C – объем рабочей камеры, м³; S_W – площадь теплопередающей поверхности стенки реактора, м²; L_R – длина реактора, м; T_W – толщина стенки реактора; λ – коэффициент теплопроводности материала стенки реактора, Вт/(м·К). E_2 – источник напряжения. $E_2^T\{U_{\max}, W_{ES}\}$ – технические характеристики источника напряжения, где $U_{\max}$ – максимальное напряжение, В; W_{ES} – мощность, Вт.

$S\{S_1, S_2, \dots, S_{SN}\}$ – материальные ресурсы, где $S_1, S_2, \dots, S_{SN}$ – единицы ресурсов, участвующих в процессе, SN – их общее количество. $S_j\{S_j^G, S_j^P, S_j^C, S_j^N\}$ – характеристики j -го ресурса, $j \in [1; SN]$, где S_j^G, S_j^C – геометрические и экономические характеристики соответственно; S_j^P – физические и химические свойства; S_j^N – допустимые примеси, влияющие на неоднородность физических и химических свойств, $j \in [1; SN]$. Пример: S_1 – графитовый анод. $S_1^P\{L_a, D_a, \rho_a\}$, где L_a, D_a – соответственно длина и диаметр анода, м; ρ_a – удельное сопротивление материала анода, Ом·мм²/м.

C – целевые компоненты процесса. $C\{C_1, C_2, \dots, C_{CN}\}$, где $C_1, C_2, \dots, C_{CN}$ – отдельные синтезируемые целевые компоненты, CN – их общее количество. $C_k\{C_k^G, C_k^P, C_k^C\}$ – характеристики k -го целевого компонента, где C_k^G, C_k^C – геометрические и экономические характеристики соответственно; C_k^P – физические и химические свойства, $k \in [1; CN]$. Пример: C_1 – фуллереновая сажа. $C_1^P\{D_s, \rho_s\}$, где D_s – дисперсность, 10⁻⁶ м; ρ_s – плотность, кг/м³. C_2 – фуллерен C_{60} . $C_2^P\{D_{C60}, \rho_{C60}, XC60_{25}^T\}$, где D_{C60} – дисперсность, 10⁻⁶ м; ρ_{C60} – плотность, кг/м³; $XC60_{25}^T$ – растворимость в толуоле при температуре 25 °С, кг/кг.

Варьируемыми характеристиками процесса являются $U\{U_a, G_c, G_{gc}, G_{He}, G_g, L_e, v_a\}$; качественными показателями – $Y\{F_{C60}, m_s, m_{C60}\}$, где F_{C60} – процентное содержание фуллерена C_{60} в массе синтезируемой сажи m_s , кг; m_{C60} – полученная масса C_{60} , кг. Технологическими регламентами процесса являются критериальные ограничения, накладываемые на варьируемые характеристики U , выраженные диапазонами безопасности, указанными при описании ГЭП. F – неконтролируе-

мые возмущающие воздействия. $F\{E_c, N_c\}$, где E_c – перепады в сети напряжения, В; N_c – примеси в материале стержней, %. При моделировании неконтролируемых возмущающих воздействий используется линейный конгруэнтный метод Лемера.

В соответствии с формализованным описанием производственного процесса и принятой траекторией обучения сформулирована комплексная задача обучения управлению электродуговым синтезом фуллерена: для заданного оборудования E , производственного участка H , сырьевых ресурсов S , целевых продуктов C с учетом экспертных знаний о процессе L и установленных технологических регламентов B варьированием переменных U выполнить:

- безаварийное управление процессом синтеза фуллерена C_{60} ;
- оптимальное управление процессом синтеза фуллерена C_{60} при достижении максимальной эффективности процесса;
- управление процессом в экстремальном режиме при устранении возникающих нештатных ситуаций за максимально короткое время с минимизацией стоимости понесенного ущерба.

При этом получить при налагаемых ограничениях на ресурсы (лимитированной массе сжигаемого графита) требуемые количественные и качественные показатели целевого продукта Q (массу m_{C60} фуллерена C_{60}).

Стадия 2. Структурный и параметрический синтез математической модели M : $Y = f(X, U, F)$, связывающей качественные показатели Y с входными X , варьируемыми переменными U процесса, а также возмущающими воздействиями F . Составление в библиотеке математических моделей системы уравнений. В основу электродугового синтеза фуллерена входят массообменный (переход массы графита в фуллерен) и теплообменный (охлаждение реактора) процессы, детально представленные в публикации [14].

При составлении системы уравнений $Y = f(X, U, F)$ учитывается вычислительная нагрузка и время решения, являющееся объектом оптимизации. При структурном синтезе математической модели принимаются допущения, снижающие время реакции математического ядра. А при параметрическом синтезе математической модели настройкой эмпирических коэффициентов компенсируется погрешность, вызванная упрощением структуры уравнений. При получении эмпирических зависимостей из экспериментальных данных при их обработке целесообразно использовать программы для регрессионного анализа экспериментальных данных, например CurveExpert или DataFit. Таким образом, при использовании полуэмпирической модели достигается оптимальная скорость и достаточная для задач обучения управлению точность вычислений.

В систему уравнений $Y = f(X, U, F)$ включены промежуточные (внутренние) переменные, а также физические и математические константы, например, в уравнении теплового баланса, описывающего теплообмен между электрической дугой, инертным газом и хладагентом, используется постоянная Стефана–Больцмана δ , Вт/(м²·К⁴) [14]. Примером внутренней переменной, используемой при описании передаточных правил и настройке поведения динамических объектов тренажера, является расчетное критическое межэлектродное расстояние $L_{ek} = f(D_a, W_{ES})$, соответствующее разрыву электрической дуги. Сила тока дуги $I_a = f(L_e, U_a, R_a)$, А. $R_a = f(\rho_a, L_a, D_a)$ – резистивное сопротивление анода, Ом. $D_{LA} = f(I_a)$ – интенсивность испарения анода, м/с·10⁻³. Внутренними переменными модели, используемыми при расчете F_{C60} , являются P_g , торр, – давление инертного газа в реакторе, T_a – температура дуги.

Для ввода функциональных зависимостей используется интегрированный формульный редактор с отображением в нем ранее определенных характеристик X, U, F, Y . Также возможно использование в формулах математических функций, констант и операторов (рис. 3).

Рис. 3. Библиотека математических моделей и формульный редактор

Стадия 3. Определение характеристик потоков, внутренних переменных и технологического регламента. Заполнение таблицы технологических регламентов производства (требований к безопасности и работоспособности B) указанием диапазонов безопасности для ранее определенных переменных процесса (рис. 4).

Пример описания технологического регламента для межэлектродного расстояния L_e : $L_e^{LL} \leq L_e^L \leq L_e^M \leq L_e^{MM}$, где L_e^{LL} , L_e^L , L_e^M , L_e^{MM} – границы диапазонов безопасности по межэлектродному расстоянию, используемые ГЭП. Для L_e принимается $L_e^{MM} = L_{ek}$. В технологические регламенты процесса включается оптимальное значение характеристики ОПТ, носящее справочный характер и используемое в сообщениях оператору от ГЭП.

Стадия 4. Сбор и структурирование знаний о нештатных ситуациях. Определение фреймов. Построение системы продукционных правил L на основании экспертных знаний о моделируемом процессе. Наполнение базы знаний в диалоговом конструкторе знаний (рис. 5). Фрейм-пример приведен на рис. 6.

Инициатором нештатной ситуации NS_1 является температура дуги, значение которой вошло в диапазон LL–L (рис. 6). Определителем причин $R_1^{NS_1}$ и $R_2^{NS_1}$ нештатной ситуации NS_1 является межэлектродное расстояние L_e , значение которого вне диапазона безопасности L–M.

	Наименование параметра	Обозн	Ед.изм.	LL	L	ОПТ	M	MM
1	Давление инертного газа	Pg	торр	10	30	320	450	770
2	Расход циркуляции инертного газа	Ggc	м.куб./с	0	1	2,1	3,8	4
3	Межэлектродное расстояние	Le	см	0,01	2	6,2	16	18
4	Напряжение дуги	Ud	В	8	10	21	27	35
5	Температура дуги	Td	К	1600	2650	3800	4800	5000
6	Сила тока дуги	Id	А	0	30	70	80	95
7	Температура стенки реактора	Tw	К	274	278	315	470	500
8	Расход хладагента	Gx	л/с	0	2,4	2,9	3,9	4
9	Скорость анода	Va	мм/с	0	1	3	6	10
10	Концентрация инертного газа	Pcr	%	0	99	100	100	100
11	Температура хладагента	Tx	К	273	278	312	352	372
12	Длина анода	La	м	0,15	0,17	0,25	0,9	1,25

Рис. 4. Технологический регламент процесса

Рис. 5. Графические интерфейсы диалогового конструктора знаний

Рис. 6. Фрейм-пример для нештатной ситуации NS_1

Стадия 5. Разработка 3D-моделей статических и динамических объектов с включением их в обучающее 3D-окружение и созданием функциональных связей с характеристиками процесса.

3D-модели статических и динамических масштабированных объектов разрабатываются с использованием технической документации и фотоматериалов в выбранном редакторе трехмерной графики (рис. 7). Их загрузка и размещение осуществляется в 3D-конструкторе производственного участка.

Рис. 7. Пример статических объектов окружения в среде Autodesk 3dsMax:

а – модель электродугового реактора; *б* – помещения

Между динамическими объектами окружения и характеристиками процесса по их системным наименованиям – алиасам в редакторе передаточных правил с заданным интервалом активации устанавливаются функциональные связи через скрипты на интегрированном языке Паскаль.

Пример скрипта передаточного правила с интервалом активации = 1 с для графитового анода:

```
IF Ta > 0 THEN La = La - DLa
```

Если температура дуги $T_a > 0$, то укорачивать анод на величину интенсивности испарения анода DLa .

Пример скрипта передаточного правила с интервалом активации = 1 с для сигнальной лампы по температуре хладагента на пульте управления:

```
IF UP > 0 THEN
```

```
BEGIN
```

```
  IF Tc > Tc_max THEN CB = #f0 ELSE CB = #00FF
```

```
END ELSE CB = #7D7D7D
```

Если напряжение на пульте UP больше 0, то, если температура хладагента T_c выше максимальной T_{c_max} , то базовый цвет элемента установить в красный #f0, иначе, базовый цвет элемента установить в зеленый #00FF. Если напряжение на пульте $UP \leq 0$, то базовый цвет элемента установить в серый #7D7D7D.

Стадия 6. Определение и настройка декларативных лимитирующих правил, описывающих постановку задачи и контроль ее исполнения.

```
IF mC60 >= mC60R THEN MES («Получена требуемая масса фуллерена C60»)
```

```
ELSE IF mS > msR THEN
```

```
BEGIN
```

```
  MES («Требуемая масса фуллерена C60 не получена»)
```

```
  ENDSTUDY
```

```
END
```

Если масса фуллерена C_{60} mC_{60} достигла требуемую mC_{60R} , то вывести сообщение об успешном выполнении задания. Иначе, если масса сажи mS (сожженного анода) превысила предел msR , то вывести сообщение о невыполнении задания с прекращением сессии обучения $ENDSTUDY$. Как видно из представленного лимитирующего правила, ограничение времени сессии виртуального синтеза не было принято. Наложено ограничение только на массу синтезируемой фуллереновой сажи. При включении ограничения времени виртуального синтеза t до максимально возможного t_{max} , с, лимитирующее правило ужесточается:

```
IF (mC60 >= mC60R) AND (t <= tmax) THEN MES («Получена требуемая масса фуллерена C60»)
```

```
ELSE IF (mS > msR) OR (t > tmax) THEN
```

```
BEGIN
```

```
  MES («Требуемая масса фуллерена C60 не получена»)
```

```
  ENDSTUDY
```

```
END
```

Стадия 7. Тестирование виртуальной модели.

При тестировании полученной виртуальной модели промышленного участка проводится анализ адекватности поведения 3D-окружения при его реакция на действия пользователя, решающего поставленную задачу виртуального синтеза. Объектами тестирования являются: тексты сообщений, скрипты передаточных

и лимитирующих правил, адекватность поведения математического обеспечения и ГЭП, точность вычисления характеристик процесса, точность позиционирования и отображения 3D-моделей.

Тестирование виртуальной модели и интерфейс обучаемого

Пользователь, имеющий соответствующие права с назначением процесса и задачи виртуального синтеза, согласно плану обучения, выполняет вход в интерфейс обучаемого (рис. 8).

Установленный технологический регламент указан на рис. 9.

В интерфейсе обучаемого функционируют информационные панели с датой и временем начала сессии обучения и ее продолжительности, текущих значений качественных показателей процесса (рис. 10).

Реакторный участок разбит на несколько зон управления (рис. 11). Перемещаясь между ними управляемой моделью человека-оператора, воздействуя на элементы управления материальными и энергетическими потоками и используя средства мониторинга и контроля, обучаемый решает принятую задачу виртуального синтеза: проводит запуск процесса, ввод его в рабочий режим, устранение возникающих нештатных ситуаций, остановку процесса.

На рисунке 11 отмечены: 1 – зона управления расходами материальных потоков G_c, G_g, G_{gc} ; 2 – пульт для управления оборудованием и напряжением U_a , скоростью v_a , контроля горения дуги и ее температуры, мониторинга и аварийной остановки процесса; 3 – зона управления анодом и межэлектродным расстоянием L_e ; 4 – источник напряжения с регулятором, вольтметром и амперметром; 5 – зона управления катодной крышкой реактора; 6 – зона управления расходом инертного газа G_{He} .

Рис. 8. Авторизация

Рис. 9. Сообщение оператору с описанием технологического регламента

Рис. 10. Информационные панели интерфейса обучаемого

Рис. 11. Зоны управления моделируемым процессом

Сообщения оператору от ГЭП формируются при идентификации нештатной ситуации (рис. 12), преимущественно во время запуска производственного цикла и неправильных действий оператора.

При получении требуемой массы фуллерена C_{60} обучаемый, согласно соответствующему лимитирующему правилу, получает сообщение (рис. 13).

При анализе протокола обучения учитывается последовательность действий обучаемого и временные графики изменения характеристик (рис. 14).

<p>СООБЩЕНИЯ ОПЕРАТОРУ</p> <p>1) Давление инертного газа в реакторе близкое к атмосферному</p> <p>1.1 Выключены насосы вакуумирования</p> <p>РЕКОМЕНДАЦИИ</p> <p>1.1.1 Включить насосы вакуумирования</p> <p>2) Горение дуги в реакторе не происходит</p> <p>2.1 Слишком большое межэлектродное расстояние</p> <p>РЕКОМЕНДАЦИИ</p> <p>2.1.1 Скорректировать вручную межэлектродное расстояние</p> <p>2.2 Отсутствует напряжение дуги</p> <p>РЕКОМЕНДАЦИИ</p> <p>2.2.1 Настроить генератор постоянного тока</p>	<p>2.3 Не определено направление движения тока на пульте управления</p> <p>2.4 Отсутствие инертного газа в газозооной смеси</p> <p>РЕКОМЕНДАЦИИ</p> <p>2.4.1 Закрыть клапаны вакуумирования и открыть вентиль подачи инертного газа</p> <p>3) Контур управления температурой дуги не активен</p> <p>3.1 Скорость движения анода = 0</p> <p>РЕКОМЕНДАЦИИ</p> <p>3.1.1 Установить скорость движения анода 3 мм/с</p>
--	--

Рис. 12. Сообщения от ГЭП

Рис. 13. Сообщение об успешном решении задачи виртуального синтеза фуллерена C_{60}

Рис. 14. Примеры стабильного (а, б) и нестабильного (в, г) виртуального синтеза характеристик:
а, в – температуры дуги; б, г – массы фуллерена

На графиках (см. рис 14, а, б) наблюдается стабильная температура дуги после вывода процесса в рабочий режим через 580 с и соответствующий стабильный рост массы фуллерена. По данным характеристикам разброс минимальный. Графики (см. рис 14, в, г) показывают затяжной и небезопасный ввод процесса в рабочий режим, значение температуры дуги пребывает продолжительное время t вне регламентного диапазона. Соответственно, выход целевого продукта минимален и начинает увеличиваться только на 2175 с, что означает чрезмерные затраты и повышение себестоимости фуллерена.

Система оценки компетенций обучаемого формирует рекомендуемую оценку по пятибалльной шкале. Окончательное решение о выполнении обучаемым задачи виртуального синтеза принимает преподаватель.

Выводы

Компьютерная система проектирования виртуальных моделей для обучения управлению процессом синтеза углеродных наноструктур позволяет планировать образовательный процесс и подготовку управленческо-производственного персо-

нала при настройке обучающего окружения на различное химико-технологическое оборудование, материально-энергетические потоки производства с установкой технологического регламента и требований к качественным показателям. Гибкость настройки подсистем архитектуры компьютерной системы показывает ее применимость для решения задач подготовки кадров при определении траектории образовательного процесса и обучения в различных режимах: управлению производственным процессом, оптимальному управлению, экстремальному управлению (при разрешении потока нештатных ситуаций).

Полученная компьютерная система испытана и внедрена в образовательный процесс на кафедре систем автоматизированного проектирования и управления ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» [15]. Результаты испытаний показали применимость программного решения для моделирования сложных наукоемких процессов синтеза углеродных нанокластерных соединений. Предложенная методика и вариант синтеза иммерсивных обучающих компьютерных систем при практической реализации в виде программного продукта и внедрении на предприятии сокращает издержки на обучение при повышении его эффективности и безопасности, снижает риски возникновения аварий по вине управленческо-производственного персонала, повышает рентабельность предприятия [16, 17].

Компьютерная система может быть рекомендовано вузам с химическими и техническими направлениями подготовки, а также предложена для внедрения в опытно-промышленную эксплуатацию таким предприятиям, как ООО НПК «НеоТекПродукт» (г. Петергоф), ООО НПК «Современные технологии синтеза» (г. Санкт-Петербург), ООО «Научно-производственное предприятие «Композитные материалы и технологии» (г. Санкт-Петербург).

Работа выполнена по заданию и при финансовой поддержке Фонда инфраструктурных и образовательных программ «РОСНАНО» (грант РФФИ № 18-08-00143 А) в рамках прикладной научно-исследовательской работы на тему «Разработка образовательной программы повышения квалификации и учебно-методического комплекса для специалистов предприятий nanoиндустрии химического и биотехнологического профиля в области автоматизированных производственных нанотехнологий».

Список литературы

1. Славин, О. А. Обзор технологий виртуальной и дополненной реальности / О. А. Славин, Е. С. Гринь // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2019. – Т. 69, № 3. – С. 42 – 54. doi: 10.14357/20790279190304
2. Ермолаева, В. В. Развитие виртуальной реальности / В. В. Ермолаева, А. М. Горшков // Тенденции развития науки и образования. – 2020. – № 58-2. – С. 14 – 17. doi: 10.18411/Ij-02-2020-20
3. Рачеева, А. М. Методика оценки надежности работы оператора и расчета при выполнении технологического процесса / А. М. Рачеева, Ю. В. Романенко // Науч.-техн. вестн. Санкт-Петербургского гос. ун-та информ. технологий, механики и оптики. – 2008. – № 47. – С. 188 – 195.
4. Дозорцев, В. М. Технологии виртуальной реальности в обучении операторов технологических процессов / В. М. Дозорцев // Автоматизация в промышленности. – 2018. – № 6. – С. 42 – 50.

5. Kartiko, I. Learning science in a virtual reality application: The impacts of animated-virtual actors visual complexity / I. Kartiko, M. Kavakli, K. Cheng // *Computers and Education*. – 2010. – No. 55 (2). – P. 881 – 891. doi:10.1016/j.compedu.2010.03.019
6. Balamuralithara, B. Virtual laboratories in engineering education: the simulation lab and remote lab / B. Balamuralithara, P. C. Woods // *Computer Applications in Engineering Education*. – 2009. – Vol. 17, Issue 1. – P. 108 – 118. doi:10.1002/cae.20186
7. Chistyakova, T. B. Creation of eLearning Environment Simulator for Obtaining Carbon Nanocluster Structures / T. B. Chistyakova // *Proceedings of the 17th Russian Scientific and Practical Conference on Planning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic Complex of the Region*, 14–15 November 2018, St. Petersburg. – St. Petersburg, 2019. – P. 95 – 97. doi: 10.1109/PTES.2018.8604277
8. Немтинов, В. А. Разработка прототипа виртуальной технологической лаборатории по изучению процессов производства органических красителей / В. А. Немтинов, Ю. В. Немтинова, И. М. Манаенков // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2020. – Т. 26, № 1. – С. 43 – 55. doi: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.043-055
9. Свидетельство о гос. рег. программ для ЭВМ № 2020667375. Тренажер в виртуальной реальности по обучению персонала / М. А. Юдин, М. В. Ашихмина (РФ). Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ. – 23.12.2020.
10. SOURCEFORGE : the Complete Open-Source and Business Software Platform, OpenGL Library for Delphi & C++Builder, maintained by GLS Team, based on Eric Grange and Mike Lischke's. – 2021. – URL : <http://glscene.sourceforge.net> (дата обращения: 13.04.2021).
11. Viking : офиц. сайт группы компаний Диполь. – 2021. – URL : <https://vkg.ru/> (дата обращения: 13.04.2021).
12. ZWCAD : офиц. сайт программы ZWCAD ООО «ЗВСОФТ». – 2021. – URL : <https://www.zwsoft.ru> (дата обращения: 13.04.2021).
13. Петров, Д. Н. Методика оценки компетенций операторов потенциально-опасного технологического процесса / Д. Н. Петров, Т. Б. Чистякова // *Математические методы в технике и технологиях – ММТТ*. – 2016. – № 12 (94). – С. 180 – 184.
14. Chistyakova, T. B. The mathematical model for synthesis process management of the carbon nanostructures / T. B. Chistyakova, D. N. Petrov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 803, No. 1. – P. 012029. doi: 10.1088/1742-6596/803/1/012029
15. Свидетельство о гос. рег. программ для ЭВМ № 2018618420. Дистанционная обучающая среда для подготовки операторов технологических процессов синтеза углеродных наноструктур «DLE Virtual Carbon» / Д. Н. Петров, Т. Б. Чистякова, Н. А. Чарыков (РФ). Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ. – 12.07.2018.
16. Симонов, И. В. Иммерсивные технологии позволят снизить вероятность несчастных случаев на промышленных предприятиях / И. В. Симонов // *Охрана труда и техника безопасности на промышленных предприятиях*. – 2020. – № 9. – С. 55 – 60. doi: 10.33920/pro-4-2009-10
17. Симонов, И. В. Как внедрение иммерсивных технологий снижает вероятность несчастных случаев в промышленности / И. В. Симонов // *Главный энергетик*. – 2020. – № 9. – С. 47 – 52.

A Computer-Aided Design System for Virtual Models for Training in Control of the Synthesis Process of Carbon Nanostructures

D. N. Petrov, T. B. Chistyakova

*Department of Computer Aided Design and Control Systems,
St. Petersburg State Technological Institute (Technical University),
petrov.dmitry@technolog.edu.ru; St. Petersburg, Russia*

Keywords: hybrid expert system; simulation modeling; management training; design; carbon nanoindustry.

Abstract: A conceptual description of a complex, potentially dangerous process of electric arc synthesis of carbon nanocluster structures is presented. The architecture and basic functional elements of a modular computer system for designing virtual models of a production facility for training operators to control the synthesis of carbon nanocluster structures are presented. A complex task of training to control a chemical-technological process is formulated, which is executed on the basis of the obtained software solution. The stages of the multistage process of designing a virtual model and setting up a computer system for the logistics base of an industrial enterprise are presented as part of testing the reactor island model, Kretschmer's electric arc, industrial and expert data on the synthesis of fullerene C₆₀.

References

1. Slavin O.A., Grin' Ye.S. [Review of virtual and augmented reality technologies], *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences], 2019, vol. 69, no. 3, pp. 42-54, doi: 10.14357/20790279190304 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Yermolayeva V.V., Gorshkov A.M. [Development of virtual reality], *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the development of science and education], 2020, no. 58-2, pp. 14-17, doi: 10.18411/lj-02-2020-20 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Racheyeva A.M., Romanenko Yu.V. [Methods for assessing the reliability of the operator's work and calculation when performing the technological process], *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical bulletin of the St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2008, no. 47, pp. 188-195. (In Russ.)
4. Dozortsev V.M. [Virtual reality technologies in teaching process operators], *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in industry], 2018, no. 6, pp. 42-50. (In Russ.)
5. Kartiko I., Kavakli M., Cheng K. Learning science in a virtual reality application: The impacts of animated-virtual actors visual complexity, *Computers and Education*, 2010, no. 55 (2), pp. 881-891, doi:10.1016/j.compedu.2010.03.019
6. Balamuralithara B., Woods P.C. Virtual laboratories in engineering education: the simulation lab and remote lab, *Computer Applications in Engineering Education*, 2009, vol. 17, issue 1, pp. 108-118, doi:10.1002/cae.20186
7. Chistyakova T.B. Creation of eLearning Environment Simulator for Obtaining Carbon Nanocluster Structures, Proceedings of the 17th Russian Scientific and Practical Conference on Planning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic Complex of the Region, 14-15 November, 2018, St. Petersburg, 2019, pp. 95-97, doi: 10.1109/PTES.2018.8604277

8. Nemtinov V.A., Nemtinova Yu.V., Manayenkov I.M. [Development of a prototype of a virtual technological laboratory for the study of the processes of production of organic dyes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 1, pp. 43-55, doi: 10.17277/vestnik.2020.01.pp.043-055 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Yudin M.A., Ashikhmina M.V. *Trenazher v virtual'noy real'nosti po obucheniyu personala* [Simulator in virtual reality for personnel training], Russian Federation, 2020, Certificate of state registration of computer programs No. 2020667375. (In Russ.)
10. <http://glscene.sourceforge.net> (accessed 13 April 2021).
11. <https://vkg.ru/> (accessed 13 April 2021).
12. <https://www.zwsoft.ru> (accessed 13 April 2021).
13. Petrov D.N., Chistyakova T.B. [Methodology for assessing the competence of operators of a potentially dangerous technological process], *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT* [Mathematical methods in engineering and technology - MMTT], 2016, no. 12 (94), pp. 180-184. (In Russ.)
14. Chistyakova T.B., Petrov D.N. The mathematical model for synthesis process management of the carbon nanostructures, *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803, no. 1, p. 012029, doi: 10.1088/1742-6596/803/1/012029
15. Petrov D.N., Chistyakova T.B., Charykov N.A. *Distantionnaya obuchayushchaya sreda dlya podgotovki operatorov tekhnologicheskikh protsessov sinteza uglerodnykh nanostruktur «DLE Virtual Carbon»* [Distance learning environment for training operators of technological processes for the synthesis of carbon nanostructures “DLE Virtual Carbon”], Russian Federation, 2018, Certificate of state registration of computer programs No. 2018618420. (In Russ.)
16. Simonov I.V. [Immersive technologies will reduce the likelihood of accidents at industrial enterprises], *Okhrana truda i tekhnika bezopasnosti na promyshlennyykh predpriyatiyakh* [Labor protection and safety at industrial enterprises], 2020, no. 9, pp. 55-60, doi: 10.33920/pro-4-2009-10 (In Russ.)
17. Simonov I.V. [How the introduction of immersive technologies reduces the likelihood of accidents in industry], *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2020, no. 9, pp. 47-52. (In Russ., abstract in Eng.)
-

Computersystem zum Entwerfen virtueller Modelle zur Belehrung über Prozesssteuerung der Synthese von Kohlenstoff-Nanostrukturen

Zusammenfassung: Es ist eine konzeptionelle Beschreibung des komplexen, potenziell gefährlichen Prozesses der Lichtbogensynthese von Kohlenstoff-Nanocluster-Strukturen vorgestellt. Die Architektur und die grundlegenden Funktionselemente des modularen Computersystems zum Entwurf virtueller Modelle einer Produktionsanlage zum Trainieren von Bedienern zur Steuerung der Synthese von Kohlenstoff-Nanocluster-Strukturen sind vorgestellt. Es ist eine komplexe Lehraufgabe zum Management des chemisch-technologischen Prozesses formuliert, die auf Basis der erhaltenen Softwarelösung ausgeführt wird. Im Rahmen der Approbation sind am Beispiel des Modells des Reaktorabschnitts, der Lichtbogen-Kretschmer-Anlage, der Industrie- und Expertendaten zur Synthese von Fulleren C₆₀ die Stufen des mehrstufigen Prozesses des Entwurfs des virtuellen Modells und des Aufbaus des Computersystems für die materielle und technische Basis des Industrieunternehmens vorgestellt.

Système informatique de conception de modèles virtuels pour la formation à la commande du processus de la synthèse des nanostructures de carbone

Résumé: Est présentée une description conceptuelle du processus complexe et potentiellement dangereux de la synthèse à l'arc électrique des structures de nanoclusters de carbone. Sont décrits l'architecture et les éléments fonctionnels de base d'un système informatique modulaire de la conception des modèles virtuels d'objet de production pour former les opérateurs à la commande du processus de la synthèse des structures de nanoclusters de carbone. Est formulé un programme complet de la formation à la commande des processus chimiques et technologiques exécuté à la base de la solution logicielle. Sont citées les étapes du processus multistade de la conception virtuelle d'un modèle et de la configuration du système informatique de la base matérielle et technique de l'entreprise industrielle dans le cadre de la validation à l'exemple du modèle réactif, arc électrique, installation de Kretschmer, des données industriels et experts sur le processus de la synthèse de fullerène C₆₀.

Авторы: *Петров Дмитрий Никифорович* – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и управления; *Чистякова Тамара Балабековна* – доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования и управления, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», г. Санкт-Петербург, Россия.

Рецензент: *Литовка Юрий Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.