

Литература

1. Глушко В. П. Оценка в L2 и разрешимость общих граничных задач для вырождающихся эллиптических уравнений второго порядка // Тр. Моск. Мат. о-ва. -1970. — Т. 187, 23. — С. 113—178.
2. Федорюк М.В. Обыкновенные дифференциальные уравнения. — М.: Наука, 1980. -352с.
3. Кузнецов В.В., Кузнецова Н.А. Существование и априорная оценка решения задачи Дирихле для вырождающегося уравнения с параметром //Ученые записки Российского государственного социального университета, 2012. Т.103. №3. С. 170-174.

Программно-алгоритмический комплекс для обучения управлению процессами синтеза фуллереновой сажи

Петров Д.Н., д.т.н. проф. Чистякова Т.Б., д.х.н. проф. Чарыков Н.А.
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)
8(812)494-92-25

Аннотация. В работе рассматривается синтез обучающей системы, позволяющей повысить эффективность обучения операторов процессов производства наноструктурированных углеродных материалов, представлены результаты научных исследований процессов синтеза фуллереновой сажи, на базе которых разработана модель функционирования реактора фуллереновой сажи, структура библиотеки математических моделей, разработан программный комплекс тренажёра процесса синтеза фуллереновой сажи для обучения операторов управлению процессами производства фуллеренов.

Ключевые слова: Автоматизированное обучение, процесс синтеза фуллереновой сажи, библиотека математических моделей, наноиндустрия

К факторам, оказывающим влияние на характеристики целевого компонента наряду с технологическими, организационными, относится человеческий фактор. От уровня подготовки, опыта, квалификации специалиста зависит степень риска поломки оборудования, порчи сырья, а также качество целевого компонента. Чтобы на ход сложного технологического процесса человеческий фактор оказывал минимальное влияние, операторы, специалисты, следящие за состоянием оборудования, качеством целевого компонента, режимами работы установок, проходят курс обучения, скомпонованный под требования конкретного предприятия по производству наноструктурированных углеродных материалов. В итоге человек обретает знания, полученные из электронных учебных пособий, лекций, видеоматериалов, презентаций в теоретическом курсе обучения и первоначальный опыт по управлению высокотехнологичным сложным процессом с использованием модели процесса синтеза фуллереновой сажи и тренажёра, созданного программными средствами.

Предлагаемый вид обучения исключает риск поломки функционирующего реактора, порчи сырьевых компонентов [1]. Обучающие системы подобного рода вводятся на процессах, которые характеризуются высокими требованиями к качеству целевых продуктов, сложностью в управлении.

Фуллерены – аллотропная модификация углерода. Уникальные физико-химические свойства, такие как оптическая нелинейность, малая ширина запрещённой зоны (~1.5 эВ), поляризуемость, позволяют использовать соединения фуллерена в радиотехнической промышленности для производства фоторезисторов, оптических затворов [2, 3]. Различные производные фуллеренов показали себя эффективными средствами в лечении вируса иммунодефицита человека: белок, ответственный за проникновение вируса в кровяные клетки –

ВИЧ-1-протеаза, – имеет сферическую полость диаметром $10 \text{ \AA}$, форма которой остается постоянной при всех мутациях. Такой размер почти совпадает с диаметром молекулы фуллерена. Синтезировано производное фуллерена, которое растворимо в воде. Оно блокирует активный центр ВИЧ-протеазы, без которой невозможно образование новой вирусной частицы [1].

Производство фуллеренов характеризуется высокой температурой рабочей среды $(3,8-4,2) \cdot 10^2 \text{ K}$ и низким давлением в реакторе (300-450 торр или $(4-6) \cdot 10^4 \text{ Па}$). При малейшем отклонении вольт-амперной характеристики или давления буферного газа от заданного значения возрастает количество примесей, при этом процентное содержание фуллерена в саже падает, возрастает содержание недофуллеренов, сверхлёгких фуллеренов, нанотрубок [2, 3]. В результате количество целевого продукта (фуллерена C_{60} или C_{70}) снижается при тех же затратах энергии и сырья. Эффективное управление процессом синтеза фуллереновой сажи повышает содержание чистых C_{60} , C_{70} в ней. Рентабельность производства фуллеренов и их соединений увеличивается, цена на производимый товар снижается, делая его более конкурентоспособным, поэтому актуальной является задача обучения производственного персонала, специалистов управлению процессами синтеза фуллеренов с использованием программных средств (тренажёра, включающего библиотеку математических моделей для возможности перенастройки процесса на требуемое оборудование, вид сырья и целевые продукты, базу данных сырья, оборудования и целевых продуктов, базу знаний для обучения управлению процессом синтеза фуллереновой сажи при возникающих нештатных ситуациях).

Рассматриваемый способ обучения позволяет экономить время обучения, сырьевые компоненты, энергию, повысить качество обучения работников, что немаловажно для любого предприятия.

Технология производства фуллеренов реализуется в несколько стадий [2].

Стадия 1. Получение фуллереновой сажи со средним содержанием фуллерена C_n 13% в реакторе фуллереновой сажи (рисунок 2). Между двумя графитовыми электродами в среде гелия низкого давления зажигается электрическая дуга. При высокой температуре дуги ($\approx 3700 \text{ K}$) происходит деструкция графита и образование фуллереновой сажи, содержащей в себе целевой продукт и примеси (фуллерены с незавершённой структурой, лёгкие фуллерены). Реактор охлаждается циркулирующим между его стенок хладагентом (чаще всего водой). Процесс протекает ≈ 24 часов – среднего времени распада анода до $l_{\min}$ – минимально допустимой его длины, после чего остатки стержней, сажу извлекают, чистят реактор, устанавливают новые стержни, запускают процесс заново.

Стадия 2. Растворение фуллереновой части сажи в о-ксилоле с одновременной фильтрацией и последующей сушкой.

Стадия 3. Высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) фуллереновой сажи позволяет определить степень очистки целевого продукта (C_{60} и C_{70}) [3].

Наиболее сложным в управлении является процесс синтеза фуллереновой сажи в силу повышенной степени риска поломки оборудования (разгерметизация реактора), порчи сырья (излом графитового анода), большого влияния отклонений вольт-амперной характеристики на состав фуллереновой сажи [3].

Существует три способа получения фуллереновой сажи: электродуговой, лазерное испарение графита и пиролиз углеродсодержащих соединений. Доказано, что самым продуктивным способом синтеза фуллереновой сажи является электродуговой [3]. Данный способ позволяет производить в сутки до 13% целевого компонента (в 300-350 грамм сажи).

В качестве математического обеспечения разрабатываемого ПАК используется математическая модель процесса, позволяющая рассчитать характеристики фуллереновой сажи (массу синтезируемой сажи в килограммах, выход чистого продукта C_n в процентном соотношении к массе сажи) в зависимости от значений режимных параметров (напряжения, силы тока дуги, межэлектродного расстояния, давления буферного газа).

Механизм образования фуллеренов в дуге до сих пор остается неясным, поскольку процессы, идущие в области горения дуги, термодинамически неустойчивы, что сильно усложняет их теоретическое рассмотрение [2]. Поэтому приведённая математическая модель реактора фуллереновой сажи разрабатывалась в большей части по экспериментальным данным. Эмпирические зависимости исследовались на адекватность критерием Фишера. Было доказано, что уравнения, описывающие массообменные процессы, происходящие в реакторе фуллереновой сажи, позволяют с достаточной точностью (погрешность при оптимальном режиме работы тренажёра составляет менее 7%) получить значение массы синтезируемой сажи и процентный выход целевого продукта – фуллерена C_{60} .

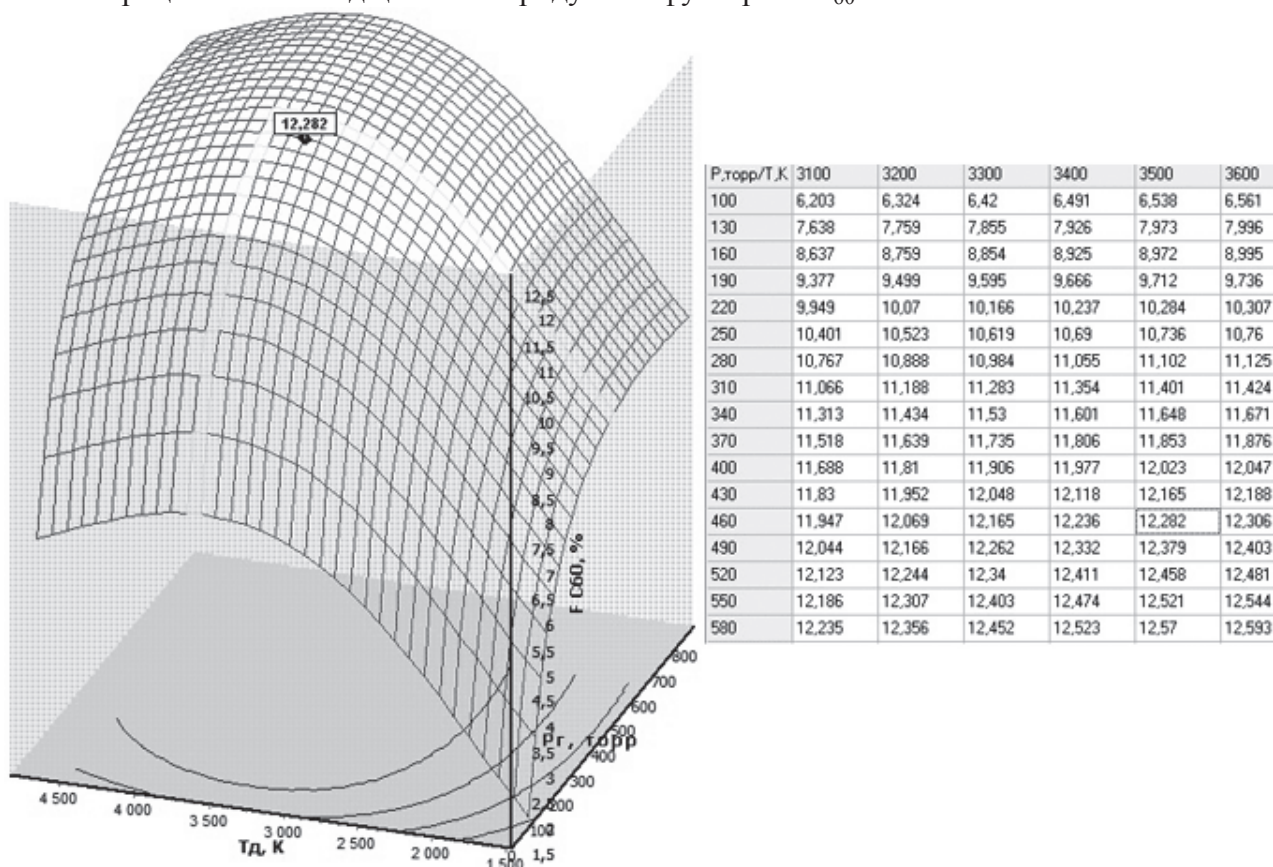


Рисунок 1. Зависимость $FC_{60} = f(P_g, T_d)$. Текущее значение $FC_{60} = 12,282\%$ при $T_d = 3500$ К и $P_g = 460$ торр

Зависимость выхода F_{C_n} , % фуллерена C_n от параметров процесса получена варьированием режимных параметров процесса (температуры дуги T_d , К в пределах [1500-5000], давления буферного газа P_g , торр в пределах [100-800]):

$$f_{C_n}(P_g, T_d) = a \cdot F_{C_n}(P_g) + b \cdot (F_{C_n}(T_d)), \quad (1)$$

где P_g – давление рабочего газа, торр; T_d – температура дуги в реакторе, К; а, b – эмпирические коэффициенты, для реактора Крёчмера, функционирующего на предприятии ООО «ИЛИП». Эксперименты проводились с использованием гелия. Основная роль гелия связана с охлаждением фрагментов, которые имеют высокую степень колебательного возбуждения, что препятствует их объединению в стабильные структуры.

Формула (1) разбивается на два слагаемых по рабочему газу и температуре дуги. При постановке эксперимента, устанавливающего зависимость выхода целевого продукта от давления рабочего газа и температуры дуги, использовались значения температуры дуги $T_d = 3500$ °С, давление рабочего газа устанавливалось $P_g = 460$ торр.

Составляющая в уравнении по рабочему газу представлена формулой (2):

$$F_{Cn}(P_2) = \frac{a_1}{a_2 + a_3 \cdot P_2 + a_4 \cdot P_2^2} \quad (2)$$

Составляющая в уравнении по температуре дуги выражается формулой (3):

$$F_{Cn}(T_d) = b_1 \cdot T_d^3 + b_2 \cdot T_d^2 + b_3 \cdot T_d + b_4. \quad (3)$$

Температура дуги зависит от подаваемого на электроды напряжения и силы тока дуги:

$$T_d(U, I) = c_1 + c_2 \cdot U + c_3 \cdot \ln(I) + c_4 \cdot U^2 + c_5 \cdot \ln(I^2) + c_6 \cdot U \cdot \ln(I) + c_7 \cdot U^3 + \\ + c_8 \cdot \ln(I^3) + c_9 \cdot U \cdot \ln(I_2) + c_{10} \cdot U^2 \cdot \ln(I^2) \quad (4)$$

где U – напряжение на электродах (графитовых стержнях) (оптимальное напряжение $U_{opt} = 21$ В); I – сила генерируемого тока (оптимальная сила тока $I_{opt} = 75$ А).

График зависимости выхода фуллерена F_{C60} от температуры дуги и давления буферного газа при варьировании температуры дуги в пределах [1500-5000] К и давления в пределах [100-800] торр изображён на рисунке 1.

График иллюстрирует не только зависимость выхода фуллерена F_{C60} от температуры дуги и давления буферного газа, но и предельные возможности оборудования по давлению и температуре, указывающие обучаемому на ограничения, в рамках которых следует держать процесс синтеза фуллереновой сажи. Для другого реактора область варьирования может быть шире и охватывать большую часть всей области варьирования параметров или, наоборот, меньше в зависимости от параметров стали, из которой изготовлен реактор (её толщины и марки), видов соединений и сварки швов. Проекция линий равного уровня показывают, что экстремальное значение содержания целевого продукта в саже соответствует выходящим за регламенты температуре и давлению. Поэтому в данном случае мы не сможем достичь экстремума, но знаем о его местонахождении.

Обучаемый решает задачу управления процессом синтеза фуллереновой сажи, которая заключается в поддержании значений режимных параметров процесса в регламентных для данного оборудования и целевого продукта диапазонах: $T_{dmin} \leq T_d \leq T_{dmax}$, $P_{2min} \leq P_2 \leq P_{2max}$, $Gx_{min} \leq Gx \leq Gx_{max}$, что соответствует максимально возможному для конкретного оборудования выходу целевого продукта и минимальному риску поломки оборудования и порчи сырья.

Задача обучения управлению состоит в передаче требуемых навыков и опыта обучаемому с использованием средств математического и имитационного моделирования, интеллектуальной подсистемы для его способности успешного решения задачи управления технологическим объектом (реактором фуллереновой сажи), а также для способности грамотно и в рамках определённого времени выводить технологический процесс из возможной нештатной ситуации, при этом минимизируя потери сырья, затраты на электроэнергию и на восстановление оборудования.

ПАК для обучения управлению процессами синтеза фуллеренов содержит модули и подсистемы, в совокупности выполняющие ряд функций:

- хранение в структурированном виде полного набора данных о процессах синтеза фуллеренов (оборудование с его техническими, геометрическими и экономическими характеристиками, сырьевые и целевые продукты, виды и характеристики процессов, режимные параметры, нештатные ситуации на процессах, причины их возникновения и рекомендации или порядок действий для устранения причины возникновения нештатной ситуации);

- защита данных от несанкционированного использования с помощью библиотеки, написанной для реализации функций хеширования, шифрования, генерации паролей;

- моделирование процессов синтеза фуллеренов с использованием библиотеки математических моделей (систем уравнений с эмпирическими коэффициентами применительно к

конкретному процессу и оборудованию) и мнемосхем с визуализацией материальных и энергетических потоков;

- постановка экспериментов с использованием информационной системы и данных о процессах, библиотеки математических моделей и фиксация результатов экспериментов в базе данных программного комплекса;
- дистанционное обучение операторов процессов по производству наноструктурированных углеродных материалов, тестирование обучаемых и фиксация результатов обучения в виде протокола обучения.

В моделируемом технологическом процессе через определённое время производится перерасчёт показателей [4] (процентное содержание целевого продукта в фуллереновой саже, масса синтезируемой сажи), кроме того, рассчитывается вероятность разгерметизации реактора, порчи конструкций в результате слишком малого или высокого давления рабочего газа или недостаточного охлаждения реактора. При возникновении поломки (оплавка и обрыв подводящих проводов, разгерметизация реактора) рассчитывается время, за которое обучаемому удастся привести систему к нормальному режиму работы (таком режиму, которому соответствуют нормальные значения всех режимных параметров и исправное оборудование). После приведения системы в нормальный режим работы, обучаемый с помощью элементов управления задаёт нужные значения параметров, соответствующие заданию. Если обучаемому не удастся за определённое время вывести систему в нормальное состояние, процесс автоматически прекращается, в журнал фиксируются все сведения о возникновении нештатной ситуации, обучаемому блокируется доступ к мнемосхеме реактора, обучаемый переходит к повторному освоению теоретического материала.

Библиотека математических моделей включает в себя коэффициенты уравнений для расчёта выхода различных фуллеренов, скорости эрозии анода и массы синтезированной сажи и позволяет с достаточной точностью отразить выходные характеристики процесса синтеза фуллереновой сажи для выбранного оборудования, вида сырья (марок графитовых стержней и их геометрических характеристик, типа буферного газа) и заданных режимных параметров процесса.

Наряду с электродуговым способом получения фуллереновой сажи существует способ лазерным испарением графита [2], который реализуется с применением тех же технологий, но есть и различия (вместо графитовых стержней используется вращающийся графитовый диск, на который направляется лазерный луч).

Поэтому целесообразна для операторов процессов синтеза наноструктурированных углеродных материалов разработка библиотеки математических моделей, структура которой позволит перенастраивать процесс синтеза фуллереновой сажи на различные виды не только сырьевых компонентов, но и реакторов. Коэффициенты системы уравнений, содержащиеся в библиотеке математических моделей применительно к заданному процессу (геометрические характеристики оборудования, физико-химические свойства сырья, вид целевого компонента), формируются исходя из опытных данных, полученных в результате экспериментов [1].

Таким образом структура ПАК для обучения управлению процессами синтеза фуллеренов включает следующие модули:

- модуль взаимодействия информационной системы программного комплекса с остальными модулями;
- библиотека математических моделей, включая редактор уравнений и коэффициентов, подсистема загрузки данных из БД и настройки системы на процесс, подмодуль ввода параметров математической модели;
- редакторы БД и БЗ применительно к интерфейсу инженера по знаниям и администратора системы, включая подмодуль проверки на корректность вводимых данных;
- модуль обучения, включающий подмодули тестирования компетенций обучающихся, мнемосхему процесса синтеза фуллеренов, интеллектуальную подсистему принятия решения

для обучения управлению процессом синтеза фуллеренов в условиях нештатной ситуации, подмодуль визуализации выходных характеристик в графическом и табличном виде, подмодуль экспорта данных о процессе обучения;

- вспомогательные модули, выполняющие функции защиты данных от несанкционированного доступа и настройки пользовательского интерфейса.

Функциональная структура ПАК для обучения управлению процессами синтеза фуллереновой сажи приведена на рисунке 2.

Тестирование компетенций обучаемого происходит с использованием тренажёра, в котором обучающий или подсистема генерации нештатных ситуаций устанавливает неблагоприятные для протекания процесса значения режимных параметров. Возникает нештатная ситуация, и студент с помощью средств управления и регулирования обязан вывести систему из возникшей нештатной ситуации, что свидетельствует о соответствующем уровне подготовки студента к управлению процессом синтеза фуллереновой сажи.

В данный момент система нуждается в доработке для возможности обучения специалистов по управлению процессами синтеза фуллереновой сажи способами лазерного испарения графита и пиролизом углеродсодержащих соединений, что повысит её универсальность и расширит область применения.

Как показывает тестирование ПАК в рамках кафедры САПРиУ СПбГТИ(ТУ), разработанная система применима для обучения операторов, технологов в сфере производства наноструктурированных углеродных материалов. Имитационная модель системы с достаточной для обучения точностью отражает процессы синтеза фуллереновой сажи.

Выводы

В процессе разработки программно-алгоритмического комплекса для обучения управлению процессами синтеза фуллеренов:

- был проведён анализ процессов синтеза фуллереновой сажи как объекта управления;
- получено математическое описание процесса синтеза фуллереновой сажи для электродугового метода, реактора Крёмера, функционирующего на предприятии по производству наноструктурированных углеродных материалов ЗАО «ИЛИП» г. Санкт-Петербург и фуллерена C_{60} ;

- разработан ПАК, позволяющий производить не только обучение специалистов с использованием компьютерных средств, но и ставить численные эксперименты для исследования процессов синтеза фуллереновой сажи в инновационном центре.

Тестирование ПАК выполнялось на примере реактора Крёмера с использованием газозооной смеси с содержанием гелия и графитовыми стержнями средней плотности.

Внедрение системы обучения позволило повысить эффективность обучения новых специалистов, операторов процесса синтеза фуллереновой сажи, снизить вероятность появления браков продукции и увеличения её количества. Обучаемые с помощью разработанной системы овладевают опытом и навыками управления процессом синтеза фуллереновой сажи, непосредственно изучив процесс на виртуальном реакторе, который по своему действию максимально приближён к настоящему реактору.

ПАК может быть рекомендован для внедрения предприятиям по синтезу наноструктурированных углеродных материалов и их соединений ЗАО «ИЛИП» (г. Санкт-Петербург), ОАО «НеоТекПродакт» (г. Петродворец); ООО «Карбон» (г. Санкт-Петербург).

Разработанный ПАК используется для подготовки и повышения квалификации специалистов в области управления производством фуллереновых материалов на базе инновационного центра «Программные комплексы для высоких химических технологий» при СПбГТИ (ТУ).

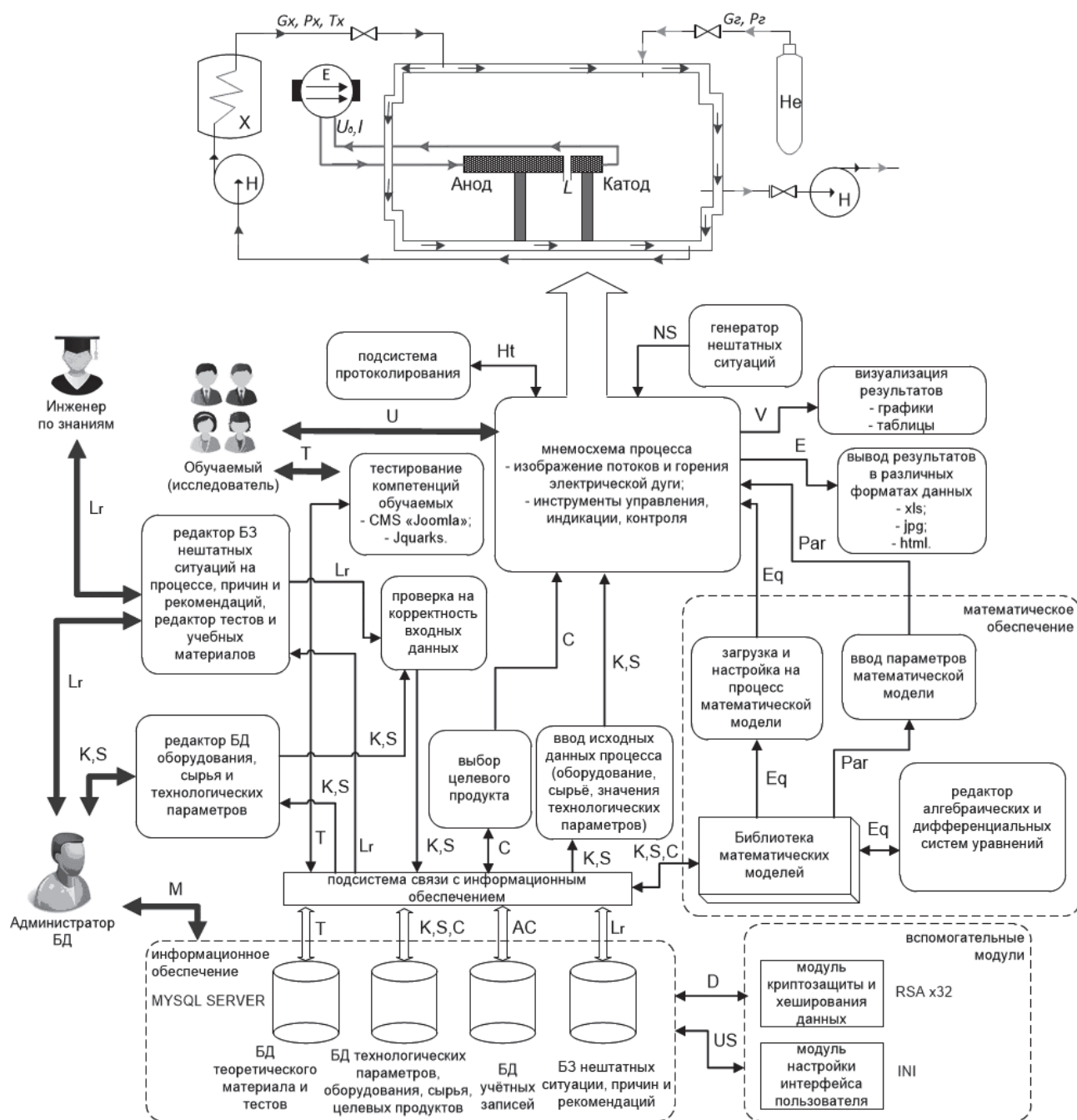


Рисунок 2. Функциональная структура ПАК для обучения управлению процессами синтеза фуллереновой сажи: Е – источник постоянного тока, Х – холодильник, Н – насос, He – баллон с гелием, U_д – напряжение дуги, I – сила тока, L – межэлектродное расстояние, G_x – расход хладагента, P_x – давление в системе охлаждения, T_x – начальная температура хладагента, G_г – расход газа, P_г – давление газа; Par – коэффициенты математической модели, C – целевой продукт, D – данные любого типа, US – настройки пользователя; E – данные в стандартных форматах для экспорта на внешний носитель, Eq – уравнения математической модели, Ht – данные о работе обучаемого, K – характеристики оборудования, Lr – объектные знания, M – общий менеджмент информационной системы, NS – случайные действия на режимные параметры, S – характеристики сырья, T – тесты, U – управление процессом

Литература

- 1 Петров Д.Н., Чистякова Т.Б., Чарыков Н.А. Программный комплекс для дистанционного обучения управлению процессами синтеза фуллереновой сажи // Материалы науч.-практ. конф., посвящ. 184-й годовщине образования СПбГТИ(ТУ). – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2012. – С. 152–153.
- 2 Сысун В.И. Фуллерены. Синтез, методы получения /– Петрозаводск. – НОЦ «Плазма», 2002. – 23 с.
- 3 Зуев В.В., Кузнецова Е.А., Чарыков Н.А. Высокопроизводительный комплекс по получению фуллеренов // Электроника. – 2007. – Т.53, № 4. – С.16–31.
- 4 Дозорцев В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. – М.: Синтег, 2009. – 372 с.

Управление надёжностью и риском в системе принятия экспертных решений

к.т.н. профессор Бондарь В.А.
Университет машиностроения
nauka@msuie.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы оценки и управления безопасностью в связи с отсутствием в настоящее время системы понятий и показателей по безопасности промышленного объекта. Предлагается действующие показатели качества и оценки безопасности сосредоточить в едином документе, обеспечивающем возможность однозначности толкования результатов при выполнении экспертизы и расчета риска.

Ключевые слова: безопасность, надежность, риск

Практика работ в области безопасности производств свидетельствует о повышенном внимании в последнее время к вопросам оценки и управления безопасностью и, в то же время, о достаточно больших методических трудностях, включая терминологические, которые встречает эксперт в конкретных случаях. Большой вклад в решение безопасности промышленных предприятий внёс вышедший в свет в 1997 г. Федеральный Закон №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». Несмотря на огромное количество публикаций, монографий, нормативных документов на тему безопасности и связанных с этой важнейшей категорией качества понятий, методов, подходов и новых решений Правительства, например, «РД 03-315-99. Положение о порядке оформления декларации промышленной безопасности и перечне сведений, содержащихся в ней», многие вопросы так и остаются неясными при выполнении практических работ.

В качестве одной, может быть, и не самой главной, но существенной причины таких трудностей можно назвать отсутствие системы понятий и показателей по безопасности промышленного объекта. Нельзя сказать, что этих понятий нет или их недостаточно, но даже беглый просмотр публикаций показывает, что системы нет, происходит смешение понятий или применение их в неполном смысле даже среди специалистов. Кроме того, во многих случаях неопределёнными остаются методы или способы измерения устанавливаемых показателей качества технической системы и, наконец, установления достаточности принимаемых мер для её безопасности.

Объяснение этому факту простое: для оценки безопасности привлекаются документы и соответственно понятия, разработанные специалистами различных научных направлений и целевой ориентировки – квалиметрии, надёжности, охраны труда, социологии, экономики, информатики, чрезвычайных ситуаций и другие. Кроме того, накладывают свой отпечаток отраслевая специфика и сам исследуемый объект. Например, оценка безопасности продукта,