

МНОГОПОДХОДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧИСТКИ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

Зобнин Б.Б., Азипа И.А.

Аннотация. Сложная нелинейная динамика управляемых объектов порождает большое разнообразие режимов их поведения, которое необходимо целенаправленно изменять. Анализ и оптимизация систем управления сложными природными и технологическими комплексами представляют собой трудноформализуемые процессы. В настоящее время отсутствует научная постановка и методы решения задачи синтеза систем управления и развития сложных природных и технологических комплексов в условиях неопределенности. Для моделирования сложных технологических комплексов предложено использовать многоподходное моделирование, когда каждый агент распределенной мультиагентной модели интегрирует различные виды знаний о классе объектов, который он представляет. Предложенный подход использован для проектирования системы очистки пылегазовых потоков. В результате решения задачи оптимизации с использованием построенной модели получена структура устройства газоочистки, удовлетворяющая заданным ограничениям и обеспечивающая требуемую степень очистки. В работе используется методология многоагентных систем, основанных на системе знаний. На основе методологии многомасштабного моделирования и прототипирования процессов строится дерево целей, описываемое связным ориентированным графом. Рассмотрен пример решения задачи оптимизации структуры очистки пылегазового потока.

Ключевые слова: многоподходное моделирование, системы очистки пылегазовых потоков.

MULTIAPPROACH MODELING OF CLEANING PYLEGAZOVYKH OF STREAMS

Zobnin B.B., Azhipa Y.A.

Abstract. Complex nonlinear dynamics of managed objects generates a great variety of modes of behavior that must be changed deliberately. Analysis and optimization of control systems of complex natural and technological systems are processes of difficulty. There is currently no scientific formulation and methods of solving the problem of synthesis of control systems and the development of complex natural and technological systems in the face of uncertainty. For modeling of difficult technological complexes it is offered to use multiapproach modeling when each agent of the distributed multiagentny model integrates different types of knowledge of a class of objects which he represents. The offered approach is used for design of system of cleaning the pylegazovykh of streams. As a result, the solution of the optimization problem using the constructed model structure obtained gas purification device that satisfies the given constraints and provide the required degree of purification. The paper uses the methodology of multi-agent systems based on knowledge. Based on the methodology of multiscale modeling and prototyping processes built objectives tree, described by a directed graph connected. An example of solving the problem of optimizing the flow of dust and gas purification structure.

Keywords: multiapproach modeling, cleaning pylegazovykh of streams.

Введение (постановка проблемы)

Существует фундаментальная научная проблема управления слабоструктурированными динамическими ситуациями, возникающими в нестационарных сложных технологических комплексах с неполным аналитическим описанием. Сложная нелинейная динамика управляемых объектов порождает большое разнообразие режимов их поведения, которое необходимо целенаправленно изменять.

Анализ и оптимизация систем управления сложными природными и технологическими комплексами представляют собой сложные и трудноформализуемые процессы.

В настоящее время отсутствует научная постановка и методы решения задачи синтеза систем управления и развития сложных природных и технологических комплексов в условиях неопределенности. Неопределенность вызвана рядом факторов: невозможностью точных измерений характеристик информационных потоков, так как используются усредненные значения, в то время как мгновенные значения передаваемых потоков могут иметь значительный разброс относительно среднего значения; влиянием факторов внешней среды на структуру и параметры технологических комплексов. Таким образом, параметры сложных технологических комплексов не могут быть определены на детерминированном уровне.

Декомпозируя систему на составные части, мы выделяем и анализируем как детерминированные, так и статистические составляющие. Детерминированные составляющие связаны с такими фундаментальными законами природы, как ньютоновские закономерности (законы переноса вещества, энергии, импульса). Стохастические составляющие необходимо учитывать на макро- и миниуровнях. К важнейшим стохастическим особенностям следует отнести характер распределения элементов фаз по времени пребывания в аппарате, вид рас-

пределения включений дисперсных фаз по размерам, эффекты взаимодействия между фазами, приводящие к дроблению и коалесценции включений.

Например, физико-химическую систему (ФХС) следует рассматривать как многокомпонентную, многофазную, неоднородную сплошную среду, распределенную в пространстве и переменную во времени, в каждой точке гомогенности которой и на границе раздела фаз имеет место перенос массы, энергии, импульса, момента импульса, заряда (электрического, магнитного) при наличии их источников и стоков [1].

На этапе идентификации ФХС рассматривается совместно с измерительной системой. С точки зрения используемой технологии, моделирование может проводиться на трех уровнях: уровне гиперструктуры, физической (ФФС) и конструктивной (КФС) функциональной структур. Под гиперструктурой (ГС) понимается некоторая модель технической системы (ТС) в терминах составляющих ее функциональных элементов, характеризующих преобразования вещественных, энергетических и (или) информационных потоков и соответствующих связей между ними. При синтезе ГС осуществляется логическое моделирование, обеспечивающее необходимое соответствие элементов по качественным признакам входных и выходных потоков энергии, вещества и информации [2]. В процессе синтеза ТС модель цели отображается и формулируется на уровне ГС нечеткими отношениями интенсивности потоков, на уровне ФФС – количественными диапазонами величин, на уровне КФС – конкретными значениями величин. Оптимальность каждой структуры понимается в смысле нечеткого соответствия функциональным требованиям и ограничениям на соответствующем иерархическом уровне представления модели цели. В процессе моделирования ТС для представления семантической информации используется метод семантических сетей с нечеткими отношениями между семантическими категориями. Степень разработанности темы исследования определяется тем, что проблематика интеллектуальных агентов (ИА) и мультиагентных систем (МАС) формируется на основе результатов, полученных в рамках таких направлений как «распределенный искусственный интеллект» (*DAI* – Distributed Artificial Intelligence), «параллельный искусственный интеллект» (*PAI* – Parallel Artificial Intelligence), «распределенные системы поддержки принятия решений» (*DPS* – Distributed Problem Solver).

Обоснование подхода к моделированию сложных технологических комплексов на примере устройств очистки пылегазовых потоков

Традиционно в моделировании ФХС используются математические модели, основанные на «физике процессов» и описывающие физические процессы и явления, происходящие при функционировании объекта, сложными дифференциальными уравнениями в частных производных с граничными условиями (например, краевые задачи для усредненного по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса в аэродинамике). Для таких уравнений зачастую неизвестны ни теоремы о существовании и единственности решения, ни характер зависимости решения от параметров и граничных условий. Программные пакеты для анализа таких моделей реализуют различные численные методы решения соответствующих уравнений (например, методы вычислительной аэрогидродинамики – Computational Fluid Dynamics, *CFD*).

Используемые численные методы имеют значительную вычислительную трудоемкость как самих расчетов, так и подготовки исходных данных, описывающих вариант построения объекта, и расчетных сеток. Это существенно сокращает возможности использования моделей, основанных на «физике процессов», особенно на стадии предварительного (концептуального) проектирования, на которой рассматривается очень большое количество вариантов решений и высока цена неправильно выбранного решения.

Для моделирования сложных технологических комплексов используем многоподходное моделирование, при котором используется более одного из перечисленных ниже подходов: молекулярной динамики, системной динамики; дискретно-событийное, или процессное моделирование; агентное моделирование.

Рассмотрим устройства очистки пылегазовых потоков с позиций извлечения наночастиц из промышленных газовых выбросов.

При этом преследуются две основных цели:

- первая цель заключается в том, чтобы избавиться от мелкодисперсных частиц, содержащихся в аэрозолях;
- вторая цель заключается в том, чтобы вернуть в производство или использовать для других полезных целей вещества, содержащиеся в выбросах и поступившие в них в результате ведения технологических процессов.

Первая цель обусловлена тем, что мелкодисперсные частицы, содержащихся в аэрозолях, способны проникать в лимфатические узлы, кровяную систему, задерживаться в легких, засорять слизистые оболочки, являясь причиной многих заболеваний и нанося тем самым, непоправимый ущерб здоровью человека.

Вторая цель стимулируется тем, что при обжиге руд и при других металлургических процессах происходит испарение летучих металлов и их соединений с последующей конденсацией и образованием дыма. В результате содержащаяся в отходящих газах тонкая пыль нередко обогащается этими металлами настолько, что становится выгодным их извлечение. Такой побочный концентрат в виде пыли является единственным промышленным сырьём для получения многих редких элементов (селен, теллур, индий и др.), так как при очень низком содержании этих элементов в полиметаллических рудах прямое их извлечение экономически невыгодно.

Таким образом, общая цель создания технологии извлечения наночастиц из промышленных газовых выбросов заключается в том, чтобы исключить попадание в атмосферу мелкодисперсных частиц и обеспечить их утилизацию. Модель дерева целей может быть описана с помощью связанного ориентированного древовидного графа, вершины которого являются целями различной степени детализации, а ребра – связями между ними. В качестве примера на рис.1 приведен фрагмент семантического графа понятий применительно к мониторингу загрязнения атмосферного воздуха.



Рис. 1. Семантический граф понятий применительно к мониторингу загрязнения атмосферного воздуха (ИЗ – источник загрязнения)

Семантическая сеть объединяет алгоритмические, структурные и продукционные знания о загрязнении воздуха в городской агломерации. Основой здесь являются алгоритмические знания, представленные в виде снабженной спецификациями библиотеки подпрограмм, работающих над полем структурированных данных. В спецификации включаются сведения о языке программирования, имени и назначении подпрограмм, списки формальных параметров, типе, семантике, способе передачи параметров и т.д.

Для моделирования устройств очистки пылегазовых потоков предлагается многоуровневый подход, сочетающий методы молекулярной динамики с другими моделями, описывающими объект как целое, например, методом конечных элементов, который делает расчеты более быстрыми. Этот подход основан на методологии многомасштабного моделирования и прототипирования процессов и структур в нанотехнологиях. При создании системы структурно-параметрического синтеза следует придерживаться такой же схемы, когда каждый агент распределенной мультиагентной модели интегрирует различные виды знаний о классе

объектов, который он представляет. Тогда мультиагентная система в целом, может представлять практически неограниченное число областей знаний, что было бы не возможно, оставаясь в рамках традиционных (не мультиагентных) технологий инженерии знаний. Предложенная мультиагентная модель распределенной системы структурно-параметрического синтеза образует единое информационное пространство для исследования и проектирования различных систем. Агенты имеют слабую связанность, в виду чего система может легко расширяться за счет добавления новых агентов. Такая мультиагентная модель может быть положена в основу архитектуры перспективных систем автоматизации проектирования, ориентированных на автоматизированный и автоматический структурно-параметрический синтез [3].

Актуальность проблемы описания процесса очистки промышленных газовых потоков от дисперсной примеси определяется тем, что это описание является основой выбора системы газоочистки и режимов ее работы. Построение модели запыленности сводится к установлению по априорным данным причинно-следственных связей между внешними и внутренними дестабилизирующими факторами и эффективностью работы системы, а количественные оценки этих связей конкретизируются путем проведения экспериментов на объекте. Тем самым гарантируется общность полученных результатов для всего класса объектов, их непротиворечивость по отношению к ранее полученным знаниям и обеспечивается уменьшение объема экспериментальных исследований.

Для решения задачи построения модели в качестве основополагающей принята концепция функционально-логического анализа вещественных, энергетических и информационных потоков в моделируемой технической системе очистки промышленных газовых потоков. При этом процесс моделирования разделяется на следующие этапы: формирование модели цели, синтез концептуальной модели и интерпретация результата моделирования. Для построения автоматизированной системы концептуального моделирования в качестве основной принята методология многоагентных систем, основанных на знаниях – интеллектуальных многоагентных систем. Использование многоагентной системы позволит построить распределенную систему параллельного проектирования с возможностью переноса на различные аппаратно-программные платформы. Существует большое количество определений понятия «агент» в зависимости от взгляда на обработку знаний. С точки зрения распределенных вычислений, агент – это «самостоятельный процесс, выполняемый параллельно, имеющий определенное состояние и способный взаимодействовать с другими агентами посредством передачи сообщений» [4]. Наибольшей информативностью при работе со сложным объектом обладает именно многомерный подход – одновременное рассмотрение всех свойств (или, по крайней мере, групп свойств) сложного объекта в совокупности.

Единственным инструментом, который объединяет системную динамику, агентное и дискретно-событийное моделирование является многоподходное имитационное моделирование. Априорная неясность уровня детализации математических моделей, описывающих сложный технологический комплекс, определяется тем, что из-за большого числа взаимосвязей свойств объекта как между собой, так и с внешней средой, построение полностью адекватной модели практически невозможно. При построении математической модели необходим компромисс между ожидаемой точностью результатов и сложностью модели. Точность модели полностью определяет достоверность тех результатов, которые получают в процессе оптимизации.

Обоснование вида модели технологического комплекса очистки пылегазовых потоков

При исследовании возможностей извлечения наночастиц из промышленных газовых выбросов приходится сталкиваться с моделированием большого количества разнообразных физических процессов: тепломассообмена дисперсной фазы с несущим газом, дробления капель под действием аэродинамических сил, их коагуляции/дробления при взаимных столкновениях. Преобразование спектра частиц дисперсной фазы процессе очистки промышленных газовых выбросов в значительной мере определяется коагуляцией – процессом слияния частиц в результате их столкновений.

Газовый поток с дисперсными частицами представляет собой многофазную многокомпонентную среду, распределенную в пространстве и времени. Существенной особенностью процесса движения дисперсных частиц в газовом потоке является его детерминированно-стохастический характер, определяемый наложением стохастических особенностей гидродинамической обстановки на процессы массо- и теплопереноса. Вследствие этого параметры математической модели отражают стохастические особенности протекания процесса движения дисперсных частиц и определяются статистическими методами.

Технологический комплекс очистки пылегазовых потоков, осуществляющий преобразование входного процесса (запыленного газового потока) $X(t)$, в выходной процесс (газовый поток, очищенный от дисперсных частиц) $Y(t)$ может быть описан оператором A :

$$y(t) = A[x(t)].$$

Оператор A ставит в соответствие каждой функции $x(t)$ входного процесса $X(t)$ функцию $y(t)$ выходного процесса $Y(t)$.

Полагаем, что оператор A является детерминированным, в том смысле, что его свойства при многократном повторении наблюдений за системой остаются неизменными.

Кривые, характеризующие дисперсный состав пыли, принято представлять в вероятностно-логарифмической координатной сетке, тогда экспериментальные точки, определяющие дисперсный состав большинства образцов промышленной пыли, располагаются близко к прямой линии [5]. Наиболее широко применяются в практике исследования промышленных пылей закон логарифмически нормального распределения, а также формулы Розина-Раммлера-Беннета, Ромашова и Годэна-Андреева (экспоненциальный закон). В этом случае дисперсный состав пыли характеризуется двумя параметрами: медианой распределения и дисперсией (или показателем полидисперсности).

Весовая дифференциальная функция распределения частиц по размерам $g_0(\delta)$, для описания которой используется логарифмически нормальный закон

$$g_0(\delta) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi} \ln\sigma} \exp\left(-\frac{(\ln\delta - \ln\delta_{50})^2}{2\ln^2\sigma}\right), \quad (1)$$

δ – текущий размер частиц, мкм; σ – дисперсия; δ_{50} – масс-медианный размер частицы, мкм.

Дисперсия для логарифмически нормального закона распределения частиц по размерам может быть определена из соотношений:

$$\sigma = \frac{\delta_{50}}{\delta_{16}} \quad \text{или} \quad \sigma = \frac{\delta_{84}}{\delta_{50}},$$

где δ_{16} и δ_{84} определяются по формулам:

$$\int_0^{\delta_{16}} g_0(\delta) d\delta = 0,16; \quad \int_0^{\delta_{84}} g_0(\delta) d\delta = 0,84.$$

Для решения задач численного моделирования двухфазных течений широкое распространение получили методы, построенные на сочетании эйлерова описания несущей среды и лагранжевого описания дисперсной фазы [6, 7].

Частицы примеси считаются однородными твердыми шарами, уравнения движения и теплообмена частиц имеют вид:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = f_p, \quad I_p \frac{d\omega_p}{dt} = T_\omega, \quad c_{pm} \cdot m_p \frac{dT_p}{dt} = q_c + q_\tau, \quad (2)$$

где m_p , I_p , v_p , T_p , c_{pm} , T_ω – масса, момент инерции, скорость, температура, и угловая скорость частицы, теплоемкость материала частиц, вращающий момент.

На каждом шаге расчета формул (t^n, t^{n+1}) (t^n, t^{n+1}) производится интегрирование уравнений движения и теплообмена всех моделирующих частиц методом Рунге-Кутты. Строится аппроксимация траектории каждой частицы пространственным полиномом второй степени

$$r(t) = r_2 t^2 + r_1 t + r_0.$$

Условие столкновения пары частиц i и j выражается алгебраическим уравнением четвертой степени $|r_i(t) - r_j(t)|^2 = (r_{pi} - r_{pj})^2$, где r_{pi}, r_{pj} – радиусы частиц.

На основе полученной аппроксимации траекторий производится расчет параметров соударения пар частиц, а также столкновений частиц с поверхностью преграды. Обработка столкновений в очереди производится последовательно. Устанавливаем следующие пространственные и временные границы объекта исследования.

Пространственными границами объекта являются технологические агрегаты – источники пылегазовых потоков, с одной стороны, и атмосферный воздух с другой стороны. Полагаем, что характеристики компонентов пылегазовых потоков задаются внешней системой. Временные границы объекта характеризуются диапазоном частот от 0 до частоты среза ω_c , существенных с точки зрения управления функционированием и развитием технологического комплекса.

Сложность построения модели состава системы состоит в ее неоднозначности. Очевидно, что для отличающихся целей один и тот же объект может потребовать разбиения на различные части. Главным при структурном моделировании является установление функциональных связей между входными, внутренними и выходными параметрами.

Ориентация модели на прогнозирование величины технико-экономических потерь требует оценки чувствительности свойств газового потока, очищенного от дисперсных частиц, к изменениям характеристик запыленного газового потока, выявления технологических операций, являющихся источниками потерь эффективности очистки газового потока, и технологических операций, непосредственно воспринимающих дестабилизирующее влияние источников потерь эффективности.

Анализ структуры технологического комплекса выполним в следующем порядке:

- определим основные типы технологических операций, входящих в S ;
- определим основные типы подсистем, образующих S ;
- установим отношения порядка между всеми подсистемами.

В качестве примера рассмотрим решение задачи идентификации модели запыленности промышленных газовых потоков, образующихся при прокатке кокса для производства анодной массы, используемой для выплавки алюминия.

Для пылеулавливания применяют большое число аппаратов, отличающихся друг от друга как по конструкции, так и по принципу осаждения взвешенных частиц. Производственная пыль, как правило, полидисперсная, т.е. в воздухе встречаются одновременно пылевые частицы различных размеров. В любом образце пыли обычно число мелких частиц больше, чем крупных. В большинстве случаев до 60÷80% частиц пыли имеют диаметр до 2 мкм, 10÷20% – от 2 до 5 мкм и до 10% – свыше 10 мкм. Однако общий вес пылевых частиц от 2 мкм весьма незначителен и обычно не превышает 1÷3% веса всего образца пыли. Зная химический состав пыли, можно обоснованно выбрать мокрый или сухой способ очистки газа. Если пыль содержит компоненты, способные образовывать с водой или другой жидкостью, подаваемой на орошение аппаратов, соединения, которые при оседании на стенках аппаратов и газоходов трудно удалить, применять мокрый способ очистки газов нельзя. По способу улавливания пыли различают аппараты механической и электрической очистки газов [8]. Очистка промышленных газовых потоков от дисперсной примеси может быть описана преобразованием функции распределения дисперсной примеси в образующихся дымовых газах в функцию распределения дисперсной примеси в газах, выбрасываемых в атмосферу.

Требуется достичь эффективности улавливания коксовой пыли, превышающей 90%. Приоритетом обладают сухие методы пылеулавливания, т.к. уловленная коксовая пыль является сырьем для производства анодной массы.

Структура системы очистки пылегазовых потоков определяется основными свойствами пыли, содержащейся в технологических и вентиляционных газах: химическим составом, плотностью, углом естественного откоса, удельным электрическим сопротивлением, структурой частиц, дисперсностью, токсичностью, воспламеняемостью, смачиваемостью и способностью коагулировать.

Поставленная цель реализуется с использованием системы очистки пылегазовых потоков, которое представляет собой множество взаимосвязанных и взаимодействующих элементов любой природы, объединенных единством цели или общими целенаправленными правилами взаимоотношений.

Знания предметного специалиста об условиях применения объекта того или иного класса в процессе вычислений представляются в виде набора продукций, которые являются и объектами определенного класса модели [9].

В качестве вспомогательных элементов модели используем: символ неопределенности θ , который используется при создании объекта, выступая в роли значения полей до их инициализации; функцию $g: O \rightarrow C$, ставящую в соответствие объекту некоторый класс; функцию $q: P \rightarrow C \cup T \cup \{o\}; \forall p \in P$:

$$q(P) = \frac{\begin{cases} c \in C \\ t \in T \end{cases}}{\theta}.$$

Состояние модели *Grid*-системы задается в виде структуры $s = \langle C, O, P, T \rangle$. Рассматриваемый язык представления знаний о *Grid*-системе включает синтаксические конструкции вида: $\langle \text{Имя базового оператора} \rangle (\langle \text{Параметр 1} \rangle, \langle \text{Параметр 2} \rangle, \dots, \langle \text{Параметр } n \rangle)$.

Данный язык позволяет представить любые действия с моделью *Grid*-системы как последовательность базовых операторов. В результате выполнения базового оператора происходит переход из исходного состояния модели $s = \langle C, O, P, T \rangle$ в результирующее $s' = \langle C, O, P, T \rangle$. На выполнение базовых операторов могут быть наложены ограничения двух видов: встроенные в транслятор языка описания модели *Grid*-системы и дополнительные, определяемые разработчиком модели. К первому виду относятся блокировки дублирования и уничтожения классов или объектов, проверка соответствия типов и другие подобные ограничения целостности модели. Ограничения второго вида определяют специфику объектов модели и взаимосвязей между ними. Они формируются разработчиком с помощью специальной подсистемы транслятора.

Различают задачи идентификации в широком (структурная идентификация) и узком смысле (параметрическая идентификация) соответственно. В первом случае неизвестна структура и параметры оператора \hat{A} , во втором – лишь параметры этого оператора. Задача структурной идентификации для данного примера заключается в выборе структуры устройства газоочистки.

Максимальная эффективность системы газоочистки от дисперсной примеси достигается при условии согласования параметров системы очистки пылегазовых потоков с параметрами потока газов от источника их образования.

В результате решения задачи оптимизации с использованием построенной модели получена структура устройства газоочистки, удовлетворяющая заданным ограничениям и обеспечивающая требуемую степень очистки.

Задача оптимизации решается при следующих условиях.

Известно множество объектов (модулей) Q системы W очистки пылегазовых потоков:

$$Q = (Q_k | k \in N^Q), \quad (3)$$

где Q_k – собственное подмножество множества Q объектов k -го типа;

N^Q – множество индексов типов объектов.

Множество отмеченных свойств объекта k -го типа

$$R_k(Q_k) = (r_{k,v} | k \in N^Q, v \in V(k)), \quad (4)$$

где $r_{k,v}$ – v -ое свойство объекта k -го типа;

$V(k)$ – множество обозначений свойств объектов k -го типа.

К модулям системы очистки относятся: пылесадительные камеры, циклоны, электрофильтры и т.д. К предикатам, характеризующим отношения между объектами, относятся:

статистические характеристики распределения частиц по размерам; удельное электрическое сопротивление пыли. Тогда система W может быть представлена в виде

$$W = (\{Q_k\}, \{R_k(Q_k)\}, \{P_k\}). \quad (5)$$

Например, при медианном диаметре пыли, равным 32 мкм, в качестве первого звена в системе газоочистки будем использовать циклон, так как пылеосадительная камера применяется при медианном диаметре свыше 40 мкм. по значению удельного электрического сопротивления слоя пыли (УЭС) пыль относится к третьей группе (пыли с УЭС = $10^{10} \dots 10^{13}$ Ом·см), т.к. в данном варианте значение УЭС = $4 \cdot 10^{12}$ Ом·см при температуре 50 °С, а пыли с высоким УЭС наиболее трудно улавливаются в электрофильтре, то используем тканевый рукавный фильтр с импульсной продувкой.

Заключение

Обоснован подход к моделированию сложных технологических комплексов на примере устройств очистки пылегазовых потоков на стадии концептуального проектирования. Используется методология многоагентных систем, основанных на знаниях. На основе методологии многомасштабного моделирования и прототипирования процессов строится дерево целей, описываемое связным ориентированным графом. Рассмотрен пример решения задачи оптимизации структуры очистки пылегазового потока.

Список используемых источников

1. Кафаров, В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов. – М. : Наука, 1976. – 499 с.
2. Заболевая-Зотова, А.В. Применение агентно-ориентированной технологии к синтезу новых технических систем / А.В. Заболевая-Зотова, М.В. Набока // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2004. – № 5.
3. Зобнин, Б.Б., Мультиагентные системы. Управление сложными технологическими комплексами / Б.Б. Зобнин, А.В. Вожегов // LAP. – Saarbrücken, Deutschland. – 2014.
4. Смирнов, А. В. Многоагентная технология проектирования сложных систем / А.В. Смирнов, Л.Б. Шереметов // Автоматизация проектирования. – 1998. – № 3.
5. Справочник по пыли и золоулавливаю / Под общ. ред.А.А. Русанова. – М. : Энергия, 1975. – 296 с.
6. Crowe, C.T. Multiphase flows with droplets and particles. / C.T. Crowe, M. Sommerfeld, Y. Tsuji. – CRC Press LLC, 1998. – 471 p.
7. Tsirkunov, Yu. M. Gas-particle flows around bodies – key problems, modeling and numerical analysis. // Proc. Fourth International Conference on Multiphase Flow (Ed.: E. Michaelides), May 27 – June1, 2001, New Orleans, LA, USA. – CD ROM Proc. ICMF'2001, paper No. 609, 31 p.
8. Ужов, В.Н. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков. – М.: Химия, 1981. – 320 с.
9. Опарин, Г.А. Входной язык объектно- ориентированной базы знаний GRID-системы / Г.А. Опарин, А.Г. Феоктистов, Э.К. Вартанян // Программные продукты и системы. – 2012. – №1. – с.3-6.
10. Зобнин, Б.Б. Прогнозирование качества агломерата с использованием неполной аналитической модели технологического комплекса / Б.Б. Зобнин, И.А. Ажипа // МиПОС. – 2014. – №1. – С. 17-21.

Зобнин Борис Борисович – д-р техн. наук, проф., профессор кафедры информатики ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет».

Ажипа Игорь Анатольевич – аспирант кафедры информатики ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», E-mail: azhipaigor@gmail.com.

Зобнин Б.Б., Ажипа И.А. Многоподходное моделирование очистки пылегазовых потоков // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2016. – Т.4. – №1. – С. 19-26.

Zobnin, B.B. and Azhipa Y.A. (2016) Multiapproach modeling of cleaning pylegazovykh of streams. Software of systems in the industrial and social fields, 4 (1): 19-26.
