

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС»

На правах рукописи



**Новаковская Анна Олеговна**

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ БИОСОРБЦИИ СЕРЕБРА:  
МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ**

Специальность: 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами» (в металлургии)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2012 г.

Работа выполнена на кафедре «Компьютерные информационные и управляющие системы автоматики» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

**Научный руководитель:** Заслуженный деятель науки России,  
доктор технических наук, профессор  
**Салихов Зуфар Гарифуллович**

**Научный консультант:** доктор технических наук, профессор  
**Стрижко Леонид Семенович**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Рутковский Александр Леонидович**

кандидат технических наук, доцент  
**Анисимов Евгений Федорович**

**Ведущая организация:** Сибирский федеральный университет, Институт цветных металлов и материаловедения

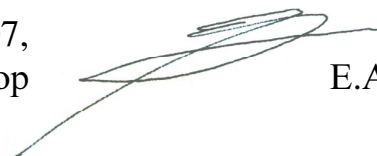
Защита состоится «14» марта 2012 г. в 14-00 на заседании Диссертационного совета Д 212.132.07 при Национальном исследовательском технологическом университете «Московский институт стали и сплавов» по адресу: 119049, г. Москва, Крымский вал, д. 3, ауд. К-325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

Автореферат разослан «31» января 2012 г.

Отзывы и замечания по автореферату в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации, просьба выслать по адресу: **119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4** на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.132.07,  
кандидат технических наук, профессор



Е.А. Калашников

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время процессы извлечения серебра из вторичных видов сырья широко распространены как в России, так и зарубежом. Основные технологические решения по извлечению серебра из вторичных видов сырья включают в себя сорбционные процессы. Современная реализация этих процессов, подчиненная условиям экономической эффективности, предусматривает применение альтернативных видов сорбентов, в частности, биокультур – отходов производства антибиотиков. Техническая реализация сорбционных процессов, основанных на применении биокультур, усложняется трехстадийностью их функционирования. Сорбционное извлечение серебра осуществляется в технологических агрегатах – колоннах, представляющих собой объекты управления с неполной информацией. Реализация систем управления этими объектами осложняется низким уровнем наблюдаемости, идентифицируемости и, как следствие, управляемости.

Характеристики явлений, протекающих на участке биосорбции, являются нелинейными и нестационарными, что определяет сложность прогнозирования состояний внутри колонн и, соответственно, процессов принятия управленческих решений. Значительные трудности вызывает задача дискретно-непрерывного управления трехстадийными процессами биосорбции серебра, в соответствии с которыми необходимо принимать решения по эффективному использованию биосорбентов в серии колонн, участвующих в процессе. Таким образом, эффективное управление серией сорбционных колонн и протекающими в них процессами является сложной научно-технической задачей, до настоящего времени не решенной в полном объеме, что определяет актуальность исследований.

В данной работе исследуются вопросы разработки систем автоматизированного управления технологическими процессами группы агрегатов, осуществляющих извлечение серебра из отработанных растворов биосорбентами в условиях неполной информации об объекте, с учетом

нестационарности и нелинейности характеристик. В качестве целевой функции управления принимается достижение максимально возможной экономической эффективности протекающих процессов.

### **Цель работы.**

Исследование и анализ эксплуатационных и сорбционных свойств биосорбентов, разработка на их основе математических моделей, алгоритмов и программ системы автоматизированного управления, обеспечивающей максимальную рентабельность процесса извлечения серебра из отработанных растворов.

**Решение сформулированной актуальной научно-технической задачи и достижение цели работы, обеспечивается:**

- исследованием принципов управления процессами извлечения серебра с применением биосорбентов;
- исследованием физико-химических, технологических и эксплуатационных характеристик, определяющих протекание процесса биосорбции в зависимости от параметров растворов;
- разработкой математической модели процесса извлечения серебра биосорбентами;
- разработкой алгоритмов управления переключением режимов работы сорбционных колонн;
- разработкой структуры и принципов функционирования системы управления рациональной заменой сорбента в сорбционных колоннах;
- разработкой специального математического, алгоритмического и программного обеспечения системы управления процессами извлечения серебра из отработанных растворов на участке биосорбции с идентификатором-наблюдателем в контуре управления.

### **Научная новизна.**

1. Впервые разработана математическая модель кинетики процессов биосорбции с учетом восстановления технологических свойств сорбента и извлечения серебра из сорбентов.

2. Усовершенствованы алгоритмы управления производством серебра (на цеховом уровне) из отработанных растворов с помощью биосорбентов.
3. Разработан метод повышения эффективности использования биосорбентов на основе процедур квазиоптимального управления.
4. Разработана структура трехуровневой системы управления, которая базируется на постановке и формализации целей управления процессами, протекающими на участке биосорбции серебра.
5. Разработан экспертный программный комплекс, реализующий алгоритмы автоматизированной системы управления.

**Практическая ценность работы.** Разработана автоматизированная система управления процессом производства серебра из отработанных растворов с применением биосорбентов, основанная на эффективном использовании физико-химических и эксплуатационных свойств сорбентов. При этом рентабельность производства увеличивается на 15-20%, а количество извлекаемого из растворов серебра – на 10-12%.

**Автор выносит на защиту.**

1. Научное обоснование прогрессивности реализации многокритериального управления процессами, протекающими на участке биосорбции серебра.
2. Структуру трехуровневой автоматизированной системы квазиоптимального управления производством серебра, реализующую переключение режимов функционирования колонн участка биосорбции на основе исследования взаимосвязи между функциями времени, характеризующими трехстадийный процесс биосорбции, и периодичностью переключения режимов функционирования сорбционных колонн.
3. Структурные и алгоритмические решения, основанные на математических моделях прогноза непрерывных и дискретно-непрерывных процессов с использованием квазиоптимального управления.

4. Результаты подтверждения эффективности работы системы управления, разработанной на базе специального математического обеспечения, алгоритмов и программного обеспечения.

**Реализация результатов.** Проведены опытно-промышленные испытания разработанной автоматизированной системы управления процессами биосорбции серебра на ОАО «Щелковский завод вторичных драгоценных металлов» (имеется акт опытно-промышленных испытаний).

**Методы исследования.** Методы математического моделирования, параметрической идентификации, численного решения уравнений модели, оптимизации и системного анализа, дискретной математики и математической логики, численного решения оптимизационных задач, теории вероятности и математической статистики.

**Достоверность результатов.** Обеспечивается строгостью применения математического аппарата, подтверждается результатами численного моделирования, оценкой адекватности решений уравнений модели и оптимизационных задач, а также опытно-промышленными испытаниями.

**Апробация результатов.** Результаты диссертации докладывались и обсуждались на 15-ти международных конференциях (основные из которых приведены в составе источников литературы), а также на научном семинаре кафедры «Компьютерные информационные и управляющие системы автоматизации» НИТУ «МИСиС».

**Публикации.** Основные положения и результаты работы изложены в 20 печатных работах, три из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, четырех приложений, актов об использовании результатов. Содержит 150 страниц основного текста, 46 рисунков, 40 таблиц.

**Личный вклад соискателя.** Положения работы, новые математические модели, алгоритмы, основные решения по разработке трехуровневой

системы управления процессами на участке биосорбции серебра и результаты численного исследования принадлежат соискателю.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность научно-технической задачи, сформулированы цели и аргументирована необходимость проведения научных исследований, дано обоснование практической ценности разработки автоматизированной системы управления процессами биосорбции серебра, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** диссертационной работы сделан обзор современных способов, методов, сопровождающих разработку систем управления сложными технологическими процессами и производствами.

Рассмотрены вопросы создания иерархических и многоуровневых систем, целесообразность которых определяется наличием задач, различающихся по времени исполнения и конечным целям. Проведен анализ работ, посвященных математическому моделированию объектов с нестационарными и нелинейными характеристиками. Выделены классы систем, предназначенных для управления объектами с неполной информацией, активным и пассивным накоплением информации. Использование таких систем позволяет повысить уровень наблюдаемости и идентифицируемости. Рассмотрены методы описания нестационарных процессов, характеристики которых отличаются существенными нелинейностями типа «насыщение». Наиболее приемлемым для описания таких процессов является математический аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений, позволяющий получать численное решение уравнений модели в реальном масштабе времени. Исследованы методы параметрической идентификации динамических моделей, описывающих нестационарные нелинейные процессы. Определены возможности применения этих методов для активного накопления информации при реализации систем с идентификатором-наблюдателем в контуре управления,

что дает возможность учитывать «временной дрейф» – неконтролируемые изменения характеристик объекта управления.

Рассмотрен круг задач дискретно-непрерывного управления, математические методы и модели их описания, а также методы описания логико-формальных правил, которым подчиняются переключения режимов работы агрегатов. Проведен анализ методов и способов декомпозиции объектов управления на уровни и их отражение в соответствующих алгоритмах с определением соотношения подчиненности решений, определяемых на каждом уровне. Рассмотрены аспекты современной реализации специального математического и алгоритмического описания автоматизированных систем управления, а также методы и приемы их отображения в специальное программное обеспечение. Выделен ряд требований, на основании которых формируется архитектура программного обеспечения, правила разработки баз знаний и баз данных.

Анализ современных разработок, алгоритмов и специального математического обеспечения систем управления показал, что не существует готовых решений, которые можно использовать при разработке прогрессивной автоматизированной системы управления процессами биосорбции серебра.

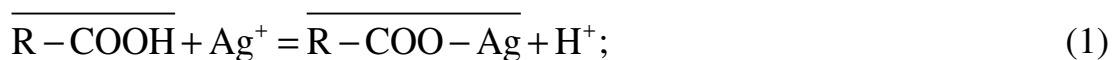
**Во второй главе** приведены результаты исследования процессов, протекающих на участке биосорбции серебра из отработанных растворов. Рассмотрены основные закономерности и технологические реализации сорбции. Определено назначение процесса, химический состав, кислотность, концентрации исходных веществ в отработанных растворах и требования санитарных норм к содержанию серебра в сточных водах. Серебросодержащий раствор под действием гравитационных сил перетекает через серию последовательно соединенных колонн, расположенных на разных уровнях, при этом происходит обеднение раствора по серебру.

Установлено, что концентрация серебра в растворе варьируется, поддерживается постоянный уровень кислотности раствора. Измерению

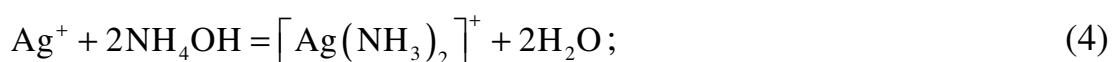


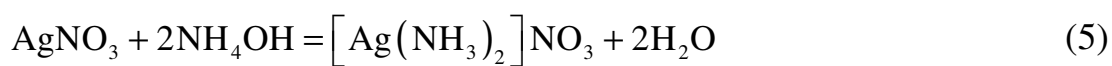
подлежат только расход раствора, подаваемого в колонны, содержание ионов серебра и кислотность раствора. Контроль содержания серебра в колонне и его усвоение сорбентом не осуществляется, что определяет степень неполноты информации об объекте и необходимость разработки инструментария косвенного измерения (прогноза) этих показателей с помощью математических моделей.

Рассмотрены физико-химические особенности различных биокультур, предлагаемых в качестве сорбентов. Определено, что биосорбенты характеризуются тремя стадиями протекающих в них процессов. Первой стадии – сорбции, присуща нелинейность типа «насыщение», обозначающая, что все активные центры плесневой культуры связаны с частицами серебра. Длительность этой стадии зависит от типа биокультуры и составляет 2-3 часа, а процесс усвоения серебра является нестационарным. Стадия сорбции характеризуется протеканием реакций (1-3):



Следующая стадия – восстановление технологических свойств сорбента, вызванное ростом биологической популяции плесневой культуры. Этот процесс также является нестационарным и характеризуется нелинейностями типа «нечувствительность» и «насыщение». Эффективное использование биосорбентов предполагает, что чередование этих стадий может осуществляться шесть-восемь раз, после чего прекращается подача серебрясодержащего раствора в колонну и осуществляется подача щелочных растворов, с помощью которых извлекается усвоенное сорбентом серебро. Третья стадия – десорбция, во время которой протекают реакции (4-5). Этот процесс также является нелинейным и нестационарным.



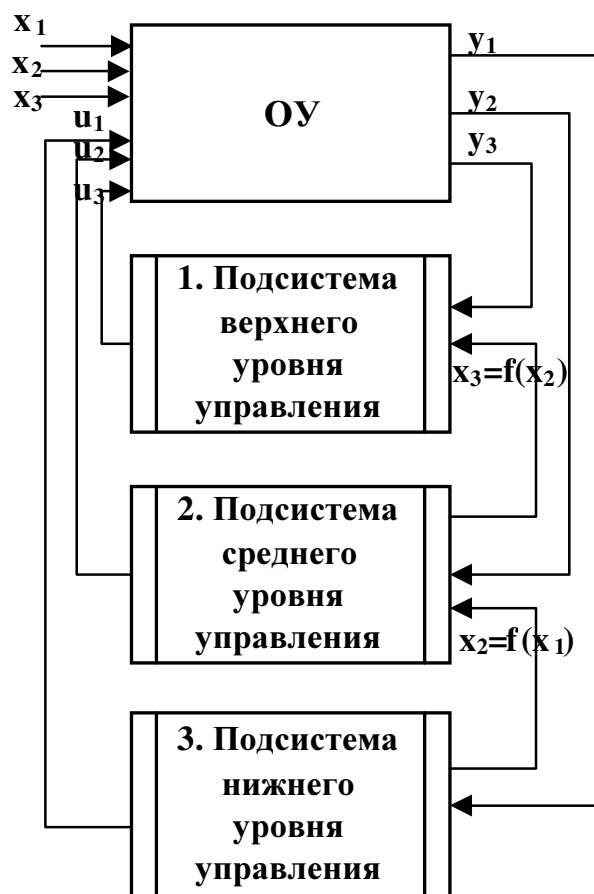


Согласно существующей методике моделирования химической кинетики процессов, для описания трехстадийных процессов выбран математический аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений, численные решения которых позволяют осуществлять управление в реальном времени. Так как серебродержащие растворы последовательно перетекают через серию сорбционных колонн, возникает необходимость переключения стадий (режимов) функционирования каждой колонны. При этом процесс накопления серебра в колоннах в зависимости от количества режимов сорбции имеет дискретно-непрерывный характер. Для математического описания таких процессов был проведен анализ существующих разработок моделей. Установлено, что наиболее приемлемым является математический аппарат, сочетающий в себе методы дискретной математики, математической логики и алгебры.

Кроме перечисленных особенностей, современные требования разработки автоматизированных систем определяют необходимость оценки экономической эффективности процессов, основными показателями которой являются расходы на закупку биологических культур и доходы, получаемые от реализации извлеченного серебра.

Для реализации системы управления трехстадийными процессами биосорбции серебра, протекающими на участке, исследованы существующие разработки многоуровневых иерархических систем управления. На основании этих исследований предложена трехуровневая структура управления процессами биосорбции, представленная на рисунке 1.

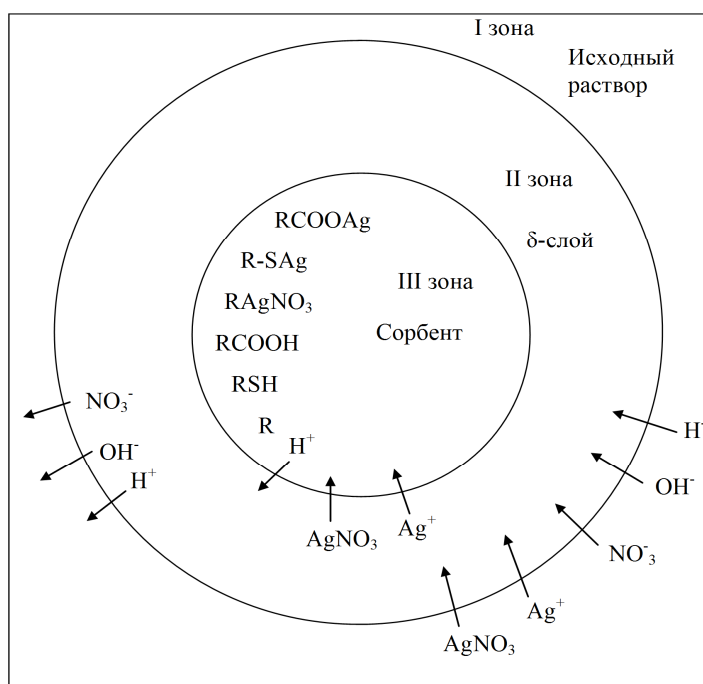
На нижнем уровне осуществляется непрерывное управление кинетикой протекающих процессов, на среднем – дискретно-непрерывное управление переключением режимов работы колонн. На этих двух уровнях предусмотрен автоматический режим управления в реальном времени.



**Рис. 1. Укрупненная структура системы управления**

На верхнем уровне решаются задачи планирования и оценки целесообразности закупки биокультур различной стоимости и с различными эксплуатационными свойствами. Система управления этого уровня функционирует дискретно, в автоматизированном режиме принятия решений лицом, принимающим решения (ЛПР).

**В третьей главе** осуществлена разработка и параметрическая идентификация математических моделей, описывающих явления, происходящие на объекте управления. При разработке математических моделей нижнего уровня, в соответствии с выбранной методологией описания нестационарных нелинейных процессов, осуществлена классификация переменных: выделены входные и выходные переменные, состояния. Осуществлена декомпозиция процессов, протекающих в колонне, на псевдооднородные зоны. Для всех режимов явления рассматриваются на отдельно взятой грануле сорбента с обобщением на весь рабочий объем колонны. Схема декомпозиции режима сорбции приведена на рисунке 2.



**Рис. 2. Принцип декомпозиции рабочего объема на зоны при протекании процесса сорбции**

Первая зона представляет собой исходный вторичный раствор, содержащий  $\text{AgNO}_3$  в химически связанном и диссоциированном виде, а также ионы воды, диссоциированные в виде анионов  $\text{OH}^-$  и катионов  $\text{H}^+$ . В качестве второй зоны выделен  $\delta$ -слой, характеризующий механизм обмена между сорбентом и раствором. Третья зона представляет собой гранулу биосорбента, содержащую активные центры, усваивающие серебро из растворов.

В соответствии с принятой декомпозицией, разработаны уравнения математической модели процесса сорбции.

Уравнение, характеризующее скорость усвоения катионов серебра сорбентом:

$$\frac{dG_3^{\text{Ag}^+}}{dt} = \beta_2 F_2 \gamma_2 ([\text{Ag}^+]_2 - [\text{Ag}^+]_3) - g_1^{\text{Ag}^+} - g_2^{\text{Ag}^+}, \quad (6)$$

где  $\frac{dG_3^{\text{Ag}^+}}{dt}$  – скорость изменения количества  $\text{Ag}^+$  в третьей зоне, г/с;  $\beta_2$  – коэффициент массопереноса между 2 и 3 зонами, м/с, параметр;  $F_2$  – площадь поверхности контакта 2 и 3 зон,  $\text{м}^2$ ;  $\gamma_2$  – плотность 2 зоны,  $\text{г}/\text{м}^3$ ;  $g_1^{\text{Ag}^+}$ ,  $g_2^{\text{Ag}^+}$  – скорость усвоения катионов серебра в реакциях (1-2), г/с.

Скорость расходования активных центров сорбента:

$$\frac{dG_3^{\text{RCOOH}}}{dt} = -\chi_1^3 g_1^{\text{Ag}^+}, \quad (7)$$

где  $\chi_1^3$  – коэффициент стехиометрии компонент в реакции (1).

Скорость образования серебросодержащего комплекса:

$$\frac{dG_3^{\text{RCOOAg}}}{dt} = \chi_1^2 g_1^{\text{Ag}^+}. \quad (8)$$

Для численного решения уравнений модели с использованием метода Рунге-Кутты-Гилла расчет правых частей дифференциальных уравнений вынесен в отдельный блок, предусматривающий аппроксимацию на предыдущей итерации.

$$g_1^{\text{Ag}^+} = k_1 g_{\text{np}}^{\text{Ag}^+} e^{-\frac{E_1}{RT}}, \quad (9)$$

где  $E_1$  – энергия активации;  $R$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура раствора;  $k_1$  – константа скорости реакции (1), параметр.

Весовые концентрации катионов серебра на каждом шаге итерации во второй и третьей зонах:

$$[\text{Ag}^+]_2(\tau_i) = [\text{Ag}^+]_2(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_2(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_2^{\text{Ag}^+}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau, \quad (10)$$

$$[\text{Ag}^+]_3(\tau_i) = [\text{Ag}^+]_3(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_3(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_3^{\text{Ag}^+}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau. \quad (11)$$

Плотность и вес второй и третьей зон, соответственно:

$$\begin{aligned} \gamma_2(\tau_i) = & \gamma_{\text{Ag}^+} [\text{Ag}^+]_2(\tau_i) + \gamma_{\text{NO}_3^-} [\text{NO}_3^-]_2(\tau_i) + \gamma_{\text{H}^+} [\text{H}^+]_2(\tau_i) + \\ & + \gamma_{\text{OH}^-} [\text{OH}^-]_2(\tau_i) + \gamma_{\text{AgNO}_3} [\text{AgNO}_3]_2(\tau_i) \end{aligned} \quad (12)$$

$$G_2(\tau_i) = \gamma_2(\tau_i) \cdot V_2, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \gamma_3(\tau_i) = & \gamma_{\text{Ag}^+} [\text{Ag}^+]_3(\tau_i) + \gamma_{\text{H}^+} [\text{H}^+]_3(\tau_i) + \gamma_{\text{AgNO}_3} [\text{AgNO}_3]_3(\tau_i) + \\ & + \gamma_{\text{RCOOH}} [\text{RCOOH}]_3(\tau_i) + \gamma_{\text{RSH}} [\text{RSH}]_3(\tau_i) + \gamma_{\text{R}} [\text{R}]_3(\tau_i) + \\ & + \gamma_{\text{RCOOAg}} [\text{RCOOAg}]_3(\tau_i) + \gamma_{\text{RSAg}} [\text{RSAg}]_3(\tau_i) + \gamma_{\text{RAgNO}_3} [\text{RAgNO}_3]_3(\tau_i) \end{aligned} \quad (14)$$

$$G_3(\tau_i) = \gamma_3(\tau_i) \cdot V_3. \quad (15)$$

Математическая модель процесса сорбции представлена системой, состоящей из девятнадцати связанных нелинейных дифференциальных уравнений и является моделью-структурой, содержащей пять параметров.

Окончание процесса сорбции подчиняется логическим правилам оценки насыщения сорбента:

$$G_3^{\text{RCOOH}}(m) - G_3^{\text{RCOOH}}(m-1) < \varepsilon_1, \quad (16)$$

где  $\varepsilon_1$  – заданная вариация переменных,  $m$  – шаг итерации.

Для разработки математической модели восстановления технологических свойств биосорбента использована методология роста биологической популяции по Мальтусу, как аналог уравнений Лотки-Вольтерра.

Уравнение, характеризующее рост плесневой культуры (рост популяции):

$$\frac{dN_t}{dt} = r_n N_t (1 - k_5 [Ag]_k), \quad (17)$$

где  $N_t$  – количество центров плесневой культуры;  $r_n$  – скорость роста центров плесневой культуры;  $k_5$  – параметр;  $[Ag]_k$  – количество серебра, усвоенного сорбентом на предыдущем цикле.

Уравнение роста активных центров сорбента:

$$\frac{dA_t}{dt} = r_n N_t \left( 1 - \frac{P_t}{N_t} \right), \quad (18)$$

где  $A_t$  – количество активных центров;  $P_t$  – количество центров размножения.

$$r_n = k_4 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (19)$$

Уравнение роста центров RCOOH:

$$\frac{dG^{\text{RCOOH}}}{dt} = A_t(t) - G^{\text{RSH}}(t) - G^{\text{R}}(t). \quad (20)$$

Долевые соотношения (концентрация) центров сорбции:

$$[\text{RCOOH}](\tau_i) = [\text{RCOOH}](\tau_{i-1}) + \frac{1}{A_t(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG^{\text{RCOOH}}}{dt} d\tau, \quad (21)$$

Окончание процесса определяется, исходя из условий:

$$G_3^{\text{RCOOH}}(m) - G_3^{\text{RCOOH}}(m-1) < \varepsilon_4, \quad (22)$$

где  $\varepsilon_4$  – заданная вариации переменных,  $m$  – шаг итерации.

Математическая модель процесса восстановления представлена системой, состоящей из шести нелинейных связанных параметрических дифференциальных уравнений, и содержит два параметра.

Принципы разработки математической модели режима десорбции аналогичны принципам моделирования процесса сорбции.

Изменение количества десорбирующего раствора:

$$\frac{dG_1^{\text{NH}_4\text{OH}}}{dt} = g_{\text{pr}}^{\text{NH}_4\text{OH}} - \beta_1 F_1 \gamma_1 ([\text{NH}_4\text{OH}]_1 - [\text{NH}_4\text{OH}]_2), \quad (23)$$

где  $\frac{dG_1^{\text{NH}_4\text{OH}}}{dt}$  – скорость изменения количества  $\text{NH}_4\text{OH}$  в 1 зоне, г/с;  $g_{\text{пр}}^{\text{NH}_4\text{OH}}$  – расход  $\text{NH}_4\text{OH}$  в растворе, г/с;  $\beta_1$  – коэффициент массопереноса между 1 и 2 зонами, м/с, параметр;  $F_1$  – площадь поверхности контакта зон, м<sup>2</sup>;  $\gamma_1$  – плотность 1 зоны, г/м<sup>3</sup>;  $[\text{NH}_4\text{OH}]_1$ ,  $[\text{NH}_4\text{OH}]_2$  – весовые концентрации  $\text{NH}_4\text{OH}$  в 1 и 2 зонах соответственно.

Скорость изменения количества продуктов реакции (4):

$$\frac{dG_1^{[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+}}{dt} = \beta_1 F_1 \gamma_2 ([\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]_1 - [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]_2). \quad (24)$$

Модель десорбции представлена системой из четырнадцати нелинейных связанных параметрических дифференциальных уравнений и содержит четыре параметра.

По экспериментальным данным рассчитаны численные значения параметров модели. Для режима сорбции значения параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры модели сорбции (режим S) для разных сорбентов

№ п/п	Тип сорбента	Параметр				
		$\beta_1$	$\beta_2$	$k_1$	$k_2$	$k_3$
1	B <sub>1</sub>	$1,91 \cdot 10^{-8}$	$2,01 \cdot 10^{-8}$	$10,58 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$1,16 \cdot 10^{-5}$
2	B <sub>2</sub>	$1,863 \cdot 10^{-8}$	$1,897 \cdot 10^{-8}$	$9,988 \cdot 10^{-5}$	$5,286 \cdot 10^{-5}$	$1,095 \cdot 10^{-5}$
3	B <sub>3</sub>	$1,687 \cdot 10^{-8}$	$1,77 \cdot 10^{-8}$	$9,34 \cdot 10^{-5}$	$4,94 \cdot 10^{-5}$	$1,024 \cdot 10^{-5}$
4	B <sub>4</sub>	$1,457 \cdot 10^{-8}$	$1,533 \cdot 10^{-8}$	$8,07 \cdot 10^{-5}$	$4,27 \cdot 10^{-5}$	$8,85 \cdot 10^{-6}$
5	B <sub>5</sub>	$1,234 \cdot 10^{-8}$	$1,298 \cdot 10^{-8}$	$6,83 \cdot 10^{-5}$	$3,62 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$
6	B <sub>6</sub>	$1,01 \cdot 10^{-8}$	$1,065 \cdot 10^{-8}$	$5,61 \cdot 10^{-5}$	$2,97 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-6}$
7	B <sub>7</sub>	$8,87 \cdot 10^{-9}$	$6,93 \cdot 10^{-9}$	$4,91 \cdot 10^{-5}$	$2,59 \cdot 10^{-5}$	$5,38 \cdot 10^{-6}$
8	B <sub>8</sub>	$7,01 \cdot 10^{-9}$	$7,38 \cdot 10^{-9}$	$3,88 \cdot 10^{-5}$	$2,06 \cdot 10^{-5}$	$4,26 \cdot 10^{-6}$

Для реализации алгоритмов среднего уровня с применением методов дискретной математики разработаны логико-формальные правила переключения режимов работы колонн.

$$\begin{aligned} \text{State}(A_{ij}, f) = S \wedge G_{ij}^{Ag}(k) = G_{\text{насыщ}}^{Ag}(k) \wedge G_{ij}^{At}(k) > G_{\mu}^{At}(B) \Rightarrow \\ \Rightarrow \text{State}(A_{ij}, f + 1) = R \wedge \text{State}(A_{i, j \oplus 1}, f + 1) = S \end{aligned} \quad (25)$$

Это правило гласит, что, если в колонне A<sub>ij</sub> во время процесса сорбции количество серебра, усвоенного колонной (свое для каждого цикла), достигает уровня насыщения (рассчитанного по модели) и при этом количество активных центров сорбента превышает граничное значение, задаваемое ЛПР, то колонна A<sub>ij</sub> переключается в режим восстановления технологических свойств, а следующая колонна того же уровня переключается в режим сорбции, согласно матрице смежности. Операция  $\oplus$  означает переход к следующей колонне того же уровня.

Логико-формальное правило переключения из режима сорбции S в режим десорбции DS имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{State}(A_{ij}, f) = S \wedge G_{ij}^{Ag}(k) = G_{\text{насыщ}}^{Ag}(k) \wedge G_{ij}^{At}(k) \leq G_{\mu}^{At}(B) \Rightarrow \\ \Rightarrow \text{State}(A_{ij}, f + 1) = DS \wedge \text{State}(A_{i, j \oplus 1}, f + 1) = S \end{aligned} \quad (26)$$

Логико-формальное правило переключения из режима восстановления R в режим сорбции S:

$$\text{State}(A_{ij}, f) = R \wedge G_{ij}^{At}(k) \geq G_H^{At}(k) \Rightarrow \text{State}(A_{ij}, f + 1) = S \quad (27)$$



Разработана матрица смежности, определяющая порядок переключения колонн (таблица 2).

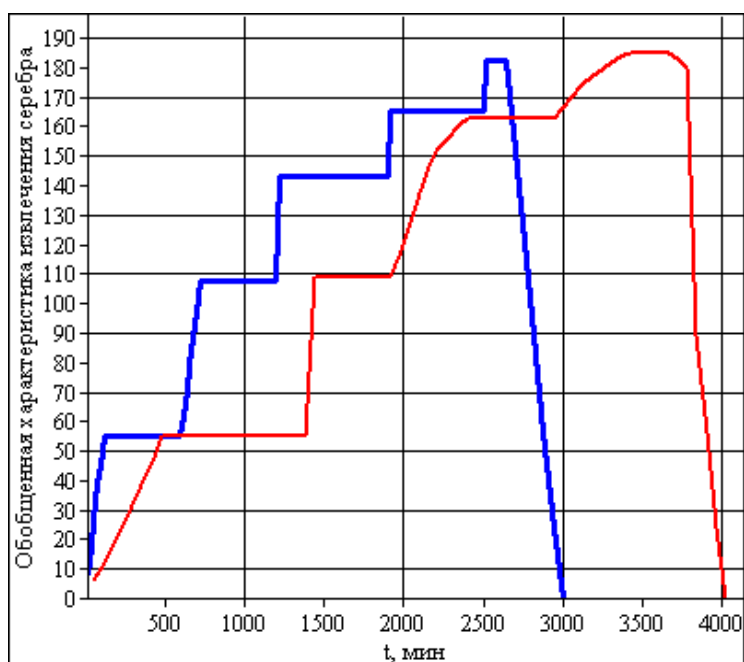
**Таблица 2. Последовательность переключения режимов работы колонн**

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Технологический цикл
1	S	0	0	0	0	S	0	S	0	I цикл k=1
2	R	S	0	0	0	S	0	S	0	
3	R	R	S	0	0	S	0	S	0	
4	R	R	R	S	0	S	0	S	0	
5	R	R	R	R	S	R	S	S	0	
1	S	R	R	R	R	R	S	S	0	II цикл k=2
2	R	S	R	R	R	R	S	S	0	
3	R	R	S	R	R	R	S	S	0	
4	R	R	R	S	R	S	R	S	0	
5	R	R	R	R	S	S	R	S	0	
1	S	R	R	R	R	S	R	R	S	III цикл k=3
2	R	S	R	R	R	S	R	R	S	
3	R	R	S	R	R	R	S	R	S	
4	R	R	R	S	R	R	S	R	S	
5	R	R	R	R	S	R	S	R	S	
1	S	R	R	R	R	R	S	R	S	IV цикл k=4
2	R	S	R	R	R	S	R	R	S	
3	R	R	S	R	R	S	R	R	S	
4	R	R	R	S	R	S	R	R	S	
5	R	R	R	R	S	S	R	R	S	
1	S	R	R	R	R	R	S	S	R	V цикл k=5
2	R	S	R	R	R	R	S	S	R	
3	R	R	S	R	R	R	S	S	R	
4	R	R	R	S	R	R	S	S	R	
5	R	R	R	R	S	S	R	S	R	
1	S	R	R	R	R	S	R	S	R	VI цикл k=6
2	0	S	R	R	R	S	R	S	R	
3	0	0	S	R	R	S	R	S	R	
4	DS	0	0	S	R	R	S	S	R	
5		DS	0	0	S	R	S	S	R	

В этой матрице введены понятия: режим (R, S, DS), фаза (характеризует режимы работы всех колонн системы) и цикл (включает в себя пять фаз).

Разработанные модели и процедуры их численных решений являются функциональной составляющей алгоритма автоматизированной системы управления. Численная реализация алгоритма представлена обобщенными характеристиками извлечения серебра двумя колоннами (рисунок 3).

Для решения задачи планирования в системе верхнего уровня разработаны статические статистические модели, позволяющие осуществлять прогноз технико-экономических показателей сорбентов.



**Рис. 3. Обобщенная характеристика извлечения серебра двумя колоннами за пять фаз первого цикла**

Разработанные модели позволяют осуществлять активное накопление информации о процессах, происходящих на участке биосорбции, повышают уровень наблюдаемости, идентифицируемости и управляемости и являются составной частью алгоритма автоматизированной системы управления участком биосорбции.

**В четвертой главе** поставлены, формализованы и решены задачи трехуровневой системы управления. Задача верхнего уровня подчинена планированию экономических показателей, характеризующих экономическую эффективность закупаемых для использования на участке биосорбции отходов от производства антибиотиков.

Физическая постановка задачи: определить количество закупаемых биосорбентов таким образом, чтобы затраты на закупку были минимальными при условии, что кинетические и физико-химические свойства этих материалов будут не менее нормативных.

Формализация этой постановки представлена в виде задачи линейного программирования.

Определить экстремум функционала:

$$F_1 = \sum_{j=1}^n w_j c_j x_{2j} \rightarrow \min_{x_{2j}}, \quad (29)$$

где  $j$  – номер типа сорбента,  $j = \overline{1, 6}$ ;  $w_j$  – доля  $j$ -го типа сорбента в общей закупке;  $c_j$  – стоимость  $j$ -го типа сорбента;  $x_{2j}$  – количество закупаемого сорбента  $j$ -го типа.

Задача решается в рамках статических ограничений, приведенных в диссертационной работе.

Для реализации дискретно-непрерывного управления на среднем уровне физическая постановка задачи имеет вид: реализовать процесс биосорбции серебра таким образом, чтобы максимально использовать активные центры плесневой культуры, при условии, что производительность (количество усвоенного сорбентом серебра) должна быть не менее заданного ЛПР уровня.

Формальная постановка задачи имеет вид:

$$F_2 = G^{\text{RCOOH}}(A_{ij}, T_{2,k}) + G^{\text{RSH}}(A_{ij}, T_{2,k}) + G^{\text{R}}(A_{ij}, T_{2,k}) \rightarrow \max_{G^{\text{RCOOH}}, G^{\text{RSH}}, G^{\text{R}}}. \quad (30)$$

При следующих ограничениях:

$$\frac{dG^{\text{Ag}}(A_{ij})}{dt} = \sum_{k=1}^{KЦ} G_k^{\text{Ag}}(A_{ij}, T_{1,k}) \geq z_7, \quad (31)$$

где  $z_7$  – заданный ЛПР уровень производительности.

$$G_k^{\text{Ag}}(A_{ij}, T_{1,k}) = \chi_{\text{Ag}}^{\text{RCOOH}} G^{\text{RCOOAg}}(A_{ij}, T_{1,k}) + \chi_{\text{Ag}}^{\text{RSH}} G^{\text{RSAg}}(A_{ij}, T_{1,k}) + \chi_{\text{AgNO}_3}^{\text{R}} G^{\text{RAgNO}_3}(A_{ij}, T_{1,k}) \geq z_8, \quad (32)$$

где  $z_8$  – заданный ЛПР уровень расходования плесневой культуры.

Для автоматического режима, реализуемого на нижнем уровне в реальном времени, сформулирована следующая физическая постановка задачи: определить режимы подачи серебросодержащего раствора таким образом, чтобы, при измеренной концентрации катионов серебра, усвоение серебра биосорбентом было максимальным.

Формальная постановка задачи представлена в виде:

$$F_3 = g_{\text{пр}}^{\text{Ag}^+} - \beta_1 F_1 \gamma_1 ([\text{Ag}^+]_1 - [\text{Ag}^+]_2) \rightarrow \max_{g_{\text{пр}}^{\text{Ag}^+}} \quad (33)$$

Задача характеризуется динамическими ограничениями вида:

$$\frac{dG_3^{\text{Ag}^+}}{dt} = \beta_2 F_2 \gamma_2 ([\text{Ag}^+]_2 - [\text{Ag}^+]_3) - g_1^{\text{Ag}^+} - g_2^{\text{Ag}^+} - g_3^{\text{AgNO}_3} \geq z_9 \quad (34)$$

Приведенные формальные постановки задач управления реализованы в алгоритмах автоматизированного и автоматического управления.

Функциональная модель системы управления, реализованная по стандарту IDEF0, приведена на рисунке 4.

Развернутая блок-схема основного алгоритма автоматических режимов управления, реализуемых на нижнем и среднем уровнях, с идентификатором-наблюдателем в контуре управления, представлена на рисунке 5.

Описание содержания блоков блок-схемы алгоритма:

1. Ввод данных об экономико-технических характеристиках сорбента.
  - 2.1. Ввод данных о кинетических и технологических свойствах сорбентов.
  - 2.2. Уравнения статистического прогноза показателей.
  - 2.3. Функционал цели – выход: вид и количество сорбента.
- 3.1. Численное решение определения вида сорбента.
- 3.2. Сопоставление численного решения функционала и выбор типа сорбента, отвечающего решению.
- 3.3. Приобретение сорбента.
4. Загрузка колонн сорбента.
  - 5.1. Ввод матрицы смежности.
  - 5.2. Задание 1-го цикла.
  - 5.3. Задание 1-й фазы.
- 6.1. Ввод данных о серебрсодержащем растворе.
- 6.2. Подача раствора, переключение клапанов колонн.
- 7.1. Прогноз сорбции в первой колонне фазы.
- 7.2. Прогноз сорбции во второй колонне фазы.
- 7.3. Прогноз сорбции в третьей колонне фазы.
- 8.1. Контроль насыщения.
- 8.2. Контроль количества фаз.
- 8.3. Переход к следующей фазе.
- 8.4. Контроль количества циклов.
- 8.5. Переключение на режим восстановления R.
- 8.6. Переключение на следующий цикл.
- 9.1. Прогноз восстановления в первой колонне фазы и цикла.
- 9.2. Прогноз восстановления во второй колонне фазы и цикла.

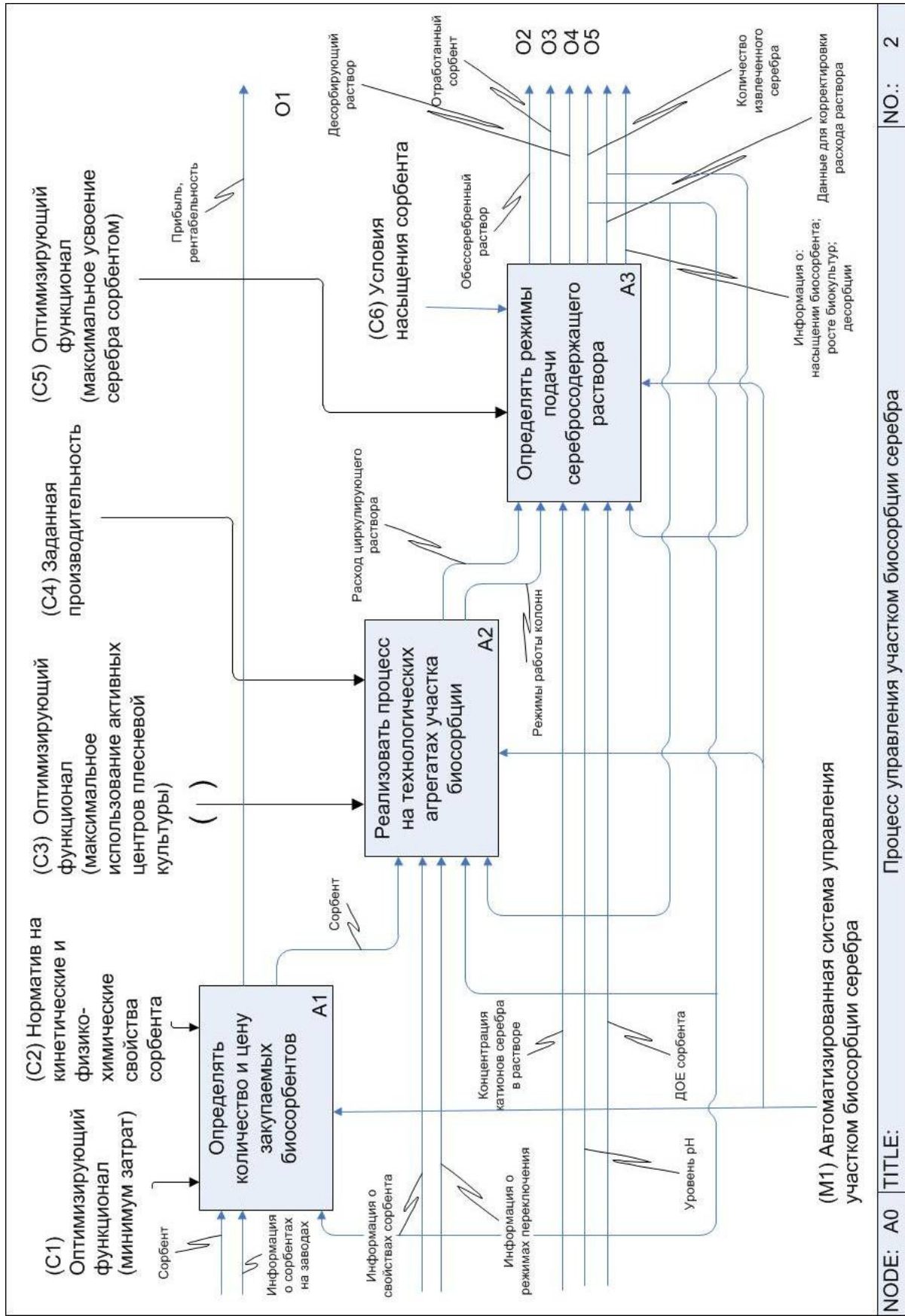
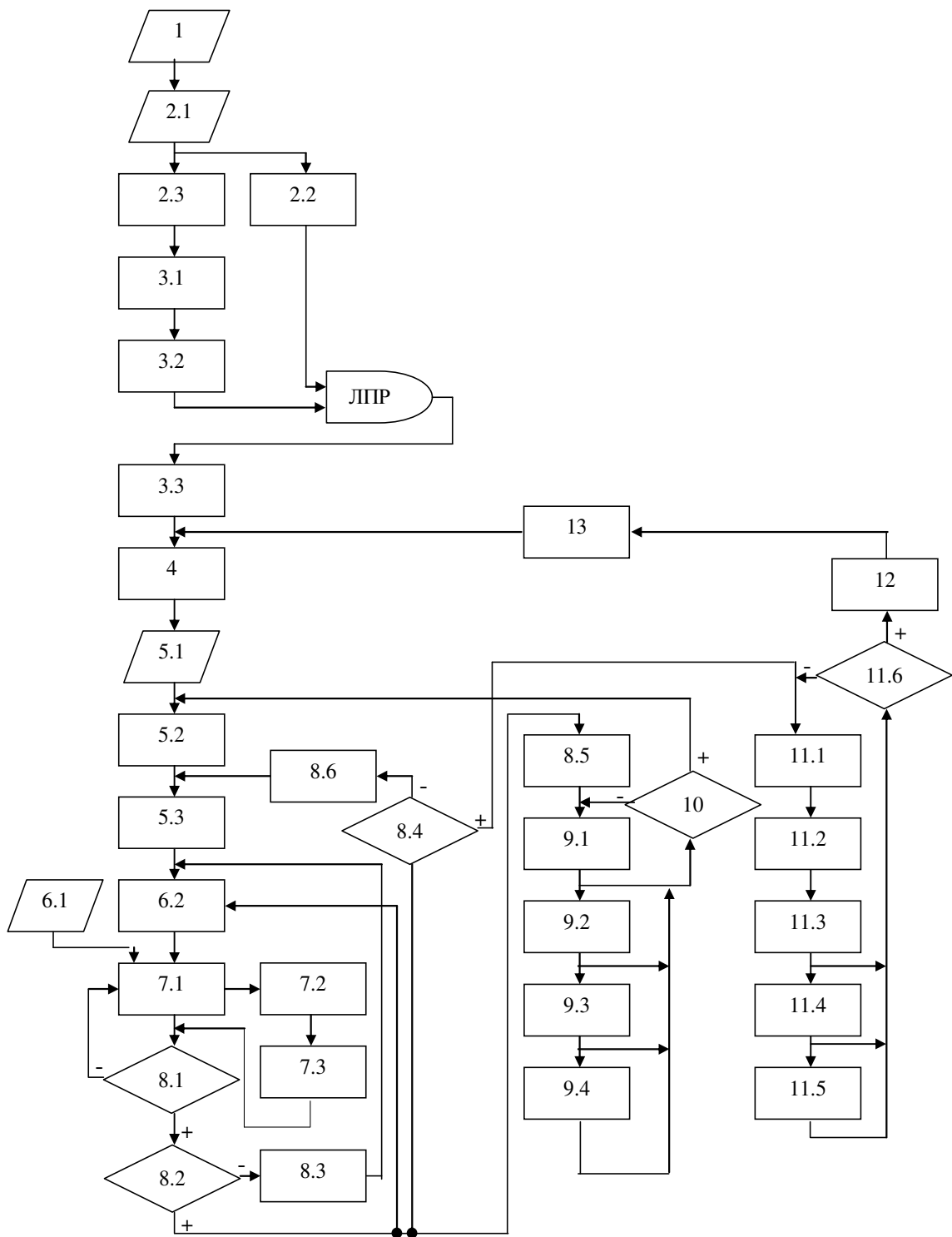


Рис. 4. Функциональная модель процесса управления участком биосорбции серебра

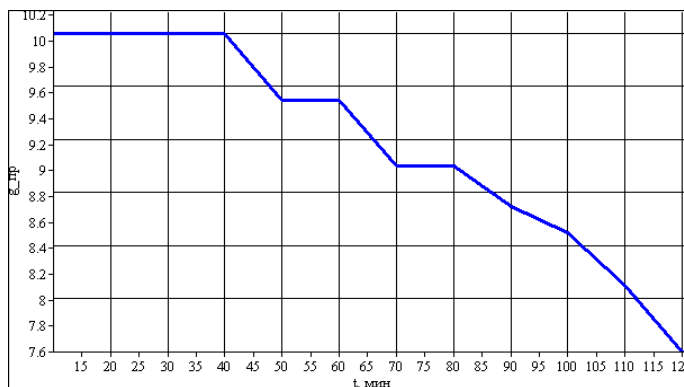


**Рис. 5. Блок-схема алгоритма функционирования автоматизированной системы управления**

9.3. Прогноз восстановления в третьей колонне фазы и цикла.  
 9.4. Завершение процесса восстановления. 10. Контроль насыщения процесса восстановления и завершения цикла. 11.1. Переключение колонн на режим десорбции. 11.2. Подача десорбирующего раствора. 11.3. Прогноз процесса

десорбции в первой колонне. 11.4. Прогноз процесса десорбции во второй колонне. 11.5. Прогноз процесса десорбции в третьей колонне. 11.6. Контроль насыщения процесса десорбции. 12. Выгрузка сорбента. 13. Идентификатор.

Оптимальные решения системы управления нижнего уровня, полученные при численном исследовании алгоритма автоматизированной системы управления при опытной эксплуатации, представлены на рисунке 6.



**Рис. 6. Оптимальные решения системы управления нижнего уровня по управлению расходом серебросодержащего раствора**

На основании алгоритма разработано специальное программное обеспечение в виде экспертного программного комплекса.

### **Заключение и общие выводы по работе**

В заключении отмечено, что цель работы, обозначенная как научное обоснование перспективности использования эксплуатационных и сорбционных свойств биосорбентов в процессах извлечения серебра, с разработкой на их основе математических моделей, алгоритмов и программ квазиоптимальной автоматизированной системы управления, обеспечивающей максимальную рентабельность процесса извлечения серебра из отработанных растворов, достигнута.

#### **Основные выводы.**

1. Выявлены закономерности процессов, сопровождающих извлечение серебра с использованием биосорбентов. Установлено, что не существует технических средств, позволяющих измерять количество активных центров сорбента. Научно обоснована необходимость

разработки математических моделей, обеспечивающих косвенные измерения количества активных центров сорбента.

2. Установлен нелинейный характер явлений в нестационарных условиях функционирования сорбционных колонн. Определены зависимости кинетики протекающих процессов от расхода раствора и времени его пребывания в колоннах.
3. Как средства активного накопления информации разработаны математические модели процесса извлечения серебра биосорбентами, что позволяет прогнозировать координаты состояния объекта в непрерывном режиме и вырабатывать управляющие воздействия.
4. Разработаны алгоритмы управления переключением режимов работы сорбционных колонн, реализующие дискретно-непрерывное управление.
5. Разработана структура и принципы функционирования системы управления эффективной заменой сорбента в сорбционных колоннах.
6. Доказано, что разработанные математические модели, алгоритмы и программное обеспечение квазиоптимальной автоматизированной системы управления обеспечивают наиболее эффективные показатели протекающих процессов, моменты завершения и переключения режимов работы колонн.
7. Опытно-промышленными испытаниями трехуровневой автоматизированной системы управления процессами биосорбции на Щелковском заводе вторичных драгоценных металлов подтверждено повышение рентабельности производства на 17% и извлечения серебра на 13%.

**Основные положения и выводы диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Стрижко Л.С., Лолейт С.И., Новаковская А.О. Динамическая модель процесса биосорбции серебра. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия, Вып. 4 (2009), М.: МИСиС, 2009, С. 55-60.
2. Салихов З.Г., Стрижко Л.С., Новаковская А.О. Нейросетевой подход к разработке прогнозирующих моделей в системах управления процессами биосорбции серебра [Электронный ресурс] // Управление



- большими системами: электронное научное периодическое издание. ИПУ РАН, 2012, №2. URL:<http://www.ubs.mtas.ru>
3. Стрижко Л.С., Лолейт С.И., Новаковская А.О. Исследование поведения серебра при переработке вторичных материалов. // Цветные металлы, 2009, № 10, С. 41-45.
  4. Криводубский О.А., Новаковская А.О. Математическая модель восстановления активных свойств сорбента. // Информатика, кибернетика и вычислительная техника: сб. научн. тр. Донецкого нац. технического ун-та., Вып. 10 (153), Украина, Донецк, 2009, С. 251-254.
  5. Strizhko L.S., Loleit S.I., Novakovskaya A.O. A Dynamic Model of the Process of Biosorption of Silver. // Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2009, Vol. 50, No. 4, pp. 377-382.
  6. Новаковская А.О. Структура трехуровневой системы автоматизированного управления процессом биосорбции серебра. // Гагаринские чтения: сб. тез. докл. 34-й Междунар. молодежной науч. конф. 1-5 апреля 2008 г., Москва: МАТИ, 2008, Т. 3, С. 206-207.
  7. Новаковская А.О. Идентификация процессов сорбции серебра. // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта: сб. науч. тр. Междунар. науч. конф. 18-22 мая 2009 г., Украина, Евпатория, 2009, Т.1, С. 96-97.
  8. Новаковская А.О. Критерии управления процессом биосорбции серебра. // XVII Туполевские чтения: Междунар. молодежной науч. конф. 26-28 мая 2009 г.: Труды конференции. Том III, Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009, С. 167-169.
  9. Новаковская А.О. Критерии оценки эффективности использования биосорбентов. // Системный анализ и информационные технологии: Материалы 12-й международной научно-технической конференции SAIT – 2010, 25-29 мая 2010 г., Украина, Киев, 2010, С. 296.
  10. Новаковская А.О. Нейронная сеть в управлении процессом биосорбции серебра. // Моделирование, идентификация, синтез систем управления: сб. тез. докл. Междунар. науч.-тех. конф. 13-20 сентября 2010 г., Москва-Донецк, 2010, С. 136-137.
  11. Novakovska A. Dynamical system of the control of the silver biosorption process. // The 18th Conference on applied and industrial mathematics: 14-17 October 2010, Iasi, Romania, P. 66.
  12. Новаковская А.О. Два уровня управления процессом извлечения серебра. // Гагаринские чтения: сб. науч. тр. 37-й Междунар. молодежной науч. конф., 5-8 апреля 2011 г., Москва: МАТИ, 2011, Т. 3, С. 174-176.
  13. Стрижко Л.С., Новаковская А.О. Функциональные особенности системы управления участком биосорбции серебра. // Моделирование, идентификация, синтез систем управления: сб. тез. докл. Междунар. науч.-тех. конф. 11-18 сентября 2011 г., Москва-Донецк, 2011, С. 145-146.