

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



На правах рукописи

УДК 004.896(043)

Криводубский Олег Александрович

РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОЙ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИЙ

Специальность 05.13.06 — Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (по отраслям)
(технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, доцент
Зори Сергей Анатольевич

Идентичность всех экземпляров
ПОДТВЕРЖДАЮ
Ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.024.04
кандидат технических наук, доцент



Донецк - 2020

Т.В. Завадская

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ, МЕТОДОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ В МЕТАЛЛУРГИИ ..	18
1.1 Проблемы и особенности разработки современных автоматизированных систем управления технологическими процессами и производствами в цветной и чёрной металлургии	23
1.2 Исследования проблем и технологических реализаций процессов сорбции как основных компонент, подверженных технико-экономической трансформации	31
1.3 Изучение существующих разработок математических моделей технологических процессов в гидрометаллургии, которые могут быть использованы для пополнения информации об объекте управления в условиях технико-экономической трансформации	34
1.3.1 Анализ метода параметрической идентификации, который может быть использован для пополнения информации об объекте управления	41
1.4 Анализ современных подходов и их применения для разработки систем управления второго уровня в планировании заказов и возможностей в условиях технико-экономической трансформации	42
1.4.1 Формализация ограничений в виде критериев задачи планирования. Адаптивные алгоритмы с использованием штрафных функций	45
1.4.2 Применение методов имитационного моделирования вариаций характеристик технологических процессов и производств	46
1.4.3 Применение генетических алгоритмов для решения оптимизационных задач управления производственными процессами	47
1.4.4 Планирование выполнения экономических задач предприятий методами теории расписаний	49
1.5 Реализации современных систем для решения задач планирования выполнения заказов в условиях информационной трансформации	50

1.5.1 Особенности и возможности информационных систем стандартов MRP и ERP	51
1.5.2 Использование информационных MES- и APS-систем для планирования производственных процессов	53
1.5.3 Роль DSS-систем при автоматизации планирования прикладных программ	54
1.6 Анализ приёмов моделирования процессов материального производства ..	58
1.7 Исследование методик моделирования затратного механизма на промышленном предприятии и их применения для систем второго уровня автоматизированного управления производством в условиях экономической трансформации	63
1.8 Выводы по разделу 1. Обоснование цели и задач исследования	73
РАЗДЕЛ 2 МЕТОДЫ ПОПОЛНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОБЪЕКТАХ УПРАВЛЕНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИЙ	
2.1 Обобщённое представление систем управления процессами и производствами	79
2.2 Представление систем управления процессами и производствами в функциональных пространствах	85
2.3 Задачи и функционалы управления предприятием	91
2.4 Постановка задач управления предприятием в условиях экономической и технологической трансформаций	103
2.5 Применение метода эквивалентных отображений в специальном математическом обеспечении систем управления производством	113
2.6 Выводы по второму разделу	126
РАЗДЕЛ 3 МЕТОДОЛОГИЯ И ПРАВИЛА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЁХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	

ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СЕРЕБРА ИЗ ГРЯЗНЫХ РАСТВОРОВ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИЙ	128
3.1 Математические модели нижнего уровня	130
3.1.1 Гипотеза о механизме процесса	130
3.1.2 Выбор типа математической модели и постановка задачи моделирования	133
3.1.3 Классификация переменных первого уровня	134
3.1.4 Математическая модель процесса биосорбции	136
3.1.5 Математическая модель регенерации технологических свойств сорбента	146
3.1.6 Математическая модель процесса десорбции	151
3.2 Математическая модель среднего уровня	159
3.3 Параметрическая идентификация математических моделей	165
3.3.1 Постановка задачи идентификации	165
3.3.2 Результаты параметрической идентификации	167
3.4 Математическая модель верхнего уровня	172
3.5 Постановка задачи управления верхнего уровня	178
3.6 Постановка задачи управления среднего уровня	179
3.7 Постановка задачи управления нижнего уровня	182
3.8 Представление двух уровней управления в виде управляемой нейросети ...	186
3.9 Разработка алгоритма системы управления нижнего уровня	191
3.10 Разработка алгоритма системы управления второго уровня	196
3.11 Разработка алгоритма системы управления верхнего уровня	199
3.12 Разработка функциональной структуры и блок-схемы алгоритма системы управления участком биосорбции серебра	200
3.13 Экономические показатели опытной эксплуатации системы управления участком биосорбции серебра	206
3.14 Выводы по третьему разделу	211
РАЗДЕЛ 4 МЕТОДОЛОГИЯ И ПРАВИЛА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СПЕЦИФИКУ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО	

ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕЛКОСЕРИЙНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ, ПОЗВОЛЯЮЩЕЙ НОРМАЛИЗОВАТЬ ПОСТАВКИ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ	216
4.1 Разработка структурной модели решения задач планирования	216
4.2 Постановка и формализация задачи оптимального планирования	229
4.3 Разработка аналитической модели расчёта времени обработки партий и трансформация функционала цели	232
4.3.1 Формирование раздела нормативной информации базы данных	234
4.3.2 Задание управляющих переменных – масс партий	234
4.3.3 Правило вычисления элементов матрицы переходов	235
4.3.4 Модель взаимосвязи между управляющими переменными и переменными состояниями партии	236
4.3.5 Разработка аналитической модели, характеризующей продолжительность технологической паузы	237
4.3.6 Аналитическая трансформация функционала цели	238
4.3.7 Разработка аналитической модели технологических ограничений	238
4.4 Разработка правил и алгоритма решения задачи оптимизации ПП	241
4.5 Разработка алгоритмов и программного обеспечения СППР	244
4.5.1 Разработка алгоритмов и ПО подсистемы принятия оптимальных решений при автоматизированном расчёте показателей ПП	246
4.5.1.1 Заполнение базы данных подсистемы планирования	246
4.5.1.2 Формирование базы знаний подсистемы планирования	248
4.5.1.3 Использование правил базы знаний при автоматизированной переработке информации	249
4.5.2 Разработка структурной модели, алгоритмов и ПО подсистемы оперативного управления	259
4.5.2.1 Разработка правил формирования базы данных подсистемы оперативного управления	260
4.5.2.2 Разработка правил наполнения базы знаний и их использования	

подсистемой оперативного управления	262
4.5.2.3 Разработка правил принятия оперативных решений	263
4.5.2.4 Решение задачи устранения «невязки» по массе в сменах	267
4.5.2.5 Использование правил принятия оперативных решений и перераспределения заданий при автоматизированном расчёте производственных заданий	270
4.6 Численное исследование решения задачи оптимального планирования и оперативного управления прокатным производством ПАО «ДМЗ»	279
4.7 Выводы по четвёртому разделу	282
РАЗДЕЛ 5 МЕТОДОЛОГИЯ И ПРАВИЛА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЕБЕСТОИМОСТЬЮ ПРОДУКЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИЙ	286
5.1 Разработка моделей прогноза себестоимости продукции	286
5.2 Постановка и формализация задачи управления себестоимостью	297
5.3 Синтез алгоритма системы управления себестоимостью продукции ОАО «АЗОЦМ»	299
5.4 Разработка программного обеспечения, опытно-промышленные испытания и численное исследование результатов	302
5.5 Выводы по пятому разделу	312
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	314
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	318
ПРИЛОЖЕНИЕ А ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	357

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В практике организации производства в странах СНГ предприятия авансируют налоги, что приводит к дефициту оборотных средств во второй половине планового периода. Поэтому предприятия вынуждены обращаться в банки за кредитными средствами, процентная ставка которых ещё более осложняет поддержание рентабельности производства. Эти проблемные вопросы особую остроту приобретают в отношении мелкосерийных (малообъёмных) производств, в которых размер серий неустойчив, сбыт ограничен нерегулярными заказами или договорами, а глубина планового периода, как правило, не превышает месяца. Перечисленные аспекты определяют актуальность задач принятия технико-организационных и управленческих решений для повышения эффективности работы предприятий мелкосерийного производства.

Мелкосерийные производства составляют важную компоненту различных отраслей промышленности и, в частности, металлургической (производство в ограниченных объёмах цветных металлов и сплавов путём переработки производственных отходов смежных отраслей). Это определяет целесообразность создания и применения моделей прогноза себестоимости, оборачиваемости средств в разработке производственной программы металлургического мелкосерийного предприятия и принятия решений с интервалом квантования в сутки. Применительно к данному объекту поставляемое в настоящее время технологическое оборудование комплектуется системами управления процессами извлечения серебра из электролизных растворов, причём заданные технологии рассчитаны на нормализацию свойств сырья, материалов и технологических режимов. Таким образом, поставляемые системы управления технологическими процессами и производствами реализованы как системы с полной информацией об объекте управления.

В условиях конкретных технологий полнообъёмная нормализация свойств применяемых сырьевых продуктов крайне затруднительна и, зачастую, вообще не

представляется возможной, что приводит к необходимости настройки, идентификации и пополнения информации об объекте управления, т.е. к реализации систем управления процессами и производствами с неполной информацией об объекте управления. Соответственно, поставляемое с технологическим оборудованием математическое и программное обеспечение таких систем необходимо адаптировать к нестационарным технологическим условиям, возникающим, в частности, при неоднородности свойств сырья. В этой связи проблема развития основ создания систем управления производственными процессами (включая организационные вопросы) в условиях информационной и технологической трансформаций (неопределённостей) является актуальной и имеет важное отраслевое значение для металлургических предприятий.

Степень разработанности темы исследования. Основные положения методик разработки математических моделей в системах управления производствами и технологическими процессами ввели Н.Д. Панкратова, В.М. Томашевский. Разработка алгоритмов многоуровневых систем и постановка задачи оптимального управления сформулированы А.А. Фельбаумом. Идентификация систем освещена в работах П. Эйкхофф. Общие вопросы принципов формирования информационных систем изложены в работе В.А. Дикарёва. Актуальные аспекты задач моделирования в системе планирования и управления на предприятии рассматривались в работе А.Д. Краснощёкова. Принципиальные положения оптимального управления многообъектными многокритериальными системами, структурный синтез и иерархическое уравнивание в интеллектуальных системах управления процессами и производствами рассматривались К.А. Пупковым и Е.М. Вороновым. Однако, результаты этих исследований не позволили решить многие актуальные проблемные вопросы, рассматриваемые в данной диссертационной работе, в связи с тем, что они не учитывают информационную и технологическую трансформации объектов управления.

Состояние темы исследований, анализ существующих проблем, оценка теоретической и практической значимости развития основ создания систем

управления производственными процессами в условиях информационной и технологической неопределённости, направлений и методик разработки новых математических моделей в системах управления производствами и технологическими процессами обсуждались в научно-исследовательских и учебных институтах: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»), в частности инжиниринговом центре «Литейные технологии и материалы» при НИТУ «МИСиС», ОАО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет» (ОАО «Гиредмет»), Всесоюзном научно-исследовательском и конструкторском институте «Цветметавтоматика» (ВНИКИЦМА), ФГБУ «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова» Российской академии наук (ИМЕТ РАН). Сотрудничество с этими научно-исследовательскими организациями выполнялось в рамках НИР, на основании которых разрабатывались АСУТП и АСУП на таких предприятиях, как АО «Щёлковский завод вторичных драгоценных металлов», ОАО «Комбинат Североникель», ООО «Запорожский титано-магниевого комбинат», ОАО «Чистые металлы», ОАО «Артёмовский завод обработки цветных металлов», а также со специалистом Российской Федерации в теории гидрометаллургических процессов д-ром техн. наук, проф. Л.С. Стрижко.

Цель и задачи исследования. Цель работы — развитие теории и практики управления технологическими процессами мелкосерийных производств в условиях информационной и технологической трансформаций на основе совершенствования методологии создания систем управления производственными процессами и принципов реализации управляющих функций.

Для достижения цели должны быть решены следующие задачи.

1. Провести анализ существующей методологии разработки математических моделей и алгоритмов функционирования систем управления иерархическими производственными структурами и выявить проблемные вопросы в контексте её практической реализации в условиях информационной и технологической трансформаций.

2. Обосновать методологические правила, которые позволяют выполнить обобщённую оценку эффективности управления предприятием и технологическими процессами (на примере мелкосерийного производства цветных металлов).

3. Обосновать и формализовать постановку задач экономико-производственных подразделений иерархической структуры управления и задач управления технологическими процессами в условиях информационной и технологической трансформаций предприятий и критерии оценки эффективности трёхуровневой системы управления технологическим процессом (на примере гидрометаллургического процесса извлечения серебра из загрязнённых растворов).

4. Разработать и исследовать математические модели и алгоритм функционирования трёхуровневой системы управления нестационарным процессом биосорбции серебра как системы с идентификатором в контуре управления, а также математические модели и методики расчёта показателей, составляющих алгоритм принятия решений на технологическом участке извлечения (сорбции) серебра.

5. Обосновать критерии постановки и методы корректного решения задачи оперативного управления величиной себестоимости продукции предприятия мелкосерийного производства и принципы формирования алгоритма функционирования системы управления производственными процессами в условиях информационной и технологической трансформаций.

6. Выполнить техническую реализацию результатов исследований на уровне промышленных испытаний и опытно-промышленной эксплуатации объекта и дать оценку эффективности предложенных технических и организационных решений.

Объект исследования — система управления процессами и производствами.

Предмет исследования — методы, модели и технологии математического моделирования, алгоритмы функционирования систем управления

технологическими процессами мелкосерийного производства в условиях трансформации возмущающих факторов.

Научная новизна.

1. Получила дальнейшее развитие методология представления систем управления процессами и производствами в трёхортном пространстве, основанная на комплексном учёте технико-экономических характеристик многоуровневых объектов управления, что позволяет создать структуру интегрированной системы управления процессами и производствами и обеспечить её эффективное функционирование в условиях информационной и технологической трансформаций процессов и производства.

2. Впервые дано обоснование и формализация правил создания трёхуровневой системы управления процессами и производствами, которыми предусмотрено комплексное решение технологических и экономических задач, что позволяет повысить экономические показатели технологического процесса на производственном участке электролизного извлечения серебра из растворов.

3. Обоснованы новые модели прогноза плановых показателей мелкосерийного производства, отличающиеся функцией учёта расчётных показателей заказов на сырьевые материалы и повышающие эффективность их переработки в производстве, что позволяет принимать решения в условиях технологической трансформации.

4. Впервые предложена методология обоснования критериев оценки качественных показателей функционирования системы управления величиной себестоимости продукции в условиях прокатки цветных металлов и сплавов, содержащая процедуру оценки оперативной информации о технологических и экономических показателях производства в динамике трансформации деятельности предприятия.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в раскрытии закономерностей построения структуры и разработки алгоритмов функционирования многоуровневой системы управления процессами производства и технико-экономическими показателями работы предприятия в

условиях динамично изменяющихся возмущающих факторов, что нашло отражение в развитии методологии принятия технических и организационных решений по достижению оптимальных показателей при управлении процессами и производствами в условиях информационной и технологической трансформаций.

Практическая значимость результатов исследования.

Созданные и апробированные динамические математические модели и численные процедуры их решения в контексте проблематики эффективного управления процессами и производствами в условиях информационной и технологической трансформаций предприятий подтвердили корректность обоснований в области совершенствования методов управления.

Опыт их реализации в промышленности на примере создания и эксплуатации трёхуровневой системы управления процессом биосорбции серебра подтвердил возможность достижения оптимальных технико-экономических характеристик производственного процесса и допустимость распространения обоснованных методов управления на мелкосерийные производства в условиях информационной и технологической трансформаций.

Реализация выводов и рекомендаций работы подтверждается:

– внедрением результатов исследований в виде рекомендаций по оптимизации процессов снабжения и обеспечения производственных участков при апробации разработанной системы «Планирование мелкосерийного производства» для формирования производственной программы предприятия: заложенный в алгоритме системы блок идентификации позволил адаптировать алгоритм системы к любому аналогичному мелкосерийному производству; подтверждена адекватность математической модели; оценка экономической эффективности за 3 месяца работы составила около 18.000 тысяч долларов (акт опытно-промышленной эксплуатации от 19.04.2011 г. выдан ООО «ВЕЛДЕ»);

– внедрением результатов исследований диссертационной работы в виде алгоритма и программного обеспечения системы управления себестоимостью сложных инженерных решений при планировании производственной программы

цехов предприятия: представленная в работе математическая модель позволила осуществить прогноз экономических показателей и расчёт производственной программы с погрешностью не более 0,5%; формализованная постановка задачи позволила получить оптимальные решения производственных заданий, которые оцениваются экономическим эффектом в размере 8.000 тысяч долларов за месяц (акт опытной эксплуатации от 05.12.2013 г. выдан ООО «Оптимум инжиниринг»);

– внедрением в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (справка №29-28/16 от 25.12.2020 г.: результаты работы внедрены в учебный процесс при чтении курсов лекций по дисциплинам «Системный анализ и проектирование компьютерных информационных систем» и «Общая теория системного управления» для студентов направлений подготовки 09.03.04 «Программная инженерия» и 09.03.02 «Системы автоматизированного проектирования», что отражено в учебно-методической документации указанных дисциплин);

– внедрением в научно-исследовательскую работу ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (справка №29-27/16 от 25.12.2020 г.: приняты к внедрению при выполнении научно-исследовательской госбюджетной работы кафедры программной инженерии Н-2020-14 «Усовершенствование средств инженерии программного обеспечения для актуальных классов IT-приложений» в 2020 г.).

Также имеются акты опытно-промышленных испытаний результатов исследований работы в ООО «Оптимум инжиниринг» и ООО «ТПС СЕРВИС».

Методологии и методы исследования.

В работе приведены выводы и заключения, основанные на функциональном анализе, применении численных методов, методов идентификации, математической статистики, теории дифференциальных уравнений, методов поиска экстремума, теории функций действительной переменной, теории оптимального управления.

Положения, выносимые на защиту.

1. Установлено, что в условиях технологической трансформации предприятия в целях достижения оптимальных технико-экономических показателей его работы необходимо сформировать правила, учитывающие возможности принятия решений, направленных на улучшение производственных и экономических показателей себестоимости продукции, стабилизирующие плановые задания в многоуровневой организации управления предприятием.

2. Доказано, что в условиях технологической и информационной трансформаций факторов, воздействующих на технологический процесс сорбции серебра, создание трёхуровневой системы управления процессами технологии извлечения серебра из электролизных растворов позволяет применять в качестве извлекающих элементов отходы производства антибиотиков, что повышает показатели экономической эффективности такого производства.

3. Установлено, что обоснованные и предложенные в работе правила, математические модели прогноза себестоимости и алгоритм функционирования системы управления себестоимостью прокатного производства в условиях информационной и технологической трансформаций предприятий позволяет сократить затратный механизм не менее, чем на 23%.

4. Доказано, что в условиях нестабильности физических и физико-химических характеристик сырьевых продуктов, характеризующих технологическую трансформацию, применение обоснованных и предложенных в работе методов и правил в отношении построения систем автоматического управления производственными процессами даёт возможность достигать оптимальные технико-экономические показатели мелкосерийного производства.

Степень достоверности и апробация результатов.

В работе приведены оценки адекватности прогнозируемых показателей и результатов управления, подтверждённые результатами опытно-промышленных испытаний.

Полученные результаты, положения и выводы отвечают требованиям паспорта специальности 05.13.06 — Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки), в частности: п.3 «Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т.д.»; п.4 «Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизации»; п.6 «Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления»; п.8 «Формализованные методы анализа, синтеза, исследования и оптимизации модульных структур систем сбора и обработки данных в АСУТП, АСУП, АСТПП и др.»; п.10 «Методы синтеза специального математического обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистему АСУТП, АСУП, АСТПП и др.»; п.11 «Методы планирования и оптимизации отладки, сопровождения, модификации и эксплуатации задач функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включающие задачи управления качеством, финансами и персоналом».

Апробирование диссертации осуществлено на следующих конференциях:

Международная молодёжная научная конференция «XXV ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ», Москва, 1999 г.;

X Международная научно-техническая конференция, Донецк, Институт прикладной математики и механики Национальной академии наук Украины (ИПММ НАНУ), 2007 г.;

Международная научно-техническая конференция «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2007», Харьков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» (ХАИ), 2007 г.;

XI Международная научно-техническая конференция «Моделирование, идентификация, синтез систем управления» МИССУ, Канака, 2008 г.;

X Международная научно-техническая конференция «Системний аналіз та інформаційні технології», Киев, Киевский политехнический институт им. И. Сикорского (КПИ), 2008 г.;

Общеинститутская научная конференция, Донецк, Донецкий институт автомобильного транспорта (ДИАТ), 2008 г.;

XII Международная научно-техническая конференция «Моделирование, идентификация, синтез систем управления» МИССУ, Канака, 2009 г.;

XIII Международная научно-техническая конференция «Моделирование, идентификация, синтез систем управления» МИССУ, Канака, 2010 г.;

XIV Международная научно-техническая конференция «Моделирование, идентификация, синтез систем управления» МИССУ, Канака, 2011 г.;

XV Международная научно-техническая конференция «Моделирование, идентификация, синтез систем управления» МИССУ, Канака, 2012 г.

Личный вклад соискателя. Все основные идеи, положения, теоретические и практические результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и её реализации, постановке целей и задач работы, в выборе методов и направлений исследований, методов моделирования, идентификации, синтеза алгоритмов систем управления производственными процессами, выполнении теоретических, аналитических и экспериментальных исследований, разработке правил, положений и методических рекомендаций по использованию результатов работы, а также их внедрению в производство.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 40 научных работах, в том числе: 4 работы – в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий, утверждённых ВАК ДНР, 19 работ – в изданиях, входящих в перечень научных изданий, утверждённых ВАК Украины, 16 – по материалам конференций, 1 – в других изданиях.

Структура и объем диссертации. Общий объем диссертации состоит из 360 страниц машинописного текста, из них 356 страниц основного текста, и состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 361 источника и одного приложения. Работа иллюстрирована 42 рисунками и 47 таблицами.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ, МЕТОДОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ
ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ В МЕТАЛЛУРГИИ

В соответствии с государственными программами роста производительных сил, СНГ осуществляет закупку современных производств. Закупаемые многоуровневые производства включают в себя совокупность вычислительных комплексов, на которых реализованы взаимосвязанные системы управления производствами. На верхних уровнях (производство, цех) в автоматизированном режиме решаются задачи управления экономического и организационно-технического характеров (АСУП), исходная информация для которых поступает с нижних уровней (участок, технологические агрегаты) автоматически по вычислительной сети с реализованными системами управления производствами. Подразделения каждого уровня рассматриваются как объекты систем управления. Техническая реализация систем управления всех объектов (подразделений) осуществляется на разветвлённой вычислительной сети, содержащей компьютеры различной комплектации и конфигурации, зависящих от сложности решаемых задач и объёма перерабатываемой информации. На нижних уровнях (технологические агрегаты) решаются задачи управления технологическими процессами (АСУТП), функционирующие в автоматическом режиме.

Функционирование перечисленных систем управления в поставляемых производствах рассчитано на следующих признаках:

- 1) фиксированные на плановый период (месяц) позиции портфеля заказов;
- 2) прогрессивная система налогообложения;
- 3) нормализованные по физическим и физико-химическим показателям сырьевые продукты;
- 4) нормализованные режимы работы технологического оборудования.

Перечисленные экономические, организационно-технические и технологические особенности закупаемого производства в их специальном математическом и программном обеспечении систем управления процессами и

производствами реализованы в фиксированном виде. Такая реализация представлена как система управления с полной информацией об объекте [1].

В реальных условиях деятельности предприятий в странах СНГ следует отметить нарушение перечисленных признаков:

1) колебания позиций портфеля заказов в пределах одного планового периода (месяц) и между плановыми периодами;

2) оплата налогов по итогам предыдущего планового периода;

3) разнообразие и разброс физических и физико-химических показателей сырьевых продуктов;

4) нарушение технологических и нормативных показателей режимов работы оборудования.

Нарушение первого признака приводит к необходимости непрерывной корректировки организационно-технических показателей плановой деятельности предприятия как составляющей специального математического обеспечения АСУП.

Второй пункт нарушений связан с тем, что, если предыдущий плановый период (месяц) был более эффективен в отношении выпуска продукции и, соответственно, доходов, то оплата налогов в текущем плановом периоде, который менее эффективен по доходам, приводит к недостатку оборотных средств и обращению к кредитам. Такая ситуация определяет необходимость корректировки финансовых показателей планового периода и их пересчёта в программах АСУП.

Отсутствие нормализации физических и физико-химических свойств сырьевых продуктов приводит к нарушению технологических режимов, которые не позволяют осуществлять автоматический режим работы АСУТП и управление реализуется в автоматизированном режиме, что приводит к ухудшению экономических показателей производства и отображается на всех уровнях управления, в том числе в АСУП.

Перечисленные особенности нарушений признаков экономической и технологической деятельности предприятия, отражённых в показателях,

характерен для систем управления с неполной информацией об объектах управления [1].

Пополнение информации возможно в активном или пассивном режиме. Так как трансформация экономических и технологических показателей варьируется в каждом плановом периоде, возможный вариант пополнения информации предложен автором [2] в системах с идентификатором в контуре управления, который позволяет улучшать показатели деятельности предприятия.

Перечисленные особенности информационной, экономической и технологической трансформаций показателей и определяют актуальность исследования, предназначенного для определения путей совершенствования специального математического и программного обеспечения многоуровневых систем управления, реализованных на закупаемых производствах.

Целью данной работы является формирование методологии пополнения информации об объектах управления при экономических и технологических флуктуациях показателей в многоуровневых системах управления, поставляемых с современными производствами, которая позволит повысить эффективность принимаемых решений.

В соответствии с целью исследования, сформированной в данной работе, необходимо проанализировать существующие в мировой практике научно-исследовательские работы и возможные результаты их эффективного использования для решения задач пополнения информации в среде информационной, технологической, планово-производственной и экономической трансформаций.

Исследованию подлежат:

- 1) компьютерные и программные средства, пакеты прикладных программ и возможности их использования для корректировки в среде информационной трансформации систем управления процессами и производствами;
- 2) технологические особенности гидрметаллургического процесса извлечения серебра из грязных растворов и варианты учёта этих особенностей для

решения задач разработки систем управления процессами (АСУП) в среде технико-экономической трансформации;

3) функциональные особенности взаимодействия в последовательной группе цехов (второй уровень) при решении задач планирования (АСУП) в условиях технико-экономической трансформации;

4) возможности решения задач оперативного управления себестоимостью производимой продукции в среде экономической трансформации.

Современной тенденцией в решении задач управления является использование информационных технологий (ИТ, IT) как способа повышения эффективности производства. Согласно прогнозам кампании Allied Market Research, к концу 2020 года мировой рынок только одного типа IT-систем управления предприятием (ERP-систем) достигнет объёма в 41,69 млрд. долларов при среднегодовом темпе роста в 7,2% [3, 4]. В настоящее время классы таких систем быстро расширяются – в зависимости от решаемых задач, выделяют классы MRP (Material Requirements Planning), ERP (Enterprise Resource Planning), MES (Manufacturing Execution System), APS (Advanced Planning and Scheduling), SCM (Supply Chain Management) и др., однако все они представляют собой интегрированные программные комплексы для решения бизнес-задач на верхнем иерархическом уровне управления предприятием [5, 6, 7]. Общие вопросы принципов формирования информационных систем подробно изложены в [8]. Широкое развитие получили системы поддержки принятия решений – СППР или DSS (Decision Support System), функцией которых является автоматизация переработки информации и расчёт результатов управленческих решений для плановых подразделений предприятий [9, 10]. Использование облачных технологий в реализации IT-систем и развитие функции доступа с мобильных устройств повышает доступность таких систем для небольших предприятий [11, 12]. В результате расширения клиентской базы появляется множество специфических задач управления, требующих разработки моделей и методов автоматизации их решения [13, 14], в связи с чем возрастает потребность

теоретических исследований в области математического моделирования и теории оптимизации.

Многообразие методов ИТ, используемых при решении задач планирования производства, обусловлено особенностями, свойственными большинству таких задач. В современной теории управления принято объединять множество задач планирования на предприятии в иерархическую систему для разработки единой автоматизированной ИТ-системы управления предприятием (АСУП). На верхнем уровне иерархической системы осуществляется управление всем предприятием, как единым технологическим комплексом [15, 16, 17]. Реализации АСУП в настоящее время выполняются в виде систем различных классов (MRP, ERP, MES, APS, DSS и др.), являющихся инструментарием управления предприятием в планово-производственных службах [18, 19, 20]. В целом, предприятия испытывают дефицит оборотных средств в середине планового периода, что приводит к необходимости кредитования при нарушении производственной программы. Поставка сырьевых продуктов с различными физическими свойствами вызывает нарушения нормального функционирования поставляемого программного обеспечения систем управления предприятия, что приводит к необходимости принятия оперативных решений в нестационарных условиях технологий. Перечисленные особенности определяют актуальность разработки математических моделей, систем управления с идентификатором в контуре управления, которые позволяют принимать эффективные управленческие решения при перечисленных флуктуациях экономического, технологического и информационного режимов функционирования объектов управления.

В диссертационной работе рассматривается один из классов задач планирования производства на верхнем уровне АСУП – определение оптимальной последовательности выполнения заказов и разработка соответствующей прикладной программы (ПП). В данном разделе необходимо рассмотреть современные подходы к решению задач планирования и оперативного управления, а также достоинства и недостатки существующих информационных систем для решения таких задач.

Себестоимость продукции является одним из важнейших показателей, характеризующих и определяющих работу промышленного предприятия. В условиях современной экономики, для которой характерны значительное падение объемов производства и рост цен на энергоресурсы, нестабильность цен на рынках и низкая платёжеспособность потребителей, вопросы прогноза и управления себестоимостью вышли на первый план при решении производственных задач на предприятии. В сложившихся условиях необходимо сформировать новые подходы к вопросам прогноза и управления себестоимостью продукции, предварительно изучив результаты имеющихся работ в данной области.

На промышленном предприятии себестоимость продукции формируется в процессе превращения материальных ресурсов в готовую продукцию, поэтому в рамках изучения и анализа существующих методик и алгоритмов моделирования себестоимости необходимо провести исследование по следующим направлениям:

- приёмы моделирования процессов материального производства;
- методики моделирования затратного механизма.

1.1 Проблемы и особенности разработки современных автоматизированных систем управления технологическими процессами и производствами в цветной и чёрной металлургии

Одной из проблем разработки автоматизированных систем управления процессами и производствами является слабая наблюдаемость характеристик объектов управления, нелинейный характер их взаимосвязей и нестационарность протекающих процессов. Слабая наблюдаемость свойственна объектам с неполной информацией об их характеристиках.

Современный уровень развития средств вычислительной и микропроцессорной техники позволяет решать задачи управления с неполной информацией о характеристиках объекта управления, в которых осуществляется активное накопление и обработка информации [1]. Возможности

микропроцессорной техники позволяют реализовывать этот процесс с использованием идентификатора-наблюдателя [2].

Наибольшую сложность представляют собой разработки систем управления нестационарными процессами, которые требуют применения современного математического аппарата, позволяющего оценивать состояние объекта в режиме реального времени [21, 22]. Алгоритмы таких систем содержат динамические математические модели, которые выполняют функции косвенных измерений и пополнения информации о характеристиках объекта управления.

Разработка автоматизированных систем управления производствами требует постановок задач в различных аспектах: информационном, техническом, математическом. В современной практике не существует единого подхода к решению подобных задач и специализированного программного продукта, допускающего адаптацию к нуждам конкретных предприятий [23].

Достаточно проблематичной является разработка систем управления объектами с различным временным характером протекающих явлений, осложненных сочетанием дискретных и непрерывных значений показателей. Решение задач управления такими объектами предполагает реализацию процедур декомпозиции [24, 25] с применением соответствующих методов анализа [26, 27]. Принципы структурной декомпозиции предполагают возможность выделения различных уровней, а функциональной декомпозиции — многокритериального оценивания задач управления каждого уровня [28]. Это позволяет решать задачи согласованного управления с соответствующей иерархией и условиями соподчинения решений каждого уровня.

Современные аспекты и методы разработки систем управления сложными технологическими объектами [29] включают в себя формализацию решений задач автоматизации на всех иерархических уровнях. При этом управляющие воздействия, вырабатываемые на верхнем уровне, определяют задания для всех нижележащих уровней [30, 31]. Решение проблемы неполноты информации о характеристиках объекта управления предполагает разработку адаптивных

алгоритмов системы управления производствами, способных осуществлять подстройку параметров, характеризующих объект, в процессе управления.

При многоуровневой организации систем управления процессами и производствами, на верхнем уровне, как правило, решаются задачи управления производством. Исполнение этих решений осуществляется человеком – лицом, принимающим решения (ЛПР). Интервалы квантования решений этого уровня обычно составляют смену или сутки. Такие решения являются заданием для систем соподчиненных уровней, реализующих управление дискретными и непрерывными технологическими процессами. В современных задачах оптимального управления это реализуется с применением методов принятия решений [32] и конструктивных методов [33]. Подобный подход позволяет разделять по времени решения, принимаемые в многоуровневой системе, не допуская запаздывания в реализации управляющих воздействий.

Переключение режимов агрегатов, включённых в технологическую схему, дискретно. Сами технологические процессы реализуются непрерывно. Сочетание перечисленных особенностей [34] осложняется плохой наблюдаемостью и нестационарностью непрерывных процессов, многомерностью характеристик и слабым согласованием задач управления дискретными и непрерывными процессами. Это определяет проблематику разработки современных систем управления производствами, учитывающих перечисленные особенности.

Методика разработки автоматизированных систем управления производствами предполагает наличие оптимальных режимов работы. При отсутствии согласования решений задач различных уровней, оптимальное управление технологическими процессами запаздывает, что приводит к ухудшению экстремальных значений показателей эффективности процесса.

В основе разработки систем управления производствами лежат методы системного анализа [35, 36, 37] и основные положения теории оптимального управления [38, 1]. Использование этих методов позволяет реализовывать постановки и формализацию задач оптимального управления, а в иерархических многоуровневых системах управления – вопросы согласования решений каждого

уровня. При этом предполагается формирование целевой функции управления на каждом уровне, определение системы ограничений и, соответственно, выбор численных методов решения оптимизационных задач. Это позволяет избежать противоречий между решениями каждого уровня. Одной из проблем, возникающих при разработке автоматизированных систем управления производствами, является согласование скорости сходимости процедур поиска экстремальных значений и скорости изменения характеристик объекта управления. Реализованное в вычислительных процедурах применение классических методов оптимизации, использующих необходимые и достаточные условия существования экстремума, для быстротекущих процессов не дают возможности своевременно определять значения управляющих воздействий, что приводит к запаздыванию управления. В подобных случаях применяются алгоритмы, определяющие управляющие воздействия в некоторой области, достаточно близкой к экстремуму. То есть, такие алгоритмы позволяют вырабатывать квазиоптимальные решения.

Технологические процессы в металлургии и, в частности, в гидрометаллургии России и стран СНГ характеризуются неопределённостью значений входных переменных. Им присущи текущие изменения концентраций, химического и гранулометрического состава сырья и полупродуктов, различие в свойствах энергоносителей. Исходя из этого, реализация автоматизированных систем управления производствами сталкивается с проблемой отсутствия стабилизации входов, что определяет необходимость создания качественных математических моделей, для которых значения входных показателей процесса являются начальными условиями, в соответствии с последними математические модели позволяют оценивать нестационарные изменения состояний объектов управления – технологических агрегатов [38].

В гидрометаллургическом процессе извлечения серебра из грязных растворов предназначен производственный участок, состоящий из галереи колонн, заполненных селективными к серебру элементами (сорбентом). Через колонны, включённые последовательно, пропускается раствор, содержащий

серебро и различные примеси (растворённые в азотнокислом растворе), при этом в гранулах сорбента усваивается только серебро, очищая раствор от примесей, после чего чистый раствор возвращается в технологический процесс электролиза низкопробных анодов серебра. Этот сорбент изготавливается на химических предприятиях и характеризуется высокой стоимостью (порядка 20 тыс. долларов за тонну). В течении 30-35 циклов гранулы истираются и их необходимо замещать. Такие затраты на процесс извлечения серебра из грязных растворов сопоставим со стоимостью серебра, что характеризует технологическую трансформацию данного гидрометаллургического процесса.

Исследования учёных-гидрометаллургов показали, что в качестве альтернативы синтетически реализованных дорогих сорбентов могут быть применены отходы плесневых культур, из которых фармацевтическая промышленность получает антибиотики, т. е. биосорбенты. Стоимость последних не превышает 200 долларов за тонну. Замена синтетических сорбентов на биосорбенты является одним из аспектов технико-экономической трансформации. Биосорбенты могут быть использованы не более 12 циклов, после чего их сорбционная способность уменьшается на 25–30%. Кроме того, в активной фазе извлечения серебра из раствора биосорбент работает не более 2-х часов, после чего необходимо выдержать технологическую паузу в течение 8-ми часов, после чего сорбционная способность сорбента восстанавливается. Данные особенности технологической трансформации определяют необходимость трансформации структуры участка сорбции и технической реализации процессов, происходящих на участке извлечения серебра из грязных растворов.

Согласно определениям системного анализа [34] участок биосорбции серебра характеризуется как сложная техническая система. Под сложной технической системой понимается материальный целостный объект, предназначенный для выполнения конечного множества функций в заданных условиях, технически реализованный на основе упорядоченного по номенклатуре конечного множества функционально взаимосвязанных, структурно

взаимосвязанных функциональных технических систем с технологическим взаимодействием.

Реализация управления сложной технической системой основывается на структурно-функциональном анализе, дающем возможность определить необходимый уровень потенциальных возможностей функциональных элементов сложной системы и степень взаимосвязей и взаимозависимостей ее функциональных элементов для достижения заданных целей функционирования системы в реальных условиях.

Процедура структурно-функционального анализа включает в себя:

1. Определение полного набора функций, обеспечивающих достижение заданных целей в конкретных условиях функционирования.

2. Определение рациональной иерархической структуры системы, обеспечивающей достижение заданной цели при известных ограничениях на ресурсы.

3. Определение функционально полного набора элементов для каждого иерархического уровня.

4. Определение рациональных характеристик функциональных элементов для каждого иерархического уровня.

5. Определение условий достижения заданных характеристик функциональных элементов для каждого иерархического уровня.

Содержание процедур структурно-функционального анализа [34], отображённое на технологическую и организационную структуру участка биосорбции серебра, приведённую в первом разделе данной работы, позволяет выделить три уровня управления участком, сформировать полные наборы функций, предназначенных для управления иерархическими элементами структуры. Функциональные особенности процессов, протекающих в серии колонн, должны быть отражены в виде математических моделей каждого уровня и условий достижения заданных характеристик режимов работы колонн. На основе этих принципов возможно определить рациональные характеристики приобретения и использования биосорбентов различных типов, а также правила

переключения режимов колонн, подчинённые заданным условиям экономической эффективности применения биосорбентов для извлечения серебра из отработанных растворов.

Как следует из анализа задач управления и принятия решений, на участке биосорбции серебра, включающем в себя последовательную серию сорбционных колонн, управление этим объектом должно включать в себя различные уровни, подчинённые методологии иерархических систем [36, 39]. Общие вопросы решения задач управления процессами на участке биосорбции серебра подчинены приёмам и методам системного анализа [40, 41, 35].

Современные аспекты реализации систем управления производствами позволяют рассматривать математические модели и алгоритмы как совокупность и последовательность операций в искусственных нейросетях. Сформулированы основные положения описания последовательности создания и обучения нейросетей [42, 43, 44], отображение особенностей системы управления в виде нейронов, правила обучения нейросетей с оценкой синаптических весов. Для управления нестационарными объектами используются динамические нейронные сети [45, 46]. Эти положения могут быть использованы при разработке системы управления производствами. Принципы практической реализации систем управления включают в себя следующие: анализ характеристик объекта управления, анализ наблюдаемости и управляемости, постановку и формализацию задач управления, разработку математических моделей, численные процедуры и алгоритмы [47]. Реализованное на этих принципах управление предоставляет возможность: минимизировать вложения, обеспечивать защиту окружающей среды, сокращать издержки производства, улучшать характеристики процесса.

Техническая реализация систем управления процессами и производствами включает в себя разработку алгоритмов специального математического и программного обеспечения системы. Разработка структурных и функциональных схем систем управления предприятия, оценка экономической эффективности разработок подчинена стандартам [48]. Современные принципы реализации

систем управления производствами предусматривают интеллектуализацию функциональных особенностей систем. Теоретические аспекты автоматизации производственных процессов включают в себя этапы разработки систем, структурные составляющие и содержание этапов [49, 50]. Как составная часть решения задач проектирования систем управления рассматривается последовательность выполнения и функциональное содержание разделов и этапов проектов [47].

При оценке эффективности функционирования системы управления процессами и производствами выделены информационные аспекты. Современная реализация систем управления, базирующаяся на цифровых вычислительных машинах, требует создания адекватных методов анализа, проектирования производственных систем управления и способов обмена информацией [51]. Для этого предназначена методология IDEF, позволяющая исследовать структуру, параметры и характеристики производственно-технических и организационно-экономических систем. IDEF0 используется для создания функциональной модели, отображающей структуру и функции системы, а также потоки информации и материальных объектов, связывающие эти функции. При разработке систем управления производствами формализуются информационные потоки с соответствующей оценкой эффективности функционирования системы [52]. В основе разработки правил, определяющих влияние дискретных сигналов на динамические системы, лежат законы математической логики [53]. Применение основных положений этих исследований позволяет сократить избыточность ветвей алгоритмов и повысить надежность системы управления процессами и производствами.

Информационные технологии, определяющие функционирование систем управления, предусматривают сочетание последовательных и параллельных алгоритмов вычислений [54]. Реализация таких алгоритмов может использоваться при создании системы управления участком биосорбции серебра для оценки состояний последовательной серии колонн и параллельных процессов прогнозирования режимов в каждой колонне. Практическая реализация

многоуровневой системы как иерархической структуры может включать в себя оптимизацию режимов на верхнем уровне и непосредственное решение задач регулирования на нижнем уровне [55].

1.2 Исследования проблем и технологических реализаций процессов сорбции как основных компонент, подверженных технико-экономической трансформации

При проведении исследования необходимо рассмотреть основные особенности общих технологических решений гидromеталлургических процессов, вопросы формирования вторичной сырьевой базы, технологические особенности процессов экстракции и сорбции, особенности отработанных и аффинажных растворов, виды сорбентов и их кинетические свойства. Кроме того, необходимо рассмотреть электрохимические свойства диссоциированных в растворах ионов металлов, взаимосвязи селективности мембран, сорбентов с катионами и анионами растворов.

Доля гидromеталлургических процессов в технологической организации процессов извлечения цветных, редких и драгоценных металлов, составляет более пятидесяти процентов проектных решений в металлургии [56, 57]. Основные технологические решения [57, 58, 59], применяемые в процессах извлечения драгоценных металлов из первичного и вторичного видов сырья, включают в себя выщелачивание, жидкостную экстракцию и сорбцию, реализуемую на основе сорбентов различной природы. В современной практике большое количество вторичных сырьевых ресурсов формируется из электронного лома и лома вычислительных машин. Это определило появление исследований, подчинённых комплексной переработке таких видов сырья с целью полного извлечения из них благородных и цветных металлов [60] с оценкой технико-экономических показателей различных технологий [61].

В основе технологических решений организации процессов извлечения серебра из вторичных видов сырья лежит анализ физико-химических

особенностей серебросодержащих материалов и сплавов [62], которые определяют химический состав отработанных растворов, сопровождающих эти процессы. Техничко-экономические показатели переработки лома электротехнических и компьютерных изделий определяются правилами компоновки видов вторичного сырья [63, 64, 65], что позволяет оценивать присутствие в растворах других металлов с оценкой их ионного состава в диссоциированных растворах. Сорбционные процессы извлечения золота и серебра из руд и вторичных видов сырья имеют общие физико-химические и кинетические свойства [66]. Это связано с общими свойствами технологических и отработанных растворов, в которых присутствуют благородные металлы, катионные и анионные составляющие пульп и растворов, участвующих в сорбционных технологиях.

В технологических решениях, связанных с извлечением благородных металлов, наряду с традиционно используемыми видами сорбентов, исследовались возможности применения специально обработанных (активированных) углей [67, 68], их достоинства и недостатки, связанные с повышенным износом и коротким циклом технологического использования [69, 70]. Соответственно, недостаточно высокими являются технико-экономические показатели и эксплуатационные характеристики этих видов сорбентов [71, 72, 73].

Как один из видов гидрометаллургических процессов, альтернативный процессу сорбции, исследовался процесс жидкостной экстракции с применением мембран [56, 57], активные центры которых селективны к благородным металлам. Исследованы кинетические свойства мембран, осуществлена оценка экономической целесообразности их применения.

Наиболее широкое распространение в гидрометаллургии получили смолы специального изготовления, селективные по отношению к благородным металлам. Существуют исследования [74] влияния кислотности среды на процесс сорбции, износостойкости сорбентов, их геометрических размеров, пористости, условий набухания гранул сорбента и технической реализации процессов десорбции. Поскольку, в зависимости от вида промышленных и отработанных

растворов, в гидрометаллургии металлы существуют в анионной и катионной формах, исследовались ионоселективные свойства различных типов сорбентов [56, 57, 75], используемых для извлечения благородных металлов из этих растворов. Исследованы особенности применения катионселективных и анионселективных сорбентов в зависимости от ионного состава промышленных и отработанных растворов. Осуществлена оценка экономических и экологических особенностей применения сорбентов различных типов в современных условиях.

Экономический анализ показал, что использование специально приготовленных ионообменных смол показало, что в современных условиях ценообразования (20-30 тыс. долларов США за тонну), определяет низкую рентабельность извлечения благородных металлов из технологических растворов и, в частности, серебра из отработанных растворов [56, 57].

Как правило, сорбенты изготавливаются в виде пористых сферических гранул. Процесс сорбции при этом имеет двухстадийный характер. Существенную роль играет анализ особенностей гомогенного и гетерогенного протекания процессов сорбции благородных металлов, их граница, физико-химические и электрохимические особенности ионселективных видов сорбентов [75]. Данное исследование включает в себя рассмотрение термодинамических свойств и соответствующих законов применения ионитов в гидрометаллургии.

Существенную роль в ионообменных процессах играет электрохимический механизм взаимодействия различных типов ионитов, статические и гидродинамические условия взаимодействия ионов растворов и ионитов [76]. Гипотезы о механизме процессов, свойственных сорбции, в том числе ионообменных, теоретические аспекты и общие законы гидрометаллургии [77], позволяют решать вопросы теоретического описания реализации технологий и систем управления на конкретных предприятиях. Проблемы эксплуатации отходов производства антибиотиков при реализации процессов сорбции в современных условиях обуславливают необходимость исследования эксплуатационных свойств биокультур.

1.3 Изучение существующих разработок математических моделей технологических процессов в гидрометаллургии, которые могут быть использованы для пополнения информации об объекте управления в условиях технико-экономической трансформации

Необходимость пополнения информации для систем управления процессами и производствами, поставляемых с современным оборудованием, требует провести анализ методологии и инструментария, позволяющих реализовать возникающие флуктуации режимов и процессов на предприятиях СНГ. Для решения возникающих при этом задач целесообразно определить классификацию математических моделей, методологию их разработки, особенности и конкретику применения моделей различных типов, методы идентификации и проверки адекватности моделей.

В основу классификации процессов, протекающих на объектах управления, положен принцип отношения к временным изменениям явлений [78]. Если характеристики процесса являются явными функциями времени, то эти процессы описываются динамическими моделями. В случае, если время в явном виде не присутствует в изменении характеристик, или инструментально не ощутимо на интервале оценивания, такие процессы описываются статическими моделями. Второй принцип классификации предусматривает деление на два типа моделей: детерминированные и вероятностные (стохастические).

Разработка математических моделей опирается на причинно-следственные комплексы взаимодействий в производственных процессах [79]. При исследовании задач и методик моделирования металлургических процессов [80] рассматриваются основные понятия и методические вопросы моделирования, приводятся особенности использования физических законов, экспериментально-статистических методов и соответствующего планирования эксперимента. Также описывается идентификация с помощью подстраиваемых моделей.

Современные аспекты моделирования технологических процессов [81, 82], включают в себя основные предпосылки выбора типа математических моделей,

оценивание скорости вычислительных процедур, точности прогноза и сложности задач идентификации, возникающих для различных типов моделей. Особенности гомогенных и гетерогенных процессов, их отображение в различных гипотезах о механизме процесса и разработках математических моделей [83] предусматривают анализ возможности применения математических моделей в виде уравнений в частных производных. Рассматриваются способы редуцирования нелинейных уравнений в частных производных и аппроксимации с теоретическим сопоставлением точности прогноза по этим моделям с моделями в виде обыкновенных дифференциальных уравнений для декомпозированных структур объектов управления.

Математическое моделирование многофазных технологических процессов предусматривает декомпозицию рабочего объема агрегатов в соответствии с фазовыми состояниями рабочей среды [84]. Принципы математического моделирования, базирующиеся на этих методах, положены в основу прогноза процессов электролиза [85].

Основные положения моделирования химической кинетики [78, 86, 87, 88] предусматривают разработку статических моделей, устанавливающих следственные зависимости массообмена, осуществляемого в технологических агрегатах. Модели такого типа могут быть использованы для прогноза свойств различного типа биосорбентов и принятия решений о стоимости и количестве отходов производств антибиотиков, предлагаемых фармацевтической промышленностью. Эти модели предназначены для решения технико-экономических задач, определяющих взаимодействие предприятия с поставщиками.

Так как статистические данные для разработки статических моделей представлены только информационной матрицей, характеризующей соответствие входных и выходных переменных, идентификация [2] параметров таких моделей подчинена методу наименьших квадратов. На основании этого метода разработана математическая модель прогноза массовых свойств процессов биосорбции [89].

Для прогноза текущего состояния технологических агрегатов [78, 86, 87, 88] предлагается математический аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений, отражающих текущие изменения масс исходных компонентов и продуктов реакций при условии стехиометрического характера физико-химических превращений. Согласно основным положениям, математическая модель представляет совокупность двух типов выражений: первый тип – уравнения, описывающие происходящие явления; второй тип – уравнения, описывающие связи между явлениями. Предлагается осуществлять декомпозицию рабочего объёма объектов управления на отдельные зоны, обладающие признаками псевдооднородности. В уравнениях, описывающих явления в зонах, на микро- и макроуровнях отражаются условия взаимодействия зон с соответствующими компонентами, характеризующими массоперенос между зонами. Микроуровень предназначен для описания механизма грамм-молекулярного взаимодействия компонент реакций, в том числе, с использованием закона Менделеева-Клапейрона. Макроуровень отражает массовые изменения, происходящие с явлениями.

Анализ технологических особенностей и методов параметризации учитывает нелинейный характер явлений, протекающих в сорбционных колоннах [90], что определяет соответствующий тип математических моделей.

Методология, изложенная в этих работах, может быть использована при разработке математических моделей, позволяющих осуществлять прогноз кинетики в ритме с технологическим процессом. Это даёт возможность осуществлять управление процессами, протекающими в сорбционных колоннах, в реальном масштабе времени. Классической моделью описания явлений, происходящих в диффузионной области, является закон Фика. В соответствии с этим законом, математическая модель прогноза кинетики протекающих процессов представляется в виде параболического дифференциального уравнения второго порядка в частных производных с соответствующими граничными условиями и нелинейными правыми частями. Решение таких уравнений осуществляется с помощью численного метода сеток [91], который не

обеспечивает прогноз в ритме с динамикой изменения характеристик процесса. Согласно известным положениям [2] модели такого типа через процедуры последовательного редуцирования преобразуются к виду обыкновенных дифференциальных уравнений. В результате применения существующей методологии моделирования разрабатывается параметрическая модель-структура, содержащая настраиваемые коэффициенты – параметры модели. Совокупность явлений, описанных в первом разделе данной работы, в соответствии с такой методологией будет описываться системой связанных дифференциальных уравнений обычного типа. Модели такого рода применяются для оценки динамики различных явлений. Существуют динамические детерминированные модели оценки себестоимости продукции [92], оценки оборачиваемости средств, вкладываемых в производство [93, 94].

Для описания реакций и диффузионных процессов твёрдо-жидких реакций разработаны динамические модели [95, 96] прогноза гидрометаллургических процессов извлечения золота. Методология моделирования, основанная на разработке дифференциальных уравнений, предполагает [97] декомпозицию рабочего объёма технологических агрегатов на участке с одинаковым характером явлений. При декомпозиции учитываются явления массопереноса движущихся компонент между участками.

Для прогнозирования поведения биологических компонент в процессах извлечения меди из сульфидных руд [98] разработаны уравнения модели, которые описывают массоперенос исходных компонент и продуктов реакции как макроявление. При этом оцениваются термодинамические особенности протекающих процессов на микроуровне.

Математическая модель, описывающая биосорбцию меди в колонне [99] содержит уравнения прогноза явлений, происходящих при массообмене между раствором и биосорбентом. С помощью разработанных уравнений осуществляется прогноз текущих состояний раствора, концентраций исходных веществ и продуктов реакций, а также оценивается длина и площадь фронта массопереноса между зонами, на которые декомпозирован рабочий объём

колонны. Выполнены численные расчёты и построены графические зависимости, подтверждающие адекватность разработанных моделей.

Для прогнозирования процессов биосорбции редких металлов из одно- и мультикомпонентных растворов разработаны конечно-разностные уравнения модели [100]. Решениями уравнений этой модели определяются концентрации веществ в растворах и биосорбенте, прогнозируются изотермические характеристики протекающих процессов.

Динамическая модель прогноза диффузионных процессов, протекающих при кислотном выщелачивании меди [101] представлена дифференциальными и интегро-дифференциальными уравнениями. С помощью этой модели прогнозируется влияние рН раствора на протекание процесса и соответствующая оценка площадей реагирующих поверхностей жидкость-твёрдое в зависимости от геометрических размеров частиц при допущениях об их сферичности. Гидродинамика потоков, циркулирующих в сорбционных колоннах, оценивается с помощью динамических моделей [102], в которых в качестве критериев используются числа Рейнольдса.

Проведён анализ типов биосорбентов, применяемых для извлечения цветных металлов [103], сопровождающийся анализом органических соединений, характерных для процессов биосорбции. Разработаны математические модели микроуровня, позволяющие оценить грамм-молекулярные взаимодействия компонент при химических реакциях, сопровождающих биосорбцию. Описание грамм-молекулярного взаимодействия на микроуровне, приведённое в данной работе, может быть использовано при разработке математической модели процесса биосорбции серебра плесневыми культурами.

Особенности роста и затухания популяций биологических структур, содержащихся в отходах производства антибиотиков, оцениваются уравнениями Лотки-Вольтерры [104]. Эти уравнения позволяют оценивать режимы восстановления технологических свойств биосорбентов с условием затухания сорбционной емкости от одного технологического цикла к другому.

Статистические модели прогноза процессов жидкостной экстракции предназначены для прогнозирования массопереноса ионов через ионселективные мембраны [105, 106, 107]. При этом, каждое уравнение модели позволяет рассчитывать количество вещества, прошедшего через мембрану, за различное время технологических циклов. Модель предназначена как для оценки анионообменных процессов, так и катионообменных. Прогнозирование поведения жидкостных потоков в сорбционных колоннах осуществляется с помощью статических математических моделей [108], предусматривающих статистическую проверку адекватности прогнозируемых по модели решений.

В современной практике разработки систем управления процессами и производствами широко применяются методы имитационного моделирования, основные принципы которого [109] позволяют настраивать математические модели в ритме с процессами управления. На основании этих принципов разработаны имитационные модели поведения биологических культур гидрометаллургических процессов [110].

Технологические особенности, характеризующие применение биосорбентов в серии колонн на участке биосорбции, обуславливают необходимость принятия решений по переключению режимов в последовательной серии колонн. Для системной реализации этих переключений необходимо осуществить формализацию режимов переключения.

Непрерывные режимы сорбции, восстановления технологических свойств сорбента и десорбции чередуются с дискретными воздействиями в виде переключений колонн. Подобные искусственные системы называют динамическими системами с дискретными событиями или дискретно-событийными динамическими системами. Для исследования дискретно-событийных динамических систем разработан метод возмущений. Этот метод предполагает использование динамических особенностей таких систем и является инструментом оценивания чувствительности системы. Основная идея метода возмущений состоит в том, что по любой фиксированной выборочной траектории системы с заданными параметрами, можно построить другую выборочную

траекторию этой же системы, но с параметром, претерпевшим малое возмущение. Построенная таким образом выборочная траектория позволяет определить характеристики системы с возмущённым параметром и на её основе получить оценку чувствительности системы к изменению параметра. Согласно изложенному, для оценивания чувствительности системы необходимо произвести однократное имитационное моделирование и зафиксировать наблюдение над системой [111].

Математический аппарат, с помощью которого возможна формализация дискретно-событийных динамических систем, подчинён законам математической логики [112] и дискретной математики [113, 114].

Существуют исследования возможности применения дискретной математики в динамических системах управления процессами и производствами [115, 116, 117]. Изложенные в этих исследованиях принципы и методы дискретной математики позволяют сформировать матрицу смежности, в которой фиксируется порядок переключения режимов работы колонн. С помощью кванторов математической логики разрабатываются логические правила оценки завершения непрерывных режимов, после чего следует дискретное переключение колонн на соответствующий режим согласно матрице смежности.

Проведённый анализ разработок позволяет ставить и решать задачи моделирования, базирующиеся на гипотезах, основные положения которых приведены в вышеизложенных работах. Согласно этим положениям, возможен выбор типа математической модели режимов работы колонн и разработка соответствующей параметрической модели-структуры. Модель-структура характеризует класс объектов одинаковой природы – сорбционных колонн. Для использования моделей в разрабатываемой системе управления необходимо реализовать параметрическую идентификацию по исходным данным исследований [118].

1.3.1 Анализ метода параметрической идентификации, который может быть использован для пополнения информации об объекте управления

Основные положения методов идентификации [2, 119, 120] предполагают возможность оценки параметров и состояний. При этом под параметрами подразумеваются обобщенные коэффициенты макроуровня и коэффициенты микроуровня. Под состояниями понимаются начальные условия задачи Коши, а также характеристики кинетики процессов внутри колонн, непосредственное измерение которых невозможно. В общем случае, вводится определение математической модели в пространстве состояний и, соответственно, предусматриваются различные процедуры оценивания параметров и состояний. В связи с нелинейным характером явлений, протекающих при различных режимах работы колонн, предложен метод параметрической идентификации скомбинированный из двух составляющих.

Первая составляющая предполагает использование функции чувствительности, согласно которой выходные переменные, являющиеся функцией параметров и состояний, заменяются функцией чувствительности, зависящей только от параметров.

Вторая составляющая – метод двух моделей, согласно которому итеративно оцениваются значения выходных переменных на предыдущем и текущем шагах итерации, что сопровождается конечно-разностной оценкой частных производных выходных переменных по параметрам.

На основании этих оценок с помощью градиентного метода, осуществляется итеративное вычисление значений параметров с циклическим функционированием алгоритма настройки. На каждой итерации сопоставляются количественные оценки выходной величины, рассчитанной по модели при шаговом значении параметров, со статистическими характеристиками этих же величин. Численная реализация алгоритма завершается, если вектор разностей сопоставления выходов модели и объекта достигает заданных наперед значений точности прогноза. То есть, настройка модели предполагает получение значений

параметров в некоторой окрестности, размеры которой задаются точностью настройки [121, 122, 123, 124]. Предлагаемый метод параметрической идентификации («в малом») может быть использован при оценке коэффициентов разработанных моделей.

1.4 Анализ современных подходов и их применения для разработки систем управления второго уровня в планировании заказов и возможностей в условиях технико-экономической трансформации

В подразделе рассматриваются классические методы оптимизации, способы формализации ограничений и использования штрафных функций, методы имитационного моделирования, использование генетических алгоритмов и существующая практика решения задач методами теории расписаний.

В настоящее время крупные предприятия конвейерного типа (в качестве объекта управления в работе выбрано листопрокатное производство) представляют собой многоуровневые производственные системы с тесным взаимодействием подразделений, поставляющих исходное сырьё, изготавливающих готовую продукцию, складирование и т.п. [125, 126, 127]. Планирование выполнения заказов на таком предприятии представляет собой многофакторную задачу [34], учитывающую нелинейные взаимосвязи между подразделениями, неоднородные технологические операции, большое количество технологических ограничений [128, 129, 130]. Ключевой проблемой при планировании является определение оптимальной последовательности выполнения заказов [131, 132, 133]. В качестве критерия оптимальности, как правило, выбирается минимизация количества перевалок рабочих клеток прокатного стана и времени простоя стана из-за необходимости подогрева заготовок (слябов) в печах или переполненности охлаждающих устройств в конце технологической цепочки [134]. Такая задача представляет собой задачу математического программирования на основе математической модели прокатного производства [135, 136, 137]. Следует отметить, что моделирование и

решение задачи значительно осложняется технологическими особенностями конкретного предприятия [138], большим количеством технологических ограничений [139], в том числе и вызванных взаимодействием с другими подразделениями предприятия (поставки заготовок, транспортировка и складирование продукции и др.), ограничением по времени выполнения каждого заказа и различной приоритетностью выполнения заказов [140, 141, 142].

В силу вышеизложенного, решению задачи планирования предшествует исследование структуры и технологических взаимосвязей между разноуровневыми подразделениями предприятия [143, 144, 145]. При выявлении детерминированных зависимостей разрабатывается аналитическая модель взаимосвязей и для решения задействуют классический аппарат методов оптимизации [146, 147].

Согласно классической теории оптимизации, функционал цели представляется в аналитическом виде, а ограничения – в виде равенств или неравенств с часто встречающимся ограничением целочисленности переменных [148, 149], после чего для полученной задачи целочисленного нелинейного программирования (MINLP) определяется численный метод решения [150]. В настоящее время применение классического подхода ограничено следующими факторами:

- сложностью получения аналитической зависимости целевой функции от последовательности выполнения заказов, в том числе и для листопрокатного производства, даже при выборе стандартного критерия оптимальности – минимизации времени выполнения заказов [151, 152];

- требованием дифференцируемости целевой функции для классических методов нахождения оптимума (метод Якоби, обобщённый метод множителей Лагранжа для задач с ограничениями и др. [153]), что редко достигается в реальных производственных задачах;

- многоэкстремальностью и разрывностью целевой функции, ввиду чего градиентный поиск оптимальных точек не гарантирует получение решения [154];

– большим количеством нелинейных технологических ограничений [155, 156], что усложняет их формализацию, затрудняет реализацию алгоритмов их численного решения за приемлемое время [157, 158];

– целочисленностью значений переменных, задающих область определения целевой функции и большой размерностью задачи [159].

Усовершенствование методов классической оптимизации с целью устранения недостатков привело к появлению некоторых модификаций метода:

– трансформации задачи нелинейного программирования классическими методами линеаризации к задачам линейного программирования [160], что значительно упрощает реальную модель, но на практике для сложных процессов не позволяет получить оптимальное решение, удовлетворяющее ограничениям;

– использование метода ветвей и границ для декомпозиции множества допустимых значений переменных на подмножества меньших размеров и сведение задачи к итеративному решению ряда подзадач методами последовательного квадратичного программирования [161, 162, 163]; применение метода ветвей и границ в задачах календарного планирования затрудняет изменение системы ограничений на каждом шаге планирования;

– включение нелинейных ограничений исходной задачи в функционал цели в виде штрафных функций, формирование лагранжиана и решение полученной задачи без ограничений с помощью уравнений Куна-Таккера (при ограничениях в виде неравенств используется обобщённый метод множителей Лагранжа); такой подход подразумевает введение предположений о выпуклости целевой функции и ограничений [164, 165];

– поскольку выпуклость целевых функций не свойственна большинству производственных задач, то метод Лагранжа дополнен непрямыми методами поиска: лагранжиан аппроксимируется сепарабельной, квадратичной или полиномиальной функцией (сепарабельное, квадратичное и геометрическое программирование) и определяется оптимум аппроксимирующей функции [166, 167, 168];

– среди непрямых методов поиска наилучшее решение в большинстве случаев даёт метод последовательного квадратичного программирования (SQP-метод), согласно которому на каждой итерации выполняется квадратичная аппроксимация Гессиана функции Лагранжа при помощи квазиньютоновского модифицированного метода, в результате получают подзадачу квадратичного программирования (QP) [169, 138] (из методов решения полученной QP-подзадачи следует выделить стратегию активных наборов, используемую, например, при оптимизации средствами «Optimization Toolbox» пакета «MATLAB» [170]); также используется метод доверительных областей, идея которого состоит в том, что на каждой итерации вокруг начальной точки выстраивается доверительная область, где целевая функция аппроксимируется более простой функцией и выполняется оптимизации в сформированной области без явного выражения Гессиана [171] (использование метода ограничено случаем линейных ограничений).

Модифицированные методы классического подхода к поиску оптимального решения задачи планирования [172, 173, 174] реализованы для некоторых предприятий. Однако, их распространение на другие, в том числе, и листопрокатные производства, ограничено из-за технологических особенностей предприятий, сложной взаимосвязи временных характеристик процессов и последовательности выполнения операций, что не позволяет выработать универсальную методику моделирования и оптимизации планирования [175, 176]. Актуальность задачи устранения недостатков классических методов привела к разработке новых подходов к моделированию задачи планирования.

1.4.1 Формализация ограничений в виде критериев задачи планирования. Адаптивные алгоритмы с использованием штрафных функций

Проблема нелинейных технологических ограничений может быть ослаблена путём формализации ограничений в виде отдельных критериев планирования. Таким образом, исходная задача трансформируется в многокритериальную задачу

без ограничений и устанавливаются весовые коэффициенты для каждого критерия пропорционально степени важности соответствующего ограничения [177]. Для адаптации модели к конкретному производству используются адаптивные алгоритмы настройки штрафов, позволяющие получать решения без нарушения обязательных технологических ограничений с учётом технологических особенностей предприятия [178]. Также при настройке значений коэффициентов применяются методы параметрической идентификации [179].

Для реализации решения многокритериальной задачи, как правило, используются эвристические алгоритмы, не гарантирующие оптимум найденного решения [180]. Кроме того, описанный подход не применим на предприятиях с большим количеством обязательных технологических ограничений, поскольку способен генерировать решения, не удовлетворяющие ограничениям.

1.4.2 Применение методов имитационного моделирования вариаций характеристик технологических процессов и производств

Сложность аналитического представления целевой функции в задачах планирования на крупных предприятиях обуславливает использование методов имитационного моделирования для воспроизведения взаимосвязей между переменными [148]. Инструментарием формирования имитационной модели является определённая система моделирования (Scilab, Maxima), средствами которой определяется структура модели – характеристики накопителей и каналов обслуживания, параметры входного и выходного потоков заявок и т.п. [181]. Осуществление имитационных экспериментов позволяет формализовать или уточнить аналитические зависимости между переменными (при наличии дополнительной информации о характере такой зависимости, вероятностной или детерминированной). Имитационная модель является основой для решения задачи оптимизации одним из существующих методов [182] или варьированием параметров имитационной модели [183]. Системы имитационного моделирования

позволяют получать поливариантные расчёты ПП для оценки различных бизнес-стратегий [184].

Критическими факторами, ограничивающими реализацию инструментария имитационного моделирования при решении сложных задач планирования, является продолжительное время построения модели и потребность в дополнительной информации о характере зависимости. Кроме того, для методов имитационного моделирования требуется объёмный набор статистических данных, не всегда доступных на предприятии. Впрочем, имитационные подходы удобно использовать для оценки технических характеристик производства – длительности технологических пауз, продолжительности обработки продукции и т.п. [185].

1.4.3 Применение генетических алгоритмов для решения оптимизационных задач управления производственными процессами

Поскольку генетические (ГА) и другие эволюционные алгоритмы являются алгоритмами поиска, каждая итерация которых формируется путём случайного комбинирования искомых значений переменных, а тип ограничений не играет такую важную роль, как в классических методах оптимизации, то методы этого раздела математического программирования используются для решения задач рассматриваемого в диссертационном исследовании типа – задач планирования с большим количеством нелинейных ограничений [186]. Кроме того, целевая функция исследуемых задач является многоэкстремальной и разрывной, поэтому случайный регулируемый поиск позволяет избежать быстрой сходимости алгоритма к точкам локальных экстремумов [187]. Основное внимание в приложении ГА к планированию уделяется выбору эффективной «функции приспособленности» (FF – fitness function), параметров кроссовера и мутации, алгоритма селекции новой популяции и критерия останова алгоритма.

При расчёте FF особей популяции используются аналитические методы, имитационное моделирование, искусственные нейронные сети и др. В ряде работ

предлагается аналитический расчёт FF (в качестве которой выбирается целевая функция задачи оптимизации) [188, 189], однако недостатком такого подхода является сложность или невозможность аналитического расчёта для реальных задач. Использование имитационного моделирования для оценки FF решения [190, 191] устраняет этот недостаток, однако снижается точность учёта критерия оптимальности задачи. Следует отметить, что интеграция генетического и имитационного моделирования даёт возможность учитывать динамические изменения ограничений и сужает область поиска на каждой итерации.

Выбор наиболее эффективных остальных параметров ГА, как правило, зависит от вида используемой модели процесса планирования, характера целевой функции, ограничений и определяется экспериментально при решении конкретной задачи. Например, в работе [192] описан выбор родителей в соответствии с правилом рулетки, одноточечные и многоточечные кроссоверы и мутации с малой вероятностью. Алгоритм динамической самоорганизации параметров предложен в [193]. Для случаев, когда целевая функция меняется в процессе выполнения оптимизации, на каждом шаге алгоритма выбирается один из параметров ГА в соответствии с его заранее установленной вероятностью появления. Частоты появления прогрессивных хромосом фиксируются при использовании каждого параметра и в дальнейшем определяют вероятность его применения. Показано, что ГА с динамической самоорганизацией параметров обладает наибольшей эффективностью в сравнении со стандартными методами выбора параметров.

Применение методов ГА при оптимизации позволяет снизить длительность поиска решения до квадратичной зависимости от размерности задачи [194]. Таким образом, при решении задач планирования наиболее перспективным будет выбор модификаций ГА или других эвристических методов, устраняющих недостатки классических методов оптимизации. Однако основным недостатком ГА является возможность стагнации – вырождения популяции хромосом, которая может наступить вдали от экстремальной точки [195]. Поскольку в реальных задачах оптимум целевой функции не известен, то отсутствуют способы оценки

оптимальности полученного решения. В настоящее время ведётся активная разработка модификаций ГА и других эволюционных алгоритмов.

1.4.4 Планирование выполнения экономических задач предприятий методами теории расписаний

В терминах теории расписаний, занимающейся упорядочением задач, планирование выполнения заказов листопрокатного производства представляется как задача класса потоковой линии (flow-shop), которая характеризуется упорядоченностью машин (технологических агрегатов) и последовательным прохождением каждого требования (прокатной партии) по всем машинам [196]. Необходимо определить перестановку требований, минимизирующую время обслуживания требований при заданных сроках окончания каждого обслуживания.

Для решения полученной задачи без заданных директивных сроков используется алгоритм Джонсона [197], дополненный эвристическими алгоритмами (LV-алгоритм локальной вариации [198, 199]) для случая более двух машин и наличия директивных сроков. Показано, что эвристические методы не дают приемлемых результатов в ресурсно-зависимых (с ограничениями) задачах [200]. Широкое использование в теории расписаний метода динамического программирования Беллмана [201] на практике целесообразно лишь при аналитическом представлении целевой функции планирования, её дифференцируемости в непрерывном случае и простых рекуррентных соотношениях в дискретном. В противном случае метод не даёт никаких преимуществ в сравнении с другими комбинаторными алгоритмами.

Современным направлением в планировании является решение так называемой *batching problem*, возникающей при объединении однотипных работ в пакеты с последующей обработкой всех работ пакета по одной схеме. Составление расписания для обработки таких пакетов является перспективной областью исследований. Среди предлагаемых алгоритмов решения стоит

выделить алгоритм сведения *batching problem* к классической задаче поиска кратчайшего пути и решение проблемы с помощью метода ветвей и границ [202].

Основная идея вышеуказанных методов – на каждой итерации отбросить основную часть допустимых решений и продолжить исследование на оптимальность небольшого подмножества. Однако, сложность использования комбинаторных алгоритмов и метода динамического программирования связана с экспоненциальной зависимостью длительности вычислений от размерности задачи. Данные алгоритмы применимы при заранее заданной длительности обработки требований на машине и отсутствии технологических ограничений, что не позволяет использовать их для решения рассматриваемой задачи планирования производства. Методы теории расписаний могут рассматриваться лишь как вспомогательный инструмент для решения отдельных подзадач.

Перечисленные подходы к решению задач планирования и оптимального управления стали основой инструментария информационных систем, реализованных в форме программных комплексов с широким кругом решаемых производственных задач.

1.5 Реализации современных систем для решения задач планирования выполнения заказов в условиях информационной трансформации

В данном подразделе рассматриваются возможности систем стандартов ERP и MRP, информационные MES и APS-системы для планирования производственных процессов, и DSS-системы поддержки принятия решений.

В настоящее время на рынке информационных услуг представлены различные IT-комплексы планирования и оперативного управления производством [203]. В зависимости от решаемых задач, комплексы классифицируются в соответствии с международными стандартами, охватывая деятельность предприятий от оптимизации логистических операций и рациональной организации производства до стратегического планирования поведения на рынках [204, 205, 206].

1.5.1 Особенности и возможности информационных систем стандартов MRP и ERP

Развитие стандартов MRP/ERP берёт своё начало с середины 60-х годов, когда международная организация APICS с целью автоматизации управления производством определила принципы управления материальными запасами предприятия в форме концепции MRP (Material Requirement Planning – планирования материальных потребностей) [207]. Со временем развитие стандарта MRP и расширение функциональных возможностей на весь производственный цикл от закупки сырья до отгрузки товара потребителю привело к возникновению ERP-стандарта [208]. Понятия, методы и алгоритмы, лежащие в основе ERP-стандарта, считаются базовыми и для других систем, возникших за последние десятилетия. Основными характерными чертами ERP-методики формализации бизнес-процессов являются [209]:

- определение производственной деятельности как выполнение набора заказов с учётом ограничения ресурсов и особенностей предприятия;
- формирование ПП на основе оптимизации производственных операций, использования сырья и транспортных затрат;
- обеспечение выполнения заказов в сроки, указанные заказчиком;
- оценка экономических показателей сформированной ПП;
- определение заказов на сырьё на основе производственных графиков;
- модульная структура системы, в которой каждый модуль реализует отдельную функцию управления, что подразумевает согласование отдельных процессов планирования и управления друг с другом.

Структурно в ERP-системах выделяется три основных слоя [204]:

- базовая система включает в себя проверенные на практике средства, закрепленные в стандарте, среди которых пакеты прикладных программ, средства интеграции с другими системами (системы автоматизированного проектирования (САПР), системы поддержки принятия решений (СППР)) и т.п.; на основе базовой

системы при внедрении создаётся гибкая АСУП, реализующая стандартные подходы к решению задач планирования с учётом особенностей предприятия; следовательно, такие особенности определяют выбор базовой системы;

- второй слой образуют не обязательные функциональные модули, реализующие классические методы планирования и управления;

- третий слой формируют специальные методы, предлагаемые компаниями-производителями систем; здесь присутствуют новейшие разработки на основе методов информационных технологий, представляющие особый интерес при исследовании возможностей систем.

Для решения задачи планирования ERP-системы оснащены функциональными блоками Master Production Scheduling (составление плана производства), Shop Flow Control (управление на уровне производственного цеха), Simulation (моделирование) [98]. В основе функционирования данных подсистем лежит наложение календарно-плановых нормативов на производственные процессы и ограничения, что позволяет сопоставлять потребности заказчиков с возможностями предприятия, формировать оперативные планы-графики на уровне производственного цеха. Недостаток данного подхода заключается в том, что оптимизация производственных процессов осуществляется только на нижнем уровне планирования с использованием простого инструментария теории расписаний, что не позволяет решать задачи планирования для многоуровневых структур с большим количеством нелинейных ограничений [204, 210].

В настоящее время на рынке представлены системы целого ряда компаний: mySAP ERP [211], Microsoft Dynamics AX [212], украинская разработка Plazma ERP+CRM [213]. С развитием информационных технологий на базе ERP-систем появляются различные системы нового класса.

1.5.2 Использование информационных MES- и APS-систем для планирования производственных процессов

Актуальность решения задач планирования производства и оперативного управления привела к возникновению современных MES- и APS-систем (Manufacturing Execution System – система управления производственными процессами и Advanced Planning/Scheduling – усовершенствованное планирование), которые могут рассматриваться как настройки соответствующих ERP-систем. В таких системах (IT-Enterprise APS / MES, Simatic IT Production Suite, SAP Manufacturing Execution) решение задач планирования методами теории расписаний дополнено широким набором математических методов оптимизации. Системы класса MES специализируются на решении задач анализа и оптимизации работы отдельного подразделения, в то время как APS-системы разрабатывают скоординированное расписание работы всего предприятия с учётом требований Supply Chain Management (SCM) – управления цепочками поставок [214].

Функция планирования осуществляется в базовых модулях программных продуктов [215]. В MES-системах это модуль ODS (Operations / Detail Scheduling – оперативное детальное планирование), который оптимизирует производственное расписание с учётом различных атрибутов изделия (веса, размеров и др.), задаваемых технологией производства. Предусмотрен выбор критерия планирования, например, минимальное время простоя устройств цеха или переналадок оборудования. В APS-системах это модуль Master Production Scheduling (MPS, основной производственный план), разрабатывающий программу выполнения портфеля заказов с учётом ресурсов для всего подразделения, а также модуль Rough Cut Capacity Planning (предварительное планирование загрузки мощностей), который, на основании выработанной MPS программы, формирует планы загрузки производственных мощностей. Модули предоставляют возможность оценить потребности в ресурсах и получать поливариантные графики загрузки производства. Предусмотрено планирование и

управление производством с дискретным и непрерывным характером, а также реализована поддержка распределённого планирования.

Фактически, вышеописанные системы приспособлены для планирования и управления при возможности формализации правил, критериев и ограничений [216]. Однако, такая возможность не всегда существует в условиях реального производства, и руководитель принимает решения, прогнозируя их последствия для предприятия на основе анализа данных, опыта и интуиции. Программным инструментарием для помощи в принятии разнообразных решений являются СПП (Decision Support Systems, DSS-системы).

1.5.3 Роль DSS-систем при автоматизации планирования прикладных программ

В теории автоматизированных систем управления производственными процессами определяют систему подготовки принимаемых решений (СПП, DSS-систему) как программный комплекс, который на основе анализа информации предлагает ЛПР оценки различных стратегий деятельности предприятия и оценивает их эффективность [217]. Как правило, под оценкой стратегий понимается либо выбор оптимального решения на множестве допустимых, либо ранжирование допустимых решений (альтернатив) в соответствии с одним или несколькими критериями. Для задания степени предпочтительности альтернатив формируется функция полезности с помощью метода аналитических иерархических процессов, при котором рассчитываются коэффициенты значимости критериев на основе их попарного сравнения и коэффициенты значимости альтернатив относительно каждого критерия. Затем для каждой альтернативы вычисляется функция полезности [218]. При необходимости учесть взаимосвязь между критериями используется метод аналитических сетевых процессов [204]. Вышеописанный инструментарий оценивания стратегий может использоваться для выработки поливариантной ПП при планировании производства.

Архитектура СППР, в том числе, при выполнении заказов листопрокатного производства, согласно [219] должна состоять из следующих компонент.

1. Системы управления данными (The data management system, DBMS). Преобладание данной компоненты характерно для СППР, классифицируемых как Data-Driven DSS. Основное внимание в таких системах уделяется структуре базы данных (Data Warehouses – хранилища данных). Простейшие Data-Driven DSS обеспечивают доступ и простые манипуляции с данными, системы с дополнительной функциональностью задействуют средства компьютерной обработки данных, продвинутые системы используют инструмент онлайн-аналитической обработки данных (Online Analytical Processing, OLAP) с представлением исходных данных для анализа в виде многомерного куба и его сечений.

2. Системы управления моделями (The model management system — MBMS). Компонента преобладает в Model-Driven DSS, включающих в себя математические модели, формализованные цели функционирования и подсистему обработки задач – программный комплекс, который выполняет численное решение задач, стоящих перед системой. Среди инструментария обработки задач следует выделить интеллектуальный анализ данных, имитационное моделирование, эволюционные алгоритмы, нейронные сети и т.п. Разработка адекватной модели и выбор приемлемой программной реализации методов решения рассматриваемых в Model-Driven DSS задач является ключевым вопросом при создании такой системы. Среди дополнительных возможностей систем данной категории следует выделить параметрический анализ (оценка значений выходных переменных при варьировании входных), анализ чувствительности решения, управление по целям (поиск значений входной переменной, приводящих к требуемому результату), анализ рисков, оптимизация решений и сравнение результатов прогнозов.

3. Машины знаний (The knowledge engine, KE), на которых фокусируется работа Knowledge-Driven DSS, использующих специальные методы формализации правил работы с взаимосвязями между данными и правилами

получения логических выводов. Среди подходов к представлению знаний в базе знаний можно выделить следующие:

- продукционные модели (правила представляются согласно алгоритму Rete в виде разветвлённого графа, узлами которого являются фрагменты условий типа «если – то»);

- семантические сети (ориентированный граф, в вершинах которого располагаются понятия, а дуги соответствуют отношениям между понятиями);

- фреймы (в базе знаний хранятся фреймы-образцы или прототипы, а фреймы-экземпляры представляют собой реализацию свойств прототипов при использовании механизма наследования с помощью АКО-связей);

- формальные логические модели, позволяющие отобразить знания как совокупность формул в некоторой логике; для получения новых знаний используются правила логического вывода;

- нейлоровский подход, основанный на верхних и нижних порогах вероятности гипотез по схеме Байеса; свидетельства пользователей используются для переоценки порогов, после чего гипотеза о появлении новой компоненты базы знаний принимается или отвергается.

В Knowledge-Driven DSS-системах последнее время широко используется инструментарий Data Mining, предназначенный для анализа больших объёмов данных и поиска в них скрытых отношений между объектами.

4. Пользователей, которыми, как правило, являются ЛПР – руководство плановых и производственных служб предприятия, а для многоуровневых систем – работники этих подразделений после разделения между ними плановых и производственных задач согласно принципам распределённого планирования.

5. Интерфейса пользователя, реализуемого в настоящее время с использованием новых средств коммуникации человека с компьютером – естественных языковых систем, систем распознавания жестов и голосовых команд, систем распознавания изображений и других инструментов искусственного интеллекта.

Таким образом, в зависимости от назначения СППР, при её разработке делается акцент на определённую компоненту архитектуры. Так Data-Driven и Knowledge-Driven DSS требуют специализированной структуры базы данных. Model-Driven DSS могут использовать и простые файловые хранилища данных, но задействовать многоуровневые математические модели [220]. В диссертационном исследовании, на основе анализа объекта планирования необходимо выбрать категорию разрабатываемой СППР и тип организации данных и знаний.

В соответствии с вышеизложенным, к преимуществам использования IT-систем можно отнести многоуровневое планирование, оптимизацию некоторых производственных процессов, что приводит к повышению эффективности производства, удовлетворению запросов потребителя, обеспечению защиты используемых данных от несанкционированного доступа и др. [204]. Использование облачных технологий открывает доступ к системам среднему и малому бизнесу. Среди недостатков следует выделить продолжительность и сложность внедрения, в ходе которого возникает риск нестабильности в работе предприятия. При этом может отсутствовать возможность адаптации системы к специфическим бизнес-процессам на предприятии – например, для рассматриваемой в диссертационной работе задачи оптимального планирования листопрокатного производства не существует систем с настройками, позволяющими формализовать технологические ограничения и особенности предприятия. Предлагаемый инструментарий решения задач оптимизации также ограничен сложностью формализации некоторых взаимосвязей на предприятии. Кроме того, существующие базы данных, как правило, сложно или невозможно интегрировать в базу данных системы, что влечёт дополнительные косвенные затраты. Следует также отметить высокую стоимость не только продукта, но и его сервисного обслуживания, зависимость от поставщика для поддержания работоспособности системы, длительность обучения персонала. Поэтому в настоящее время [221] ведётся разработка как новых IT-систем, так и методов

оптимизации бизнес-процессов на предприятии, чему и посвящено диссертационное исследование.

1.6 Анализ приёмов моделирования процессов материального производства

Моделирование процессов материального производства представлено следующими основными направлениями:

- комбинаторные модели;
- статические модели;
- динамические модели.

Комбинаторные модели представлены работами, содержащими приёмы и методы формализации схем технологических процессов на промышленном предприятии и соответствующие им алгоритмы. Промышленное предприятие представляется, как правило, в виде совокупности блоков или звеньев с определёнными свойствами и заданными входами, и выходами, отражающими специфику производства. В таких структурных моделях в качестве блоков выступают производственные подразделения предприятия.

Промышленное производство отображается в виде системы отдельных элементов [222], производительность которых определяется плановым выпуском продуктов. При этом вся совокупность математических моделей этих элементов разбивается на однопродуктовые, двухпродуктовые и трехпродуктовые, а любая математическая модель подсистемы производства в целом получается путём их комбинирования. Предполагается, что качество продукции, количество ручного труда и стоимость единицы сырья является функцией от количества используемых роботов, а стоимость единицы продукции – функцией качества [222]. Эти функции представлены статическими зависимостями, не отражающими динамику экономических процессов, в силу чего их применение в настоящее время не может дать адекватных результатов. Имеется также модель многоступенчатого производственного процесса, представляющая предприятие в виде системы блоков, которыми являются его структурные подразделения. При

известной себестоимости продукции в каждом из блоков ставится задача линейного программирования для определения их загрузки с минимизацией себестоимости продукции [223]. В модели не учитывается зависимость себестоимости единицы продукции от объёмов её производства. Такой подход может иметь место только при условии, что доля условно-постоянных затрат в структуре себестоимости очень мала. В современных условиях, при значительном падении объёмов производства, данная модель не является адекватной. Разработана методика, позволяющая на основании экспресс-обследования построить структурную модель предприятия, предназначенную для имитации динамики процесса производства [224].

Приёмы комбинаторики используются в моделях [225, 226], где производство представляется в виде совокупности блоков, образующих направленную сеть. Узлами сети выступают некоторые состояния, события, а дугами изображаются действия, приводящие к изменению состояния. В [2] у блоков выделяются входы двух типов - с запасами и без запасов. В рамках этой же методологии для задач оперативного управления и календарного планирования предлагается модель цеха, где производственное звено цеха является элементарным модулем и представляет собой систему «человек-станок» [227]. Работы [228, 229] используют для описания производственных систем аппарат сетей Петри.

При совместном использовании приёмов комбинаторики и теории массового обслуживания, производство рассматривается как совокупность процессов изготовления, обслуживания и управления [230]. Их результаты, т.е. продукты или услуги, могут быть промежуточными или конечными. Производственная система представляется в виде графа, на котором различаются звенья (позиции формирования продуктов) и связи, описываемые удельными коэффициентами внутрипроизводственного потребления входящих продуктов (исходные ресурсы и промежуточные продукты) на единицу образуемых. Для каждой позиции производственного процесса выделяются локальные и нарастающие затраты в денежном выражении; затраты вспомогательного

производства оцениваются при помощи вероятностных методов.

Структурный подход к моделированию позволяет создать модель промышленного предприятия, инвариантную относительно его производственной структуры. Однако эти модели не рассматривают декомпозицию затрат, в силу чего они не могут быть использованы в современных прогнозах себестоимости.

Статические модели процесса материального производства включают в себя имитационные модели и модели линейного программирования. Имитационные модели применяются для описания процессов производства дискретного и непрерывного типа [231, 232]. Они использовались в условиях производства, основой которых является одноканальная, однофазовая система массового обслуживания, имитирующая прохождение требований [233]. Непрерывная имитационная модель экономики предприятия позволяет прогнозировать технико-экономические показатели производства в зависимости от вариантов распределения ресурсов [234]. Недостатком рассмотренных моделей является то, что они могут быть применены только для промышленных предприятий с последовательной технологической схемой.

Модели линейного программирования производства являются наиболее распространёнными при решении задач планирования на промышленном предприятии. Целевые функции реализуют критерии максимума прибыли [235, 236], минимизации материальных и денежных затрат [237], уменьшения времени простоя оборудования [238] и т.п. В качестве ограничений выступают объёмы запасов [239], фонды рабочего времени [240], производственные мощности оборудования, объёмы плановых заданий [241] и др. В ряде случаев данные модели преобразуются в статистические, рассматривая часть коэффициентов целевой функции или ограничений как случайные величины [170]. В работе [242] представлена модель многоэтапного производства в виде многоиндексной задачи линейного программирования, решаемой симплекс-методом. Целевая функция минимизирует суммарные капиталовложения при выполнении производственной программы. В рамках линейного программирования также нашли применение матричные модели [243]. Матричные модели используются при обработке

больших массивов информации. Они содержат наборы коэффициентов задач линейного программирования, описывают основные связи показателей техпромфинплана предприятия, задают связи между продукцией, материальными и трудовыми ресурсами и т.п. В качестве примера рассмотрена матричная модель для химической промышленности, описывающая связь сырья и продукции. Линейное программирование применяется для максимизации прибыли [243].

Модели линейного программирования получили своё распространение благодаря простоте формализации задачи и лёгкости ее решения. Общим недостатком этих моделей является линейность, отсутствие связей между коэффициентами и их стационарность, что значительно сужает область применения указанных моделей в настоящее время.

Динамические модели рассматривают процесс производства во временном аспекте. Кроме аппарата дифференциальных и разностных уравнений [244, 245, 242], в имеющихся работах при описании процесса производства используют теорию дифференциальных включений [246] и фильтр Калмана [247].

Работа [248] рассматривает промышленное предприятие как систему, состоящую из множества производственных звеньев (субстрат системы), набора отношений между звеньями (структура системы) и технологии производства готовой продукции из сырья и материалов (концепт системы).

Субстрат системы задаётся в виде (1.1):

$$S = \bigcup_{i=1}^{n_k} B_i^k, \quad (1.1)$$

где S – субстрат системы, k – степень агрегации, n_k – число звеньев степени агрегации, B_i^k – i -ое звено системы степени агрегации k .

Иерархия звеньев по степеням агрегации задаётся следующим образом (1.2):

$$B_i^k = \bigcup_{j=1}^{n_i} B_j^{k-1}, \quad B_i^k \cap B_j^k = \emptyset, \quad \forall i, j, k, \quad n_0 > n_1 > \dots > n_l \geq 1. \quad (1.2)$$

Блок (звено) описывает часть производства в своей целостности и неделимости и может включать с себя одно или несколько производственных звеньев (цехов, переделов, бригад и т.д.). Основной характеристикой блока B_i

является вектор \bar{y}^l – количество материальных ресурсов в блоке согласно ассортимента, описывающий незавершённое производство и выпуск готовой продукции. Движение ресурсов задаёт связи между блоками, при этом возможно наличие последовательных, параллельных и обратных связей.

Концепт системы задаётся системой дифференциальных уравнений, описывающей процесс движения материальных ресурсов на предприятии. Изменение количества k -го материального ресурса блока B_i (1.3):

$$\frac{d}{dt} y_k^i(t) = \frac{\Delta}{\Delta t} y_k^i(t) - \sum_j \frac{\delta_j}{\delta t} y_k^i(t), \quad (1.3)$$

где сумма берётся по всем связям k -го материального ресурса по ассортименту блока B_i с блоками системы. Первое слагаемое из правой части уравнения описывает производство этого ресурса, а второе – его потребление. Система дифференциальных уравнений вида (1.3), решаемая в режиме реального времени, даёт прогноз показателей движения материальных ресурсов и показателей оборачиваемости оборотных средств предприятия [248].

Предложенная модель позволяет формализовать процесс производства на любом промышленном предприятии с серийным либо массовым характером производства. Однако данная модель не описывает многоуровневую организацию производства (предприятие рассматривается на некотором одном заданном уровне агрегирования), в ней не учитывается наличие незавершённого производства внутри блоков, в структуре модели отсутствуют параметры, характеризующие особенности конкретного промышленного предприятия. Перечисленные недостатки делают невозможным ее использование в задаче динамического прогноза себестоимости.

Теория дифференциальных включений используется в модели, в которой процесс производства описывается в виде системы дифференциальных уравнений с неопределёнными параметрами, с некоторой минимальной информацией о пределах их возможных изменений – дифференциальные включения. Дифференциальные включения позволяют исследовать динамические свойства модельного представления, стабильность и жизнеспособность системы [246].

Фильтр Калмана используется в модели материального потока, в которой вводятся три переменные: плотность p , поток q и скорость u . Переменная p характеризует распределение деталей по технологическому маршруту, переменная q – сдачу деталей на операции, v – скорость движения. Имеются случайные возмущения b^* , z^* типа «брак» и «сбой». Для описания движения получены уравнения в частных производных. Фильтр Калмана используется для оценивания возмущений b^* , z^* и в выработке управляющих воздействий их компенсации [247]. В этих моделях отсутствует описание явлений формирования себестоимости продукции.

В завершение анализа имеющихся моделей материального производства необходимо отметить, что из всех рассмотренных подходов для моделирования процесса материального производства в рамках задачи динамического прогноза себестоимости наиболее целесообразно использовать структурный подход, рассматривая промышленное предприятие как многоуровневую систему с соответствующей декомпозицией затрат.

Опираясь на проведённый анализ и учитывая, что процесс материального производства лежит в основе формирования себестоимости, необходимо провести исследование и анализ работ по моделированию и управлению затратами на промышленном предприятии.

1.7 Исследование методик моделирования затратного механизма на промышленном предприятии и их применения для систем второго уровня автоматизированного управления производством в условиях экономической трансформации

Оценивание затратного механизма на промышленном предприятии осуществляется в моделях формирования себестоимости и прибыли. Анализ методик моделирования процесса формирования себестоимости продукции включает в себя исследование задач её планирования, прогноза, расчёта, анализа.

При планировании себестоимости в основном используется метод

планирования по технико-экономическим факторам и составление плановых калькуляций (нормативно-балансовый метод), а также матричные модели.

Планирование по технико-экономическим факторам осуществляется согласно количественного анализа зависимости между производственными затратами и различными изменениями в объёме производства, технологии, организации труда и производства [249]. Суть метода сводится к нескольким последовательно выполняемым этапам:

1. Определяют затраты на 1 руб. товарной продукции в базисном периоде (месяц, квартал, год). За базисные затраты принимают, как правило, затраты предшествующего периода. Далее в качестве периода рассматривается год.

2. Исчисляют себестоимость товарной продукции планового года исходя из уровня затрат, сложившихся в базисном году (C_T). С этой целью затраты на один рубль товарной продукции базисного года ($I_б$) умножают на объем товарной продукции планового года в ценах и условиях базисного года (D_T) (1.4):

$$C_T = I_б \cdot D_T. \quad (1.4)$$

3. Рассчитывают влияние важнейших технико-экономических факторов на понижение или повышение себестоимости товарной продукции планового года ($\Sigma \mathcal{E}$). К этим факторам относятся:

- изменение объема и структуры производимой продукции;
- повышение технического уровня производства;
- улучшение организации производства и труда;
- изменение природных условий и способов добычи полезных ископаемых;
- отраслевые и прочие факторы.

4. Из себестоимости товарной продукции, исчисленной по уровню затрат базисного года (C_T), вычитают итоговую сумму экономии, полученной в результате действия рассматриваемых факторов, и таким образом определяют себестоимость товарной продукции планового года (C'_T) в ценах базисного года (1.5):

$$C'_T = C_T - \Sigma \mathcal{E}. \quad (1.5)$$

5. Подсчитывают уровень затрат на 1 руб. товарной продукции (I_c)

планового года (в ценах базисного) (1.6):

$$I_c = \frac{C'_T}{D_T} \quad (1.6)$$

и процент снижения этих затрат по сравнению с уровнем затрат базисного года (1.7):

$$B = \left(\frac{I_6 - I_c}{I_6} \right) \cdot 100\% . \quad (1.7)$$

6. Вычисляют уровень затрат на 1 руб. товарной продукции I_k с учетом роста объёма товарной продукции D_k за счет увеличения оптовых и надбавок к ним, связанных с повышением качества продукции (1.8):

$$I_k = \frac{C'_T + C_k}{D_T + D_k} , \quad (1.8)$$

где C_k – дополнительные (текущие) эксплуатационные затраты по выпуску продукции повышенного качества.

7. При составлении годового плана, кроме того, определяют влияние на объем и себестоимость товарной продукции изменений оптовых цен на изготавливаемую продукцию D_d , потребляемое сырье, материалы, топливо, энергию и других условий, снижающих или повышающих издержки производства (C_d).

8. Подсчитывают уровень затрат на 1 руб. товарной продукции в ценах и условиях планового года (1.9):

$$I_T = \frac{C'_T + C_k + C_d}{D_T + D_k + D_d} \quad (1.9)$$

и процент снижения этих затрат по сравнению с уровнем затрат базисного года (1.10):

$$B = \left(\frac{I_6 - I_T}{I_6} \right) \cdot 100\% . \quad (1.10)$$

Рассмотренный расчётно-аналитический метод применяется, как правило, для определения величины плановых издержек производства на стадии разработки перспективных планов развития предприятия. Он показывает основные направления, за счёт которых намечается снижение себестоимости

продукции, а также роль и значение отдельных служб и подразделений предприятия в снижении издержек производства. Однако в современных экономических условиях, сопровождающихся значительными колебаниями рыночных цен на ресурсы, низкой платёжеспособностью заказчиков и нестабильностью портфеля заказов предприятия, результаты планирования себестоимости по данному методу имеют очень низкий уровень достоверности. Для управления деятельностью промышленного предприятия необходим прогноз себестоимости на короткие промежутки времени (декада, месяц).

Нормативно-балансовый метод является основным методом планирования себестоимости на стадии разработки техпромфинплана предприятия. Этот метод базируется на применении прогрессивных, технически и экономически обоснованных норм, и нормативов использования машин и оборудования, материалов, топлива, затрат труда и других расходов, определяющих себестоимость продукции [249]. Сущность данного метода состоит в составлении балансов потребности и распределения по направлениям производственно-хозяйственной деятельности предприятия всех материальных, трудовых и денежных ресурсов, необходимых для выполнения производственного плана. Нормы и нормативы, используемые для составления плана по себестоимости, основываются на действующих (или ожидаемых на начало планового периода) нормативах с учётом их изменения под влиянием всех организационных и технических мероприятий по совершенствованию производства (внедрение в производство достижений науки и техники, изобретений и рационализаторских предложений рабочих, ИТР и служащих, мероприятий по расширению и реконструкции предприятия и т.п.), намечаемых в плановом периоде. В качестве периода в современных условиях выступает месяц, реже – квартал, год.

Используя нормы и нормативы, а также данные техпромфинплана по производству, труду, финансам, капитальному строительству, внедрению новой техники и материально-техническому снабжению разрабатываются следующие компоненты плана по себестоимости:

- 1) смета затрат на производство;

2) калькуляции себестоимости единицы изделий по всем видам продукции, включённым в план по выпуску;

3) сметы затрат по цехам вспомогательного производства с калькулированием себестоимости их продукции и услуг;

4) сметы расходов по обслуживанию производства и управлению (расходы по содержанию и эксплуатации оборудования, цеховые и общезаводские);

5) смета транспортно-заготовительных расходов;

6) смета прочих производственных расходов;

7) смета внепроизводственных расходов;

8) сводный расчёт изменения себестоимости по технико-экономическим факторам, обобщающим все произведённые расчёты.

Кроме того, на предприятиях отдельных отраслей промышленности также составляются:

- смета расходов на освоение производства новых видов продукции;
- смета расходов по изготовлению специальной оснастки и прочих специальных расходов;
- смета пусковых расходов;
- смета расходов на текущий ремонт основных средств;
- смета расходов на горно-подготовительные работы и другие.

На основании смет расходов составляются плановые калькуляции продукции по элементам затрат или же по калькуляционным статьям. При этом величина условно-постоянных расходов определяется на основании соответствующих данных смет, а величина условно-переменных рассчитывается как произведение объёма производства соответствующего вида продукции на норму расхода на её единицу (линейная зависимость).

Нормативно-балансовый метод обеспечивает полную, органическую увязку показателей плана по себестоимости с техпромфинпланом и позволяет осуществлять контроль за правильностью его составления. На основе этого метода созданы статические модели плановых расчётов [250]. Они используются для определения себестоимости новых изделий [251], планирования затрат на 1

руб. товарной продукции [252], организации плановых расчётов на ЭВМ [225]. Данный метод, как и расчётно-аналитический, в силу большой трудоёмкости позволяет просчитать два-три варианта прогноза себестоимости для задач формирования портфеля заказов и планирования производства, чего в современных условиях недостаточно для эффективного управления деятельностью предприятия. При этом расчётные процедуры рассмотренных методов не учитывают динамику переходных процессов в экономике, нелинейный характер зависимости величины затрат от объёмов производства.

Матричные модели планирования основаны на использовании матриц, отражающих технологические и производственные связи предприятия [253], которые применяются для расшифровки комплексных расходов и распределения косвенных затрат [253]. Матричная модель даёт возможность расшифровки комплексных расходов предприятия. Матрицы внутрипроизводственных связей и поставок ресурсов со стороны составляются с учётом особенностей использования полуфабрикатов, отходов, попутной продукции и комплексной переработки сырья. При расшифровке комплексных расходов применяется диагональная матрица себестоимости [254]. Для распределения косвенных расходов применяются полученные на основе технологического маршрута производства матрица коэффициентов прямых затрат и обратная к ней матрица Леонтьева, при условии стабильности этих коэффициентов [255]. Рассмотренные модели являются статическими.

Для прогноза себестоимости используются статистические модели, а также модели с применением адаптивного экспоненциального сглаживания и коротких временных рядов.

Статистические модели прогноза себестоимости используют аппарат регрессионного анализа. На основании статистических данных, собранных за определённый промежуток времени функционирования предприятия, строится зависимость величины себестоимости продукции или какой-то ее составляющей от технико-экономических факторов, оказывающих влияние на процесс ее производства [256]. Эти модели используются для прогнозирования

себестоимости спечённых изделий [257], добычи газа [258], выемки руды [259], прогнозирования расходов на содержание и ремонт оборудования [229], затрат энергии при постройке судов [260], прогноза затрат при комплексной переработке сырья [241], формирования оптимальной производственной программы предприятия [261], создания системы прогнозирования на предприятии [262].

Применение адаптивного экспоненциального сглаживания, основанного на использовании контрольного следящего сигнала (трекинг-сигнала), рассматривается в рамках прогнозирования экономических показателей в энергетике. Метод служит для распознавания возникающих погрешностей в прогнозах, что позволяет их улавливать и вносить соответствующие изменения в модель прогноза [263].

Метод моделирования себестоимости на основе коротких временных рядов опирается на выявление и использование основных закономерностей в формировании затрат и используется в условиях ограниченной ретроспективной информации о деятельности предприятия [264].

Рассмотренные модели получили широкое распространение благодаря простоте и удобству используемого математического аппарата, однако усилившаяся динамика экономических процессов значительно сужает область их возможного применения. Они позволяют прогнозировать среднюю себестоимость продукции за некоторый, довольно значительный промежуток времени, а в современных условиях для управления деятельностью промышленного предприятия наиболее важен динамический прогноз себестоимости, т.е. прогноз величины себестоимости на промежутки времени, кратные декаде.

В моделях расчёта себестоимости формализованы существующие методики калькулирования, представления учётной информации с последующей автоматизацией расчётов.

Формализации в виде экономико-математических моделей подвергаются методы расчёта себестоимости при помощи удельных коэффициентов [265]; способ суммирования затрат [266]; распределение косвенных расходов [267]; зависимости для определения нормативов по содержанию оборудования [256] и

расчёт цеховой себестоимости [268]. Разработана модель расчёта себестоимости производства [269], математическая модель расчёта себестоимости изделий для условий малого предприятия [270], модель в виде СЛАУ для расчёта себестоимости продукции и услуг [271], модель формирования затрат при флотации [2], модель определения затрат на производство электроэнергии [229], статическая детерминированная модель определения производственных затрат [272]. Имеются также модели, реализующие расчёт себестоимости по методу директ-костинг (расчёт себестоимости только по прямым затратам) [323, 273], хотя этот метод из-за неполноты представляемой информации о затратах не получил широкого распространения в отечественной практике. Рассмотренные модели являются статическими и служат для расчёта фактической себестоимости, поэтому их применение для динамического прогноза себестоимости невозможно.

Для представления учётной информации используются матричные модели. Матрицы содержат информацию, относящуюся к данным процесса производства, коэффициентам затрат, связям с бухгалтерскими счетами и т.п. [273]. Использование этих моделей позволяет получить единую интегрированную схему обработки данных на предприятии. При этом информация представляется в строго увязанном виде, можно определить место возникновения затрат по элементам и целевому направлению [274]. Такие модели используются как для расчёта себестоимости продукции, так и для расшифровки комплексных расходов [275].

Автоматизация расчёта себестоимости включает в себя выбор математической модели калькулирования и реализацию алгоритма на ЭВМ. В имеющихся работах рассматривается автоматизация расчёта себестоимости на примере предприятий машиностроения [276], пакет прикладных программ «Калькулирование себестоимости продукции» (расчёт себестоимости по калькуляционным статьям) [277]; Имеются работы по расчёту себестоимости сложных изделий [278] и нормативов чистой продукции и её себестоимости в рамках АСУ предприятием [279], созданию системы управления себестоимостью по нормативному методу [280, 281], для представления и хранения информации в

которых используются специальные банки данных. Система оперативного учёта технико-экономических показателей производства труб ежедневно решает задачи по учёту и анализу расхода металла и выпуска готовой продукции, рассчитывает и анализирует суточную себестоимость [282]. В основу рассмотренных систем положены статические модели расчёта фактической себестоимости, не учитывающие динамику экономических процессов.

Анализ себестоимости продукции промышленного предприятия проводится, как правило, с использованием методов факторного, корреляционного и регрессионного анализа. Опираясь на статистический материал, характеризующий работу предприятия за некоторый промежуток времени, проводится исследование зависимости себестоимости от ряда технико-экономических показателей.

Факторный анализ себестоимости является составной частью метода её планирования по технико-экономическим факторам. Техничко-экономические факторы, оказывающие влияние на её себестоимость, объединяются в группы, каждая из которых включает ряд факторов [283]. Основные из них характеризуют технический уровень производства, уровень организации труда и производства, объем и структуру продукции. Для этих факторов на основании собранного статистического материала рассчитывается их влияние на величину себестоимости [284, 281]. В имеющихся работах рассмотрены результаты анализа себестоимости коконов [285], суровых тканей [286], фосфатной продукции [287], затраты в приборостроении [288], бурении скважин [289], себестоимости на 1 руб. товарной продукции [290, 291], а также анализ себестоимости станкостроительной продукции методом главных компонент [292]. Факторный анализ также применяется для контроля и анализа издержек производства пищевых продуктов, затрат на технологическое оборудование [293], зависимости себестоимости руды от производственной мощности рудных шахт.

Однако сложность проведения этого анализа состоит в том, что технико-экономические факторы находятся в тесной взаимосвязи и взаимодействии, действуют разнонаправлено и одновременно, что допускает вероятность

повторного счета результата влияния некоторых факторов [294]. Для оценки комплексного влияния факторов на величину себестоимости используется аппарат корреляционного и регрессионного анализа.

При исследовании себестоимости с их помощью в модель анализа включаются как факторы, непосредственно её формирующие (расход материалов, заработной платы), так и те, которые действуют опосредованно (производительность труда, фондоотдача, оборачиваемость оборотных средств и т.п.) [295]. Корреляционный анализ используется для оценки характера и степени влияния факторов на себестоимость, а также для исследования их взаимной обусловленности. Регрессионный анализ позволяет построить математическую модель зависимости величины себестоимости продукции от выделенных технико-экономических факторов. Модель зависимости величины затрат на рубль товарной продукции для одного промышленного предприятия представлена уравнением (1.11):

$$y = 1,1869 + 0,009x_1 + 2,5132x_2 + 0,0002x_3 - 0,0180x_4 - 2,292x_5 - 0,004x_6 - 0,0003x_7, \quad (1.11)$$

где x_1 – производительность труда; x_2 – фондоотдача; x_3 – оборачиваемость оборотных средств; x_4 – качество продукции; x_5 – коэффициент сменности; x_6 – удельный расход материалов; x_7 – затраты на заработную плату.

Анализ для данного регрессионного полинома величины критерия Фишера, коэффициента множественной детерминации и оценки значимости факторов по критерию Стьюдента показывает, что уравнение в целом и его коэффициенты статистически значимы, а связь между себестоимостью и факторами достаточно тесная, что говорит об адекватности предложенной модели.

Аппарат регрессионного анализа также был использован для построения многофакторных моделей производственных процессов [296], моделирования производственных затрат по стадиям технологического процесса [297], исследования и оптимизации себестоимости концентрата [298], моделирования себестоимости изготовления технологического оборудования [299], анализа и планирования затрат на ремонты [226], анализа себестоимости в лёгкой

промышленности [300, 301], моделирования затрат на один руб. товарной продукции в чёрной металлургии [302], проектирования себестоимости пряжи для ниток в текстильной промышленности [230], исследования себестоимости нерудных строительных материалов [303], расчёта и анализа прибыли и рентабельности [304].

Основным назначением рассмотренных регрессионных моделей является выявление резервов снижения уровня затрат и организации на этой основе управления себестоимостью продукции [305]. Однако в современных условиях эффективное управление себестоимостью может быть осуществлено только на базе её динамического прогноза. Данные модели не предназначены для динамического прогноза себестоимости, так как входящие в них факторы отражают фактическое состояние предприятия, а задание в качестве их значений ожидаемых (плановых) величин в условиях современной динамики экономических процессов не может дать достоверных результатов.

В данной работе были рассмотрены и проанализированы основные подходы к моделированию себестоимости в задачах её прогноза, планирования, расчёта и анализа. Ни одна из рассмотренных моделей в полном объёме не может быть использована для решения задачи динамического прогноза себестоимости продукции промышленного предприятия, что определяет актуальность разработки подходов к моделированию и управлению себестоимостью.

1.8 Выводы по разделу 1. Обоснование цели и задач исследования

Научное обоснование направлений развития методологии и принципов создания систем управления процессами и производствами в условиях экономико-производственной, информационной и технологической трансформации предприятий обуславливает формулировку постановки задач.

Общая постановка задачи, решаемой в данной работе, формулируется следующим образом: разработать алгоритм, специальное математическое и

программное обеспечение автоматизированной системы управления процессом биосорбции серебра.

Для решения этой задачи необходимо:

- провести анализ физико-химических особенностей протекающих процессов, исходя из которых обосновать выбор математического аппарата моделирования;
- разработать математические модели, учитывающие физико-химические, технологические и эксплуатационные особенности процессов, протекающих на участке биосорбции;
- выбрать метод идентификации моделей и осуществить параметрическую идентификацию;
- осуществить постановку и формализацию задач управления процессами, протекающими на участке биосорбции серебра;
- выбрать численные процедуры решения уравнений модели и поиска экстремума функционала цели;
- разработать алгоритмы трёхуровневой системы управления процессами;
- осуществить численное исследование работы алгоритма автоматизированной системы управления производственными процессами;
- разработать программное обеспечение автоматизированной системы управления производственными процессами.

Для научного обоснования направлений развития методологии и принципов создания систем управления процессами и производствами в условиях экономико-производственной, информационной и технологической трансформации предприятий как основной задачи исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Сформировать методологические правила пополнения специального математического и программного обеспечения поставляемых систем управления производственными процессами, учитывающие условия технологической, экономической и информационной трансформаций.

2. Сформировать методологические правила, которые позволят осуществлять обобщённую оценку деятельности служб управления предприятием и технологическими процессами.

3. Осуществить физическую и формальную постановку решения задач экономико-производственных подразделений иерархической структуры управления и задач управления технологическими процессами.

4. Установить и формализовать критерии оценки эффективности трёхуровневой системы управления процессом сорбции серебра.

5. Разработать математические модели и алгоритм функционирования трёхуровневой системы управления нестационарным процессом биосорбции серебра как системы с идентификатором в контуре управления.

6. Поставить, формализовать задачу планирования, разработать математические модели и методики расчёта показателей, составляющих алгоритм принятия решений на предприятиях мелкосерийного производства.

7. Поставить и формализовать задачу оперативного управления себестоимостью, разработать математические модели и методики, на основании которых сформировать алгоритм системы управления производственными процессами и провести опытно-промышленные испытания, позволяющие оценить эффективность принимаемых решений.

На основании материала, изложенного в первом разделе можно сделать следующие выводы:

1. Исследованы программные средства многоуровневых систем управления процессами и производствами и определена возможность их использования в условиях информационной трансформации поставляемых с оборудованием программных комплексов.

2. Проведён анализ специального математического обеспечения систем управления технологическими процессами, определена методология и правила её применения для трёхуровневой системы управления гидрометаллургическим процессом извлечения серебра из грязных растворов в условиях технологической трансформации.

3. В результате исследования математического обеспечения автоматизированных систем управления производством сформирована методология и определены правила, определяющие взаимодействие производственных подразделений второго уровня (цехов) с учётом экономико-производственной трансформации.

4. Анализ существующего математического обеспечения автоматизированных систем управления затратным механизмом производства продукции даёт возможность сформулировать методологию и правила принятия решений в условиях экономической трансформации.

5. Проведён анализ проблем и особенностей разработки современных автоматизированных систем управления производственными процессами, на основании чего определена актуальность диссертационного исследования.

6. Исследованы проблемы и основные закономерности технологических реализаций гидрметаллургических и сорбционных процессов, что позволяет осуществить постановку задачи разработки автоматизированной системы управления.

7. Рассмотрены методы и способы разработки математических моделей как составной части систем управления процессами и производствами.

8. Осуществлён анализ методов параметрической идентификации математических моделей.

9. Сформулированы задачи, вопросы и составные части диссертационного исследования.

10. При разработке инструментария информационной технологии СППР целесообразно использовать методы системного анализа, позволяющие выделить и формализовать переменные, характеризующие исходные сырьевые продукты, технологические особенности и требования производственного характера. На основании этого анализа выделяются функциональные связи, с помощью которых осуществляется разработка функциональных моделей автоматизированных процессов, определяется структура и характеристики базы данных. Кроме этого, на основе принципов оптимизации моделей и методов принятия решений

осуществляется формализация задач управления и ограничений, соответствующих технологическим ограничениям производства.

11. В результате анализа современных подходов к решению задач оптимального планирования определён математический аппарат, методы и приёмы поиска экстремума функционала цели, определяющего качество задачи планирования и технологических ограничений.

12. Исследованы возможности использования адаптивных алгоритмов, базирующихся на штрафных функциях, ГА поиска экстремума и других методов имитационного моделирования. ГА со специфическими доработками, характеризующими предприятия конвейерного типа, может быть использован при поиске оптимальных решений задачи планирования.

13. Современные информационные системы классов MRP и ERP не могут быть использованы в задаче планирования ПП предприятий, чья деятельность характеризуется нестабильностью позиций портфеля заказов и сложной системой регламентных условий, определяющих возможности технологического оборудования.

14. Информационные системы классов MES и APS не могут быть непосредственно использованы в реализации СППР на предприятиях конвейерного типа. Их применение возможно при условии, что системы дополнены математическими моделями, соответствующими формализованным целям управления.

15. Анализ существующих методов и моделей расчёта и прогноза себестоимости показал, что работы в этой области представлены широким спектром подходов и приёмов, математического аппарата. Можно выделить комбинаторные, статические и динамические модели. Комбинаторные модели позволяют формализовать как структуру предприятия, так и приёмы методик калькулирования затрат. Статические модели отражают задачи планирования социалистической формы хозяйствования, т. е. привязаны к совокупности нормативных и статистических показателей предшествующих периодов в условиях малой девиации плановых показателей. Существующие динамические

модели рассматривают некоторые частные задачи, относящиеся к затратному механизму, например, к управлению запасами.

16. Для синтеза системы управления себестоимостью возможно применение методик комбинаторного анализа при формализации структуры предприятия и методик калькулирования. Это даст возможность разрабатывать алгоритмы управления себестоимостью, инвариантные относительно структуры объекта управления. Предыстория затратного процесса в виде статистического материала должна рассматривать короткие интервалы квантования, кратные декаде, т.к. в современных условиях плановые периоды квартал, год для предприятий не приемлемы, причём совокупность показателей динамического прогноза определяется лицом, принимающим решения, как и интересующий его период прогноза.

17. Современную систему прогнозирования и управления затратным механизмом необходимо рассматривать как многоуровневую, в которой возможно прогнозирование показателей для всех подразделений предприятия в их структурной и функциональной взаимосвязи, причём интервалы квантования совместно с интегрированием показателей колеблются от дискретно-непрерывной смены на агрегате до периодов сутки, декада, месяц на уровне предприятия как юридического лица.

18. Для реализации поставленной задачи необходимо провести системный анализ промышленного предприятия как объекта управления в задаче возникновения затрат и формирования себестоимости, существующих методик калькулирования, совокупность показателей которых доступна планово-производственным службам как пользователям, с соответствующим выделением взаимосвязей и совокупности показателей, подлежащих формализации.

Перечисленные особенности определяют функциональное содержание разделов диссертационной работы.

РАЗДЕЛ 2

МЕТОДЫ ПОПОЛНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОБЪЕКТАХ УПРАВЛЕНИЯ,
 ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНОГО
 МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
 ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОЙ
 И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИЙ

2.1 Обобщённое представление систем управления процессами и производствами

Современные аспекты представления систем управления производствами и процессами, как правило, касаются частных случаев, в которых специализируется тот или иной исследователь. Наиболее общее представление оптимальных (в любом смысле) систем дано в работе [1]. Согласно автору, любая система управления (в том числе и оптимальная) может быть представлена точкой или некоторой областью в трёхортовом пространстве МИФ (Рисунок 2.1), конфигурация и размеры, которой определяются совокупностью показателей объекта управления (ОУ).



Рисунок 2.1 — Трёхортовое представление систем управления процессами и производствами

Для реализации процедур численного сравнения различных систем управления производственными процессами целесообразно использовать их обобщённое представление.

Известно, что формализованные характеристики объекта управления – математические модели «в большом» отображают свойства классов объектов, т.е. представляются в форме различных структур. Современные аспекты задач моделирования отражены в работе [306]. Выделение конкретного объекта из своего класса производится с помощью процедур идентификации. Таким образом, математические модели в системах управления представляются параметрическими структурами.

Наиболее общим представлением являются модели в виде дифференциальных уравнений в частных производных, однако громоздкость вычислительной процедуры метода сеток делает их применение в системах управления малоприменимым. Известная классификация моделей по временному признаку позволяет выделить статические и динамические модели. Статические модели, как правило, представимы в виде систем линейных (2.1) или нелинейных (2.2) полиномов:

$$\bar{y} = \bar{\beta}_0 + \sum_{i=1}^N \bar{\beta}_i \bar{x}_i \quad (2.1)$$

$$\bar{y} = \bar{\beta}_0 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \bar{\beta}_{ij} \bar{x}_i \bar{x}_j + \sum_{i=1}^N \bar{\beta}_i \bar{x}_i \quad (2.2)$$

где \bar{y} – выходные переменные объекта управления; \bar{x}_i – входные переменные объекта управления; $\bar{\beta}_0, \bar{\beta}_{ij}, \bar{\beta}_i$ – параметры моделей; N – число переменных.

Динамические модели представимы в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений (2.3) или конечно-разностных уравнений (2.4):

$$\frac{d\bar{y}}{dt} = \bar{f} \left(\bar{x}, \bar{y}, \frac{dy}{dt}, \bar{z}, \bar{\beta}, t \right) \quad (2.3)$$

$$\bar{y}(k+1) = f \left(\bar{x}(k), \bar{y}(k), \bar{z}(k), \bar{\beta}(k) \right) \quad (2.4)$$

где \bar{z} – помехи; t – время процесса.

Динамические модели могут быть линейными или нелинейными как по переменным, так и по параметрам. Согласно [307], если $\bar{\beta}_i = f(\beta_j)$ – модель нелинейна по параметрам, при $\beta_i = f\left(x, y, \frac{dy}{dt}\right)$ – модель нелинейна по переменным, при $\beta_i = f(t)$ – модель с нестационарно-линейными параметрами.

Для экспертных систем по орту ОМ могут представляться структуры наборов правил, а в системах искусственного интеллекта – структуры ассоциативных связей.

Рассматривая возможности получения решений задачи Коши для динамических моделей, следует выделить структуры начальных условий. Для объектов с медленно меняющимися характеристиками (относительно скорости вычислительных процедур) возможно применение математических моделей в виде системы стохастических дифференциальных уравнений (2.5):

$$\frac{d\bar{y}}{dt} = \bar{f}\left(\bar{x}, \bar{y}, \frac{dy}{dt}, \bar{z}, \bar{\beta}, t\right) + \omega(t) \quad (2.5)$$

$\omega(t)$ – случайный процесс.

Рассматривая показатели относительно орта ОИ – информация об объекте управления, – следует выделить аспекты априорного и апостериорного активного и пассивного накопления информации. В современных системах управления, базирующихся на цифровых вычислительных комплексах и сетях различной конфигурации, необходимо учитывать способ ввода информации. Если ввод осуществляется с пульта, то в систему управления поступает оцифрованный сигнал. В случае снятия информации с различного типа аналоговых датчиков производится квантование и оцифровывание непрерывных сигналов. Кроме этого, учитывается метод измерений (мостовой или потенциометрический), тип сигнала (двоичный, троичный). Методологию и способы квантования следует отнести к характеристикам объекта управления. Сюда же следует отнести способы формализации и модель опроса датчиков, модели оценивания погрешностей измерений и квантования.

Рассматривая плоскость МОИ, следует отметить, что она характеризует задачи параметрической идентификации. Для моделей вида (2.1) информация об

объекте управления должна группироваться в информационную матрицу значений входных переменных и векторов выходящих переменных. В классической постановке задачи оценивания параметров (2.6):

$$E = \sum_{i=1}^M (y_{iоб} - y_{iмод}) \Rightarrow_{\bar{\beta}} \min, \quad (2.6)$$

где M – объем выборки; $y_{iоб}$ – выходные переменные, измеренные на объекте; $y_{iмод}$ – выходные переменные, прогнозируемые по модели (2.1).

Информация об объекте позволяет осуществить расчёт параметров по (2.7):

$$\bar{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T \bar{Y}_{об}, \quad (2.7)$$

где X – информационная матрица входных переменных; X^T – транспонированная матрица; $\bar{Y}_{об}$ – вектор выходных переменных, измеренных на объекте.

Следует отметить, что для систем управления с неполной информацией об объекте, информационная матрица может накапливаться в процессе движения объекта, и при достижении представительности выборки m , оцениваемой по числу степеней свободы f , может осуществляться процедура (2.7).

Это характерно для адаптивных систем с идентификатором в контуре управления. В этих системах тренд или временной дрейф возможно учитывать циклическим сдвигом строк информационных массивов или рекуррентными процедурами (2.8):

$$\begin{aligned} \bar{\beta}(k+1) &= \bar{\beta}(k) + \bar{\gamma}(k) \bar{\rho}(k) \bar{u}(k+1) (y(k+1) - \bar{u}'(k+1)) \beta(k), \\ \bar{\gamma}(k) \bar{\gamma}'(k) &= 1, |\bar{\rho}(k)| - 1 = \bar{u}_k^{-1} \bar{u}_k. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Таким образом, вычислительные процедуры матричной алгебры (2.7) осуществляются над некоторой областью, задаваемой в плоскости МОИ.

В случае, если математическая модель представима в виде (2.3), процедуры оценивания параметров и состояний имеют более сложный характер. Если эти модели линейны, то существуют единственные условия наблюдаемости и идентифицируемости. Для случаев нелинейных моделей арсенал процедур настройки многообразен, но в его основе лежат принципы обратной задачи системного анализа, а для осуществления процедур необходима информация о значениях входных и выходных переменных, численных значениях начальных

условий задачи Коши. При этом процедуры оценивания параметров имеют среднестатистический характер.

Для класса адаптивных систем управления производственными процессами структуры динамических моделей могут быть избыточными. Это даёт возможность варьировать структуру модели с помощью процедур идентификации, в которых незначимые элементы структуры эквивалентны нулю. Совокупность идентифицированных уравнений являет собой модели представления конкретного объекта управления. Таким образом, область, представляющая в плоскости МОИ класс объектов управления, в результате получения информации об объекте и последующей идентификации преобразуется в более узкую область конкретного объекта управления. Для идентификации уравнений (2.5) применяются более сложные алгоритмы, в которых оценивается математическое ожидание и дисперсия состояний и параметров. Применимость этих моделей и, соответственно, процедур идентификации ограничена быстродействием и возможностями компьютера в контуре управления. Известно, что идентифицированные по собранной информации модели нуждаются в проверке адекватности, которая осуществляется по независимым от первоначальных данных выборочным значениям переменных. В этом случае, при положительной (дисперсионной) оценке адекватности, область представления объекта управления на плоскости МОИ ещё больше уменьшается.

Таким образом, в зависимости от степени полноты знаний о характеристиках объекта управления и информированности о его состояниях, плоская фигура, представляющая математическую модель объекта, может иметь различную конфигурацию и площадь [308]. В многоуровневых системах управления подобное представление математических моделей возможно для объектов управления каждого уровня [309]. Рассматривая системы искусственного интеллекта, следует отметить, что в этой плоскости формируются нечёткие множества и ассоциативные связи, характеризующие объект управления, и производится кластеризация и формирование образов. В экспертных системах на плоскости МОИ идентифицируются правила.

Рассматривая орт ОФ требований к объекту управления [1], следует отметить, что по этому орту формализуются цели управления в виде соответствующих критериев оптимальности. Как правило, это экономические показатели, формализованные в виде функционалов, зависящих от состояний, входных и выходных переменных и выделенных управляющих входов. Функционалы могут быть линейными, нелинейными, интегральными и т.д. Это разделяющая поверхность в задачах линейного программирования и распознавания образов.

Представление свойств системы управления в плоскости МОФ отражает классическую постановку задач методов оптимизации (2.9) – (2.11):

$$f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{u}, t) \rightarrow \min; \quad (2.9)$$

$$f_i(\bar{x}, \bar{y}, \bar{u}, t) \leq 0; \quad (2.10)$$

$$\bar{x}(0) \leq 0, \quad (2.11)$$

где $\bar{u} \subset \bar{x}$ – управляющие переменные.

Очевидно, что различные виды функционалов (2.9) могут быть представлены точками или отрезками на оси ОФ, а (2.10) – математические модели, выступающие в роли ограничений, – точками или отрезками на оси ОМ. Тогда задачи типа (2.9) – (2.11) занимают некоторую область на плоскости МОФ. Численные методы решения задач (2.9) – (2.11) определяются над этой областью. Очевидно, что для адаптивных систем может быть предусмотрена избыточность структуры за счёт многофункциональных постановок задач. Плоскость МОИ даёт возможность формировать области определения функционалов и решать задачи идентификации их параметров. В задачах (2.9) – (2.11) на этой плоскости определяются численные значения критериев оптимальности, характеризующие качество управления.

В совокупности, обобщённое представление объекта и системы управления в трёхмерном пространстве МИФ занимает некоторую трёхмерную область различной конфигурации (параллелепипед, сфера, эллипс) и объёма, каждая точка которой представима набором вектор-функций. Следует отметить, что такое

представление системы управления может дать возможность сравнивать различные системы по сложности, точности, экономической эффективности и пр.

2.2 Представление систем управления процессами и производствами в функциональных пространствах

Современные тенденции, рассматривающие системы управления (СУ) процессами и производствами как многоуровневые структуры, реализованные на разветвлённой вычислительной сети, требуют новых подходов к их формальному представлению. Целью дальнейших исследований является методология создания представления СУ, инвариантной относительно уровней управления, специфики основных методологических положений и математического аппарата, на основании которых разрабатываются эти системы. В основе предлагаемого представления систем управления процессами и производствами положено, введённое в [1], трёхортное пространство Фельдбаума: характеристики объекта управления – информация об объекте управления – требования к объекту управления (ХИТ). Согласно аксиоматике этого представления, любая СУ может быть представлена в этом пространстве некоторой геометрической фигурой – от прямоугольного параллелепипеда до эллипсоида, где каждая точка их объёма есть вектор-функция характеристик, свойств и состояний.

Следует отметить, что введённое таким образом пространство E – линейно, т.к. $\forall x \in E, y \in E \Rightarrow x + y \in E; x \in E, \lambda \in R \Rightarrow \lambda x \in E$.

Согласно утверждению о линейности пространства выполняются аксиомы:

$$x + y = y + x;$$

$$x + (y + z) = (x + y) + z;$$

$$\exists 0 \in E \quad x + 0 = x;$$

$$\lambda (\mu x) = \lambda (\mu) x, \quad \lambda \in R, \quad \mu \in R;$$

$$1 \cdot x = x, \quad 0 \cdot x = 0;$$

$$\lambda (x + y) = \lambda x + \lambda y;$$

$$(\lambda + \mu) x = \lambda x + \mu y.$$

Для формального представления элементов этого пространства рассмотрим составляющие вектор-функций по каждому орту.

Направление «характеристики объекта управления» подразумевает, что точками и отрезками этого координатного направления являются математические модели.

Классифицируя модели по временному признаку на статические и динамические [310], можно формировать их в виде соответствующих множеств: (2.12) – динамическая модель, (2.13) – статистическая модель:

$$M' = \{m'_i\}, \forall i, m_i: \left\{ \frac{d\bar{y}}{dt} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{u}, \bar{\beta}, t) \right\}, \quad (2.12)$$

где \bar{y} – вектор выходных переменных; \bar{x} – вектор входных переменных; \bar{u} – вектор управляющих переменных; $\bar{\beta}$ – вектор параметров модели.

$$M^2 = \{m_i^2\}, \quad m_i: \left\{ \bar{y} = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \beta_{jk} x_j x_k \right\}. \quad (2.13)$$

Уравнения модели в частных производных в данной работе не рассматриваются, т.к. их применение в алгоритмах систем управления производствами, функционирующих в ритме с процессом, ограничено из-за сложностей вычислительного характера при реализации численных процедур.

В зависимости от степени изученности явлений и процессов, происходящих в объекте управления, изменяется как число уравнений, так и их порядок, что характеризует размеры отрезков, определяющих характеристики класса объектов, для которых синтезированы модели (2.12) и (2.13), как параметрическая структура.

Рассматривая свойства системы по орту «информация об объекте» можно выделить два класса измерений переменных: дискретные и непрерывные (аналоговые). Непрерывные измерения характеризуются множествами (2.14):

$$N' = \{n'_i\}, \quad n_i = \{\bar{x}(t), \bar{y}(t), \bar{u}(t)\} \quad (2.14)$$

Дискретные измерения формализованы в виде (2.15):

$$N^2 = \{n_i^2\}, \quad n_i = \{\bar{x}(k), \bar{y}(k), \bar{u}(k)\} \quad (2.15)$$

В зависимости от возможностей измерительных подсистем вектор-функции этих множеств могут иметь различную размерность, т.е. по этому координатному направлению отображаться отрезками различной длины. Если рассматривать геометрическую фигуру, представляющую систему управления [3] на плоскости ХИ – «характеристики объекта управления – информация об объекте управления», то площадь и геометрия этой фигуры будут изменяться как от степени изученности явлений, происходящих на объекте управления, так и от возможностей измерения (2.16), т.е.

$$S_{\text{ХИ}} = S_{\text{ХИ}}(M', M^2, N', N^2). \quad (2.16)$$

Каждая точка этой фигуры $S_i \in S_{\text{ХИ}}$ есть вектор-функция, отражающая зависимость (2.16). Подстановка и реализация задачи параметрической идентификации моделей M' и M^2 [311], которая осуществляется согласно измерениям $N = N' \cup N^2$, позволяет определить параметры моделей β , что, в свою очередь, приводит к уменьшению площади фигуры $S_{\text{ХИ}}$ и изменению ее геометрии. В этом случае модель характеризует конкретный объект из класса объектов данной природы.

Координатное направление «требования к объекту управления» предназначено для отображения показателей (зачастую экономических) управляемого процесса, т.е. критериев оптимальности, представленных в виде функционалов (2.17) и (2.18):

$$T' = T'(\bar{x}, \bar{y}, \bar{u}, t), \quad (2.17)$$

$$T^2 = T^2(\bar{x}, \bar{y}, \bar{u}). \quad (2.18)$$

Рассматривая плоскость ТИ – «требование к объекту управления – информация о нем», можно выделить плоскую фигуру (2.19):

$$S_{\text{ХИ}} = S_{\text{ХИ}}(T', T^2, N', N^2). \quad (2.19)$$

Т.к. на этой плоскости целесообразно рассматривать как функционалы цели, так и ограничения физического или экономического характера, то в зависимости от выбора функционалов и ограничений будет меняться как площадь, ограниченная фигурой (2.19), так и её геометрия (2.20):

$$S_{ХТ} = S_{ХТ}(M', M^2, T', T^2). \quad (2.20)$$

Площадь и геометрия этой фигуры могут изменяться в зависимости от числа и вида функционалов цели, размерности моделей, которые могут представлять структуру динамических и статических ограничений на управляемый процесс.

Объединяя приведённые выше соображения, можно сделать вывод, что система управления представима в линейном пространстве ХИТ в виде некоторой трёхмерной фигуры, координаты каждой точки которой являются соответствующими вектор-функциями, а объем и геометрия этого тела меняются в зависимости от переменных характеристик.

Такое представление не даёт возможности количественно оценить уровень накопления информации в процессе дуального управления [1] или адаптивных процедур. Количественная оценка объёмов фигуры ХИТ в зависимости от этих требований возможна в случае преобразования множеств (2.12) – (2.20) в нормированные или ортогональные пространства.

Рассмотрим преобразования составляющих трёхортогового пространства Фельдбаума.

Множество $M' = \{m'_i\}$, представленное динамическими детерминированными моделями, это множество непрерывных и, по определению, дифференцируемых функций [307].

Для метрики вида (2.21):

$$\rho(m_i, m_j) = |m_i(t) - m_j(t)| \quad (2.21)$$

множество M' преобразуется в метрическое пространство непрерывных функций $M' = C$.

Введя норму, $\|m_i\| = \max_i |m_i(t)|$ получим представление динамических детерминированных моделей, как линейного нормированного пространства Банаха, т.е. $M'(\|m_i\|) = B$.

Применение динамических математических моделей M' для задач управления, как инструмента прогноза состояний объекта в последующие моменты времени предполагает наличие в контуре управления процедур

интегрирования уравнения модели. При этом можно полагать, что уравнения (2.12) интегрируемые. Вводя метрику (2.22):

$$\rho(m_i, m_j) = \left(\int |m_i(t) - m_j(t)|^\rho dt \right)^{\frac{1}{\rho}}, \quad (2.22)$$

модель представляется метрическим пространством: $M' = L_p$. Нормирование этого пространства по норме (2.23):

$$\|m_i\| = \left(\int |m_i(t)|^\rho dt \right)^{\frac{1}{\rho}} \quad (2.23)$$

преобразует его в Банахово линейное нормированное пространство $M' = B$.

Т.к. современные алгоритмы систем управления производствами предполагают программную реализацию на цифровых вычислительных машинах, то численные решения моделей носят дискретный характер и могут быть представлены метрическим пространством с метрикой (2.24):

$$\rho(m_i, m_j) = \left(\sum_{i=1}^N |m_i^* - m_j^*|^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}}, \quad (2.24)$$

где m_i^*, m_j^* – числовые реализации моделей.

При этих условиях $M' = l_p$ – пространство числовых последовательностей.

Вводя норму (2.25), преобразуем это пространство в линейное нормированное пространство Банаха: $M' = B'$

$$\|m_i\| = \left(\sum_{i=1}^N |m_i^*|^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}}. \quad (2.25)$$

Аналогичные заключения относительно статических моделей M^2 позволяют отнести множество этих моделей к пространству ограниченных вещественных функций $M^2 = M$, обладающих метрикой (2.26):

$$\rho(m_i, m_j) = \sup |m_i - m_j|. \quad (2.26)$$

Введённая норма (2.27) позволяет представить множество этих моделей в виде Банахова пространства $M^2 = B$

$$\|m_i\| = \sup |m_i^*|. \quad (2.27)$$

Рассматривая условие измеримости переменных по координатному направлению «информация об объекте управления» можно сделать вывод, что отрезки на этой оси, как вектор-функции, представленные множеством аналоговых измерений N , также представляют собой метрические и нормированные пространства, полученные введением метрики (2.28) и нормы (2.29), которые представляют класс ограниченных измеримых функций $N' = \tilde{M}$:

$$\rho(n'_i, n'_j) = \text{urai} \max |n_i(t) - n_j(t)| \quad (2.28)$$

$$\|n_i\| = \text{urai} \max |n_i(t)| \quad (2.29)$$

Подобным образом множество дискретных измерений N^2 может быть представлено, как пространство ограниченных числовых последовательностей $N^2 = m$. С введением метрики (2.30) и нормы (2.31) оно представимо в виде Банахова пространства $N^2 = B$:

$$\rho(n_i^2, n_j^2) = \sup_i |n_i^{2*} - n_j^{2*}|, \quad (2.30)$$

$$\|n_i^*\| = \sup_i |n_i^{2*}|. \quad (2.31)$$

Аналогичным образом можно представить в виде пространств множества точек, ограниченных фигурой XII на координатной плоскости.

Несколько сложнее вопрос метризации и нормирования точек координатного направления «требования к объекту управления», поскольку разнообразия постановок задач управления и, соответственно, формализация функционалов целей допускает как непрерывные, так и дискретные решения. При этом, как правило, на задачу поиска экстремума накладывается условие существования и единственности, необходимые и достаточные условия существования экстремума. Эти условия определяются по первой производной (равенства нулю) и по второй производной (положительная определённость).

Рассматривая множество функционалов $T = \{T_i\}$ в виде (2.32):

$$T_i = \int_0^{\tau} (y(t) - y^*(t))^2 dt, \quad (2.32)$$

можно представить пространством интегрируемых функций, т.е. $T=L_p$.

Для этого пространства вводится метрика (2.33) и норма (2.34), в силу чего получим $T = B$.

$$\rho(T_i, T_j) = \left(\int_0^1 |T_i - T_j|^p dt \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (2.33)$$

$$\|T\| = \left(\int_0^1 |\tau|^p dt \right)^{\frac{1}{p}}. \quad (2.34)$$

В то же время необходимые условия существования экстремума, исполъзуемые в численных процедурах поиска управления, могут рассматривать эти множества в виде пространства непрерывных функций $T' = C$. Принимая в качестве метрики (2.35), а в качестве нормы (2.36), можно рассматривать это множество в виде $T' = B$.

$$\rho(T'_i, T'_j) = \max_u |T'_i(\bar{u}) - T'_j(\bar{u})|, \quad (2.35)$$

$$\|T'_i\| = \max_u |T'_i|. \quad (2.36)$$

Совокупность приведённых рассуждений о преобразованиях множеств линейного пространства ХИТ в линейные нормированные и метрические пространства отражают возможности представления трёхмерной фигуры, характеризующей систему управления в виде такого же пространства, каждая точка которого есть вектор-функция. Процедуры нормирования позволяют оценить объем, занимаемый этой фигурой и критериально оценивать уменьшение (увеличение) этого объёма при адаптивном пополнении сведений об объекте управления или при появлении неконтролируемых возмущений [312]. Такой подход позволяет оценивать эффективность управления в том числе и экономическую.

2.3 Задачи и функционалы управления предприятием

Тенденция экономических преобразований в условиях скачкообразной смены формы собственности и общественно-экономической формации, совмещённые с современными возможностями микропроцессорной техники,

накладывают специфические требования к постановке и формализации задач управления предприятием [313, 314].

Общетеоретические аспекты оптимального управления в больших системах рассмотрены в работе [315], но в ней не затрагиваются вопросы многокритериальное задач и декомпозиции критериев. Структурные аспекты соподчинённости в многоуровневых системах рассмотрены в работе [36, 316]. Математические модели прогноза производства в иерархических структурах рассмотрены в [317]. Анализируются [318, 319, 320] современные аспекты декомпозиции задачи оптимального планирования. Выделены [321] модели прогноза экономических показателей на микро и макроуровнях.

Рассматривая современное предприятие с одной стороны, как юридическое лицо, а с другой — как многоуровневую производственно-экономическую систему, необходимо сформировать физические постановки задач управления, формализовать их в виде функционалов целей с соответствующими системами ограничений, реализуя их декомпозицию на уровнях структуры предприятия.

В современных экономических условиях производственная деятельность предприятий группы «А» (производство средств производства) начинается с формирования портфеля заказов текущего планового периода (но не более месяца) G_i , где i – номер планового периода. Этот портфель, в основном, формируется из трёх видов заказов: государственный заказ g_i , договорные заказы d_i , и заказы рынка z_i сформированные службой маркетинга предприятия. Формирование портфеля заказов осуществляется в конце предыдущего планового периода и основано на следующих принципах:

- госзаказ g_{ij} включается в производственную программу предприятия, если он обеспечен производственными фондами f_{ij} (j – номер заказа);
- договорные заказы d_{ik} включаются в производственную программу предприятия, если по ним осуществлена предоплата c_{ik} (k – номер договора);
- рыночные заказы z_{im} включаются в производственную программу при условии близости ассортимента этих заказов ассортименту государственных и договорных заказов;

– цена позиций государственного и договорного заказов фиксирована государственными постановлениями;

– цена рыночных – договорная, отвечающая условиям ликвидности продукции.

Тогда портфель заказов планового периода имеет вид (2.37) – (2.38):

$$G_i = \{g_i, d_i, z_i\} \quad (2.37)$$

$$g_{ij} \equiv f_{ij}, d_{ik} \equiv c_{ik}, z_{im} \equiv g_{ij} \bigcup d_{ik}, g_i = \bigcup_j g_{ij}, d_i = \bigcup_k d_{ik}, z_i = \bigcup_m z_{im}. \quad (2.38)$$

Для предприятий группы «А», имеющих широкий ассортимент производственной продукции каждый из перечисленных заказов сопровождается спецификацией (перечнем видов) заказываемого ассортимента. Сформированный на перечисленных принципах портфель заказов согласно прилагаемым спецификациям разбивается на группы по видам ассортимента (2.39):

$$g_{il} = g_{ijl} \bigcup d_{ikl} \bigcup z_{iml}, \quad (2.39)$$

где l – номер группы (вид продукции).

Для этой сортировки осуществляется расчёт объёма заказа P по каждой группе (2.40):

$$P_{il} = P_1(g_{ijl}) \bigcup P_2(d_{ikl}) \bigcup P_3(z_{iml}). \quad (2.40)$$

Тогда общий объем продукции, заказанной в производство на плановый период (2.41):

$$P_i = \bigcup_l P_{il}. \quad (2.41)$$

Производственные фонды, необходимые для выпуска продукции каждой группы, согласно условий формирования портфеля заказов (2.42) – (2.46):

$$S_{il} = S_{ijl} \bigcup S_{ikl} \bigcup S_{iml}, \quad (2.42)$$

$$\text{где } S_{ijl} = k_1 P_1(g_{ijl}) = f_{ijl}, S_{ijl} = k_1 P_1(d_{ijl}), S_{ijl} = k_1 P_3(z_{ijl}) \quad (2.43)$$

$$S_{ij} = \bigcup_l S_{ijl}, S_{ik} = \bigcup_l S_{ikl}, S_{im} = \bigcup_l S_{iml}, \quad (2.44)$$

$$S_i = S_{ij} + S_{ik} + S_{im}, \quad (2.45)$$

$$S_{ikl} = \bigcup_n \frac{C_{ikl}^n}{\alpha_l^n}, \quad (2.46)$$

где α_l^n – цена единицы сырья n-го вида; k_l – нормативный показатель; C_{ikl}^n – стоимость закупок сырья.

Рассматривая предприятия как объект в шестиуровневой системе управления, следует выделить задачи верхнего уровня, решаемые на автоматизированных рабочих местах (АРМ) производственного, планового, финансового отделов и в службах главного инженера. Следует отметить, что эти задачи могут рассматриваться последовательно, согласно текущего экономического момента на предприятии, подкрепляя друг друга или подчиняясь приоритетам показателей, который формирует лицо, принимающее решение на предприятии (главный экономист, директор и т.д.). Возможен вариант связного решения перечисленных задач, удовлетворяющий требованиям перечисленных отделов заводоуправления. При последовательном решении задач формулируются цели управления, которые определяют поиск оптимальных решений в каждом автоматизированном рабочем месте (АРМ). Тогда последовательность решений в других отделах делает предыдущее решение квазиоптимальным. Связное решение задач, фиксированное поиском оптимальных значений общего функционала цели, доставляет оптимальные решения по всем задачам.

Для предприятий в современных условиях, как юридических лиц (верхний уровень управления), может существовать ряд физических постановок, приведённых ниже задач, подчинённых экономике предприятия, отображённой на производственную программу.

Производственная программа предприятия при её реализации в системе управления должна быть сформирована таким образом, чтобы:

- валовый доход от реализации произведённой продукции был максимальным;
- валовые расходы на выполнение портфеля заказов были минимальны;
- себестоимость производимой продукции была минимальной;

– оборачиваемость средств и фондов, используемых в производственной программе, была максимальной;

– валовая прибыль от реализации портфеля заказов была максимальной.

Следует отметить, что среди этих задач наиболее актуальной для экономической деятельности предприятий стран СНГ, является четвертая задача. Это обусловлено тем, что практически все предприятия работают в условиях дефицита оборотных средств. Решение этой задачи технически осуществимо, т.е. существует система электронных платежей, функционирующая в реальном масштабе времени и сырьевой рынок, способный в ритме с процессом производства удовлетворять потребности производственной программы в сырье и материалах.

В соответствии с приведёнными физическими постановками задач могут быть формализованы функционалы целей управления предприятием.

Формальная постановка первой задачи имеет вид (2.47):

$$J_1 = F(D(P_{il})) = \sum_l D_l(P_{il}) \rightarrow \max, \quad (2.47)$$

где D_l – валовый доход от реализации продукции группы.

Эта задача решается в динамической системе ограничений, представленной уравнениями модели прогноза (2.48):

$$\begin{aligned} \frac{dD_{ijl}}{dt} &= f_1(g_{ijl}), \\ \frac{dD_{ikl}}{dt} &= f_2(d_{ikl}), \\ \frac{dD_{iml}}{dt} &= f_3(z_{iml}) \end{aligned} \quad (2.48)$$

и статической системой ограничений вида (2.40), (2.41).

Решением данной задачи будут пары (D_{ijl}, g_{ijl}) , (D_{ikl}, d_{ikl}) , (D_{iml}, z_{iml}) , $\forall l$.

В связи с тем, что, как правило, оплату за выполнение госзаказа предприятия не получают, справедливо ограничение следующего вида (2.49):

$$D(g_{ikl}) = 0. \quad (2.49)$$

Так как договорные заказы d_{ik} могут быть включены в производственную программу на условиях предоплаты при фиксированной цене продукции, справедливо условие (2.50):

$$D(g_{ikl}) = \text{const.} \quad (2.50)$$

Таким образом, управляющими переменными в решении задачи (2.47) на современном этапе экономической деятельности предприятия могут быть только пары (D_{iml}, z_{iml}) , включение которых в производственную программу осуществляется службой маркетинга предприятия согласно условиям ликвидности продукции различных групп.

Формальная постановка задачи (2.47) тем не менее имеет объективный смысл, т.к. в развитых странах госзаказ (g_{ij}) является залогом успешной деятельности предприятия, ибо государство выступает гарантом оплаты этого заказа по фиксированной заранее цене, т.е. справедлива замена условия (2.49) на аналог условия (2.50).

Динамическая система ограничений (2.48) осуществляет прогноз временной последовательности изготовления и реализации каждой группы заказов и каждого вида заказа. Это позволяет реализовать гибкое планирование производственной программы, подчинённой (2.47), на любой, наперёд заданный, плановый период и включать дополнительно возникающие заказы рынка z_{im} , появление которых прогнозировать невозможно.

Формальная постановка второй задачи представлена функционалом (2.51):

$$J_2 = F(R(P_{il})) = \sum_l R_l(P_{il}) \rightarrow \min, \quad (2.51)$$

где R_l – валовый расход на выполнение группы заказов.

Для решения этой задачи предлагается динамическая система ограничений в виде уравнений модели (2.52):

$$\begin{aligned} \frac{dR_{ijl}}{dt} &= \varphi_1(g_{ijl}), \\ \frac{dR_{ikl}}{dt} &= \varphi_2(d_{ikl}), \end{aligned} \quad (2.52)$$

$$\frac{dR_{iml}}{dt} = \varphi_3(z_{iml}).$$

Это обобщённое представление динамической системы ограничений в виде векторов, при решении реальной задачи разворачивается в сложную систему связанных нелинейных дифференциальных уравнений, определяющих расходные составляющие по каждому виду заказа. Решением данной задачи будут пары $(R_{ijl}, g_{ijl}), (R_{ikl}, d_{ikl}), (R_{iml}, z_{iml}), \forall l$.

Учитывая тот факт, что выполнение госзаказа g_{ijl} обеспечивается поставкой производственных фондов f_{ijl} справедливо соотношение (2.53):

$$R_{ijl} = R_{ijl} - R_{ijl}(f_{ijl}), \quad (2.53)$$

т.е. из решения задачи (2.52) исключаются расходы, связанные с приобретением производственных фондов. Отсюда следует, что все перечисленные пары – результат решения задачи (2.51) – являются управляющими. Уравнения математической модели (2.52) прогнозируют расходы, связанные с выполнением производственной программы, на любой, наперёд заданный период, что позволяет включать в систему ограничений все расходы, связанные с заказами (особенно, по группе заказов z_{im}), возможными в этот период. Из статических ограничений этой задачи наиболее существенным является условие (2.54):

$$0 < \bigcup_l R_{il} \leq C_i, \quad (2.54)$$

где C_i – объем оборотных средств предприятия на плановый период.

Следует подкрепить это условие соотношением (2.55), вытекающим из свойств производственных фондов (2.46):

$$0 < \bigcup_l R_{il} < S_i(g_{ij}, d_{ik}, z_{im})C_i(g_{ij}, d_{ik}, z_{im}). \quad (2.55)$$

Использование задачи (2.51) в планировании производственной программы наиболее актуально в двух случаях. Первый – это период скачкообразной дестабилизации цен на сырье и энергию. В этом случае на плановые периоды не более декады определяется целесообразность выполнения договоров по

фиксированным ценам на продукцию и колеблются ценовые условия на продукцию госзаказов. Тогда задача (2.51) дополняется ограничением вида (2.56):

$$\begin{aligned} R_{ijl} < f_{ijl}(g_{ijl})c_{ijl}, P_1(g_{ijl}) &\leq \frac{R_{ijl}}{C(g_{ijl})}, \\ R_{ikl} < f_{ikl}(d_{ikl})c_{ikl}, P_2(d_{ikl}) &\leq \frac{R_{ikl}}{C(d_{ikl})}, \\ R_{iml} < f_{iml}(z_{iml})c_{iml}, P_3(z_{iml}) &\leq \frac{R_{iml}}{C(z_{iml})}. \end{aligned} \quad (2.56)$$

Второй случай, который характерен для стабилизированной экономики, предполагает, что успешное экономическое функционирование предприятия определяется уменьшением расходов, пусть даже на доли процента. В этом случае задача (2.51) дополняется ограничением вида (2.57):

$$\begin{aligned} R_{ijl} < A_1(g_{ijl}), \\ R_{ikl} < A_2(d_{ikl}), \\ R_{iml} < A_3(z_{iml}), \end{aligned} \quad (2.57)$$

где A – нормативные расходы (предыдущего планового периода) по каждой группе и заказу.

Третья постановка задачи представлена функционалом (2.58):

$$J_3 = F(SS(P_{il})) = \sum_l \sum_r ZT_{lr}(P_{il}) \rightarrow \min, \quad (2.58)$$

где SS – себестоимость продукции (по группе); ZT – затраты; r – виды затрат.

Решение задачи (2.58) предполагается получить в рамках динамической системы ограничений, представленной математической моделью вида (2.59):

$$\begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= \psi_1(g_{ijl}, d_{ikl}, z_{iml}), \\ \frac{dP_2}{dt} &= \psi_2(g_{ijl}, d_{ikl}, z_{iml}), \\ \frac{dP_3}{dt} &= \psi_3(g_{ijl}, d_{ikl}, z_{iml}), \\ \frac{dZT}{dt} &= \psi(g_{ijl}, d_{ikl}, z_{iml}). \end{aligned} \quad (2.59)$$

Решением задачи (2.58) будут пары (ZT_{ijl}, g_{ijl}) , (ZT_{ikl}, d_{ikl}) , (ZT_{iml}, z_{iml}) , $\forall l$.

Аналогично задаче 2 из затратного механизма выполнения позиций госзаказа исключаются затраты на приобретение производственных фондов (2.60):

$$ZT_{ijl} = ZT_{ijl} - Z_{ijl}(f_{ijl}). \quad (2.60)$$

Т.к. задача (2.58) решается на верхнем уровне, то справедливо соотношение (2.61) относительно полноты общезаводских затрат:

$$ZT = \bigcup_r ZT_{lr}. \quad (2.61)$$

В современных условиях для предприятий стран СНГ, наращивающих производственные программы, характерно наличие статических ограничений (2.62):

$$\forall ZT_{lr}: 0 < ZT_{lr} \leq B_{lr}, \quad (2.62)$$

где B_{lr} – затраты предыдущего планового периода.

Решение задачи (2.58) позволяет управлять затратным механизмом по предприятию в целом, определяя тактику выполнения портфеля заказов и стратегию сокращения затрат, что является существенным фактором вхождения экономики предприятия в систему конкурентоспособных предприятий. На современном этапе это в первую очередь относится к снижению энергоёмкости производимой продукции и нормам расхода сырья и материалов. Следует отметить, что выполнение позиций госзаказа, которые не оплачиваются потребителем, с точки зрения затратного механизма может быть учтено в модели прогноза как возмущение на показатели себестоимости, за исключением затрат на производственные фонды. В качестве пользователя этой задачи на предприятии выступают плановые службы.

Формализация четвертой задачи представлена функционалом (2.63):

$$J_4 = F(OR(P_{il})) = \sum_l (OR_1(g_{ijl}) + OR_2(d_{ikl}) + OR_3(z_{iml}) + k_1 OR_1(d_{ikl}) + k_2 OR_1(z_{iml}) + k_3 OR_2(z_{iml})) \rightarrow \max, \quad (2.63)$$

где OR_1 – обороты средств госзаказа; OR_2 – обороты средств договоров; OR_3 – обороты средств рыночных заказов; $k_1 - k_3$ – количество оборотов средств.

Решение задачи (2.63) возможно в системе динамических ограничений, представленной математической моделью прогноза выпуска и реализации продукции и расчёта показателей оборачиваемости (2.64):

$$\begin{aligned}\frac{dP_1}{dt} &= \Theta_1(g_{ijl}(f_{ijl})), \\ \frac{dP_2}{dt} &= \Theta_2(d_{ikl}(f_{ikl})) + \Theta_2(d_{ikl}(f_{ijl})), \\ \frac{dP_3}{dt} &= \Theta_3(z_{iml}(f_{iml})) + \Theta_3(z_{iml}(f_{ijl})) + \Theta_3(z_{iml}(f_{ikl})), \\ \frac{df}{dt} &= \Theta_4(g_{ijl}, d_{ikl}, z_{iml}), \\ \frac{dOR_2}{dt} &= \Theta_5(f_{ijl}, f_{ikl}, f_{iml}), \\ \frac{dOR_3}{dt} &= \Theta_6(f_{ijl}, f_{ikl}, f_{iml}).\end{aligned}\tag{2.64}$$

Предполагается, что в границах планового периода, предприятие может использовать производственные фонды госзаказа f_{ijl} и средства предприятия для выпуска договорной d_{idl} и рыночной z_{iml} продукции, при условиях (2.65):

$$T_2(OR_2) < T_3, T_1(OR_3) < T_3, T_1(OR_3) < T_2(OR_2),\tag{2.65}$$

где T_1, T_2, T_3 – срок выполнения заказов.

Это позволяет определять соблюдение условий договоров и госзаказа в отношении сроков поставки и формировать ограничения на количество оборотов средств (2.66):

$$k_1 > \frac{T_2(OR_2)}{T_3(OR_3)}, k_1 > \frac{T_1(OR_1)}{T_2(OR_2) + T_3(OR_3)}.\tag{2.66}$$

Решением задачи (2.63) в рамках ограничений (2.64) – (2.66) являются: (k_1, OR_1) , (k_2, OR_2) , (k_3, OR_3) которые позволяют выбирать варианты относительно привлечения оборотных средств (предоплата по договорам d_{ik}) и производственных фондов g_{ij} при условии, что эти заказы будут выполнены в срок, определенный условиями договоров и госзаказов. Такое управление не

противоречит законодательной базе стран СНГ и отражает тенденции мировой экономики, особенно в банковской сфере, где повсеместно используется привлечение оборотных средств клиентов к выполнению собственных задач. Эта постановка задачи наиболее актуальна для предприятий стран СНГ, т.к. позволяет частично или полностью компенсировать затраты на выпуск неоплачиваемого госзаказа и, в конечном итоге, увеличить прибыль предприятия. Сегодня эффективность реализации этой задачи упирается в показатели рыночной востребованности продукции предприятия, её ликвидности и оперативности работы службы маркетинга предприятия. Если объем рыночных заказов отвечает условию (2.67) то, в рамках ограничений (2.66) решение задачи (2.63) наиболее эффективно:

$$P_{3i}(z_{iml}) > 0,5 (P_{1i}(g_{ijl}) + P_{2i}(d_{ikl})). \quad (2.67)$$

Пользователем этой задачи являются все экономико-финансовые подразделения предприятия, включая главного экономиста.

Формальная постановка пятой задачи представлена в виде (2.68):

$$J_5 = F(PR(P_{il})) = \sum_l PR_l(P_{il}) \rightarrow \max. \quad (2.68)$$

Решение этой задачи предполагается реализовать в рамках системы динамических ограничений – уравнений модели прогноза прибыли (2.69), уравнений прогноза валового дохода (2.48) и валового расхода (2.52):

$$\begin{aligned} \frac{dPR_{ijl}}{dt} &= F_1(g_{ijl}), \\ \frac{dPR_{ikl}}{dt} &= F_2(d_{ikl}), \\ \frac{dPR_{iml}}{dt} &= F_3(z_{iml}). \end{aligned} \quad (2.69)$$

Исходя из особенностей конкурентной борьбы и возможности привлечения заказчиков необходимо, даже временно, ввести условия (2.70):

$$\forall z_{iml}, P_3(z_{iml}) \neq 0, \text{ если } PR(z_{iml}) = 0. \quad (2.70)$$

Современные концепции неоплаченного госзаказа определяют наличие ограничения (2.71):

$$\forall g_{ijl}, PR(g_{ijl}) \leq 0. \quad (2.71)$$

Фиксированные условия договоров на поставку отражены в (2.72):

$$\forall d_{ikl}, PR(d_{ikl}) = const. \quad (2.72)$$

Условия функционирования предприятия определяет общее ограничение (2.73):

$$PR(g_{ijl}) + PR(d_{ikl}) + PR(z_{iml}) > 0. \quad (2.73)$$

По приоритету задача (2.68) уступает только задаче (2.63). Пользователями этой задачи являются планово-финансовые службы предприятия, причём эта задача характерна только для систем, как юридических лиц. Общее ограничение (2.73) подчёркивает, что совокупность заказов должна быть сформирована таким образом, чтобы предприятие от их комбинации получало прибыль. Условие (2.71) вносит возмущение в задачу (2.68), но является сегодня, наряду с малыми объёмами заказов, определяющим в формировании прибыли. В систему ограничений не ведены условия плановой нормы прибыли, т.к. динамика задачи (2.68) способна свести это ограничение к условиям (2.73). Совокупность динамических ограничений (2.64) позволяет при решении задачи (2.68) учитывать дополнительную прибыль, которая может быть получена за счёт оборачиваемости производственных фондов госзаказа и средств договоров. Решением задачи (2.68) являются пары (PR_{ijl}, g_{ijl}) , (PR_{ikl}, d_{ikl}) , (PR_{iml}, z_{iml}) , но в современной экономике предприятий управление возможно только через последнюю пару.

Перечисленные пять физических и формальных постановок задач предназначены для системы управления предприятием имеющей высший уровень иерархии. Пользователи перечисленных задач — работники подразделений заводоуправления. Выделим для предприятий группы «А» шесть уровней управления: предприятия в целом (1-й уровень), производства (2-й уровень), цеха (3-й уровень), передельные (4-й уровень), производственные участки (5-й уровень), технологические агрегаты (6-й уровень). Приведённые в работе пять постановок задач служат для определения заданий для системы управления 1-го уровня, однако, не нарушая общности, третья задача (2.58) может иметь место и для систем управления производствами 2-6 уровней иерархии. При этом

декомпозируются показатели портфеля заказов, относящиеся к своим подразделениям, сокращается число переменных и их количественные характеристики. Кроме того, сокращается число уравнений в системе ограничений.

2.4 Постановка задач управления предприятием в условиях экономической и технологической трансформаций

В современной практике разработка алгоритмов систем управления производствами опирается на многоуровневость подразделений и служб управления в задачах АСУП, которые поддерживаются задачами АСУТП.

Согласно этому можно привести оценочную таблицу соотношений решаемых задач [322]. На предприятиях можно выделить пять уровней:

- 1 уровень – предприятие в целом, в совокупности решаемых задач.
- 2 уровень – производственные цеха.
- 3 уровень – переделы цехов.
- 4 уровень – производственные участки.
- 5 уровень – технологические агрегаты.

В соответствии с этой иерархией оценочное соотношение решаемых задач представлено таблицей 2.1.

Таблица 2.1 – Соотношение задач АСУП и АСУТП

Доля решаемых задач, %	Уровни				
	1	2	3	4	5
АСУП	97 – 99	94 – 96	60 – 65	40 – 45	5 – 10
АСУТП	1 – 3	4 – 6	35 – 40	55 – 60	90 – 95

Постановки многоуровневых задач управления.

В перечень задач, решаемых на 1-м уровне, входят функциональные особенности служб управления предприятием. Как правило, основные задачи этих служб:

- формирование портфеля заказов;
- планирование заданий производственным цехам;

- материальное и финансовое обеспечение;
- оборачиваемость средств;
- управление налогами;
- техническое обеспечение;
- ремонт и межремонтное обслуживание;
- модернизация оборудования.

Физическая постановка задачи управления при формировании портфеля заказов может быть сформулирована следующим образом: определить позиции портфеля заказов таким образом, что общий доход от реализации производственной продукции был максимальным. Тогда формальная постановка задачи имеет вид (2.74):

$$J_1^1 = F(\bar{x}^1, \bar{y}^1, \bar{z}^1) \rightarrow \max_{\bar{x}^1, \bar{y}^1, \bar{z}^1}. \quad (2.74)$$

Нижний индекс функционала означает уровень (первый), верхний – номер задачи этого уровня.

Решение задачи (2.74) представлено вектором $\bar{x}^1: \bar{x}^1 = \{x_1^1, x_2^1, x_3^1, x_4^1, x_5^1\}$, где x_1^1 – потребитель, x_2^1 – вид продукции, x_3^1 – цена, x_4^1 – количество, x_5^1 – стоимость.

Функционал (2.74) целесообразно дополнить уравнениями математической модели прогноза, вида $\bar{y}^1 = f(x_1^1, x_2^1, x_4^1)$ и $Z^1 = f(x_1^1, x_2^1, x_3^1, x_4^1, x_5^1)$, где \bar{y}^1 – объем реализованной продукции, Z^1 – доход от реализации объёма.

В условиях достаточно высокого уровня конкуренции постановка задачи может быть дополнена аналогичными показателями конкурентов.

Оптимальным решением задачи (2.74) будет вектор (матрица), что содержит наилучшие значения $L = (\bar{x}^{1*}, \bar{y}^{1*}, \bar{z}^{1*})$ позиций портфеля заказов. На сегодня существует достаточно большое количество предприятий, у которых формированием портфеля заказов ведает менеджерская фирма-надстройка. Для этого случая постановка задачи (2.74) столь же действенна.

Планированием производства ведают планово-производственные службы предприятия (пользователи). Разработанный ими план содержит показатели: что,

где, когда, какой ценой, будет произведено, определяющие загрузку производственных мощностей предприятия во всей совокупности производственных цехов. Кроме этого службы определяют потребности в сырьевых материалах и комплектующих, как составных частей готовой продукции.

Постановка этой задачи: определить очерёдность выполнения позиций портфеля заказов L таким образом, чтобы себестоимость выпуска продукции была минимальной. Формально эта постановка представлена функционалом вида (2.75):

$$J_1^2 = F(\bar{x}_1^2, \bar{y}_1^2, \bar{L}_1^2, \bar{T}_1^2, \bar{S}_1^2, \bar{A}_1^2) \rightarrow \min, \quad (2.75)$$

где $\bar{x}_1^2 = \{x_2^{1*}, x_4^*\}$, $\bar{y}_1^2 = \{\bar{y}_{1k}^2\}$ – объёмы каждого вида k -й продукции; \bar{L}_1^2 – производственная функция цеха $\bar{L}_1^2 = \{\bar{L}_{1m}^2\}$; \bar{T}_1^2 – текущий период (сутки); \bar{S}_1^2 – себестоимость (затратный механизм) $\bar{S}_1^2 = \{\bar{S}_{1k}^2\}$; \bar{A}_1^2 – количество сырья $\bar{A}_1^2 = \{\bar{A}_{1n}^2\}$.

Функционал вида (2.75) целесообразно дополнить математическими моделями прогноза [323, 324].

Физические показатели плана влияют друг на друга, поэтому модели могут быть представлены квадратичными полиномами:

1) прогноза количества (2.76):

$$\bar{y}_{1k}^2 = b_0 + \sum_{i=1}^{\mu} b_i x_{2i}^2 + \sum_{i=1}^{\mu} \sum_{\sigma=1}^{\eta} b_{ij} x_{2i}^1 x_{2j}^1, \quad (2.76)$$

2) прогноза загрузки цеха (2.77):

$$\bar{L}_{1m}^2 = b_0 + \sum_{i=1}^{\mu} b_i x_{2i}^1 + \sum_{i=1}^{\mu} \sum_{\sigma=1}^{\eta} b_{ij} x_{2i}^1 x_{2j}^1, \quad (2.77)$$

3) плана на сутки (2.78):

$$\bar{T}_{1m}^2 = b_0 + \sum_{i=1}^{\mu} b_i x_{2i}^1 + \sum_{i=1}^{\mu} \sum_{\sigma=1}^{\eta} b_{ij} x_{2i}^1 x_{2j}^1, \quad (2.78)$$

4) себестоимости (2.79):

$$\bar{S}_{1k}^2 = b_0 + \sum_{i=1}^{\mu} b_i S_{1k}(x_{2i}^1) + \sum_{i=1}^{\mu} \sum_{\sigma=1}^{\eta} b_{ij} S_{1k}(x_{2i}^1) S_{1k}(x_{2j}^1). \quad (2.79)$$

Период планирования на предприятии имеет в глубину один месяц. Разбивка плановых заданий на сутки может осуществляться как на первом, так и на втором уровнях управления (в цехах) с последующим согласованием позиций.

Решением задачи (2.75) будет вектор, содержащий оптимальные значения показателей, т.е. $\bar{U}_1^2 = \{\bar{x}_1^{2*}, \bar{y}_1^{2*}, \bar{L}_1^{2*}, \bar{T}_1^{2*}, \bar{S}_1^{2*}, \bar{A}_1^{2*}\}$.

Приведённая выше постановка задачи планирования актуальна, т.к. на предприятиях СНГ энергозатраты (себестоимость) в 3-3,5 раза выше, чем в развитых странах.

Задачи (2.74) и (2.75) предполагают рассмотреть деятельность предприятия как стационарный процесс, описываемый регрессионными полиномами. В современных условиях деятельности предприятий возникают коллизии двух видов: возникновение новых заказов в течение планового периода или срыв плановых заданий в результате отказов оборудования или отключения энергии.

В обоих случаях эта ситуация может рассматриваться как нестационарный процесс и с соответствующими допущениями описываться системой нелинейных дифференциальных уравнений вида (2.80):

$$\forall L_1^2 \exists \frac{d\bar{y}_1^2}{dt} = f(\bar{d}, \bar{x}_1^2, \bar{y}_1^2, \bar{L}_1^2, \bar{T}_1^2, \bar{S}_1^2, \bar{A}_1^2),$$

$$\frac{d\bar{L}_1^2}{dt} = f(\bar{d}, \bar{x}_1^2, \bar{y}_1^2, \bar{L}_1^2, \bar{T}_1^2, \bar{S}_1^2, \bar{A}_1^2),$$
(2.80)

где \bar{L} – параметры модели.

Решение этих уравнений выполняет роль корректировок месячного плана. При этом возникающие невязки «план – факт» выполняют назначение начальных условий задачи Коши для приведённой системы уравнений. Для сформированного плана, подчинённого J_1^2 , необходимо решить задачи материального и финансового обеспечения производства. Физическая постановка задачи материального обеспечения аналогична задаче J_1^1 .

Назначение этой задачи — обеспечить предприятие необходимым сырьём и комплектующими, определяющими выполнение планового заказа. Пользователи этой подсистемы — менеджеры службы снабжения предприятия. Постановка задачи заключается в следующем: определить оптимальные значения портфеля заказов на поставку сырья и материалов таким образом, чтобы сумма затрат на их приобретение была минимальной.

Формальная постановка задачи (2.81):

$$J_1^3 = F(A_1^{2*}, C_1^{3*}) \rightarrow \min, \quad (2.81)$$

где C_1^{3*} – стоимость сырья.

Решением этой задачи является вектор $U_1^3 = \{A_1^{2*}, C_1^{3*}\}$, обеспечивающий минимум затрат на сырьё и материалы.

Задача финансового обеспечения физически формулируется следующим образом: определить объём финансов, необходимый для выполнения плановых позиций таким образом, чтобы сумма заёмных средств (кредита) была минимальна.

Формальная запись этой задачи (2.82):

$$J_1^4 = F(\bar{A}_1^{2*}, C_1^{2*}, D_1^{4*}) \rightarrow \min, \quad (2.82)$$

где D_1^{4*} – заёмные средства.

Оптимальным решением этой задачи будет вектор $U_1^4 = \{A_1^{2*}, C_1^{2*}, D_1^{4*}\}$.

В современных условиях, когда налоговые отчисления авансируются в счёт будущих доходов, эта задача актуальна. В современном мире кредитование производственных программ предусмотрено для всех предприятий, производящих продукцию. Для больших производственных корпораций, обладающих собственным банком, эта задача может совмещаться с постановкой задачи оптимального управления процессом кредитования. В существующей практике дефицита оборотных средств решение задачи управления оборачиваемости средств является едва ли не самой актуальной. Постановка задачи: определить оптимальные показатели оборота средств, вкладываемых в закупку сырья при производстве продукции таким образом, чтобы сроки оборачиваемости были минимальны.

Формальная постановка задачи (2.83):

$$J_1^5 = F(\bar{A}_1^{2*}, \bar{C}_1^{2*}, \bar{T}_1^{2*}, \bar{y}_1^{2*}, \bar{K}_1^{2*}, \bar{TK}_1^{2*}) \rightarrow \min. \quad (2.83)$$

В силу того, что процесс оборачиваемости средств зависит от времени, т.е. является нестационарным, модели прогноза представлены системой дифференциальных, нелинейных уравнений (2.84):

$$\begin{aligned}\frac{d\bar{y}_1^{-5}}{dt} &= f(\bar{A}_1^{2*}, \bar{c}_1^{2*}, \bar{T}_1^{2*}, \bar{y}_1^{2*}, \bar{K}_1^{2*}, \bar{TK}_1^{2*}), \\ \frac{d\bar{A}_1^{-5}}{dt} &= f(\bar{A}_1^{2*}, \bar{c}_1^{2*}, \bar{T}_1^{2*}, \bar{y}_1^{2*}, \bar{K}_1^{2*}, \bar{TK}_1^{2*}), \\ \frac{dK_1^5}{dt} &= f(\bar{y}_1^{2*}, \bar{TK}_1^{2*}).\end{aligned}\tag{2.84}$$

Физическая постановка задачи управления налогами может быть сформулирована следующим образом: определить условия и сроки выплаты предприятием налогов и сборов таким образом, чтобы суммы налогов были минимальны (в рамках законов и Положений фискальных служб).

Формальная постановка задачи (2.85):

$$J_1^6 = F(\bar{P}_1^6, \bar{T}_1^6, \bar{N}_1^6) \rightarrow \min.\tag{2.85}$$

Решением этой задачи в рамках законных ограничений является вектор $U_1^6 = \{\bar{P}_1^6, \bar{T}_1^6, \bar{N}_1^6\}$, определяющий суммы и сроки выплат налогов.

Задача управления техническим обучением решается службами главного инженера предприятия, где определяются технические условия выпуска новой продукции, необходимость модернизации производственных агрегатов и их замена. Постановка этой задачи: определить техническую политику предприятия таким образом, чтобы увеличить производительность оборудования.

Формальная постановка задачи (2.86):

$$J_1^7 = F(\bar{L}_1^6, \Pi_1^6, G_1^6) \rightarrow \max.\tag{2.86}$$

Решение этой задачи сопровождается совокупностью технической документации, актов испытаний, технических условий. Для конкретного предприятия эта совокупность может быть отражена в ограничениях.

Постановка задачи ремонта и межремонтного обслуживания может быть сформулирована следующим образом: определить виды и сроки ремонтов и межремонтного обслуживания таким образом, чтобы суммарные затраты на эти работы были минимальны.

Такая постановка задачи существует в развитых странах, где эти работы выполняют специализированные сторонние организации. В условиях стран СНГ ещё существуют собственные службы главного механика и главного энергетика,

которые выполняют большую часть работ. В соответствии с современными тенденциями формально рассматриваются исполнители сторонние и собственные. Тогда формальная постановка задачи имеет вид (2.87):

$$J_1^8 = F(L_1^8, R_1^8, SL_1^8) \rightarrow \min. \quad (2.87)$$

Решение этой задачи сопровождается уравнениями прогноза объёмов и сроков ремонтных работ, а также загрузки собственных служб и сторонних организаций с условиями оплаты.

Перечисленные задачи $J_1^1 - J_1^8$ отражают формальную сущность алгоритмов системы управления производственными показателями предприятия. Решение задач осуществляется с интервалом квантования сутки с выдачей плановых заданий цехам. Пользователи задач $J_1^1 - J_1^8$ — это, как правило, службы заводоуправления. Службы оснащаются вычислительной сетью радиально-кольцевого типа. Формально представленные задачи $J_1^1 - J_1^8$ могут быть описаны нейросетью (Рисунок 2.2).

При последовательном решении задач могут возникнуть неантагонистические противоречия в конечных решениях подсистем. Эти противоречия решаются межкомпьютерным согласованием плановых показателей, после чего полученные плановые задания поступают в планово-производственные службы основных цехов, т.е. на второй уровень управления. Выработанное на первом уровне плановое задание на втором уровне дробится на интервалы, кратные времени смен, т.е. интервал квантования 6 – 8 часов.

Постановка задачи планирования на этом уровне может быть сформулировано следующим образом: определить плановые задания конкретной смене (бригаде) таким образом, чтобы количество простоев оборудования было минимальным. Формально эта задача представлена функционалом (2.88):

$$J_2 = F(\bar{x}_2, \bar{y}_2, S\bar{M}_2) \rightarrow \min, \quad (2.88)$$

где $S\bar{M}_2$ – рабочие бригады (смены); \bar{x}_2 – плановое задание цехам на сутки, полученное из системы первого уровня; \bar{y}_2 – фактический выпуск продукции.

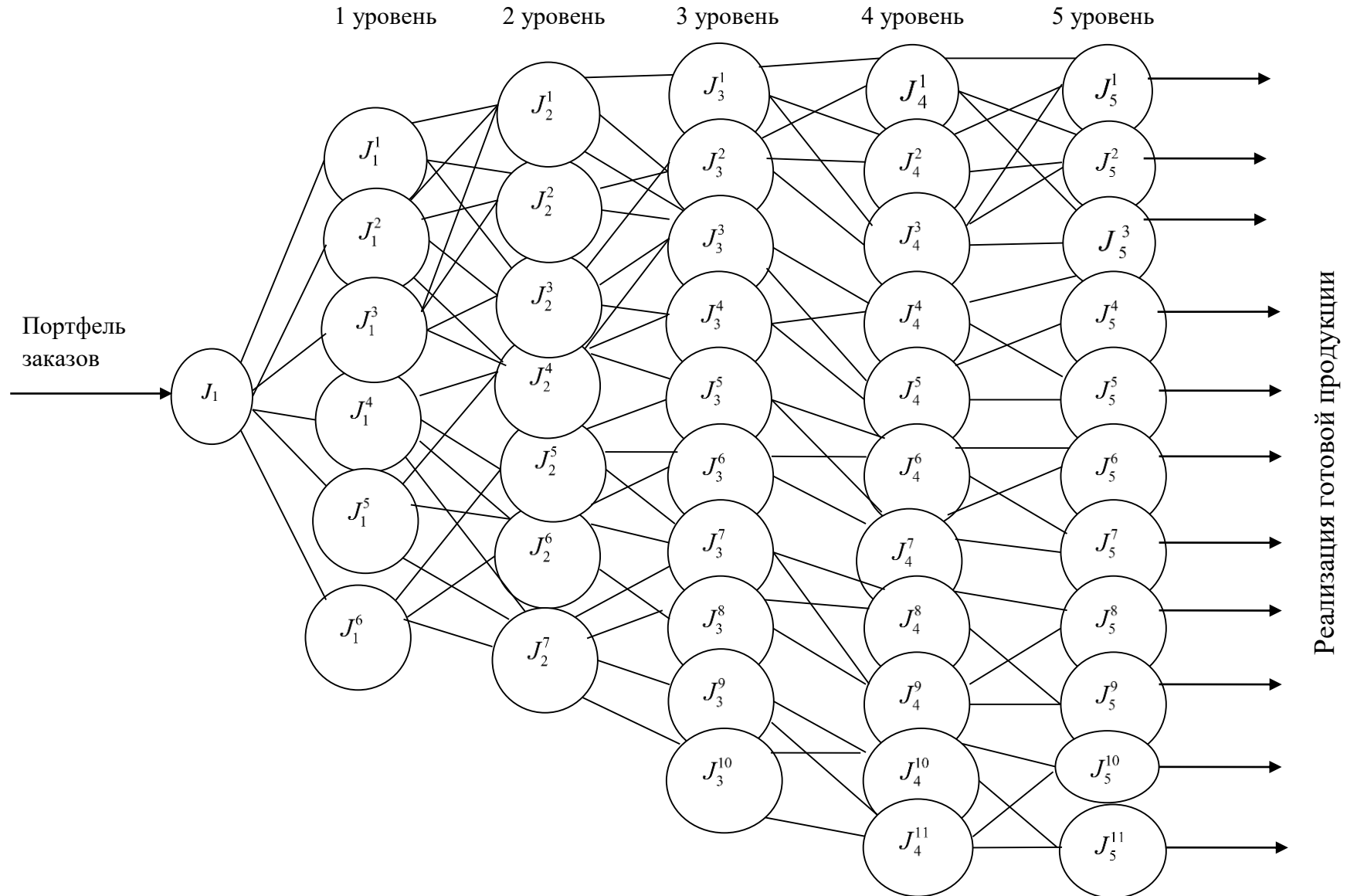


Рисунок 2.2 — Нейросетевое представление многоуровневой системы управления предприятием

Решением задачи (2.88) является вектор $M(\bar{x}_2^*, \bar{y}_2^*, S\bar{M}_2^*)$, определяющий оптимальную загрузку подразделений цеха.

В рамках общецеховой системы управления производственные процессы рассматриваются как стационарные, поэтому задача (2.88) может быть дополнена системой нелинейных статистических моделей (полиномов) вида (2.89):

$$\bar{y}_2 = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \bar{x}_{2i} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b_{ij} \bar{x}_{2i} \bar{x}_{2j}. \quad (2.89)$$

Эти модели могут выполнять роль ограничений задачи (2.88), а кроме того являются инструментом прогноза выходных показателей смены.

При сетевой организации системы управления второго уровня в вычислительную сеть цеха входят микропроцессоры и цеховые компьютеры; различают комплектации, на которых реализуются системы управления четвёртого и пятого уровней. При разработке этих систем, особенно, если на пятом уровне находится агрегат, в котором осуществляются сложные физические или физико-химические превращения (например, металлургическая печь) приходится учитывать сложные технические и экономико-технические коллизии. Экономико-технические коллизии заключаются в том, что предлагаемые вместе с технологическим оборудованием управляющие вычислительные комплексы ориентированы на нормализацию сырьевых материалов по физическим, физико-химическим и гранулометрическим показателям. Тогда согласно [1] мы получаем систему управления с полной информацией об объекте, которая управляет процессом по жёсткому, фиксированному алгоритму. При этом количество моделей инструментария прогноза невелико, а вычислительные процедуры достаточно несложны. В практиках предприятий СНГ нормализация сырьевых материалов не производится. Отсюда следует, что в таких системах управления необходимо непрерывно определять численные значения входных, выходных, управляющих переменных и переменных состояния. В системах управления такого типа мы вынуждены рассматривать их как системы с неполной информацией об объекте. В этом случае усложняется инструментарий прогноза и требуется большое количество измерений переменных, позволяющих адаптировать модели и алгоритмы систем управления производством. При этом

возникают сложности технико-экономического характера, связанные со стоимостью комплекса технических средств системы. Так, если стоимость вычислительной техники с 1980 года стала меньше на 2 порядка, то стоимость датчиков, измерительных и коммутирующих устройств выросла на 3-4 порядка. Учитывая вышесказанное, в этом случае процессы, протекающие на 5 уровне, рассматриваются как нестационарные и инструментальный прогноз представлен системами нелинейных дифференциальных уравнений вида (2.90):

$$\begin{aligned}\frac{d\bar{y}_6}{dt} &= f(\bar{x}_6, \bar{y}_6, u_6, B), \\ \frac{d\bar{x}_6}{dt} &= f(\bar{x}_6, \bar{y}_6, u_6, B), \\ \frac{d\bar{u}_6}{dt} &= f(\bar{x}_6, \bar{y}_6, u_6, B),\end{aligned}\tag{2.90}$$

где B – вектор (матрица) параметров модели.

Выбор функционала цели и постановка задачи уравнения на 5 уровне варьируются в зависимости от характера процессов, протекающих на объектах управления. Следует отметить, что алгоритм системы управления нестационарными процессами должен содержать математические модели, численные процедуры их решения, численные методы параметрической идентификации, численные процедуры поиска экстремума функционала цели. Всё перечисленное предназначено для определения управляющих воздействий в реальном масштабе времени. Прогноз по модели должен обладать погрешностью не более 0,3 %, но, с другой стороны, сложность и количество уравнений вместе с вычислительной процедурой должны быть соизмеримы, или на порядок меньше времени изменений характеристик объекта. Процедуры поиска экстремума функционала цели, в зависимости от точки начала поиска, варьируются в порядке скоростных характеристик процесса и быстродействия приводных устройств. Поэтому могут применяться как сложные поисковые процедуры, так и их комбинации. В связи с тем, что система управления такого типа обладает неполной информацией об объекте, целесообразно рассматривать её как систему с идентификатором в контуре управления, что позволяет с каждым

технологическим циклом адаптировать алгоритм работы системы, увеличивая точность прогноза по моделям и параметров функционала цели.

2.5 Применение метода эквивалентных отображений в специальном математическом обеспечении систем управления производством

В современной практике, специалисты, осуществляющие разработку технических, технико-экономических и финансовых систем, вынуждены перебирать многообразие реализованных в мировой практике аналогов. Такое состояние дел, в первую очередь, зависит от квалификации работника, его аналитических способностей, а также от требований Заказчика. Предлагаемые в работе методические правила позволяют сократить процедуры и количество вариантов [325].

Кроме этого, в задачах систем управления производством при определении оптимальных значений показателей разработчик сталкивается с большим количеством переменных, характеризующих требуемые показатели. Это приводит к усложнению процедур численного решения оптимизационных задач.

Целью исследования является разработка такой методики и алгоритмов производственного планирования для многоуровневых систем управления производством, которые будут применимы к ряду объектов с аналогичной структурой.

Современные методы решения задач планирования и управления деятельностью многоуровневых предприятий, рассмотрены многокритериальные постановки задач управления обсуждаются в работе [326]. Принципиальные положения оптимального управления многообъектными многокритериальными системами, структурный синтез и иерархическое уравнивание в интеллектуальных системах управления рассматривались в работе [327]. Методика формализации переменных, предложенная в [328], позволяет заменить изучение связей между характеристиками объекта изучением отношений между множествами для объектов управления со сложной структурой.

Постановка задачи управления.

Необходимо разработать методику решения задач оперативного управления производственной деятельностью в многоуровневой и многокритериальной системе управления предприятием.

В основу методики данной работы положены определение эквивалентности множеств и следствие, что из каждых неэквивалентных множеств могут быть извлечены эквивалентные подмножества [329].

Современное предприятие может быть представлено, как пятиуровневая структура, в различной степени подчинённая производственной программе предприятия.

Первый уровень — это предприятие, в заводууправлении которого подразделения вырабатывают плановые задания второму уровню — производственным цехам.

На сегодняшний день глубина планирования не превышает месяца, а производственные задания второму уровню — цехам имеют период квантования — сутки.

Основной расчёт плановых заданий осуществляется в планово-производственном отделе заводууправления и подчиняется, как правило, критерию оптимальности (2.91):

$$J_1^1 \rightarrow \max, \quad (2.91)$$

т.е. получению максимального дохода от реализации заказов, сформированных в портфеле заказов.

Решением этой задачи (2.91) является вектор (матрица), характеризующий «что» — вид заказанной продукции, «где» — в каком цехе и «когда» — в какие сутки должно быть произведено.

Кроме этого, в решение задачи (2.91) входят показатели сырья и комплектующих, необходимых для выполнения заказов. Формально решение может быть представлено в виде (2.92):

$$Y_1^1 = \{Z^j, G^j, Ц^j, S_2^j, T_2^j, SR_2^j, SG_2^j, Ц_2^j\}, \quad (2.92)$$

где Z^j — заказы портфеля; G^j — количество заказанной продукции; $Ц^j$ — стоимость заказа; S^{j_2} — цех, производящий эту продукцию; T^{j_2} — сутки, в которые произведут продукцию; SR^{j_2} — вид сырья, необходимого для производства продукции; SG^{j_2} — количество сырья; $Ц^{j_2}$ — стоимость сырья.

Переменная Z содержит название продукции NZ_j или номера, под которыми эта продукция указана в портфеле.

Согласно предлагаемой методики осуществляется проверка эквивалентности позиций, указанных в портфеле заказов, и позиций, приведённых в решении плановой задачи (2.91). Эквивалентность множеств подразумевается в семантическом и нумерологических смыслах. Эквивалентность в семантическом смысле подразумевает отображение названий продукции портфеля заказов и позиций планового решения (2.92), т.е. устанавливается эквивалентность вида (2.93):

$$Z_p^j \equiv Z^j, \quad (2.93)$$

где Z_p^j — множество названий продукции в портфеле заказов.

Если множества не эквивалентны, из (2.93) выделяется неэквивалентное подмножество $Z_{н.э.}^j$. Это может означать, что данные позиции не включены в план, может быть ошибочно, или заказаны виды продукции, которые предприятия могли бы производить. Это является основанием для выдачи заданий техническому отделу предприятия на разработку технических условий выпуска такой продукции.

Аналогично осуществляется проверка эквивалентности множеств (2.93) в нумерологическом смысле, при условии кодировки позиций портфеля заказов.

В последующем осуществляется отображение множеств вида (2.94):

$$G_p^j \equiv G^j, \quad (2.94)$$

характеризующих соотношения количества заказанного продукта и включённого в плановый портфель. Оценка эквивалентности осуществляется в количественном смысле.

Если множества (2.94) неэквивалентны, то это означает, что выделенное неэквивалентное подмножество $G_{н.э.}^j$ показывает несовпадение количества продукции в портфеле заказов G_p^j с запланированным выпуском G^j .

Возможны варианты, когда сырьё проходит стадии преобразования в полупродукты, выпускаемые последовательной группой цехов предприятия. Когда последний цех выпускает готовую продукцию, тогда необходимо в плановом задании производства учитывать виды полупродуктов PSR_2^j и сроки выпуска, определённого в плане PT_2^j полупродукта.

В этом случае возможно формирование множеств, характеризующих эти показатели $PSR_1 = \cup_j PSR_2^j$ и $PT_1 = \cup_j PT_2^j$.

Аналогично формируются множества, характеризующие количество полупродуктов PSG_2^j в виде $PSG_1 = \cup_j PSG_2^j$.

Отображение этих множеств друг на друга позволяет выделить неэквивалентные подмножества, как в семантическом (по названиям), так и в количественном смысле. Сопоставление множеств PSR_2^j и PSR_1 позволяет по полученным неэквивалентным подмножествам определить, что эти полупродукты не входят в плановые задания производства.

Неэквивалентные множества сроков поставки, полученные при отображении множеств PT_1 и PT_2^j , позволяют оценить нарушения в сроках поставки полупродуктов между цехами, а сопоставления множеств PSR_1 и PSR_2^j через неэквивалентные отображения покажут несоответствие количественных характеристик полупродуктов.

Таким образом, для последовательной группы цехов, выпускающих полупродукты, необходимо отображать множества, выделяя неэквивалентные составляющие, представленные формулами (2.95) – (2.100):

$$PSR_1 \equiv PSR_2^j, \quad (2.95)$$

$$PT_1 \equiv PT_2^j, \quad (2.96)$$

$$PSG_1 \equiv PSG_2^j, \quad (2.97)$$

$$PSR_2^j \equiv PSR_2^{j+1}, \quad (2.98)$$

$$PT_2^j \equiv PT_2^{j+1}, \quad (2.99)$$

$$PSG_2^j \equiv PSG_2^{j+1}. \quad (2.100)$$

Для каждой из последовательной группы цехов J_2 целесообразно построить отображение (2.98) – (2.100), а для цехов, выпускающих готовую продукцию, отображения (2.95) – (2.97).

Неэквивалентные множества, полученные при этих отображениях, характеризуют нарушение графика движения полупродуктов (2.98) – (2.100) и нарушения графиков поставок (2.95) – (2.97).

Аналогично проводится отображение множества показателей каждого цеха S_2^j с оценкой эквивалентности по видам и количеству произведённой этим цехом продукции.

Согласно специфике производственного назначения цеха по выпуску продукции, из отображения на цеховые показатели выделяется эквивалентное подмножество Z_2^{ij} , характеризующее эту ситуацию, а при количественном отображении – подмножество G_2^{ij} , характеризующее количество продукции, запланированное к выпуску этим цехом. По результатам этих отображений формируются множества (2.101) и (2.102):

$$Z_1^* = \bigcup_i \bigcup_j Z_2^{ij}, \quad (2.101)$$

$$G_1^* = \bigcup_i \bigcup_j G_2^{ij}. \quad (2.102)$$

Множество (2.101) и множество (2.102) отображаются на соответствующие показатели портфеля Z^j и G^j . По результатам оценки эквивалентности этих множеств осуществляется вывод о полноте учёта заказанной продукции в решении задачи планирования (2.92).

Проверка заказываемого для производства сырья также может осуществляться через отображение характеристик сырьевого продукта $SR_{2Г}^j$, определённых ГОСТом или ТУ на производимый продукт и сопутствующие сырьевые материалы.

Эквивалентность в семантическом смысле (2.103) позволяет выделить нарушение в виде неэквивалентного подмножества — $SR_{2н.э.}^j$:

$$SR_2^j \equiv SR_{2Г}^j . \quad (2.103)$$

Количество заказываемого сырья подчинено нормативам на производство из него готовой продукции. Проверка эквивалентности в количественном смысле, представленная в выражении (2.104):

$$SG_2^j \equiv SG_{2Н}^j , \quad (2.104)$$

позволяет выделить неэквивалентное подмножество $SG_{2н.э.}^j$, которое характеризует повышение стоимости закупки сырья и себестоимости продукции $ПЦ_2^j$, отражённое в формуле (2.105):

$$ПЦ_2^j = \bigcup_i \bigcup_j S_{2нэ}^{ij} \cdot Ц_2^{ij} . \quad (2.105)$$

Плановое задание (2.92) как решение задачи планирования производственной программы поступает в экономико-финансовую службу, где по задаче вида (2.106):

$$J_1^2 \rightarrow \max , \quad (2.106)$$

J_1^2 задаются оптимальные условия для определения финансовых возможностей реализации планового задания.

В этом случае отображаются через количественную эквивалентность (2.107) соотношения доходов от реализации портфельных позиций и расходов, связанных с закупкой сырья и комплектующих:

$$\bigcup_i \bigcup_j G_1^{ij} \cdot Ц^{ij} \equiv \bigcup_i \bigcup_j SG_1^{ij} \cdot ЦS_1^{ij} . \quad (2.107)$$

При этом отображении может быть неэквивалентное подмножество, которое свидетельствует о дефиците оборотных средств, в следствие чего возникает потребность в краткосрочном кредитовании производственной программы.

На первом уровне могут решаться задачи по определению оптимальной себестоимости (затратного механизма) предприятия вида (2.108):

$$J_1^3 \rightarrow \min . \quad (2.108)$$

В этом случае отображаются множества количественных оценок сырья, энергозатраты и их нормативные или статистические показатели.

Может иметь место задача определения оптимального портфеля заказов на сырьевые материалы вида (2.109):

$$J_1^4 \rightarrow \min . \quad (2.109)$$

В этой задаче сопоставляются множества договорных цен на поставку сырья и множества рыночных цен на эти же материалы.

Эквивалентность множеств определяется из сопоставления множеств видов сырья, цен на сырьевые материалы и множества сырья, заданных выражениями (2.110) – (2.112):

$$SR_2^j \equiv VSR_2^j, \quad (2.110)$$

$$\Pi_2^j \equiv V\Pi_2^j, \quad (2.111)$$

$$SG_2^j \equiv VSG_2^j. \quad (2.112)$$

Процедура предусматривает определение эквивалентности в семантическом (по наименованию) и количественном смысле (объём, цена).

Неэквивалентные подмножества, выделенные при этом отображении, означают, что службы снабжения должны пересмотреть существующие договора на поставку сырья, меняя условия оплаты либо поставщиков.

Как отдельная задача может рассматриваться управление оборачиваемостью средств, представленное в выражении (2.113):

$$J_1^5 \rightarrow \min . \quad (2.113)$$

В этой задаче оцениваются сроки движения средств, вкладываемых в закупку сырья и превращение сырья в реализованную продукцию.

Для оценки окупаемости осуществляется отображение множеств объёмов, видов, стоимости сырья, а также множеств сроков поставки сырья, изготовления готовой продукции по объёмам, срокам и стоимости, представленное в (2.114) – (2.122):

$$SR_2^j \equiv FSR_2^j, \quad (2.114)$$

$$SG_2^j \equiv FSG_2^j, \quad (2.115)$$

$$(\Pi_2^j \cdot SG_2^j) \equiv (F\Pi_2^j \cdot S_2^j), \quad (2.116)$$

$$T_2^j \equiv FT_2^j, \quad (2.117)$$

$$G_2^j \equiv FG_2^j, \quad (2.118)$$

$$(\Pi_j \cdot G_2^j) \equiv (\Pi_j \cdot FG_2^j), \quad (2.119)$$

$$\Gamma T_2^j \equiv F\Gamma T_2^j, \quad (2.120)$$

$$FT_2^j \equiv F\Gamma T_2^j, \quad (2.121)$$

$$(F\Pi_2^j \cdot S_2^j) \equiv (\Pi_j \cdot G_2^j) \equiv (\Pi_j \cdot FG_2^j). \quad (2.122)$$

В этом случае имеют место отображения множества и оценка их эквивалентности по семантическим признакам (названия), сроки, объёмы и стоимости по закупке сырья и реализованной продукции.

При этих отображениях появление неэквивалентных подмножеств означает, что необходимо управлять практикой закупок объёмов сырья, меняя интервалы закупок, соизмеримых с временем технологических циклов изготовления продукции с полным использованием объёма закупки сырья.

Частным случаем практических задач, реализуемых в многоуровневой системе, является задача технического обеспечения производства. Задача вида (2.123):

$$J_1^6 \rightarrow \max \quad (2.123)$$

рассматривается как управление производительностью оборудования за счёт изменения технических условий и модернизации оборудования.

В этой задаче отображаются множества, содержащие фактические значения показателей с характеристиками более современных образцов оборудования. В эту же систему поступают запросы от системы (2.91) по разработке технических условий на новые виды продукции.

Немаловажную роль в управлении производственной программой предприятия играют задачи, решаемые отделами главного инженера, касающиеся технического обеспечения производства (2.124):

$$J_1^7 \rightarrow \min, \quad (2.124)$$

решением которых является уменьшение затрат на ремонты и ремонтное обслуживание оборудования.

В этой задаче отображаются множества в семантическом, количественном и логическом смыслах.

Согласно постановки задачи формируются множества, определяющие, в каких цехах будут проводиться работы по ремонту оборудования $RS_1 = \cup_j RS_2^j$, а также множества, характеризующие сроки проведения ремонтов $RT_1 = \cup_j RT_2^j$. Множества, отражающие стоимости ремонтных работ: $CR_1 = \cup_j CR_2^j$.

Перечисленные множества отображаются по формулам (2.125) – (2.127):

$$RS_1 \equiv S_1, \quad (2.125)$$

$$RT_1 \equiv T_1, \quad (2.126)$$

$$CR_1 \equiv CTR_1, \quad (2.127)$$

на множество плановых показателей работы цехов $S_1 = \cup_j S_2^j$, а также на сроки выполнения плановых заданий $T_1 = \cup_j T_2^j$. Множества, характеризующие стоимость ремонтных работ, осуществляемых строительными организациями, $CTR_1 = \cup_j CTR_2^j$.

Последовательное определение неэквивалентных подмножеств позволяет оценить стоимость работ, выполняемых сторонними организациями.

Кроме того, отображение сроков ремонтных работ и выделение неэквивалентных множеств определяет необходимость корректировки плановых заданий (2.91).

На втором уровне решается задача планирования работ подразделениями цеха (переделами) с периодом квантования – смена (бригада). Задача вида (2.128):

$$J_2^1 \rightarrow \min \quad (2.128)$$

подчинена минимизации простоев оборудования и выполнению заданий, полученных цехом.

При решении задачи J_2 формируются множества, характеризующие простои в последовательной группе цехов. Выделяются производственные простои:

$PS_1 = \cup_j PS_2^j$ и непроизводственные: $NPS_1 = \cup_j NPS_2^j$, а также показатели времени (суток) простоев, соответственно: $PT_1 = \cup_j PT_2^j$ и $NPT_1 = \cup_j NPT_2^j$.

Отсюда следует, что $CPS_1 = PS_1 + NPS_1$ и $CT_1 = PT_1 + NPT_1$.

Эквивалентность отображений этих множеств задана формулами (2.129) – (2.131):

$$S_1 \equiv CPS_1, \quad (2.129)$$

$$T_1 \equiv CT_1, \quad (2.130)$$

$$PSR_1 \equiv PSR(PT_1). \quad (2.131)$$

В этом случае осуществляется последовательность отображений семантического (по названиям операций), количественного (по объёму полупродуктов, обрабатываемых сменой), а также логического (определяющего порядок следования полупродуктов по переделам — на третьем уровне).

Выявленные при отображениях множеств этих показателей неэквивалентные множества позволяют оценить невозможность выполнения плановых заданий, полученных в результате решения задачи (2.91). Это определяет необходимость корректировки плановых заданий на сутки.

Аналогично определяется отображение множеств в задаче третьего уровня вида (2.132):

$$J_3 \rightarrow \min, \quad (2.132)$$

в результате которого определяется корректность плана по смене, выработанного в решениях задачи J_2 — второго уровня.

Для задачи третьего уровня J_3 значения производственных показателей квантуются с интервалом смена (бригада) в час $STЧ_3^j$. Эти показатели отображаются на плановые производственные показатели выпускаемых

полупродуктов PSR_3^j , т.е. сопоставляется множество, состоящее из почасовых показателей, представленных в (2.133) – (2.134):

$$PSR_3 \equiv PSR_3(STЧ_3^j), \quad (2.133)$$

$$STЧ_2 \equiv STЧ_3. \quad (2.134)$$

В задачах четвёртого (участок) и пятого (технологический агрегат) уровней большую долю занимают задачи технологического характера, специфические для каждого предприятия.

В этом случае отображаются множества технологических характеристик.

Полученные при этом отображении неэквивалентные множества позволяют оценить отклонения этих характеристик от нормированных плановых режимов работы оборудования.

В практической деятельности предприятия плановые задания поступают от первого до пятого уровней управления, а отчёт о выполнении этих заданий – от пятого уровня до первого.

При этом, в каждой задаче $J_1 - J_5$ необходимо проводить отображение показателей «план-факт».

Эквивалентность множеств на всех уровнях целесообразно определять в интервалах квантования сутки по всем уровням в последовательной группе цехов по формулам (2.135) – (2.139):

$$1 \text{ уровень} \begin{cases} G_1 \equiv G_1 F, \\ S_1 \equiv S_1 F, \\ T_1 \equiv T_1 F. \end{cases} \quad (2.135)$$

$$2 \text{ уровень} \begin{cases} PSR_2^j \equiv PSRF_2^j, \\ PT_2^j \equiv PTF_2^j, \\ PSG_1^j \equiv PSGF_1^j. \end{cases} \quad (2.136)$$

$$3 \text{ уровень} \begin{cases} PSR_3^j \equiv PSRF_3^j, \\ PT_3^j \equiv PTF_3^j, \\ PSG_2^j \equiv PSGF_2^j, \\ PSG_3^j \equiv PSGF_3^j. \end{cases} \quad (2.137)$$

$$4 \text{ уровень} \begin{cases} PSR_4^j \equiv PSRF_4^j, \\ PT_4^j \equiv PTF_4^j, \\ PSG_3^j \equiv PSGF_3^j, \\ PSG_4^j \equiv PSGF_4^j. \end{cases} \quad (2.138)$$

$$5 \text{ уровень} \begin{cases} PSR_5^j \equiv PSRF_5^j, \\ PT_5^j \equiv PTF_5^j, \\ PSG_4^j \equiv PSGF_4^j, \\ PSG_5^j \equiv PSGF_5^j. \end{cases} \quad (2.139)$$

В этом случае отображения могут осуществляться в количественном, семантическом и логическом смыслах.

Неэквивалентные множества, характеризующие «невязку» «план-факт», выполняют роль начальных условий при определении начальных условий в задаче оперативного управления этих уровней.

В зависимости от характера производства, учёт выполнения плановых заданий может осуществляться с интервалом квантования час. На предприятиях с непрерывным характером производства этот учёт может осуществляться в течении всего производственного цикла.

В этом случае необходимо осуществлять отображение множеств, характеризующих темп производства вида (2.140) – (2.143):

$$PT(T)_4^j \equiv PT(T)F_4^j, \quad (2.140)$$

$$PT(T)_5^j \equiv PT(T)F_5^j, \quad (2.141)$$

$$PSG(T)_4^j \equiv PSG(T)F_4^j, \quad (2.142)$$

$$PSG(T)_5^j \equiv PSG(T)F_5^j. \quad (2.143)$$

При этом следует учесть, что установленное в производственном потоке измерительное оборудование формирует множества непрерывно с интервалом квантования, соизмеримым со скоростью измерений. Отображение этих множеств и выделение неэквивалентных подмножеств сокращает объём и время определения значений следующих режимов, т. е. выступают в качестве составной

части алгоритмов управления. Это характерно для металлургических, химических и теплоэнергетических процессов.

Так, в металлургических печах (электропечь, конвертер) измеряемые с помощью специальной фурмы или электронной бомбы содержание веществ и температура формируют множества, которые возможно отображать на аналогичные множества технических условий, протекающих на агрегате процессов. Выделенные при этом неэквивалентные подмножества выступают в качестве начальных условий поиска оптимальных режимов управления в течении всего производственного цикла.

Аналогично для станов непрерывной прокатки листовой стали показания толщины заготовки, подаваемой в первую клетку, измеренной с помощью рентгеновской линейки, отображаются на технические условия толщины заготовки. Выделяемые при отображении неэквивалентные показатели позволяют управлять движением валков первой клетки, что существенно улучшает характеристики системы управления станом.

Следует отметить, что существенную роль отображений множеств может иметь при контроле качества производимой продукции на любом производстве. Службы контроля на производствах сопоставляют характеристики продукции, производимой на этих производствах, с требованиями ГОСТов и технических условий.

Формирование множеств фактических показателей продукции и требуемых ГОСТ могут отображаться через множества в семантическом (по наименованию, а также по соответствующему ГОСТ), нумерологическом (номер издания или партии), количественном (значения характеристик) и логическом признаках.

Выделение неэквивалентных подмножеств служит исходным материалом для системы управления качеством продукции.

2.6 Выводы по второму разделу

1. Установлено, что обобщённое представление объекта и системы управления позволяет варьировать поисковые процедуры с наибольшей эффективностью, которую можно оценивать по сужению (расширению) области обобщённого представления объекта и системы.

2. Предложена методология представления СУ в функциональных пространствах, пригодная для специалистов, ведущих работы по созданию систем управления производством и, в первую очередь, адаптивных, многоуровневых систем. Перспективы дальнейшего развития методологии — формализация сходимости процедур управления, представленных в функциональных пространствах, и формальная оценка эффективности.

3. Осуществлена физическая постановка задач определения заданий для предприятий, производящих средства производства (группа «А»). Согласно этим постановкам произведена их обобщённая формализация в виде функционалов целей и систем ограничений динамического и статического характера. Постановки задач предназначены для пользователей системы верхнего уровня управления предприятием — служб заводоуправления, и могут быть использованы при различных экономических ситуациях, характеризующих деятельность предприятия в плановый период.

4. Определены возможности декомпозиции сформулированных задач для подчинённых систем управления производством в многоуровневой реализации. Постановки задач и функционалы конструктивно могут быть использованы в системах управления любым предприятием при условии наполнения функционалов и ограничений конкретными показателями, характеризующими это предприятие, его систему заказов, продукцию и сырье.

5. Предлагаемые методологические правила создания пятиуровневой системы управления дают возможность представлять её в виде активной нейросети. Активными центрами этой нейросети являются рабочие станции кольцевых и радиальных вычислительных устройств системы управления.

Сложным является обучение такой нейросети, т.к. метод обратного восстановления ошибки непригоден для активной нейросети такой конфигурации.

6. Полученные при отображениях неэквивалентные множества составляют основу начальных значений решения задач оперативного управления деятельностью предприятий.

7. Изложенный в работе материал может быть применён в качестве инструментария системы принятия решений в многоуровневой и многокритериальной системе управления предприятием, базирующейся на активной нейросети.

РАЗДЕЛ 3

МЕТОДОЛОГИЯ И ПРАВИЛА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВОЗМОЖНОСТЬ
СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ТРЕХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ
ПРОЦЕССОМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СЕРЕБРА ИЗ ГРЯЗНЫХ РАСТВОРОВ В
УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
ТРАНСФОРМАЦИЙ

В данном разделе необходимо разработать математические модели, с помощью которых будут оцениваться состояния биосорбента и протекающего через колонны раствора при различных режимах функционирования колонн. Кроме того, необходимо сформировать логико-формальные правила переключения колонн. Также целесообразно создать математические модели прогноза экономико-технических свойств сорбента, предназначенные для выбора предлагаемых биокультур.

Как следует из анализа характеристик объекта управления, необходимо поставить и формализовать задачи управления участком биосорбции серебра на трёх уровнях. Нижний уровень ориентирован на управление кинетикой процессов, протекающих в каждой колонне. Задачи среднего уровня предназначены для реализации дискретных воздействий – режимов переключения колонн в соответствии с фазами каждого технологического цикла. Непрерывная задача управления среднего уровня предусматривает управление режимами биосорбции, подчинёнными наиболее эффективному использованию сорбента, загруженного в колонны. Задача верхнего уровня носит организационно-экономический характер и предназначена для оценки целесообразности закупки плесневой культуры, используемой в качестве сорбента. Таким образом, в данном разделе необходимо осуществить физическую постановку задач управления, формализовать их в виде функционалов цели, выбрать методы решения оптимизационных задач, разработать алгоритмы системы управления, осуществить численное исследование алгоритмов.

Технологические особенности процесса, описанные в первой главе, позволяют выделить три уровня управления процессами, протекающими на участке биосорбции серебра. На нижнем уровне управления необходимо осуществлять прогноз и принятие решений по регулированию кинетики протекающих процессов. На среднем уровне необходимо осуществлять логические переключения колонн. На верхнем уровне необходимо решать задачи экономического характера, подчинённые стоимости биосорбентов, обладающих различными кинетическими свойствами и специфической динамической обменной ёмкостью.

На нижнем уровне можно выделить три стадии протекания процесса. Первая стадия – биосорбция серебра (режим S), вторая – восстановление сорбционной способности плесневой культуры (режим R), которые составляют технологическую фазу процесса биосорбции, и, в зависимости от вида сорбента, могут повторяться несколько раз, образуя технологический цикл. После завершения использования сорбента выделяется третья стадия - десорбция (режим DS), подчинённая извлечению серебра из биосорбента, накопленного за все технологические циклы.

Исходя из технологических и физико-химических особенностей процессов, протекающих на участке биосорбции, необходимо разработать следующие математические модели процессов:

- на первом уровне биосорбции, восстановления сорбционной способности, десорбции;
- для второго уровня необходимо разработать логико-формальные модели, учитывающие особенности переключения колонн и модели прогноза процессов каждого цикла;
- для третьего уровня сформировать модели прогноза экономических и технологических свойств различных типов биосорбентов.

При разработке математических моделей необходимо:

- произвести классификацию переменных;
- разработать уравнения модели;

- выбрать численный метод решения уравнений модели;
- выбрать метод идентификации моделей и осуществить параметрическую идентификацию «в малом»;
- провести численное исследование прогноза по модели и проверить её адекватность.

3.1 Математические модели нижнего уровня

При разработке математической модели процесса биосорбции серебра из вторичных растворов (первая стадия цикла), необходимо решить следующие задачи:

- сформулировать гипотезу о механизме протекающих процессов;
- осуществить выбор типа модели и математического аппарата моделирования;
- разработать уравнения математической модели.

3.1.1 Гипотеза о механизме процесса

Согласно технологическим и физико-химическим особенностям процессов, протекающих при гетерогенном процессе биосорбции, в данной работе сформулирована следующая гипотеза о механизме процесса.

Вторичный серебросодержащий раствор, под действием гидростатического давления, протекает через сорбционную колонну, омывая гранулы биосорбента, содержащие активные центры, которые являются антагонистами серебра. При этом происходит химическое взаимодействие активных центров и металла, представленного катионами Ag^+ и солями AgNO_3 . В связи с особенностями кинетики, ограничивающими диапазон кислотности раствора, с гранулами соприкасаются диссоциированные анионы NO_3^- , OH^- и катионы H^+ . Согласно химизму, исследованному в работе [36], при взаимодействии активных центров (R-COOH , R-SH , R) и серебросодержащих компонент (Ag^+ , AgNO_3^-) происходят

реакции (3.1) – (3.3). Количество серебра, усваиваемого сорбентом, определяется начальными условиями концентрации серебра в растворах, поступающих в колонну. Время пребывания раствора в колонне зависит от расхода растворов, поступающих в колонну.

Исходя из геометрических и физических особенностей процессов биосорбции, происходящих в технологическом агрегате – колонне, заполненной гранулами биосорбента, при протекании растворов можно сформулировать следующие допущения:

- геометрические размеры сферических гранул сорбента одинаковы;
- кинетика биосорбции одинакова для каждой гранулы;
- в процессе биосорбции участвует вся поверхность гранулы;
- площадью контакта гранул между собой можно пренебречь;
- температура раствора не меняется в течение цикла биосорбции;
- расход серебросодержащего раствора через колонну постоянен;
- уровень серебросодержащего раствора в колонне постоянен и раствор заполняет рабочий объем сорбента полностью;
- реакции (3.1) – (3.3) стехиометричны;
- влиянием примесей, в фиксированном диапазоне кислотностей, пренебрегаем;
- объем гранул сорбента постоянен;
- вес гранул сорбента зависит от количества сорбированного серебра и компонент реакции.

Технологические особенности проведения процесса биосорбции предполагают наличие следующих ограничений:

- концентрация азотнокислого серебра в растворе подчинена условию: $200 < \text{AgNO}_3 < 500 \text{ мг/дм}^3$;
- активность ионов водорода находится в границах $1,9 < \text{pH} < 3$.

Исходя из принятых допущений, в гипотезе о механизме явлений, сопровождающих процесс биосорбции, принято, что рассматриваются явления,

происходящие на отдельной грануле биосорбента с обобщением на весь фиксированный объем сорбента в одном технологическом агрегате (колонне).

Физико-химические особенности процесса биосорбции описаны в работах [36, 81, 82]. На основании принятой гипотезы, допущений и ограничений, процесс биосорбции, осуществляемый в каждой грануле при протекании раствора, декомпозирован на три зоны (Рисунок 3.1).

Первая зона представляет собой исходный вторичный раствор, содержащий AgNO_3 в химически связанном и диссоциированном виде, а также ионы воды, диссоциированные в виде анионов OH^- и катионов H^+ . В качестве второй зоны выделен δ -слой, характеризующий механизм обмена между сорбентом и раствором. Третья зона представляет собой гранулу биосорбента, содержащую активные центры, усваивающие серебро из растворов.

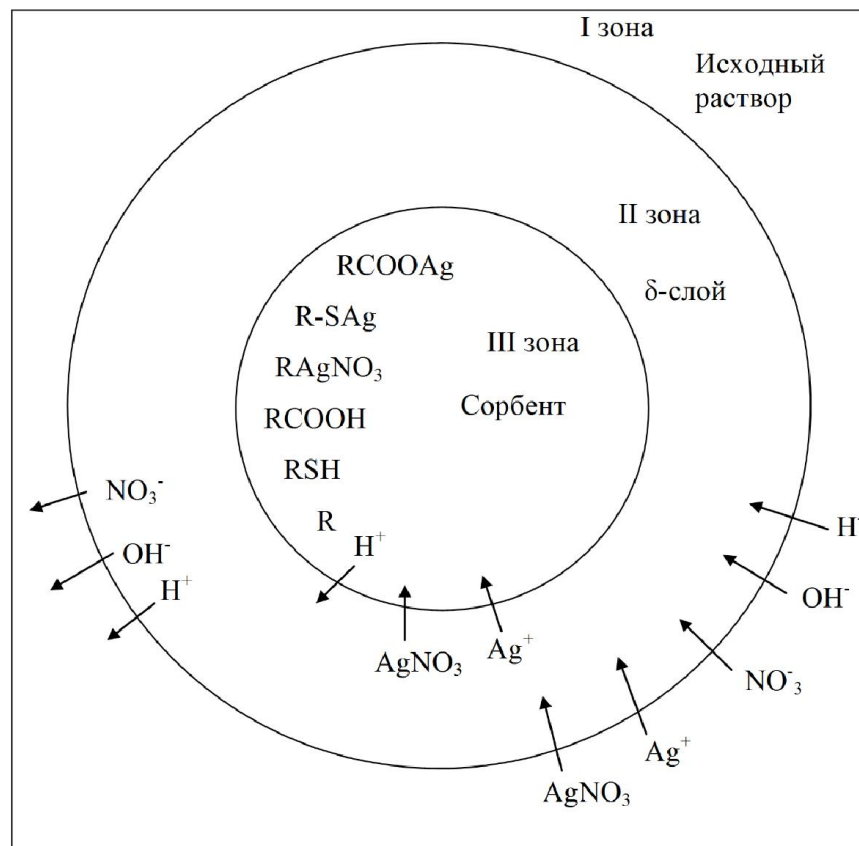
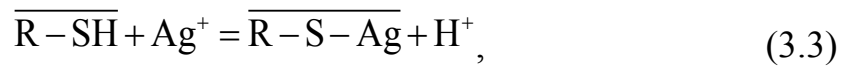
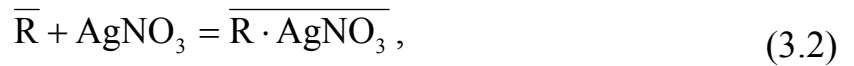
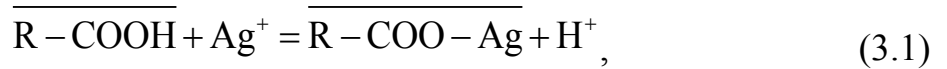


Рисунок 3.1 – Принцип декомпозиции рабочего объёма на зоны при протекании процесса сорбции

Согласно принятой декомпозиции, в первой зоне циркулируют растворы, содержащие Ag^+ , NO_3^- , AgNO_3 , H^+ , OH^- . Из этой зоны во вторую зону переходят

вышеперечисленные компоненты. Из второй зоны в третью зону переходят Ag^+ , AgNO_3 . В третьей зоне, согласно работе [36], происходят химические реакции (3.1) – (3.3):



где R – свободный радикал в растворе.

На протекание реакции расходуются биоактивные центры сорбента R-COOH, R-SH и R. Образуются R-COO-Ag, R-S-Ag, R·AgNO₃, которые усваиваются сорбентом и катионы H⁺, которые переходят во вторую зону. Из второй зоны в первую переходят анионы NO₃⁻, OH⁻ и катионы H⁺. Для приведённой декомпозиции рабочего объёма гранул биосорбента необходимо разработать математическую модель процесса биосорбции.

3.1.2 Выбор типа математической модели и постановка задачи моделирования

Так как протекающие в колонне процессы являются нестационарными, то для описания явлений, происходящих при этих процессах, согласно положениям моделирования, необходимо разработать динамическую детерминированную модель, которая рассматривается как параметрическая структура. Зависимости между переменными, как приведено в первой главе, носят нелинейный характер, поэтому постановка задачи моделирования имеет следующий вид.

Разработать динамическую детерминированную модель с нелинейным характером переменных, описывающую явления массопереноса с сопутствующим химизмом протекающих процессов. Согласно декомпозиции, приведённой в предыдущем подразделе, необходимо разработать три подмодели, описывающие явления, протекающие в каждой зоне, в виде связной системы параметрических дифференциальных уравнений с нелинейными правыми частями (3.4):

$$\frac{dy}{dt} = f(\bar{x}, \bar{y}, t), \quad (3.4)$$

где x – состояние объекта; y – прогнозируемая переменная (выход объекта); t – время.

Для каждой зоны с помощью этого уравнения описываются физико-химические явления, происходящие в этой зоне, количество извлекаемого серебра (выход) и расход сорбентов на протекающие реакции. Так как численное решение, осуществляемое на компьютерах, предполагает применение метода Рунге-Кутты-Гилла четвертого порядка, при котором запись дифференциальных уравнений при решении задачи Коши, предполагает линейные правые части, запись системы дифференциальных уравнений осуществляется в соответствии с этим требованием, а расчет нелинейностей выносится в отдельный блок правых частей. При этом расчет нелинейностей в итеративных процедурах численного интегрирования предполагает аппроксимацию значений переменных на предыдущем шаге.

3.1.3 Классификация переменных первого уровня

Перед разработкой математической модели, согласно основам системного анализа, осуществлена классификация переменных, характеризующих процессы, протекающие в колоннах. Выделены входные переменные (Таблица 3.1), состояния (Таблица 3.2) и выходные переменные (Таблица 3.3).

Таблица 3.1– Входные переменные первого уровня

Наименование переменной	Обозначение	Единица измерения
Расход серебрясодержащего раствора	$g_{пр}$	г/с
Содержание серебра в растворе	$[Ag^+](0)$	доли
Активность катионов водорода (pH) в растворе	$[H^+](0)$	доли
Кислотность раствора	$[NO_3^-](0)$	доли
Содержание гидроксида OH^-	$[OH^-](0)$	доли
Содержание $AgNO_3^+$	$[AgNO_3^+](0)$	доли
Количество активных центров сорбции $RCOOH$	$G_{RCOOH}(0)$	г
Количество активных центров сорбции RSH	$G_{RSH}(0)$	г
Количество активных центров сорбции R	$G_R(0)$	г
Номер технологического цикла	k	

Таблица 3.2– Состояния первого уровня

Наименование переменной	Обозначение	Единица измерения
Количество катионов серебра, усвоенного сорбентом	$G^{\text{Ag}^+}(\tau)$	г
Количество AgNO_3 , усвоенного сорбентом	$G^{\text{AgNO}_3}(\tau)$	г
Количество анионов NO_3	$G^{\text{NO}_3}(\tau)$	г
Активность катионов водорода	$G^{\text{H}^+}(\tau)$	г
Количество израсходованных активных центров RCOOH	$G^{\text{RCOOH}}(\tau)$	г
Количество израсходованных активных центров RSH	$G^{\text{RSH}}(\tau)$	г
Количество израсходованных активных центров R	$G^{\text{R}}(\tau)$	г
Количество сорбированных комплексов RCOOAg	$G^{\text{RCOOAg}}(\tau)$	г
Количество сорбированных комплексов RSAg	$G^{\text{RSAg}}(\tau)$	г
Количество сорбированных комплексов RAgNO_3	$G^{\text{RAgNO}_3}(\tau)$	г
Текущие концентрациикатионов серебра	$[\text{Ag}^+](\tau)$	доли
Текущие концентрации NO_3^-	$[\text{NO}_3^-](\tau)$	доли
Текущие концентрациикатионов водорода	$[\text{H}^+](\tau)$	доли
Текущие концентрации AgNO_3	$[\text{AgNO}_3](\tau)$	доли
Текущие концентрации активных центров RCOOH	$[\text{RCOOH}](\tau)$	доли
Текущие концентрации активных центров RSH	$[\text{RSH}](\tau)$	доли
Текущие концентрации активных центров R	$[\text{R}](\tau)$	доли
Плотность	$\gamma(\tau)$	г/см ³
Скорость усвоения серебра в реакциях (3.1-3.3)	$g_1^{\text{Ag}^+}, g_2^{\text{Ag}^+}, g_3^{\text{AgNO}_3}$	г/с
Текущие веса зон	$G_1(\tau_i), G_2(\tau_i), G_3(\tau_i)$	г
В режиме восстановления технологических свойств сорбента		
Рост плесневой культуры	$N(\tau)$	г
Рост активных центров	$A(\tau)$	г
Рост центров размножения	$P(\tau)$	г
Количество восстановленного серебра, усвоенного на к-м цикле	$G_k\text{Ag}$	г
Концентрация металлизированного серебра в сорбенте	$[\text{Ag}]$	г
В режиме десорбции		
Количество десорбирующего раствора	$G^{\text{NH}_4\text{OH}}(\tau)$	г
Количество продуктов десорбции	$G^{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2}(\tau)$	г
Количество продуктов десорбции	$G^{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{NO}_3}(\tau)$	г
Концентрация десорбирующего раствора	$\text{NH}_4\text{OH}(\tau)$	доли
Концентрация продуктов реакции	$[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]$	доли
Концентрация продуктов реакции	$[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]\text{NO}_3$	доли
Плотность раствора	$\gamma_p(\tau)$	г/см ³

Таблица 3.3– Выходные переменные первого уровня

Наименование переменной	Обозначение	Единица измерения
Количество катионов серебра Ag^+ в растворе	$G^{Ag^+}(T_1)$	г
Интервал времени сорбции	T_1	с
Количество анионов в NO_3^- растворе	$G^{NO_3^-}(T_1)$	г
Количество катионов водорода в растворе	$G^{H^+}(T_1)$	г
Количество $AgNO_3$ в растворе	$G^{AgNO_3}(T_1)$	г
Количество активных центров $RCOOH$ в сорбенте	$G^{RCOOH}(T_1)$	г
Количество активных центров RSH в сорбенте	$G^{RSH}(T_1)$	г
Количество активных центров R в сорбенте	$G^R(T_1)$	г
Количество сорбированных комплексов $RCOOAg$	$G^{RCOOAg}(T_1)$	г
Количество сорбированных комплексов $RSAg$	$G^{RSAg}(T_1)$	г
Количество сорбированных комплексов $RAgNO_3$	$G^{RAgNO_3}(T_1)$	г
Количество усвоенного серебра	$G_k Ag(T_1)$	г
Длительность сорбции	T_1	с
Время восстановления технологических свойств сорбента	T_2	с
Количество плесневой культуры	$N_k(T_2)$	г
Количество активных центров сорбента	$A_k(T_2)$	г
Количество центров размножения	$P_k(T_2)$	г
Количество восстановленных активных центров $RCOOH$	$G_k^{RCOOH}(T_2)$	г
Количество восстановленных активных центров RSH	$G_k^{RSH}(T_2)$	г
Количество восстановленных активных центров R	$G_k^R(T_2)$	г
Время десорбции	T_3	с
Количество продуктов реакции десорбции	$G^{Ag(NH_3)_2}(T_3)$	г
Количество продуктов реакции десорбции	$G^{Ag(NH_3)_2 NO_3}(T_3)$	г
Общее количество серебра, усваиваемого в колонне	$G^{Ag}(\tau)$	г

3.1.4 Математическая модель процесса биосорбции

В соответствии с изложенным принципом декомпозиции, математическая модель процесса биосорбции представлена подмоделями каждой из трех зон [330, 331, 332, 333].

Подмодель первой зоны.

Изменение количества катионов серебра в единицу времени (3.5):

$$\frac{dG_1^{Ag^+}}{dt} = g_{np}^{Ag^+} - \beta_1 F_1 \gamma_1 ([Ag^+]_1 - [Ag^+]_2), \quad (3.5)$$

где $\frac{dG_1^{Ag^+}}{dt}$ – скорость изменения количества Ag^+ в 1 зоне, г/с; $g_{np}^{Ag^+}$ – расход серебра в протекающем растворе, г/с; β_1 – коэффициент массопереноса между 1 и 2

зонами, м/с, параметр; F_1 – площадь поверхности контакта зон, m^2 ; γ_1 – плотность 1 зоны, $г/м^3$; $[Ag^+]_1$, $[Ag^+]_2$ – весовые концентрации катионов серебра в 1 и 2 зонах соответственно.

Скорость изменения количества $AgNO_3$ (3.6):

$$\frac{dG_1^{AgNO_3}}{dt} = g_{np}^{Ag^+} - \beta_1 F_1 \gamma_1 ([AgNO_3]_1 - [AgNO_3]_2) \quad (3.6)$$

Аналогично, скорость изменения анионов NO_3^- (3.7):

$$\frac{dG_1^{NO_3^-}}{dt} = g_{np}^{NO_3^-} - \beta_1 F_1 \gamma_1 ([NO_3^-]_1 - [NO_3^-]_2). \quad (3.7)$$

Скорость изменения катионов водорода (3.8):

$$\frac{dG_1^{H^+}}{dt} = g_{np}^{H^+} - \beta_1 F_1 \gamma_1 ([H^+]_1 - [H^+]_2). \quad (3.8)$$

Динамика изменения количества гидроксидов (3.9):

$$\frac{dG_1^{OH^-}}{dt} = g_{np}^{OH^-} - \beta_1 F_1 \gamma_1 ([OH^-]_1 - [OH^-]_2). \quad (3.9)$$

Обозначения переменных в уравнениях (3.7) – (3.9) аналогичны обозначениям переменных уравнения (3.5).

В рамках решения задачи Коши заданы $[\bar{x}](0)$ – начальные концентрации, g_{np} – измеряемая величина, T_1 – время окончания процесса сорбции (верхний предел интегрирования).

Подмодель второй зоны.

Изменение количества катионов серебра в единицу времени (3.10):

$$\frac{dG_2^{Ag^+}}{dt} = \beta_1 F_1 \gamma_1 ([Ag^+]_1 - [Ag^+]_2) - \beta_2 F_2 \gamma_2 ([Ag^+]_2 - [Ag^+]_3). \quad (3.10)$$

Скорость изменения количества анионов NO_3^- (3.11):

$$\frac{dG_2^{NO_3^-}}{dt} = \beta_1 F_1 \gamma_1 ([NO_3^-]_1 - [NO_3^-]_2) - \beta_2 F_2 \gamma_2 ([NO_3^-]_1 - [NO_3^-]_2). \quad (3.11)$$

Динамика изменения количества гидроксидов (3.12):

$$\frac{dG_2^{OH^-}}{dt} = \beta_1 F_1 \gamma_1 ([OH^-]_1 - [OH^-]_2) - \beta_2 F_2 \gamma_2 ([OH^-]_2 - [OH^-]_1). \quad (3.12)$$

Скорость изменения количества катионов водорода (3.13) – (3.14):

$$\frac{dG_2^{H^+}}{dt} = \beta_1 F_1 \gamma_1 ([H^+]_1 - [H^+]_2) + \beta_2 F_2 \gamma_3 ([H^+]_3 - [H^+]_2) - \beta_2 F_2 \gamma_2 ([H^+]_2 - [H^+]_1). \quad (3.13)$$

$$\frac{dG_2^{AgNO_3}}{dt} = \beta_1 F_1 \gamma_1 ([AgNO_3]_1 - [AgNO_3]_2) - \beta_2 F_2 \gamma_2 ([AgNO_3]_2 - [AgNO_3]_3) \quad (3.14)$$

Обозначения переменных в уравнениях (3.10) – (3.13) аналогичны обозначениям переменных уравнения (3.5).

Подмодель третьей зоны.

Блок изменения количества исходных веществ в серебросодержащем растворе представлен уравнениями (3.14) – (3.17):

$$\frac{dG_3^{Ag^+}}{dt} = \beta_2 F_2 \gamma_2 ([Ag^+]_2 - [Ag^+]_3) - g_1^{Ag^+} - g_2^{Ag^+}, \quad (3.15)$$

$$\frac{dG_3^{H^+}}{dt} = \chi_1^1 g_1^{Ag^+} + \chi_2^1 g_1^{Ag^+} + \chi_3^1 g_3^{AgNO_3} - \beta_2 F_2 \gamma_3 ([H^+]_3 - [H^+]_2) + \beta_2 F_2 \gamma_2 ([H^+]_2 - [H^+]_3), \quad (3.16)$$

$$\frac{dG_3^{AgNO_3}}{dt} = \beta_2 F_2 \gamma_2 ([AgNO_3]_2 - [AgNO_3]_3) - g_3^{AgNO_3}, \quad (3.17)$$

где $g_1^{Ag^+}$, $g_2^{Ag^+}$, $g_3^{AgNO_3}$ — скорость усвоения катионов серебра в реакциях (3.1) – (3.3), г/с.

Блок изменения количества активных центров биосорбентов представлен уравнениями (3.18) – (3.23):

$$\frac{dG_3^{RCOOH}}{dt} = -\chi_1^3 g_1^{Ag^+}, \quad (3.18)$$

$$\frac{dG_3^{RSH}}{dt} = -\chi_2^3 g_2^{Ag^+}, \quad (3.19)$$

$$\frac{dG_3^R}{dt} = -g_3^{AgNO_3}. \quad (3.20)$$

Блок изменения количества продуктов реакций:

$$\frac{dG_3^{RCOOAg}}{dt} = \chi_1^2 g_1^{Ag^+}, \quad (3.21)$$

$$\frac{dG_3^{R-SAg}}{dt} = \chi_2^2 g_2^{Ag^+}, \quad (3.22)$$

$$\frac{dG_3^{\text{RAgNO}_3}}{dt} = \chi_3^2 g_3^{\text{AgNO}_3}, \quad (3.23)$$

где χ_j^i – коэффициенты стехиометрии компонент в реакциях (3.1) – (3.3); i – номер компоненты, $i = \overline{1,3}$; j – номер реакции, $j = \overline{1,3}$.

В связи с тем, что численное решение приведённой системы уравнений (3.5-3.23) осуществляется методом Рунге-Кутты четвёртого порядка, расчёт нелинейностей и итеративные процедуры пересчёта концентраций вынесены в отдельный блок.

Расчёт количества серебра, усваиваемого сорбентом в реакциях (3.1) – (3.3), производится по формулам (3.24) – (3.28):

$$g_1^{\text{Ag}^+} = k_1 g_{\text{пп}}^{\text{Ag}^+} e^{-\frac{E_1}{RT}}, \quad (3.24)$$

$$g_2^{\text{Ag}^+} = k_2 g_{\text{пп}}^{\text{Ag}^+} e^{-\frac{E_2}{RT}}, \quad (3.25)$$

$$g_3^{\text{AgNO}_3} = k_3 g_{\text{пп}}^{\text{AgNO}_3} e^{-\frac{E_3}{RT}}, \quad (3.26)$$

$$g_{\text{пп}}^{\text{Ag}^+} = g_p [\text{Ag}^+]_{\text{раств}}, \quad (3.27)$$

$$g_{\text{пп}}^{\text{AgNO}_3} = g_p [\text{AgNO}_3]_{\text{раств}} \quad (3.28)$$

где E_1, E_2, E_3 – энергия активации; R – постоянная Больцмана; T – температура раствора; k_1-k_3 – константы скоростей реакций (3.1) – (3.3), параметры; g_p – скоростной поток серебра в растворе, г/с.

Итеративный расчёт текущих концентраций веществ осуществляется для каждой зоны.

Расчёт текущих концентраций веществ в первой зоне (3.29) – (3.33):

$$[\text{Ag}^+]_1(\tau_i) = [\text{Ag}^+]_1(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_1(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_1^{\text{Ag}^+}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau, \quad (3.29)$$

$$[\text{NO}_3^-]_1(\tau_i) = [\text{NO}_3^-]_1(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_1(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_1^{\text{NO}_3^-}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau, \quad (3.30)$$

$$[\text{H}^+]_1(\tau_i) = [\text{H}^+]_1(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_1(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_1^{\text{H}^+}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau, \quad (3.31)$$

$$[\text{OH}^-]_1(\tau_i) = [\text{OH}^-]_1(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_1(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_1^{\text{OH}^-}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau. \quad (3.32)$$

$$[\text{AgNO}_3]_1(\tau_i) = [\text{AgNO}_3]_1(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_1(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_1^{\text{AgNO}_3}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau \quad (3.33)$$

Плотность первой зоны рассчитывается из условия аддитивности действия компонент (3.34):

$$\begin{aligned} \gamma_1(\tau_i) = & \gamma_{\text{Ag}^+} [\text{Ag}^+]_1(\tau_i) + \gamma_{\text{NO}_3^-} [\text{NO}_3^-]_1(\tau_i) + \gamma_{\text{H}^+} [\text{H}^+]_1(\tau_i) + \\ & + \gamma_{\text{OH}^-} [\text{OH}^-]_1(\tau_i) + \gamma_{\text{AgNO}_3} [\text{AgNO}_3]_1(\tau_i) \end{aligned} \quad (3.34)$$

Итеративный расчёт веса первой зоны (3.35):

$$G_1(\tau_i) = \gamma_1(\tau_i) \cdot V_1. \quad (3.35)$$

Как следует из приведённых формул, вес зоны является величиной переменной, зависящей от текущих концентраций веществ с соответствующим пересчётом плотностей этой зоны.

Расчёт концентраций компонент во второй зоне (3.36)- (3.40):

$$[\text{Ag}^+]_2(\tau_i) = [\text{Ag}^+]_2(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_2(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_2^{\text{Ag}^+}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau, \quad (3.36)$$

$$[\text{NO}_3^-]_2(\tau_i) = [\text{NO}_3^-]_2(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_2(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_2^{\text{NO}_3^-}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau, \quad (3.37)$$

$$[\text{H}^+]_2(\tau_i) = [\text{H}^+]_2(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_2(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_2^{\text{H}^+}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau, \quad (3.38)$$

$$[\text{OH}^-]_2(\tau_i) = [\text{OH}^-]_2(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_2(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_2^{\text{OH}^-}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau. \quad (3.39)$$

$$[\text{AgNO}_3]_2(\tau_i) = [\text{AgNO}_3]_2(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_2(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_2^{\text{AgNO}_3}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau \quad (3.40)$$

Плотность и вес второй зоны вычисляются аналогично первой зоне (3.41) – (3.42):

$$\begin{aligned} \gamma_2(\tau_i) = & \gamma_{\text{Ag}^+}[\text{Ag}^+]_2(\tau_i) + \gamma_{\text{NO}_3^-}[\text{NO}_3^-]_2(\tau_i) + \gamma_{\text{H}^+}[\text{H}^+]_2(\tau_i) + \\ & + \gamma_{\text{OH}^-}[\text{OH}^-]_2(\tau_i) + \gamma_{\text{AgNO}_3}[\text{AgNO}_3]_2(\tau_i) \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$G_2(\tau_i) = \gamma_2(\tau_i) \cdot V_2. \quad (3.42)$$

Расчёт концентраций компонент в третьей зоне (3.43) – (3.51):

$$[\text{Ag}^+]_3(\tau_i) = [\text{Ag}^+]_3(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_3(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_3^{\text{Ag}^+}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau, \quad (3.43)$$

$$[\text{H}^+]_3(\tau_i) = [\text{H}^+]_3(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_3(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_3^{\text{H}^+}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau, \quad (3.44)$$

$$[\text{AgNO}_3]_3(\tau_i) = [\text{AgNO}_3]_3(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_3(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_3^{\text{AgNO}_3}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau, \quad (3.45)$$

$$[\text{RCOOH}]_3(\tau_i) = [\text{RCOOH}]_3(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_3(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_3^{\text{RCOOH}}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau, \quad (3.46)$$

$$[\text{RSH}]_3(\tau_i) = [\text{RSH}]_3(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_3(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_3^{\text{RSH}}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau, \quad (3.47)$$

$$[\text{R}]_3(\tau_i) = [\text{R}]_3(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_3(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_3^{\text{R}}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau, \quad (3.48)$$

$$[\text{RCOOAg}]_3(\tau_i) = [\text{RCOOAg}]_3(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_3(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_3^{\text{RCOOAg}}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau, \quad (3.49)$$

$$[\text{RSAg}]_3(\tau_i) = [\text{RSAg}]_3(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_3(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_3^{\text{RSAg}}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau, \quad (3.50)$$

$$[\text{RAgNO}_3]_3(\tau_i) = [\text{RAgNO}_3]_3(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_3(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_3^{\text{RAgNO}_3}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau. \quad (3.51)$$

Плотность и вес третьей зоны рассчитываются аналогично первой зоне (3.52) – (3.53):

$$\begin{aligned} \gamma_3(\tau_i) = & \gamma_{\text{Ag}^+}[\text{Ag}^+]_3(\tau_i) + \gamma_{\text{H}^+}[\text{H}^+]_3(\tau_i) + \gamma_{\text{AgNO}_3}[\text{AgNO}_3]_3(\tau_i) + \\ & + \gamma_{\text{RCOOH}}[\text{RCOOH}]_3(\tau_i) + \gamma_{\text{RSH}}[\text{RSH}]_3(\tau_i) + \gamma_{\text{R}}[\text{R}]_3(\tau_i) + \\ & + \gamma_{\text{RCOOAg}}[\text{RCOOAg}]_3(\tau_i) + \gamma_{\text{RSAg}}[\text{RSAg}]_3(\tau_i) + \gamma_{\text{RAgNO}_3}[\text{RAgNO}_3]_3(\tau_i) \end{aligned} \quad (3.52)$$

$$G_3(\tau_i) = \gamma_3(\tau_i) \cdot V_3. \quad (3.53)$$

Общее количество серебра, усвоенного сорбентом в колонне, рассчитывается по формуле (3.54):

$$G^{\text{Ag}}(\tau_i) = N \left(G_3^{\text{Ag}^+}(\tau_i) + G_3^{\text{AgNO}_3}(\tau_i) \right) \quad (3.54)$$

где N – количество гранул.

Запись уравнений модели, предназначенная для численных расчётов, линейная по форме, после подстановки нелинейностей (3.29) – (3.51) может быть преобразована к следующему интегро-дифференциальному виду (3.55):

$$\begin{aligned} \frac{dG_3^{\text{Ag}^+}}{dt} = & \beta_2 F_2 \gamma_2 \left([\text{Ag}^+]_2 - [\text{Ag}^+]_3 \right) - g_1^{\text{Ag}^+} - g_2^{\text{Ag}^+} - g_3^{\text{AgNO}_3} = \\ = & \beta_2 F_2 \left(\gamma_{\text{Ag}^+} [\text{Ag}^+]_2 + \gamma_{\text{NO}_3^-} [\text{NO}_3^-]_2 + \gamma_{\text{H}^+} [\text{H}^+]_2 + \gamma_{\text{OH}^-} [\text{OH}^-]_2 \right) \times \\ \times & \left([\text{Ag}^+]_2 - [\text{Ag}^+]_3 \right) - k_1 g_{\text{np}}^{\text{Ag}^+} e^{-\frac{E_1}{RT}} - k_2 g_{\text{np}}^{\text{Ag}^+} e^{-\frac{E_2}{RT}} - k_3 g_{\text{np}}^{\text{AgNO}_3} e^{-\frac{E_3}{RT}} = \\ = & \beta_2 F_2 \left(\begin{aligned} & \gamma_{\text{Ag}^+} \left([\text{Ag}^+]_2 + \frac{1}{\gamma_2 V_2} \int \frac{dG_2^{\text{Ag}^+}}{dt} d\tau \right) + \\ & + \gamma_{\text{NO}_3^-} \left([\text{NO}_3^-]_2 + \frac{1}{\gamma_2 V_2} \int \frac{dG_2^{\text{NO}_3^-}}{dt} d\tau \right) + \\ & + \gamma_{\text{H}^+} \left([\text{H}^+]_2 + \frac{1}{\gamma_2 V_2} \int \frac{dG_2^{\text{H}^+}}{dt} d\tau \right) + \\ & + \gamma_{\text{OH}^-} \left([\text{OH}^-]_2 + \frac{1}{\gamma_2 V_2} \int \frac{dG_2^{\text{OH}^-}}{dt} d\tau \right) \end{aligned} \right) \times \\ \times & \left([\text{Ag}^+]_2 + \frac{1}{\gamma_2 V_2} \int \frac{dG_2^{\text{Ag}^+}}{dt} d\tau - [\text{Ag}^+]_3 - \frac{1}{\gamma_3 V_3} \int \frac{dG_3^{\text{Ag}^+}}{dt} d\tau \right) - \\ & - k_1 g_{\text{np}}^{\text{Ag}^+} e^{-\frac{E_1}{RT}} - k_2 g_{\text{np}}^{\text{Ag}^+} e^{-\frac{E_2}{RT}} - k_3 g_{\text{np}}^{\text{AgNO}_3} e^{-\frac{E_3}{RT}} \end{aligned} \quad (3.55)$$

В связи с тем, что биосорбент представлен гранулами с распределённой пористой поверхностью, пересчёт количества гранул рабочей поверхности и объёмов пористых гранул рассчитывается исходя из статистических характеристик классов крупности гранул биосорбента, поступающих в процесс, в основе которого лежит биномиальный закон распределения.

Расчёт количества гранул в колонне осуществляется согласно физическим и геометрическим законам.

Объём гранулы (3.56):

$$V_{\text{гр}} = \frac{4}{3} \pi R_{\text{гр}}^3, \quad (3.56)$$

где $R_{\text{гр}}$ – радиус гранулы, мм.

Количество гранул (3.57):

$$N = \frac{V_{\text{к}}}{V_{\text{гр}}} \cdot k_{\text{зап}}, \quad (3.57)$$

где $V_{\text{к}}$ – рабочий объём колонны; $k_{\text{зап}}$ – коэффициент заполнения объёма колонны сорбентом.

Площадь и объём второй зоны (3.58) – (3.59):

$$F_2 = 4\pi(R_{\text{гр}} + \delta)^2, \quad (3.58)$$

где δ – толщина слоя раствора, окружающего гранулы (вторая зона), мм.

$$V_2 = \frac{4}{3} \pi (R_{\text{гр}} + \delta)^3 - V_{\text{гр}}, \quad (3.59)$$

где V_2 – объём δ -слоя (второй зоны).

Расчёт площади поверхности каждой гранулы, как пористого тела, основывается на том, что, принимая допущение о цилиндрической форме пор, рассчитываются среднестатистические характеристики гранул. Распределение радиусов пор подчиняется биномиальному закону (3.60):

$$P(R = k) = \frac{C_{R-1}^{k-1}}{2^{R-1}}, \quad (3.60)$$

где $k = 1, 2, \dots$; R – радиусы пор.

Тогда средняя площадь поры равна (3.61):

$$\overline{F}_R = \pi \sum_{k=1}^R \left(\frac{C_{R-1}^{k-1}}{2^{R-1}} \cdot k^2 \right) = \frac{\pi}{2^{R-1}} \sum_{k=1}^R (C_{R-1}^{k-1} \cdot k^2) = \frac{\pi}{2^{R-1}} \sum_{k=1}^R \left(\frac{(R-1)!}{(k-1)!(R-k)!} \cdot k^2 \right) \quad (3.61)$$

Считая поверхность гранулы сферической, рассчитывается среднее количество пор в грануле (3.62):

$$\overline{M} = \frac{F_{\text{гр}}}{F_R} = \frac{4\pi R_{\text{гр}}^2}{F_R} \quad (3.62)$$

Глубина пор, согласно статистической проверке гипотез, также распределена по биномиальному закону (3.63).

$$P(H=1) = \frac{C_{H-1}^{l-1}}{2^{H-1}}, \quad (3.63)$$

где $l = 1, 2, \dots; H$ – глубина пор.

Тогда средняя глубина пор равна (3.64):

$$\overline{H} = \sum_{l=1}^H \frac{C_{H-1}^{l-1}}{2^{H-1}} = \frac{1}{2^{H-1}} \sum_{l=1}^H \frac{(H-1)!}{(l-1)!(H-l)!} \quad (3.64)$$

Средняя поверхность пор равна (3.65):

$$\begin{aligned} \overline{F}_\Pi &= 2\pi \cdot \overline{R}_\Pi \cdot \overline{H} + \overline{F}_R = \frac{2\pi}{2^{R-1}} \sum_{k=1}^R \frac{(R-1)!}{(k-1)!(R-k)!} \cdot \frac{1}{2^{H-1}} \sum_{l=1}^H \frac{(H-1)!}{(l-1)!(H-l)!} + \\ &+ \frac{\pi}{2^{R-1}} \sum_{k=1}^R \left(\frac{(R-1)!}{(k-1)!(R-k)!} \cdot k^2 \right) = \\ &= \frac{2\pi}{2^{(R+H-2)}} \left(\sum_{k=1}^R \frac{(R-1)!}{(k-1)!(R-k)!} \cdot \sum_{l=1}^H \frac{(H-1)!}{(l-1)!(H-l)!} \right) + \\ &+ \frac{\pi}{2^{R-1}} \sum_{k=1}^R \left(\frac{(R-1)!}{(k-1)!(R-k)!} \cdot k^2 \right) \quad (3.65) \end{aligned}$$

Исходя из вышеизложенного, поверхность пор каждой гранулы биосорбента равна (3.66):

$$\overline{F}_{\text{гр}} = F_3 = \overline{F}_\Pi \cdot \overline{M} \quad (3.66)$$

Объем пор каждой гранулы (3.67):

$$\overline{V}_{\text{гр}} = V_3 = \overline{F}_{\text{П}} \cdot \overline{H} \cdot M \quad (3.67)$$

Исходя из принятых допущений, при заданной геометрии колонны, методом пролива определяется объем, занимаемый гранулами в колонне. Согласно условию сферичности и геометрических размеров гранул, вычисляется объем и поверхность каждой гранулы. Далее из объёма сорбента, полученного путём пролива, рассчитывается количество гранул в колонне (3.68):

$$V_c = V_k - V_v, \quad (3.68)$$

где V_c – объем сорбента; V_k – объем колонны, который вычисляется по формуле (3.69):

$$V_k = 2\pi R_k^2 \cdot H_v, \quad (3.69)$$

где R_k – радиус колонны (внутренний); H_v – высота уровня воды в колонне; V_v – объем воды, заполняющей колонну до уровня H_v .

Тогда количество гранул в колонне (3.70):

$$N = \frac{V_c}{V_{\text{гр}}}, \quad (3.70)$$

где $V_{\text{гр}}$ – объем сферической гранулы сорбента (3.71).

$$V_{\text{гр}} = \frac{4}{3}\pi R_{\text{гр}}^3 \quad (3.71)$$

Модель процесса, представленная системой дифференциальных уравнений (3.5) – (3.23) и блоком расчёта нелинейностей (3.29) – (3.51), имеет вид параметрической модели-структуры, для которой предполагается идентификация параметров модели «в малом» по экспериментальным данным. Численное решение системы дифференциальных уравнений, представляющих модель, позволяет прогнозировать концентрации веществ как изменения состояний в каждой колонне[334]. В последовательной технологической схеме соединения колонн предлагается использовать аналогичные модели. Модели отличаются заданием начальных условий, при которых выход предыдущей колонны и

концентрации веществ в растворе являются начальными условиями для последующей колонны.

Таким образом, математическая модель-структура последовательно соединённых агрегатов представлена сложной системой дифференциальных уравнений(3.72):

$$\frac{dy}{dt}(j) = f_j(\bar{x}_j, \bar{y}_j, \bar{\beta}_j, t), \quad (3.72)$$

где j – номер колонны; \bar{x}_j – вектор состояний колонны; \bar{y}_j – вектор выходных переменных колонны; $\bar{\beta}_j$ – вектор параметров колонны.

Окончание процесса сорбции итеративно определяется неравенствами (3.73):

$$\begin{cases} G_3^{\text{RCOOH}}(m) - G_3^{\text{RCOOH}}(m-1) < \varepsilon_1, \\ G_3^{\text{RSH}}(m) - G_3^{\text{RSH}}(m-1) < \varepsilon_2, \\ G_3^{\text{R}}(m) - G_3^{\text{R}}(m-1) < \varepsilon_3. \end{cases} \quad (3.73)$$

Здесь $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – заданные вариации переменных, m – шаг итерации.

3.1.5 Математическая модель регенерации технологических свойств сорбента

Из анализа физико-химических и технологических особенностей процесса сорбции известно, что плесневая культура, являющаяся биосорбентом, характеризуется рециклами сорбция-восстановление. В процессе циркуляции раствора плесневая культура усваивает из растворов только серебро до насыщения сорбционной ёмкости материала. После насыщения циркуляция через колонну прекращается и колонна переводится в режим восстановления сорбционной ёмкости (вторая стадия процесса), в течение которого происходит рост активных центров A_t , способных вновь поглощать серебро из растворов. В зависимости от типа плесневой культуры в работе колонны могут реализовываться 6-8 рециклов, содержащих обе стадии.

Физико-химические особенности процесса заключаются в том, что процесс сорбции серебра из вторичных растворов характеризуется гибелью активных центров взрослых особей плесневой культуры. Из исследований [36, 81] известно, что образующиеся в результате процесса сорбции органические соединения серебра (R-COOH, R-SH, R) в течение 8-10 часов после прекращения подачи вторичных растворов в сорбционную колонну, превращаются в металлизированное серебро Ag^0 . При этом осуществляется рост активных центров плесневой культуры и сорбционная ёмкость восстанавливается до 95% первоначальной. В последующих рециклах сорбция-восстановление сорбционная ёмкость с каждым шагом рецикла уменьшается на 10-15%.

Гипотеза о механизме процесса.

Частицы сорбента можно условно разделить на «активные» и «пассивные». «Активные» служат для борьбы с внешней средой и, в данном случае, поглощения серебра. Назначение «пассивных» – дать потомство в виде новых клеток. До тех пор, пока клетки следующего поколения находятся в стадии созревания (цикл восстановления), «пассивные» частицы находятся в закрытом, устойчивом состоянии. Однако, до тех пор, пока «пассивные» клетки находятся в агрессивной окружающей среде, они не дают потомства, не раскрываются. Цикл восстановления, таким образом, можно сопоставить с циклом созревания клеток плесени следующего поколения. За это время «активные» клетки предыдущего поколения либо поглощают серебро, либо устаревают и погибают.

Когда количество активных клеток снижается, снижается, соответственно, и сорбционная способность сорбента. При достижении экономически целесообразной границы сорбционной способности, дальнейшее продолжение процесса становится неэффективным. В этом случае процесс сорбции прерывается, циркуляция раствора прекращается и колонна останавливается на технологическую паузу для реализации процесса восстановления плесневой культуры. За это время активные центры плесени, усвоившие серебро, погибают. При этом серебро сохраняется в структуре сорбента в металлизированном виде.

Во время технологической паузы пассивные частицы раскрываются и дают жизнь новому поколению клеток сорбента, как активных, так и пассивных. Популяция плесневой культуры восстанавливается и колонна переводится в процесс сорбции серебра из серебрясодержащих растворов.

Известно, что при технологической паузе серебро из органической фракции (реакции (3.1) – (3.3)) в процессе отмирания плесневой культуры восстанавливается до металлического состояния, и в последующих циклах в реакциях сорбции не участвует, а накапливается в гранулах сорбента, то есть «биологически помечено» плесневой культурой. Рассмотренные соображения позволяют говорить о том, что в течение процесса сорбции происходит гибель взрослых клеток плесневых культур, сопровождающаяся усвоением серебра, которая может рассматриваться как «затухание популяции» активных центров плесени.

Процесс восстановления сорбционной ёмкости в течение периода технологической паузы процесса сорбции может рассматриваться как рост популяции активных центров плесневой культуры, формирующихся за счёт семенного спорного материала плесени. При этом каждая новая популяция меньше популяции предыдущего цикла на величину помеченных молекул восстановленного серебра.

Из исследований [36, 81] известно, что активные центры содержат комплексы R-COOH, R-SH, R. Каждая новая популяция содержит два вида плесневой культуры: активные центры (A_t), способные усваивать серебро и центры размножения (P_t), предназначенные для выращивания спор следующих популяций.

В данной гипотезе приняты следующие допущения:

- активные центры A_t и центры размножения P_t плесневой культуры равномерно распределены по поверхности и в порах сорбента;
- площадь поверхности гранул сорбента подчиняется законам (см. формулы 3.51-3.56);
- физическим износом гранул сорбента пренебрегаем;

- уменьшение количества активных центров от цикла к циклу для каждого типа плесневой культуры;
- серебро, накапливаемое в гранулах сорбента в каждом цикле, не влияет на рост активных центров;
- рост и затухание популяций активных центров подчиняется известным биологическим законам;
- долевое соотношение активных центров в плесневой культуре постоянно и эквивалентно весовой концентрации.

Для разработки математической модели восстановления сорбционной способности плесневой культуры [335] использована методология прогноза роста популяции по Мальтусу [112], рассматривается как аналог уравнений Лотки – Вольтерра.

Уравнение, характеризующее рост плесневой культуры (популяции) (3.74):

$$\frac{dN_t}{dt} = r_n N_t (1 - k_5 [Ag]_k), \quad (3.74)$$

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, которое характеризует количество помеченных на этом цикле составляющих плесневой культуры. Эта составляющая определяет затухание роста плесневой культуры как популяции и, соответственно, сокращение динамической обменной ёмкости сорбента, то есть способности плесневой культуры усваивать серебро.

В связи с тем, что, согласно гипотезе о механизме процесса, плесневая культура содержит два вида культуры: центры размножения и активные центры, два следующих уравнения описывают динамику роста этих центров.

Уравнение роста активных центров (3.75):

$$\frac{dA_t}{dt} = r_n N_t \left(1 - \frac{P_t}{N_t} \right), \quad (3.75)$$

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

Уравнение роста центров размножения (3.76) - (3.77):

$$\frac{dP_t}{dt} = r_n N_t \left(1 - \frac{A_t}{N_t} \right), \quad (3.76)$$

$$r_n = k_4 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (3.77)$$

Количество видов плесневой культуры подчинены условию (3.78):

$$A_t + P_t = N_t. \quad (3.78)$$

Поскольку группа активной плесени содержит центры, расходуемые на процесс усвоения серебра, следующие уравнения модели описывают динамику роста этих центров.

Уравнение роста центров R-COOH (3.79):

$$\frac{dG^{\text{RCOOH}}}{dt} = A_t(t) - G^{\text{RSH}}(t) - G^{\text{R}}(t). \quad (3.79)$$

Уравнение роста центров R-SH (3.80):

$$\frac{dG^{\text{RSH}}}{dt} = A_t(t) - G^{\text{RCOOH}}(t) - G^{\text{R}}(t). \quad (3.80)$$

Уравнение роста центров R (3.81):

$$\frac{dG^{\text{R}}}{dt} = A_t(t) - G^{\text{RCOOH}}(t) - G^{\text{RSH}}(t). \quad (3.81)$$

Долевые соотношения (концентрация) центров (3.82) – (3.84):

$$[\text{RCOOH}](\tau_i) = [\text{RCOOH}](\tau_{i-1}) + \frac{1}{A_t(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG^{\text{RCOOH}}}{dt} d\tau, \quad (3.82)$$

$$[\text{RSH}](\tau_i) = [\text{RSH}](\tau_{i-1}) + \frac{1}{A_t(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG^{\text{RSH}}}{dt} d\tau, \quad (3.83)$$

$$[\text{R}](\tau_i) = [\text{R}](\tau_{i-1}) + \frac{1}{A_t(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG^{\text{R}}}{dt} d\tau. \quad (3.84)$$

Количество центров плесневой культуры подчинено условию (3.85):

$$G^{\text{RCOOH}} + G^{\text{RSH}} + G^{\text{R}} = A_t. \quad (3.85)$$

Решение системы дифференциальных уравнений осуществляется при следующих начальных условиях задачи Коши (3.86):

$$[\text{RCOOH}](0) = 0, [\text{RSH}](0) = 0, [\text{R}](0) = 0. \quad (3.86)$$

Конечные условия задачи Коши (3.87):

$$[\text{RCOOH}](T_2) = \text{const}, [\text{RSH}](T_2) = \text{const}, [\text{R}](T_2) = \text{const}, \quad (3.87)$$

где T_2 – верхний предел интегрирования.

Окончание процесса определяется, исходя из условий (3.88):

$$\begin{cases} G_3^{\text{RCOOH}}(m) - G_3^{\text{RCOOH}}(m-1) < \varepsilon_4, \\ G_3^{\text{RSH}}(m) - G_3^{\text{RSH}}(m-1) < \varepsilon_5, \\ G_3^{\text{R}}(m) - G_3^{\text{R}}(m-1) < \varepsilon_6. \end{cases} \quad (3.88)$$

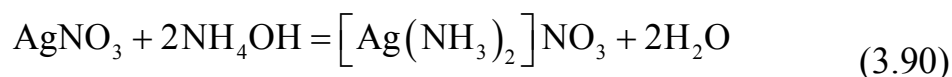
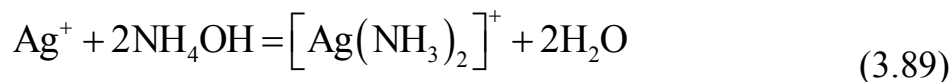
Здесь $\varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$ – заданные вариации переменных, m – шаг итерации.

Уравнения (3.74) – (3.81) являются составной частью модели процесса и представляют собой математическую модель, характеризующую динамику изменения количества активных центров плесневой культуры в процессе протекания серебросодержащего раствора через колонну («затухание популяции» плесневой культуры). Модель регенерации технологических свойств сорбента представлена системой, состоящей из шести обыкновенных дифференциальных уравнений. Нелинейности уравнений системы вынесены в отдельный блок, уравнения (3.82) – (3.84).

3.1.6 Математическая модель процесса десорбции

Гранулы биосорбента, использованные в 6-8 циклах сорбция-регенерация сорбционных свойств, накапливают определённое количество серебра, определяемое видом плесневой культуры. После этого подача серебросодержащих растворов через колонну прекращается и через эту колонну протекает десорбирующий раствор. В качестве такого раствора используется гидроксид аммония NH_4OH .

Для прогноза кинетики процесса перехода серебра в десорбирующий раствор необходимо разработать динамическую детерминированную модель процесса [336]. При десорбции, согласно физико-химическим исследованиям [36] протекают следующие реакции (3.89) – (3.90):



Аналогично принципам разработки математической модели процесса сорбции при синтезе модели десорбции были приняты следующие допущения:

- геометрические размеры сферических гранул одинаковы;
- кинетика десорбции одинакова для каждой гранулы;
- в процессе десорбции участвует вся поверхность гранулы;
- площадью контакта гранул между собой можно пренебречь;
- температура раствора не меняется в течении цикла десорбции;
- уровень раствора в колонне постоянен и раствор заполняет рабочий объем сорбента полностью;
- влиянием сульфатов и хлоридов пренебрегаем;
- реакции (3.86) – (3.87) стехиометричны;
- объем гранул сорбента постоянен;
- вес гранул сорбента зависит от количества десорбированного серебра и компонент реакции.

Технологические особенности проведения процесса десорбции предполагают наличие следующих ограничений:

- концентрация NH_4OH в растворе $\geq 5\%$;
- активность ионов водорода находится в границах $1 < \text{pH} < 9$;

Согласно общепринятой методологии моделирования, при разработке динамической модели рассматриваются явления, происходящие на отдельной грануле биосорбента с обобщением на весь объем сорбента в одном технологическом агрегате (колонне).

Физико-химические особенности процесса десорбции описаны в работах [36, 81]. Как следует из этих работ, процесс десорбции, осуществляемый в каждой грануле при протекании раствора, гипотетически может быть декомпозирован на три зоны (Рисунок 3.2).

Первая зона представляет собой десорбирующий раствор, содержащий NH_4OH , а также ионы воды. В качестве второй зоны выделен δ -слой, характеризующий механизм обмена между сорбентом и раствором. Третья зона представляет собой гранулу биосорбента, содержащую, на момент проведения процесса десорбции, серебро в неорганической форме.

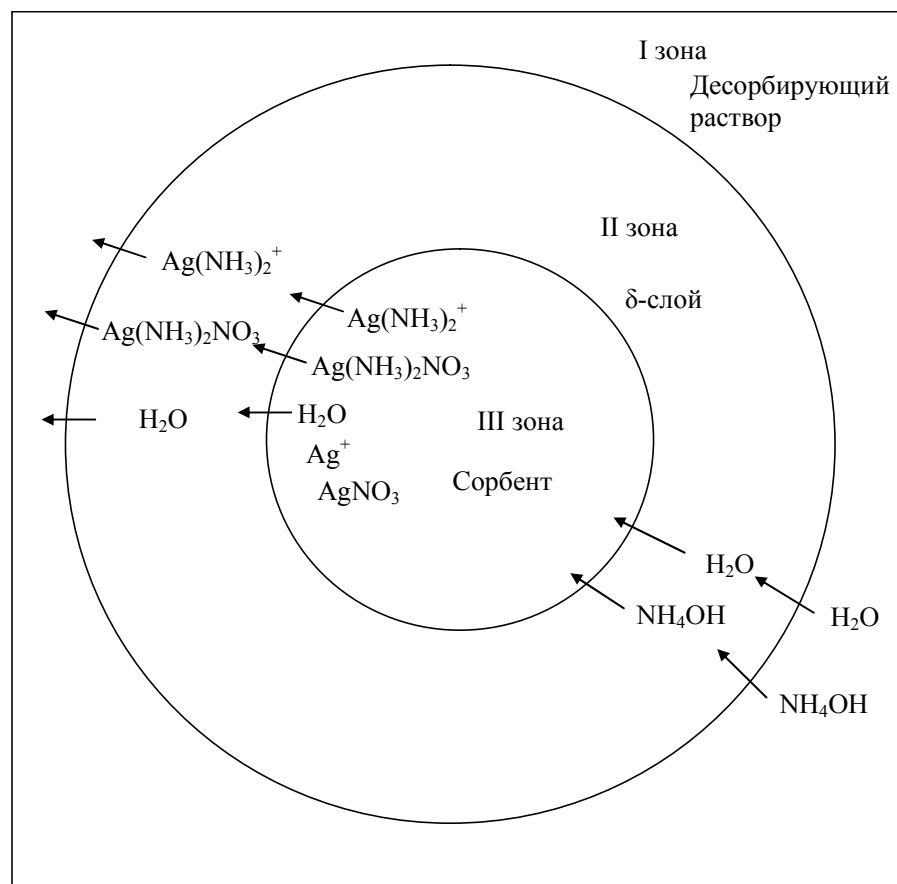


Рисунок 3.2–Принцип декомпозиции рабочего объёма на зоны при протекании процесса десорбции

Согласно принятым допущениям и принципу декомпозиции, устанавливается следующий механизм взаимодействия зон.

1. Первая зона получает десорбирующий раствор, содержащий NH_4OH и молекулы H_2O . Эта зона отдаёт во вторую зону перечисленные компоненты. Получает из второй зоны продукты реакций (3.86-3.87) $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2$, $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{NO}_3$ и H_2O .

2. Вторая зона получает из первой зоны NH_4OH и H_2O и из третьей зоны получает продукты десорбции $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2$, $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{NO}_3$, H_2O . Вторая зона отдаёт в третью зону NH_4OH и H_2O .

3. Третья зона получает из второй зоны NH_4OH и H_2O , происходят реакции (3.86) – (3.87). Третья зона отдаёт во вторую зону продукты реакций десорбции $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2$, $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{NO}_3$ и H_2O .

Вышеперечисленные особенности гипотезы о механизме процесса положены в основу разработки дифференциальных уравнений, составляющих динамическую модель процесса десорбции, состоящую из подмоделей декомпозированных зон [337, 338].

Подмодель первой зоны.

Изменение количества десорбирующего раствора (3.91):

$$\frac{dG_1^{\text{NH}_4\text{OH}}}{dt} = g_{\text{pr}}^{\text{NH}_4\text{OH}} - \beta_1 F_1 \gamma_1 ([\text{NH}_4\text{OH}]_1 - [\text{NH}_4\text{OH}]_2), \quad (3.91)$$

где $\frac{dG_1^{\text{NH}_4\text{OH}}}{dt}$ – скорость изменения количества NH_4OH в 1 зоне, г/с; $g_{\text{pr}}^{\text{NH}_4\text{OH}}$ – расход NH_4OH в растворе, г/с; β_1 – коэффициент массопереноса между 1 и 2 зонами, м/с, параметр; F_1 – площадь поверхности контакта зон, м^2 ; γ_1 – плотность 1 зоны, $\text{г}/\text{м}^3$; $[\text{NH}_4\text{OH}]_1$, $[\text{NH}_4\text{OH}]_2$ – весовые концентрации NH_4OH в 1 и 2 зонах соответственно.

Скорость изменения количества продуктов реакции (3.92):

$$\frac{dG_1^{[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+}}{dt} = \beta_1 F_1 \gamma_2 ([\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]_1 - [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]_2). \quad (3.92)$$

Скорость изменения количества десорбированного компонента реакции (3.93):

$$\frac{dG_1^{[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]\text{NO}_3}}{dt} = \beta_1 F_1 \gamma_2 ([[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]\text{NO}_3]_2 - [[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]\text{NO}_3]_1). \quad (3.93)$$

Скорость изменения количества воды (3.94):

$$\frac{dG_1^{\text{H}_2\text{O}}}{dt} = g_{\text{pr}}^{\text{H}_2\text{O}} - \beta_1 F_1 \gamma_1 ([\text{H}_2\text{O}]_1 - [\text{H}_2\text{O}]_2) + \beta_1 F_1 \gamma_2 ([\text{H}_2\text{O}]_2 - [\text{H}_2\text{O}]_1). \quad (3.94)$$

Обозначения переменных в уравнениях (3.92) – (3.94) аналогичны обозначениям переменных уравнения (3.91).

Подмодель второй зоны (δ -слой).

Скорость изменения количества реагентов в единицу времени (3.95):

$$\frac{dG_2^{\text{NH}_4\text{OH}}}{dt} = \beta_1 F_1 \gamma_1 ([\text{NH}_4\text{OH}]_1 - [\text{NH}_4\text{OH}]_2) - \beta_2 F_2 \gamma_2 ([\text{NH}_4\text{OH}]_2 - [\text{NH}_4\text{OH}]_3) \quad (3.95)$$

Расчёт скорости изменения количества вещества, десорбированного в реакции (3.96):

$$\begin{aligned} \frac{dG_2^{[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]}}{dt} = & \beta_2 F_2 \gamma_3 \left[[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]_3 - [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]_2 \right]_1 - \\ & - \beta_1 F_1 \gamma_2 \left[[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]_2 - [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]_1 \right] \end{aligned} \quad (3.96)$$

Расчёт изменения количества вещества, десорбированного в реакции (3.97):

$$\begin{aligned} \frac{dG_2^{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{NO}_3}}{dt} = & \beta_2 F_2 \gamma_3 \left([\text{Ag}(\text{NH}_3)_2 \text{NO}_3]_3 - [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2 \text{NO}_3]_2 \right) - \\ & - \beta_1 F_1 \gamma_2 \left([\text{Ag}(\text{NH}_3)_2 \text{NO}_3]_2 - [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2 \text{NO}_3]_1 \right) \end{aligned} \quad (3.97)$$

Изменение количества воды в единицу времени (3.99):

$$\begin{aligned} \frac{dG_2^{\text{H}_2\text{O}}}{dt} = & \beta_2 F_2 \gamma_3 ([\text{H}_2\text{O}]_3 - [\text{H}_2\text{O}]_2) - \beta_1 F_1 \gamma_2 ([\text{H}_2\text{O}]_2 - [\text{H}_2\text{O}]_1) + \\ & + \beta_1 F_1 \gamma_1 ([\text{H}_2\text{O}]_2 - [\text{H}_2\text{O}]_1) \end{aligned} \quad (3.99)$$

Подмодель третьей зоны

Расчёт скорости изменения количества десорбирующего раствора (3.100), участвующего в реакциях (3.89) и (3.90):

$$\frac{dG_3^{\text{NH}_4\text{OH}}}{dt} = \beta_2 F_2 \gamma_2 ([\text{NH}_4\text{OH}]_2 - [\text{NH}_4\text{OH}]_3) - \chi_{\text{NH}_4\text{OH}}^{\text{Ag}} \cdot g_4^* - \chi_{\text{NH}_4\text{OH}}^{\text{AgNO}_3} \cdot g_5^* \quad (3.100)$$

Скорость изменения количества десорбированных ионов серебра (3.101) по реакции (3.89):

$$\frac{dG_3^{\text{Ag}^+}}{dt} = -g_4^* \quad (3.101)$$

Скорость изменения количества азотнокислого серебра десорбированного (3.102) по реакции (3.90):

$$\frac{dG_3^{\text{AgNO}_3}}{dt} = -g_5^* \quad (3.102)$$

Скорость изменения количества продуктов (3.103) реакции (3.89):

$$\frac{dG_3^{\text{[Ag(NH}_3)_2]}}{dt} = -\beta_2 F_2 \gamma_3 \left(\left[\text{[Ag(NH}_3)_2]_3 \right] - \left[\text{[Ag(NH}_3)_2]_2 \right] \right) + \chi_{\text{[Ag(NH}_3)_2]}^{\text{Ag}} \cdot g_4^* \quad (3.103)$$

Скорость изменения количества продуктов (3.104) реакции (3.90):

$$\begin{aligned} \frac{dG_3^{\text{Ag(NH}_3)_2 \text{NO}_3}}{dt} = \\ = -\beta_2 F_2 \gamma_3 \left(\left[\text{Ag(NH}_3)_2 \text{NO}_3 \right]_3 - \left[\text{Ag(NH}_3)_2 \text{NO}_3 \right]_2 \right) + \chi_{\text{Ag(NH}_3)_2 \text{NO}_3}^{\text{AgNO}_3} \cdot g_5^* \end{aligned} \quad (3.104)$$

Скорость изменения количества воды (3.105):

$$\begin{aligned} \frac{dG_3^{\text{H}_2\text{O}}}{dt} = -\beta_2 F_2 \gamma_3 \left(\left[\text{H}_2\text{O} \right]_3 - \left[\text{H}_2\text{O} \right]_2 \right) + \chi_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{Ag}} \cdot g_4^* + \\ + \chi_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{AgNO}_3} \cdot g_5^* + \beta_2 F_2 \gamma_2 \left(\left[\text{H}_2\text{O} \right]_2 - \left[\text{H}_2\text{O} \right]_3 \right) \end{aligned} \quad (3.105)$$

Скоростные характеристики процесса десорбции (3.106) – (3.107):

$$g_4^{\text{Ag}^*} = k_4 g_{\text{sorb}}^{\text{Ag}} e^{-\frac{E_4}{RT}}, \quad (3.106)$$

$$g_5^{\text{AgNO}_3^*} = k_5 g_{\text{sorb}}^{\text{Ag}} e^{-\frac{E_5}{RT}}. \quad (3.107)$$

Расчёт количества серебра, десорбируемого в реакциях (3.108):

$$g_{\text{sorb}}^{\text{Ag}} = g_{\text{rastv}} \left[\text{Ag}^+ \right]_{\text{rastv}} + g_{\text{rastv}} \left[\text{AgNO}_3 \right]_{\text{rastv}}. \quad (3.108)$$

В связи с тем, что численное решение системы дифференциальных уравнений осуществляется методом Рунге-Кутты четвёртого порядка, расчёт текущих концентраций и плотностей производится согласно итеративным процедурам.

Концентрация десорбированного продукта реакции (3.89) в первой зоне (3.109):

$$\left[\text{Ag(NH}_3)_2 \right]_1 (\tau_i) =$$

$$= [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]_1(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_1(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_1^{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau \quad (3.109)$$

Концентрация десобированного продукта (3.110) по реакции (3.90):

$$\begin{aligned} & [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2 \text{NO}_3]_1(\tau_i) = \\ & = [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2 \text{NO}_3]_1(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_1(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_1^{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2 \text{NO}_3}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau \end{aligned} \quad (3.110)$$

Концентрация воды (3.111), как продукта реакций (3.89) и (3.90):

$$[\text{H}_2\text{O}]_1(\tau_i) = [\text{H}_2\text{O}]_1(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_1(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_1^{\text{H}_2\text{O}}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau \quad (3.111)$$

Аддитивный расчёт плотности первой зоны (3.112):

$$\begin{aligned} \gamma_1(\tau_i) = & \gamma_{\text{NH}_4\text{OH}} [\text{NH}_4\text{OH}]_1(\tau_i) + \gamma_{[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]} [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]_1(\tau_i) + \\ & + \gamma_{[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]\text{NO}_3} [[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2] \text{NO}_3]_1(\tau_i) + \gamma_{\text{H}_2\text{O}} [\text{H}_2\text{O}]_1(\tau_i) \end{aligned} \quad (3.112)$$

Расчёт веса первой зоны (3.113) – (3.114):

$$G_1(\tau_i) = \gamma_1(\tau_i) \cdot V_1 \quad (3.113)$$

$$[\text{NH}_4\text{OH}]_2(\tau_i) = [\text{NH}_4\text{OH}]_2(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_2(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_2^{\text{NH}_4\text{OH}}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau \quad (3.114)$$

Расчёт концентрации десорбированного вещества по реакции (3.89) во второй зоне (3.115):

$$\begin{aligned} & [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]_2(\tau_i) = \\ & = [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]_2(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_2(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_2^{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau \end{aligned} \quad (3.115)$$

Расчёт концентрации десорбированного вещества по реакции (3.90) во второй зоне (3.116):

$$\begin{aligned} & [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2 \text{NO}_3]_2(\tau_i) = \\ & = [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2 \text{NO}_3]_2(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_2(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_2^{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2 \text{NO}_3}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau \end{aligned} \quad (3.116)$$

Расчёт концентрации воды во второй зоне (3.117):

$$[\text{H}_2\text{O}]_2(\tau_i) = [\text{H}_2\text{O}]_2(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_2(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_2^{\text{H}_2\text{O}}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau \quad (3.117)$$

Аддитивный расчёт плотности второй зоны (3.118):

$$\begin{aligned} \gamma_2(\tau_i) = & \gamma_{\text{NH}_4\text{OH}} [\text{NH}_4\text{OH}]_2(\tau_i) + \gamma_{[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+} [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]_2^+(\tau_i) + \\ & + \gamma_{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{NO}_3} [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{NO}_3]_2(\tau_i) + \gamma_{\text{H}_2\text{O}} [\text{H}_2\text{O}]_2(\tau_i) \end{aligned} \quad (3.118)$$

Расчёт веса второй зоны (3.119):

$$G_2(\tau_i) = \gamma_2(\tau_i) \cdot V_2 \quad (3.119)$$

Расчёт концентрации десорбента в третьей зоне (3.120):

$$[\text{NH}_4\text{OH}]_3(\tau_i) = [\text{NH}_4\text{OH}]_3(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_3(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_3^{\text{NH}_4\text{OH}}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau \quad (3.120)$$

Расчёт концентрации десорбированного вещества по реакциям (3.89) и (3.90) в третьей зоне соответственно (3.121) и (3.122):

$$\begin{aligned} & [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]_3(\tau_i) = \\ & = [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]_3(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_3(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_3^{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau \end{aligned} \quad (3.121)$$

$$\begin{aligned} & [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{NO}_3]_3(\tau_i) = \\ & = [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{NO}_3]_3(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_3(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_3^{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{NO}_3}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau \end{aligned} \quad (3.122)$$

Расчёт концентрации воды в третьей зоне (3.123):

$$[\text{H}_2\text{O}]_3(\tau_i) = [\text{H}_2\text{O}]_3(\tau_{i-1}) + \frac{1}{G_3(\tau_i)} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{dG_3^{\text{H}_2\text{O}}(\tau_{i-1})}{dt} d\tau \quad (3.123)$$

Аддитивный расчёт плотности третьей зоны (3.124):

$$\begin{aligned} \gamma_3(\tau_i) = & \gamma_{\text{NH}_4\text{OH}} [\text{NH}_4\text{OH}]_3(\tau_i) + \gamma_{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2} [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]_3(\tau_i) + \\ & + \gamma_{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{NO}_3} [\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{NO}_3]_3(\tau_i) + \gamma_{\text{H}_2\text{O}} [\text{H}_2\text{O}]_3(\tau_i) \end{aligned} \quad (3.124)$$

Расчёт веса третьей зоны (3.125):

$$G_3(\tau_i) = \gamma_3(\tau_i) \cdot V_3 \quad (3.125)$$

T_3 – время десорбции (верхний предел интегрирования уравнений), определяется в соответствии с условиями (3.126):

$$\begin{cases} G_3^{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2}(m) - G_3^{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2}(m-1) < \varepsilon_7, \\ G_3^{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{NO}_3}(m) - G_3^{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{NO}_3}(m-1) < \varepsilon_8. \end{cases} \quad (3.126)$$

Здесь m – номер шага итерации; ε – точность прогноза процесса десорбции.

Общее количество десорбированного серебра (3.127):

$$G^{\text{Ag}} = G^{\text{AgNH}_3} + G^{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{NO}_3} \quad (3.127)$$

Модель процесса, представленная системой дифференциальных уравнений (3.91) – (3.105) и блоком расчёта нелинейностей (3.109) – (3.125), имеет вид параметрической модели-структуры. Идентификация параметров модели осуществляется по экспериментальным данным.

Модель процесса десорбции представлена системой, состоящей из четырнадцати обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. Расчёт нелинейностей, ориентированный на численное решение методом Рунге-Кутты, вынесен в отдельный блок.

3.2 Математическая модель среднего уровня

Для среднего уровня необходимо определить логико-формальные правила переключения режимов работы колонн и разработать математические модели, учитывающие извлечение серебра всеми колоннами участка [339, 340, 341].

Исходя из задач, решаемых на участке биосорбции, произведена классификация переменных, характеризующих второй уровень управления. В классификации (Таблица 3.4) учтены переменные, характеризующие технологические циклы (биосорбция – восстановление) функционирования колонн и заключительной стадии – процесса десорбции.

Таблица 3.4– Классификация переменных второго уровня

Наименование переменной	Обозначение	Примечание
Входные переменные		
Колонны предыдущего цикла	$A_{ij}(k-1)$	Согласно матрице смежности (табл.3.5)
Номер уровня	i	
Номер колонны	j	
Количество активных центров сорбента	$N(T_1, k-1)$	
Количество восстановленных активных центров сорбента	$A_i(T_2, k)$	
Номер цикла	k	
Вид биосорбента	$B(A_{ij})$	
Количество циклов данного вида сорбента	$KЦ(B)$	
Выходные переменные		
Переключаемые колонны	$A_{ij}(k, f)$	Согласно матрице смежности (табл.3.5) и правилам (3.124, 3.126, 3.127, 3.128)
Количество продуктов реакции десорбции	$G^{Ag}(T_3, A_{ij})$	

Технологически процесс реализуется в девяти колоннах, установленных на трёх уровнях (Рисунок 3.3). Колонны каждого уровня, установлены с таким расчётом, чтобы раствор перетекал из колонны в колонну. На первом уровне установлено пять колонн, на остальных – по две колонны.

Введём множество колонн для каждого уровня (3.128) – (3.130):

$$A_1 = \{A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14}, A_{15}\} \quad (3.128)$$

$$A_2 = \{A_{21}, A_{22}\} \quad (3.129)$$

$$A_3 = \{A_{31}, A_{32}\} \quad (3.130)$$

Колонны каждого уровня – A_i , где $i = \overline{1, 3}$.

Тогда, согласно матрице смежности (Таблица 3.5), общее количество колонн участка биосорбции (3.131):

$$A = \bigcup_i A_i \quad (3.131)$$

Для конструирования логико-формальных правил введем понятие состояния колонн, согласованное с режимами, отраженными в матрице смежности (3.132):

$$\text{State}(A_{ij}) \in \{S, R, DS, 0\} \quad (3.132)$$

Согласно матрице смежности и условиям протекания процесса, в каждой фазе режим сорбции осуществляется в трех колоннах разных уровней. Соответственно, логико-формальное правило перетекания серебросодержащего раствора через колонны, включенные в режим сорбции (3.133):

$$(\forall f \forall i) (\exists! A_{ij} \in A_i) \text{State}(A_{ij}, f) = S. \quad (3.133)$$

Это правило расшифровывается следующим образом: в любой фазе на каждом уровне существует единственная колонна, которая находится в режиме сорбции.

Логико-формальное правило переключения из режима сорбции S в режим восстановления технологических свойств сорбента R (3.134):

$$\begin{aligned} \text{State}(A_{ij}, f) = S \wedge G_{ij}^{\text{Ag}}(k) = G_{\text{nasish}}^{\text{Ag}}(k) \wedge G_{ij}^{\text{At}}(k) > G_{\mu}^{\text{At}}(B) \Rightarrow \\ \Rightarrow \text{State}(A_{ij}, f + 1) = R \wedge \text{State}(A_{i, j \oplus 1}, f + 1) = S \end{aligned} \quad (3.134)$$

Это правило гласит, что, если в колонне A_{ij} во время процесса сорбции количество серебра, усвоенного колонной (свое на каждом цикле), достигает уровня насыщения (рассчитанного по модели) и при этом количество активных центров сорбента превышает граничное значение, задаваемое лицом, принимающим решение (ЛПР), то колонна A_{ij} 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. То есть, если рассмотреть колонны первого уровня: если в предыдущей фазе работала в режиме сорбции первая колонна, то в следующей будет сорбировать вторая колонна, а после завершения сорбции в пятой колонне осуществляется переключение на режим сорбции первой колонны.

Логико-формальное правило переключения из режима сорбции S в режим десорбции DS (3.135):

$$\begin{aligned} \text{State}(A_{ij}, f) = S \wedge G_{ij}^{\text{Ag}}(k) = G_{\text{насыщ}}^{\text{Ag}}(k) \wedge G_{ij}^{\text{At}}(k) \leq G_{\mu}^{\text{At}}(B) \Rightarrow \\ \Rightarrow \text{State}(A_{ij}, f + 1) = DS \wedge \text{State}(A_{i, j \oplus 1}, f + 1) = S \end{aligned} \quad (3.135)$$

Это правило гласит, что, если в колонне A_{ij} во время процесса сорбции количество серебра, усвоенного колонной (своё на каждом цикле), достигает уровня насыщения (рассчитанного по модели) и при этом количество активных центров сорбента достигает граничного значения, задаваемого ЛППР, то колонна A_{ij} переключается в режим десорбции, а следующая колонна того же уровня переключается в режим сорбции, согласно матрице смежности.

Логико-формальное правило переключения из режима восстановления R в режим сорбции S (3.136):

$$\text{State}(A_{ij}, f) = R \wedge G_{ij}^{A_i}(k) \geq G_H^{A_i}(k) \Rightarrow \text{State}(A_{ij}, f + 1) = S \quad (3.136)$$

Согласно этому правилу, если в колонне A_{ij} во время процесса восстановления количество активных центров сорбента достигает нормативного значения, прогнозируемого по математической модели (своё на каждом цикле), то колонна переключается в режим сорбции согласно матрице смежности.

Необходимо разработать уравнения математической модели для обобщенного прогноза количества серебра, усвоенного колоннами, роста активных центров, в течение совокупности циклов, характеризующих чередование колонн и протекающих в них режимов.

Уравнения, характеризующие количество комплексов усвоенного серебра в режиме сорбции (S) (3.137) – (3.139):

$$\forall A_{ij}, B_i$$

$$G_{\text{общ}}^{\text{RCOOAg}}(A_{ij}) = \sum_{k=1}^{\text{КЦ}} G_k^{\text{RCOOAg}}(A_{ij}, T_{1,k}), \quad (3.137)$$

$$G_{\text{общ}}^{\text{RSAg}}(A_{ij}) = \sum_{k=1}^{\text{КЦ}} G_k^{\text{RSAg}}(A_{ij}, T_{1,k}), \quad (3.138)$$

$$G_{\text{общ}}^{\text{RAgNO}_3}(A_{ij}) = \sum_{k=1}^{\text{КЦ}} G_k^{\text{RAgNO}_3}(A_{ij}, T_{1,k}), \quad (3.139)$$

Общее количество серебра, усвоенного колонной за все циклы (3.140):

$$G_{\text{общ}}^{\text{Ag}}(A_{ij}, T_{1,k}) = G_{\text{общ}}^{\text{RCOOAg}}(A_{ij}, T_{1,k}) + G_{\text{общ}}^{\text{RSAg}}(A_{ij}, T_{1,k}) + G_{\text{общ}}^{\text{RAgNO}_3}(A_{ij}, T_{1,k}) \quad (3.140)$$

где КЦ – количество циклов; k – номер цикла.

Рост активных центров сорбента в режиме восстановления технологических свойств (R) (3.141) – (3.143):

$$G_{\text{общ}}^{\text{RCOOH}}(A_{ij}) = \sum_{k=1}^{\text{КЦ}} G_k^{\text{RCOOH}}(A_{ij}, T_{2,k}), \quad (3.141)$$

$$G_{\text{общ}}^{\text{RSH}}(A_{ij}) = \sum_{k=1}^{\text{КЦ}} G_k^{\text{RSH}}(A_{ij}, T_{2,k}), \quad (3.142)$$

$$G_{\text{общ}}^{\text{R}}(A_{ij}) = \sum_{k=1}^{\text{КЦ}} G_k^{\text{R}}(A_{ij}, T_{2,k}). \quad (3.143)$$

Общее количество активных центров, выращенных в течение всех циклов работы сорбента (3.144):

$$G_{\text{общ}}^{A_t}(A_{ij}, T_{2,k}) = G_{\text{общ}}^{\text{RCOOH}}(A_{ij}, T_{2,k}) + G_{\text{общ}}^{\text{RSH}}(A_{ij}, T_{2,k}) + G_{\text{общ}}^{\text{R}}(A_{ij}, T_{2,k}). \quad (3.144)$$

Предусмотрено, что порция биосорбента (плесневой культуры) используется до тех пор, пока способность поглощать серебро после технологических пауз и определенного количества циклов (для каждого типа плесневой культуры) не понизится до уровня менее 50% от первоначальной. Это пороговое значение определяет эффективность использования биосорбента и, в зависимости от технологических условий, может быть ниже или выше.

Логико-формальное правило протекания процесса десорбции и замены сорбента по его завершению (3.145):

$$\text{State}(A_{ij}, f) = D \wedge G_{\text{DS}}^{\text{Ag}}(A_{ij}) \geq G_{\text{общ}}(A_{ij}) \Rightarrow \text{Change}(B, A_{ij}). \quad (3.145)$$

Процедура $\text{Change}(B, A_{ij})$ означает, что в колонне A_{ij} осуществляется замена сорбента. Согласно этому правилу, если в колонне A_{ij} во время процесса десорбции количество серебра, десорбированного из сорбента, достигает общего количества серебра, извлечённого сорбентом в колонне из серебросодержащего раствора за все фазы работы колонны с момента загрузки сорбента, то необходимо останавливать процесс десорбции и осуществлять замену сорбента в данной колонне.

Восьмая-девятая колонны используются как вспомогательные, осуществляя доочистку растворов до норматива, соответствующего содержанию серебра в промышленных стоках. Замена сорбента в этих колоннах осуществляется через два-три раза после замены биосорбента в колоннах предыдущих уровней.

В соответствии с изложенным порядком чередования режимов сорбция-восстановление-десорбция, предложена матрица смежности (Таблица 3.5), определяющая порядок функционирования колонн в каждом цикле.

Таблица 3.5– Матрица смежности технологических циклов

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

Здесь i – номер колонны, j – номер фазы.

Математические модели процессов сорбции, восстановления технологических свойств и десорбции являются параметрическими структурами. На основании результатов физико-химических исследований [36] необходимо определить численные значения параметров, после чего математические модели могут использоваться для прогноза показателей, характеризующих процессы, протекающие в колоннах участка биосорбции.

3.3 Параметрическая идентификация математических моделей

Необходимо осуществить идентификацию «в малом» для следующих типов моделей – параметрических структур:

- биосорбции;
- восстановления технологических свойств сорбента;
- десорбции.

3.3.1 Постановка задачи идентификации

Задача идентификации формулируется следующим образом: по результатам наблюдений над входными и выходными переменными объекта управления определить оптимальные в смысле заданного функционала ошибки значения параметров моделей.

В данной работе ставится и решается задача идентификации в «узком» смысле. Для заданного набора выходных переменных Y , характеризующих работу объекта управления и фиксированных значений входных переменных X , соответствующих определённому интервалу наблюдений по уравнениям математической модели, осуществляется расчёт выходных переменных в следующем виде (3.146):

$$y_{\text{мод}} = f_1(x, \beta, t) \quad (3.146)$$

При этом предполагается, что выходные переменные $y_{\text{мод}}$ рассчитываются по уравнениям, представленным как параметрические структуры. Для тех же

наборов значений входных переменных предполагается наличие измеренных выходных переменных объекта(3.147):

$$y_{об} = f_2(x, t) \quad (3.147)$$

На основании приведённых зависимостей рассчитывается ошибка (3.148):

$$e = y_{мод} - y_{об} \quad (3.148)$$

Предполагая, что объект и модель характеризуются набором переменных, ошибка представляется в виде вектора(3.149):

$$\bar{e} = \{e_i\}, \text{ где } i = \overline{1, n} \quad (3.149)$$

n – объем статистической выборки.

При этом предполагается, что вектор параметров в представленной модели-структуре (3.150):

$$\bar{\beta} = \{\beta_j\}, \text{ где } j = \overline{1, p} \quad (3.150)$$

p – количество параметров модели.

В предлагаемой постановке задачи идентификации формируется квадратичный функционал ошибки в виде(3.151):

$$E = \sum_{i=1}^n (y_{мод i} - y_{об i})^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (3.151)$$

Тогда в формализованном виде задача идентификации может быть представлена следующим образом (3.152):

$$E = \sum_{i=1}^n (y_{мод}(x, \beta, t) - y_{об}(x, t))^2 \rightarrow \min_{\beta} \quad (3.152)$$

Согласно такой постановке задачи, необходимо найти значение вектора параметров модели $\bar{\beta}$, которое доставляет минимум среднеквадратичному функционалу ошибки E .

Геометрически, эта постановка задачи сводится к поиску вершины гиперпараболоида, представляющего функционал ошибки E в пространстве параметров β .

При численной реализации, поисковая процедура определения вершины гиперпараболоида, геометрически представляющего собой функционал ошибки, считается удовлетворительной при достижении некоторой окрестности ε , характеризующей вершину гиперпараболоида в пространстве параметров.

Для решения поставленной задачи необходимо выбрать метод идентификации, который по своим скоростным характеристикам поисковой процедуры был бы соизмерим с динамикой изменения характеристик объекта управления.

Согласно [97], для определения численных значений параметров были выбраны метод чувствительности и метод двух моделей.

3.3.2 Результаты параметрической идентификации

Численные значения параметров, рассчитанные по выбранному алгоритму [342], для режима сорбции (S), реализуемого на различных сорбентах, приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Параметры модели сорбции (режим S) для разных сорбентов

№ п/п	Тип сорбента	Параметр				
		β_1	β_2	k_1	k_2	k_3
1	B_1	$1,91 \cdot 10^{-8}$	$2,01 \cdot 10^{-8}$	$10,58 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$1,16 \cdot 10^{-5}$
2	B_2	$1,863 \cdot 10^{-8}$	$1,897 \cdot 10^{-8}$	$9,988 \cdot 10^{-5}$	$5,286 \cdot 10^{-5}$	$1,095 \cdot 10^{-5}$
3	B_3	$1,687 \cdot 10^{-8}$	$1,77 \cdot 10^{-8}$	$9,34 \cdot 10^{-5}$	$4,94 \cdot 10^{-5}$	$1,024 \cdot 10^{-5}$
4	B_4	$1,457 \cdot 10^{-8}$	$1,533 \cdot 10^{-8}$	$8,07 \cdot 10^{-5}$	$4,27 \cdot 10^{-5}$	$8,85 \cdot 10^{-6}$
5	B_5	$1,234 \cdot 10^{-8}$	$1,298 \cdot 10^{-8}$	$6,83 \cdot 10^{-5}$	$3,62 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$
6	B_6	$1,01 \cdot 10^{-8}$	$1,065 \cdot 10^{-8}$	$5,61 \cdot 10^{-5}$	$2,97 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-6}$
7	B_7	$8,87 \cdot 10^{-9}$	$6,93 \cdot 10^{-9}$	$4,91 \cdot 10^{-5}$	$2,59 \cdot 10^{-5}$	$5,38 \cdot 10^{-6}$
8	B_8	$7,01 \cdot 10^{-9}$	$7,38 \cdot 10^{-9}$	$3,88 \cdot 10^{-5}$	$2,06 \cdot 10^{-5}$	$4,26 \cdot 10^{-6}$

Аналогично, перечень численных значений параметров процесса восстановления технологических свойств сорбента приведён в таблице 3.7, десорбции – в таблице 3.8. Параметры моделей рассчитаны для каждого типа сорбента (B_i).

Таблица 3.7– Параметры модели восстановления (режим R) технологических свойств сорбента

№ п/п	Тип сорбента	Параметр	
		k_4	k_5
1	B ₁	$9,4*10^{-5}$	$3,6*10^{-5}$
2	B ₂	$8,87*10^{-5}$	$3,18*10^{-5}$
3	B ₃	$7,17*10^{-5}$	$2,75*10^{-5}$
4	B ₄	$6,07*10^{-5}$	$2,33*10^{-5}$
5	B ₅	$4,98*10^{-5}$	$1,91*10^{-5}$
6	B ₆	$4,36*10^{-5}$	$1,67*10^{-5}$
7	B ₇	$3,45*10^{-5}$	$1,32*10^{-5}$
8	B ₈	$3,16*10^{-5}$	$1,06*10^{-5}$

Таблица 3.8– Параметры модели десорбции (режим D) серебра

№ п/п	Тип сорбента	Параметр			
		β_3	β_4	k_6	k_7
1	B ₁	$1,74*10^{-8}$	$2,3*10^{-8}$	$7,2*10^{-5}$	$7,4*10^{-5}$
2	B ₂	$1,64*10^{-8}$	$2,17*10^{-8}$	$6,8*10^{-5}$	$6,486*10^{-5}$
3	B ₃	$1,54*10^{-8}$	$2,03*10^{-8}$	$6,0*10^{-5}$	$6,53*10^{-5}$
4	B ₄	$1,33*10^{-8}$	$1,75*10^{-8}$	$5,49*10^{-5}$	$5,65*10^{-5}$
5	B ₅	$1,12*10^{-8}$	$1,43*10^{-8}$	$4,65*10^{-5}$	$4,78*10^{-5}$
6	B ₆	$9,2*10^{-9}$	$1,22*10^{-8}$	$3,82*10^{-5}$	$3,92*10^{-5}$
7	B ₇	$8,1*10^{-9}$	$1,07*10^{-8}$	$3,34*10^{-5}$	$3,43*10^{-5}$
8	B ₈	$6,4*10^{-9}$	$8,4*10^{-9}$	$2,64*10^{-5}$	$2,72*10^{-5}$

Результаты численного исследования по модели представлены на рисунках 3.3-3.5. Сопоставление прогноз-факт сорбции серебра в первой колонне, за четыре фазы первого цикла приведено на рисунке 3.6.

Обобщённый график, характеризующий извлечение и накопление серебра в двух колоннах, при сочетании режимов сорбции (S) и восстановления (R) для пяти фаз – полного первого цикла приведён на рисунке 3.7.

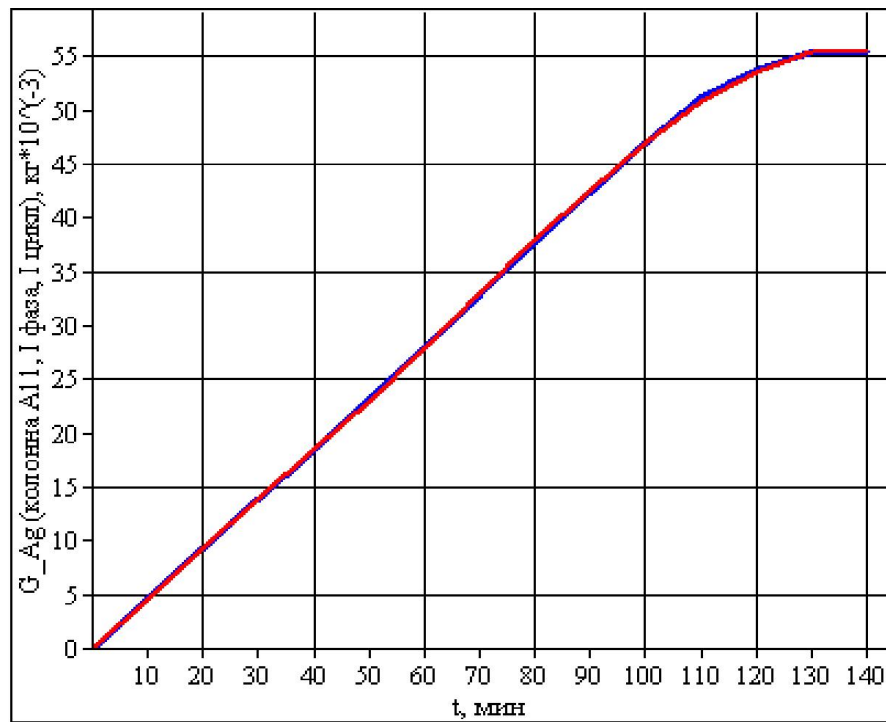


Рисунок 3.3–Сопоставление «прогноз-факт» сорбции серебра сорбентом В1 (леворин), в первой колонне, для первого режима (S), за время первой фазы первого цикла

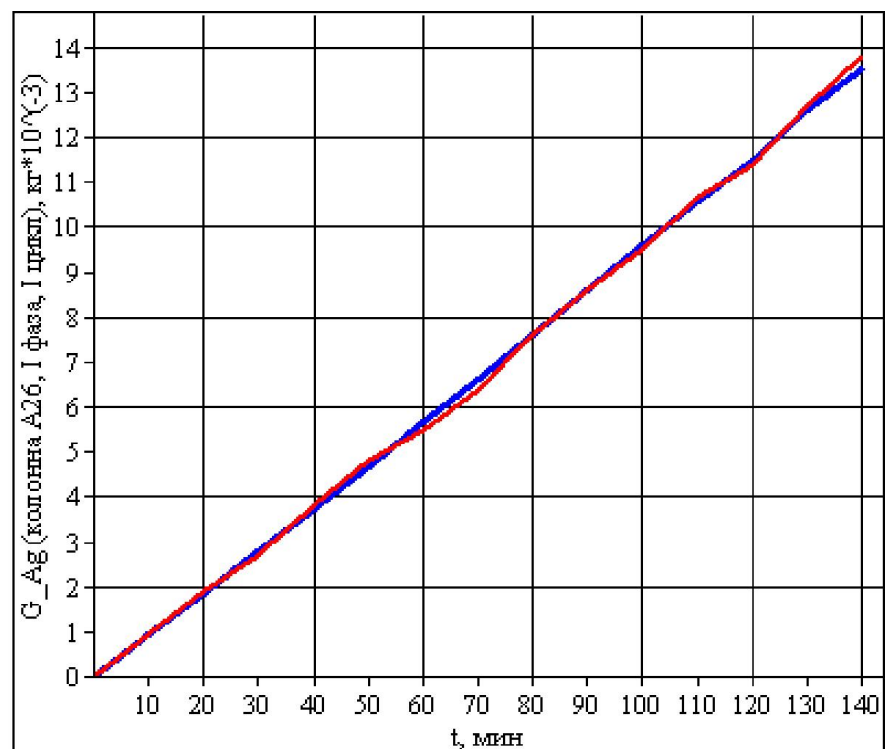


Рисунок 3.4– Сопоставление «прогноз-факт» сорбции серебра сорбентом В1 (леворин), во второй колонне, для первого режима (S), за время первой фазы первого цикла

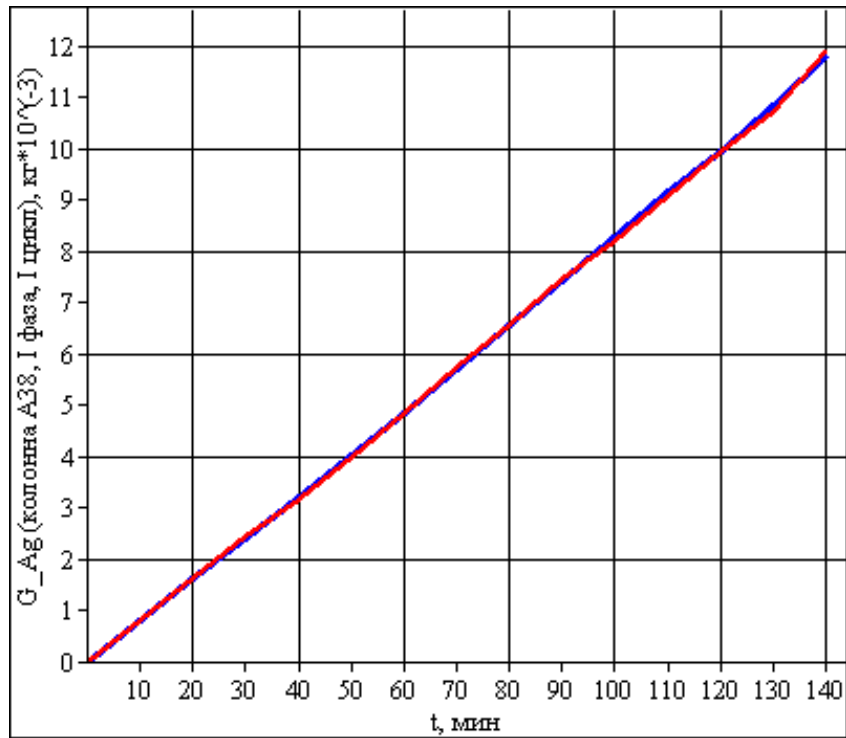


Рисунок 3.5– Сопоставление «прогноз-факт» сорбции серебра сорбентом В1 (леворин), в третьей колонне, для первого режима (S), за время первой фазы первого цикла

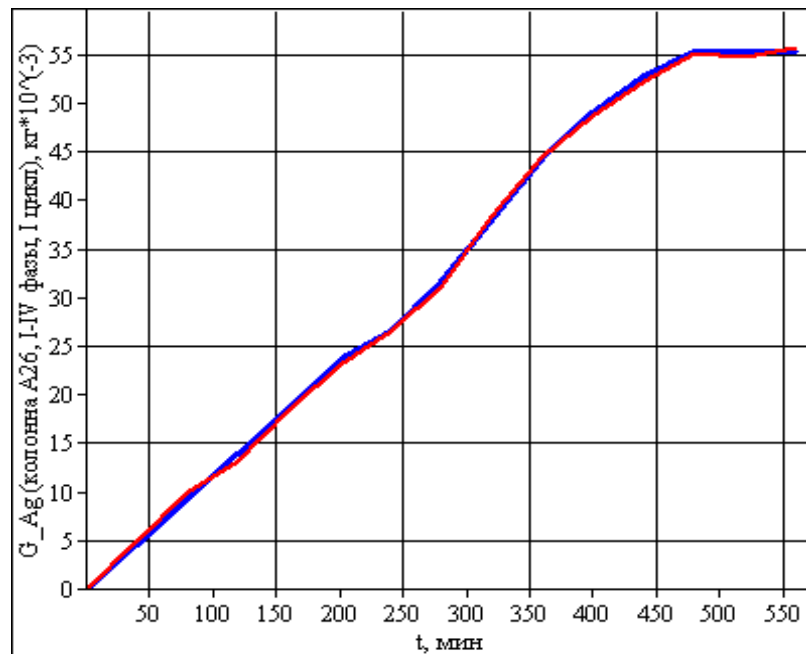


Рисунок 3.6– Сопоставление «прогноз-факт» сорбции серебра сорбентом В1 (леворин), во второй колонне, за четыре фазы первого цикла

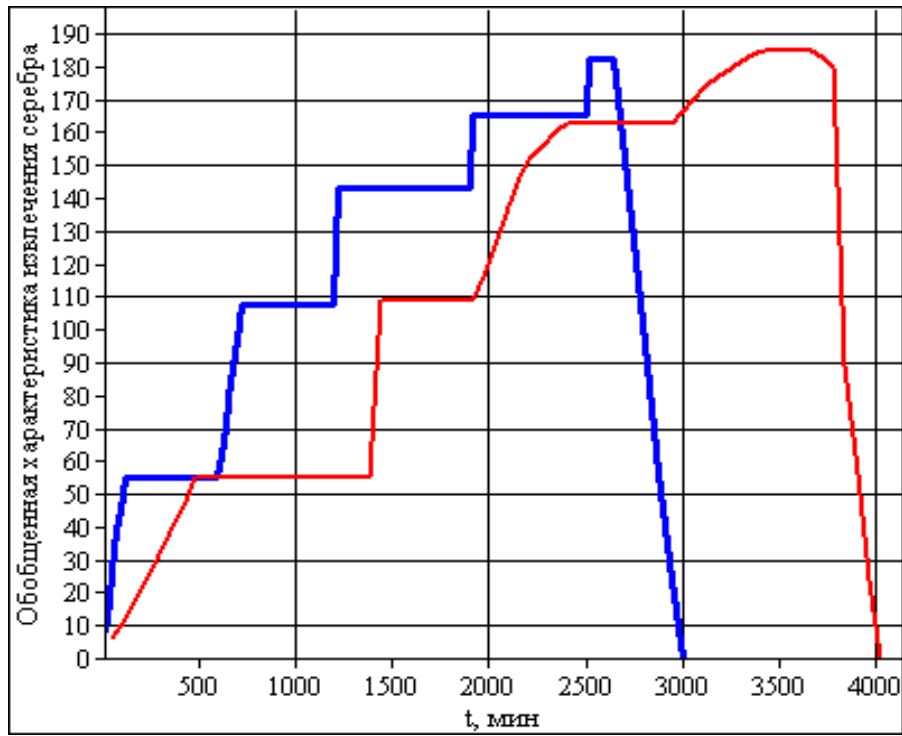


Рисунок 3.7– Обобщённая характеристика извлечения серебра двумя колоннами за пять фаз первого цикла

Расчёт количества активных центров сорбента В1 (леворин) в режимах R и S за пять циклов представлен на рисунке 3.8.

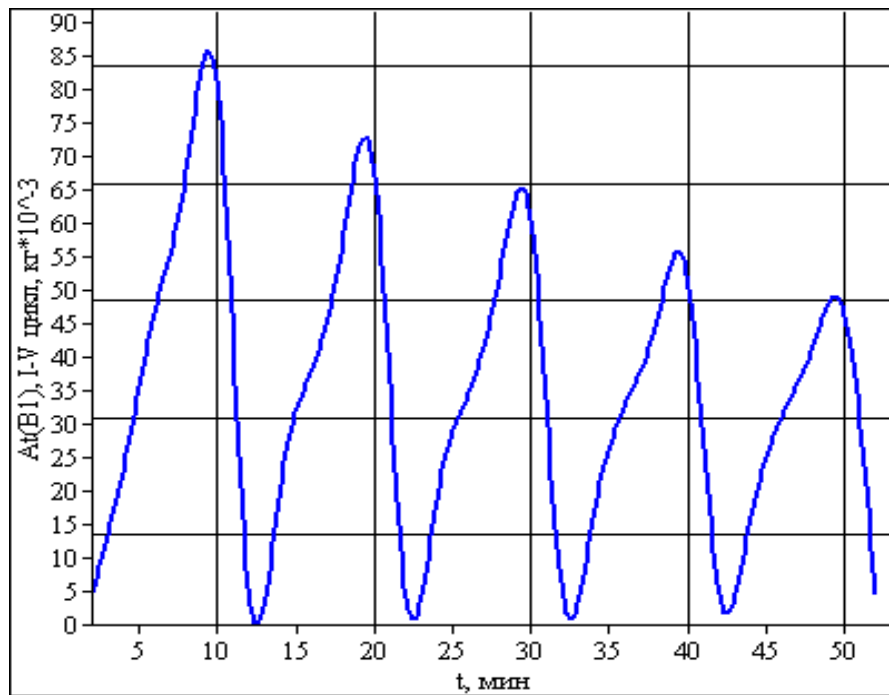


Рисунок 3.8– Прогноз динамики роста и расходования активных центров сорбента (за пять фаз первого цикла)

По независимой выборке объемом 86 строк проведена проверка адекватности разработанных моделей. Статистические оценки проверки адекватности прогноза основных показателей режимов приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9– Оценки проверки адекватности моделей

№п/п	Наименование показателей	Обозначение показателей	Остаточная дисперсия	%
1	$G_k^{RCOOAg}(A_{ij}, T_{1,k})$	Количество сорбированного комплекса RCOOAg	0,028	2,8
2	$G_k^{RSAg}(A_{ij}, T_{1,k})$	Количество сорбированного комплекса RSAg	0,031	3,1
3	$G_k^{RAgNO_3}(A_{ij}, T_{1,k})$	Количество сорбированного комплекса RAgNO ₃	0,025	2,5
4	$G_k^{Ag}(A_{ij})$	Количество серебра усвоенного за цикл	0,015	1,5
5	$G_k^{RCOOH}(A_{ij}, T_{2,k})$	Количество восстановленной культуры RCOOH	0,037	3,7
6	$G_k^{RSH}(A_{ij}, T_{2,k})$	Количество восстановленной культуры RSH	0,034	3,4
7	$G_k^R(A_{ij}, T_{2,k})$	Количество восстановленной культуры R	0,029	2,9
8	$G_k^{At}(A_{ij})$	Количество активных центров за цикл	0,023	2,3

Как показывает оценка остаточной дисперсии, прогноз по моделям в среднестатистическом смысле попадает в доверительный интервал 3σ , то есть модель адекватна процессу.

3.4 Математическая модель верхнего уровня

Для принятия решений по управлению участком биосорбции серебра, необходимо разработать динамические модели прогноза получаемого серебра и, соответственно, динамического прогноза расходуемого сорбента, подлежащего замене после десорбции с оценкой текущего затратного механизма. Классификация переменных верхнего уровня приведена в таблице 3.10.

Таблица 3.10– Классификация переменных верхнего уровня

Наименование переменной	Обозначение	Единица измерения
Входные		
Количество десорбированного из каждой колонны $Ag(NH_3)_2$	$G^{Ag(NH_3)_2}(A_{ij})$	кг
Количество десорбированного из каждой колонны $Ag(NH_3)_2NO_3$	$G^{Ag(NH_3)_2NO_3}(A_{ij})$	кг
Количество циклов использования сорбента	КЦ(В)	
Период насыщения сорбента (S)	$T_1(B)$	час
Динамическая сорбционная обменная емкость	ДСОЕ(В)	кг ^{Ag} /кг
Цена сорбента (плесневой культуры)	СТ(В)	у.е./т
Вид плесневой культуры	B_1	
Количество плесневой культуры	$CG(B, A_{ij})$	кг
Период режимов восстановления технологических свойств сорбента (R)	$T_2(A_{ij})$	час
Количество фаз использования сорбента в цикле	КФ(В)	
Выходные		
Количество полученного после десорбции серебра	G^{Ag}	кг
Период, за который десорбируется серебро	T_3	час
Расход сорбента	CG	кг
Стоимость расходуемого сорбента	СТ	у.е./кг

При разработке математической модели принята следующая гипотеза о механизме процесса.

Плесневая культура, используемая в качестве сорбента после определённого для каждой из них количества технологических циклов, выгружается из соответствующей колонны и полностью заменяется. Для определения технологической себестоимости плесневой культуры, используемой в качестве сорбента, необходимо осуществить прогноз технологических свойств сорбента и количества серебра, которое данный тип плесневой культуры способен извлекать из вторичных серебрясодержащих растворов. Количество извлекаемого из растворов серебра, переходящего в десорбирующий раствор, определяется как суммарное количество серебра, извлекаемого из каждой колонны, переключаемой на десорбцию согласно логическим правилам (3.145) и очерёдности, приведённой в таблице 3.5.

Количество используемого сорбента, подлежащего замене, определяется в зависимости от количества циклов сорбция-восстановление (S-R), периодов

длительности насыщения сорбента и возможности сорбента усваивать серебро – динамической обменной ёмкости. Технологическая себестоимость, определяющая экономическую эффективность исследования каждого вида плесневой культуры в качестве сорбента, зависит от количества и цены сорбента. При этом в каждой фазе участвуют три колонны, из которых десорбируется серебро.

Согласно принятой гипотезе разработаны уравнения математической модели.

Уравнения, характеризующие скорость изменения количества серебра, извлечённого из растворов (3.153) – (3.154):

$$\frac{dG_{\text{ioбщ}}^{\text{Ag}}}{dt} = \sum_{i=1}^3 G_i^{\text{Ag}} (A_{ij}), \quad (3.153)$$

где $i = \overline{1,3}$, $j = \overline{1,9}$.

$$G_i^{\text{Ag}} = G_i^{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2} + G_i^{\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{NO}_3}, \quad (3.154)$$

Скорость изменения количества заменяемого сорбента (3.155):

$$\frac{dCG}{dt} = \frac{\sum_{k=1}^{\text{КЦ}} T_{\text{ц}}(B, A_{ij}) \cdot \text{ДСОЕ}(B)}{\text{КЦ}(B)}, \quad (3.155)$$

где $T_{\text{ц}}$ – время цикла (3.156).

$$T_{\text{ц}} = T_1 + T_2. \quad (3.156)$$

Затратный механизм процесса (3.157):

$$\frac{dCT}{dt} = CG \cdot CT(B). \quad (3.157)$$

Так как фармацевтическая промышленность поставляет различные виды биосорбентов с текущим изменением цены, для принятия решений об их закупке необходимо разработать статические статистические модели, учитывающие комплекс свойств предлагаемых сорбентов.

Классификация переменных, используемых для разработки статической модели, представлена в таблице 3.11.

Таблица 3.11– Классификация переменных верхнего уровня

Наименование переменной	Смысловое содержание переменной
x_{1j}	Долевое соотношение j-го сорбента
x_{2j}	Вес закупаемого сорбента, кг
x_{3j}	ПДОЕ, кгAg/кг
x_{4j}	Количество циклов
x_{5j}	Время насыщения, час
x_{6j}	Количество извлеченного серебра, кг
x_{7j}	Длительность использования, час
y_1	Весовая характеристика закупаемых сорбентов
y_2	Общее количество извлекаемого серебра
y_3	Общее время использования сорбентов на участке
y_4	Оценка средней длительности режима сорбции в колонне

В обозначениях переменных x_{ij} : j – номер типа сорбента, $j = \overline{1,6}$, i – номер свойства сорбента, $i = \overline{1,7}$.

При планировании производственной программы и оценке технико-экономических показателей лицом, принимающим решения (ЛПР) на верхнем уровне, необходимо учитывать случайный характер поставок, ценообразования и эксплуатационных свойств биосорбентов. Для решения этих задач были разработаны статистические модели.

Разработка моделей осуществлена с использованием методов регрессионного анализа и представлена набором полиномов (3.158-3.167).

Уравнение долевого отношения использования различных типов сорбентов в процессе извлечения серебра (3.158):

$$y_1 = 0,39x_{11} + 0,22x_{12} + 0,11x_{13} + 0,13x_{14} + 0,08x_{15} + 0,07x_{16}, \quad (3.158)$$

где x_{1j} – весовая характеристика j-го типа сорбента;

Уравнение прогноза общего количества извлекаемого из сорбентов серебра (3.159):

$$y_2 = 0,08 + 0,41x_{31} + 0,27x_{32} + 0,21x_{33} + 0,14x_{34} + 0,15x_{35} + 0,09x_{36}, \quad (3.159)$$

где x_{3j} – предельно допустимая обменная емкость сорбента (ПДОЕ).

Уравнение прогноза общего времени использования сорбентов на участке (3.160):

$$\begin{aligned}
y_3 = & 153,8 + 0,51x_{31} + 0,42x_{32} + 0,18x_{33} + 0,21x_{34} + 0,16x_{35} + \\
& + 0,09x_{36} + 1,6x_{41} + 1,7x_{42} + 1,2x_{43} + 0,9x_{44} + 0,7x_{45} + 0,6x_{46} + \\
& + 0,32x_{31}x_{41} + 0,34x_{32}x_{42} + 0,24x_{33}x_{43} + 0,23x_{34}x_{44} + \\
& + 0,14x_{35}x_{45} + 0,11x_{36}x_{46}
\end{aligned} \quad (3.160)$$

где x_{4j} – количество циклов использования сорбента.

Уравнение прогноза оценки средней длительности режима сорбции в колонне (3.161):

$$\begin{aligned}
y_4 = & 209,6 + 0,63x_{31} + 0,61x_{32} + 0,57x_{33} + 0,51x_{34} + 0,42x_{35} + \\
& + 0,35x_{36} + 3,1x_{51} + 2,7x_{52} + 1,3x_{53} + 1,2x_{54} + 1,1x_{55} + 1,2x_{56} + \\
& + 0,8x_{31}x_{51} + 0,9x_{32}x_{52} + 0,6x_{33}x_{53} + 0,5x_{34}x_{54} + \\
& + 0,4x_{35}x_{55} + 0,3x_{36}x_{56}
\end{aligned} \quad , \quad (3.161)$$

где x_{5j} – время насыщения j -го сорбента.

Уравнение прогноза количества закупаемого сорбента типа леворин (3.162):

$$x_{21} = 3,16 + 3,42x_{31} + 3,71x_{41} + 4,5x_{51} + 11,24x_{61} + 1,15x_{71}, \quad (3.162)$$

где x_{6j} – количество извлекаемого серебра из j -го сорбента; x_{7j} – длительность использования j -го сорбента.

Уравнение прогноза закупки сорбента типа неомицин (3.163):

$$x_{22} = 17,26 + 3,13x_{32} + 3,61x_{42} + 4,33x_{52} + 10,82x_{62} + 1,12x_{72} \quad (3.163)$$

Уравнение прогноза количества закупаемого сорбента типа гентамицин (3.164):

$$x_{23} = 28,26 + 3,01x_{33} + 3,65x_{43} + 4,51x_{53} + 11,64x_{63} + 1,16x_{73} \quad (3.164)$$

Уравнение прогноза количества закупаемого сорбента типа фузидин (3.165):

$$x_{24} = 29,46 + 3,16x_{34} + 3,63x_{44} + 4,72x_{54} + 12,33x_{64} + 1,23x_{74} \quad (3.165)$$

Уравнение прогноза количества закупаемого сорбента эритромицин (3.166):

$$x_{25} = 8,23 + 3,41x_{35} + 3,65x_{45} + 4,88x_{55} + 13,12x_{65} + 1,41x_{75} \quad (3.166)$$

Уравнение прогноза количества закупаемого сорбента типа линкомицин (3.167):

$$x_{26} = 14,18 + 4,31x_{36} + 4,33x_{46} + 4,05x_{56} + 15,16x_{66} + 1,53x_{76} \quad (3.167)$$

Уравнения (3.159) – (3.160) предназначены для оценки принимаемых решений при планировании производственной деятельности участка. Уравнение (3.161) необходимо для принятия решений по длительности технологических циклов и, соответственно, является дополнением к матрице смежности. Уравнения (3.162) – (3.167) предназначены для принятия решений по закупке сорбентов различных типов в зависимости от их физико-химических, технологических и эксплуатационных свойств. Они выступают в качестве ограничений при решении оптимизационной задачи о закупках сорбента и опосредовано влияют на формирование прибыли от основной деятельности участка биосорбции.

Приведённые уравнения второго и третьего уровней позволяют прогнозировать состояние технологических агрегатов участка биосорбции и принимать решения по управлению режимами (второй уровень) и закупке сорбента (третий уровень).

Приведённые значения параметров статистических моделей (3.158) – (3.167) идентифицированы для статистических данных, собранных в результате физико-химических исследований [36] и опытно-промышленной эксплуатации алгоритма и программного обеспечения системы в режиме «Советчик». В случае применения нового типа биосорбента в режиме обучения осуществляется идентификация параметров моделей по алгоритму (3.168):

$$\bar{V}_j = (\bar{U}_j^T, \bar{U}_j)^{-1} \bar{U}_j^T \bar{y}_j \quad (3.168)$$

где V_j – параметры нового типа биосорбента; j – номер этого сорбента; U_j – информационная матрица значений факторов x_j , столбцы которой – значения показателей нового сорбента, а строки соответствуют технологическим циклам; y_j – значения выходных показателей, соответствующие строкам таблицы U_j ; U_j^T – транспонированная информационная матрица.

Этот же алгоритм используется для адаптации параметров перечисленных моделей после каждого цикла использования сорбента. То есть алгоритм (3.168) рассматривается как идентификатор в контуре управления.

3.5 Постановка задачи управления верхнего уровня

Система верхнего уровня управления предназначена для принятия решений по экономической целесообразности закупки и эффективности использования плесневых культур различных типов в качестве биосорбентов. Определено, что эта система функционирует в автоматизированном режиме, при этом пользователь частично вводит информацию о вариантах закупки (цене плесневой культуры и ее количестве), а информация о технологических свойствах этой культуры, уже использовавшейся в технологическом цикле процесса биосорбции серебра, поступает из базы данных системы, реализованной в составе системы управления участком на базе персонального компьютера. Из базы данных в систему верхнего уровня также поступают данные о физико-химических и кинетических свойствах плесневой культуры, определенных на стадии лабораторных и опытно-промышленных испытаний.

Физическая постановка задачи управления верхнего уровня имеет следующий вид:

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

В соответствии с физической постановкой, была разработана формальная постановка задачи, представленная в виде задачи линейного программирования.

Определить экстремум функционала (3.169):

$$F_1 = \sum_{j=1}^n w_j c_j x_{2j} \rightarrow \min_{x_{2j}}, \quad (3.169)$$

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.

При следующих ограничениях: количество закупаемых сорбентов должно быть не менее рассчитанных по модели (3.161) – (3.167), то есть $x_{2j} \geq x_{2j}^M$, где

$\bar{j}=1,6$ а свойства \bar{j} -х сорбентов должны быть не менее нормативных ($x_{ij} \geq x_{ij}^M$, где $\bar{i}=3,7, \bar{j}=1,6$).

Поиск экстремума функционала F_1 осуществляется симплекс-методом. Полученные оптимальные решения за месяц приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12– Оптимальные решения за месяц

Перем.	Знач.	Перем.	Знач.	Перем.	Знач.	Перем.	Знач.
X ₁₁	1	c ₁	83	X ₄₁	6	X ₆₁	38,8
X ₁₂	2	c ₂	84	X ₄₂	6	X ₆₂	36,8
X ₁₃	3	c ₃	95	X ₄₃	7	X ₆₃	31,8
X ₁₄	4	c ₄	89	X ₄₄	8	X ₆₄	26,1
X ₁₅	5	c ₅	105	X ₄₅	7	X ₆₅	23,6
X ₁₆	6	c ₆	81	X ₄₆	9	X ₆₆	18
X ₂₁	218	X ₃₁	21	X ₅₁	2	X ₇₁	48
X ₂₂	213	X ₃₂	19	X ₅₂	2,1	X ₇₂	48
X ₂₃	205	X ₃₃	17	X ₅₃	1,72	X ₇₃	55
X ₂₄	193	X ₃₄	15	X ₅₄	1,63	X ₇₄	63
X ₂₅	186	X ₃₅	14	X ₅₅	1,58	X ₇₅	57
X ₂₆	174	X ₃₆	12	X ₅₆	1,41	X ₇₆	69

Оптимальные решения задачи верхнего уровня, опирающиеся на экономические и технологические характеристики биосорбентов, позволяют сократить производственные расходы, связанные с приобретением и заменой биосорбентов. Согласно этим решениям, в период опытной эксплуатации стало возможным оценить обобщенные технико-экономические показатели применения различных видов сорбентов.

3.6 Постановка задачи управления среднего уровня

В системе управления участком биосорбции серебра предусмотрен режим переключения колонн после насыщения биосорбента, то есть переходы с режима сорбции (S) на режим восстановления технологических свойств сорбента (R) – роста активных центров плесневой культуры, способных усваивать серебро из раствора в последующих циклах. Это определяет особенности дискретного управления, реализующего переключение режимов и фаз в каждом цикле, а также

переключение колонны на режим десорбции при максимальном использовании сорбционных свойств плесневой культуры, загруженной в колонну. Дискретное управление переключениями осуществляется согласно матрице смежности (Таблица 3.5) и логическим правилам (3.124, 3.126-128). Экономические требования лежат в основе постановки задачи непрерывного управления, подчиненной определению условий максимального использования возможностей закупаемой плесневой культуры.

Физическая постановка задачи управления:

– 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 ЛППР уровня.

Формальная постановка задачи имеет вид (3.170):

$$F_2 = G^{\text{RCOOH}}(A_{ij}, T_{2,k}) + G^{\text{RSH}}(A_{ij}, T_{2,k}) + G^{\text{R}}(A_{ij}, T_{2,k}) \rightarrow \max_{G^{\text{RCOOH}}, G^{\text{RSH}}, G^{\text{R}}} \quad (3.170)$$

При следующих ограничениях (3.171) – (3.172):

$$\frac{dG^{\text{Ag}}(A_{ij})}{dt} = \sum_{k=1}^{\text{КЦ}} G_k^{\text{Ag}}(A_{ij}, T_{1,k}) \geq z_7, \quad (3.171)$$

где z_7 – заданный ЛППР уровень производительности.

$$G_k^{\text{Ag}}(A_{ij}, T_{1,k}) = \chi_{\text{Ag}}^{\text{RCOOH}} G^{\text{RCOOAg}}(A_{ij}, T_{1,k}) + \chi_{\text{Ag}}^{\text{RSH}} G^{\text{RSAg}}(A_{ij}, T_{1,k}) + \chi_{\text{AgNO}_3}^{\text{R}} G^{\text{RAgNO}_3}(A_{ij}, T_{1,k}) \geq z_8, \quad (3.172)$$

где z_8 – заданный ЛППР уровень расходования плесневой культуры.

Решение задачи управления сводится к определению расходования плесневых культур в режиме сорбции.

Задача поиска экстремума решается методом наискорейшего спуска. Наборы решений, полученных при опытной эксплуатации для каждого типа сорбента, представлены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Изменение количества циклов в зависимости от уровня задания долевого использования активных центров

$z_4 = k_g G^{At} (0)$	Типы сорбентов – количество циклов					
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆
0,1	8	8	9	9	10	11
0,2	7	8	8	9	9	11
0,3	7	7	7	8	8	10
0,4	6	6	7	8	8	10
0,5	6	6	7	8	7	9

$G^{At} (0)$ – вес активных центров свежего сорбента.

Полученные оптимальные решения позволили получить оценки характеристик количества циклов использования биосорбентов каждого типа.

В результате решения задачи второго уровня осуществлена оценка роста активных центров биоккультуры и соответствующее им количество извлекаемого серебра на участке сорбции за общее количество циклов, соответствующее таблице 3.13. для каждого типа сорбента.

Таблица 3.14– Соотношение роста активных центров и количества извлекаемого серебра в зависимости от типа сорбента и количества циклов его использования

Кол-во цикл ов	Тип сорбента											
	B ₁				B ₂				B ₃			
	RCOON	RSH	R	Ag	RCOON	RSH	R	Ag	RCOON	RSH	R	Ag
6	12,9	5,3	2,3	38,8	11,9	4,2	3,3	36,7	11,2	3,7	3,52	31,4
7	12,1	4,2	1,8	35,8	11,3	3,6	3	33,2	11,1	3,1	3	30,5
8	11,3	3,9	1,4	33,1	9,9	3,1	2,7	30,2	9,1	2,9	2,6	25,4
9	11	2,8	0,9	31,1	9	2,9	2,2	29,1	9,6	2,4	2,3	24,6
	B ₄				B ₅				B ₆			
6	9,6	4,5	3,6	26,1	8,2	4,6	4,4	23,2	7,8	4,9	3,1	17,9
7	9,1	3,8	3	23,6	7,2	4,6	4	22,1	8,15	4,1	2,7	17,6
8	8,75	3,2	2,7	21,45	6,9	4,1	3,1	19,2	7,5	3,9	2,3	16
9	8,2	3	2,5	20,1	5,95	3,8	2,9	17,6	6,2	3,1	2	13,7
10	7,1	2,5	2	19,6	5,1	3,9	2,2	17,4	5,4	3,2	1,9	12,8
11	6,5	2,1	1,7	8,4	4,8	3,9	1,7	6,5	4,1	2,3	1,55	8,4

Как следует из приведённой таблицы, наиболее эффективно использование сорбента типа «леворин» (B₁) для 6 циклов использования. Увеличение количества циклов использования культуры приводит к сокращению роста

активных центров и уменьшению количества извлекаемого на участке серебра. Применение сорбентов вида B_4 , B_5 , B_6 менее эффективно, так как количество извлекаемого серебра по сравнению с B_1 меньше более чем в два раза (для сорбента B_6).

На основании полученных решений возможно рассчитать экономические показатели расхода биосорбента каждого типа и, соответственно, дохода, получаемого от извлечения серебра этими сорбентами. Использование этих оценок позволяет осуществить экономический расчёт рентабельности применения биосорбентов различных типов.

3.7 Постановка задачи управления нижнего уровня

На нижнем уровне управления необходимо решать задачу управления кинетикой процессов биосорбции. Так как серебросодержащие растворы в первом режиме каждой фазы цикла последовательно перетекают через колонны, реализация управления кинетикой процессов в первой колонне фазы цикла влечет за собой изменение кинетики процессов в двух последующих колоннах. Управление кинетикой протекающих процессов связано с тем, что содержание катионов серебра в протекающем растворе не стабилизировано и непрерывно изменяется.

Прибор, измеряющий концентрацию серебра в растворе, установленный на трубопроводе, подающем раствор в колонны, задаёт начальные условия при решении дифференциальных уравнений моделей и позволяет непрерывно оценивать кинетику процесса усвоения серебра сорбентом.

Физическая постановка задачи управления сформулирована следующим образом:

– определить режимы подачи серебросодержащего раствора таким образом, чтобы, при измеренной концентрации катионов серебра, усвоение серебра биосорбентом было максимальным.

Формальная постановка задачи представлена в виде (3.173):

$$F_3 = g_{\text{np}}^{\text{Ag}^+} - \beta_1 F_1 \gamma_1 ([\text{Ag}^+]_1 - [\text{Ag}^+]_2) \rightarrow \max_{g_{\text{np}}^{\text{Ag}^+}} \quad (3.173)$$

Задача характеризуется динамическими ограничениями (3.174) – (3.177):

$$\frac{dG_3^{\text{Ag}^+}}{dt} = \beta_2 F_2 \gamma_2 ([\text{Ag}^+]_2 - [\text{Ag}^+]_3) - g_1^{\text{Ag}^+} - g_2^{\text{Ag}^+} - g_3^{\text{AgNO}_3} \geq z_9 \quad (3.174)$$

$$\frac{dG_3^{\text{RCOOAg}}}{dt} = \chi_1^2 g_1^{\text{Ag}^+} \geq z_{10} \quad (3.175)$$

$$\frac{dG_3^{\text{R-SAg}}}{dt} = \chi_2^2 g_2^{\text{Ag}^+} \geq z_{11} \quad (3.176)$$

$$\frac{dG_3^{\text{RAgNO}_3}}{dt} = \chi_3^2 g_3^{\text{AgNO}_3} \geq z_{12} \quad (3.177)$$

где z – номинальные показатели кинетики, полученные при лабораторных испытаниях.

Решение задачи осуществляется методом наискорейшего спуска. Численное решение этой задачи с определёнными значениями количества раствора, перетекающего через колонны, представлено на рисунке 3.9. Как видно из приведённого графика, оптимальные решения поддерживают фиксированный расход раствора в первые 40 минут режима сорбции, а с уменьшением сорбционной ёмкости сорбента, расход раствора через колонну уменьшается.

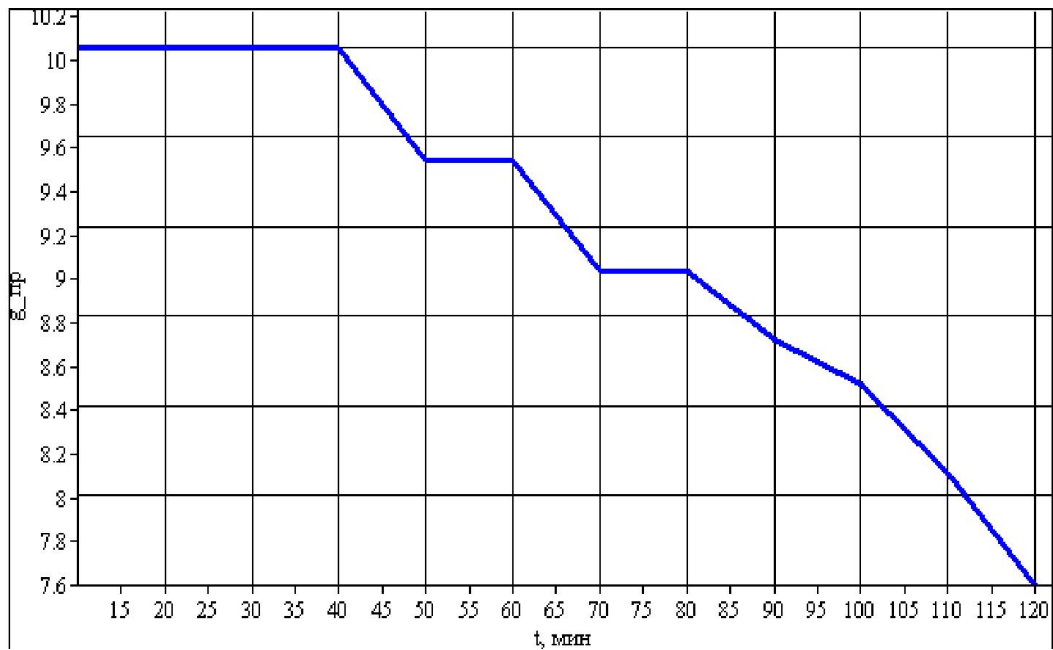


Рисунок 3.9— Оптимальные решения системы управления нижнего уровня по управлению расходом серебрясодержащего раствора

График численных решений задачи управления нижнего уровня, характеризующий количество сорбированного серебра в колонне A_{11} , в первой фазе первого цикла, приведён на рисунке 3.10.

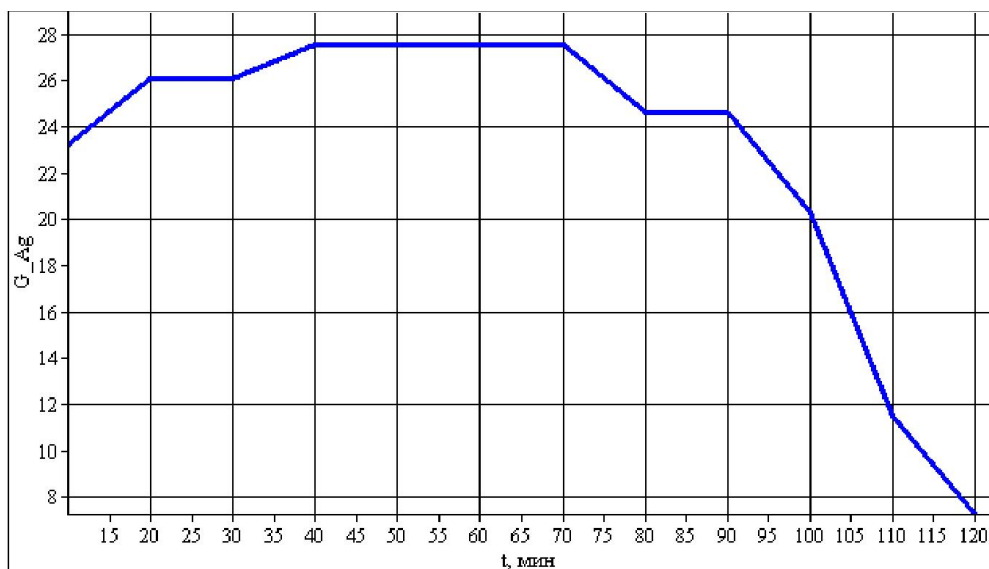


Рисунок 3.10— Оптимальные решения системы управления нижнего уровня по извлечению серебра в колонне A_{11} , в первой фазе первого цикла

В зависимости от принимаемых решений по управлению расходом раствора кинетика процесса сорбции имеет нелинейный характер. По мере насыщения сорбента количество извлекаемого серебра падает.

Характеристики роста плесневой культуры во второй-пятой фазах первого цикла колонны А₁₁ представлены графиками на рисунках 3.11-3.13.

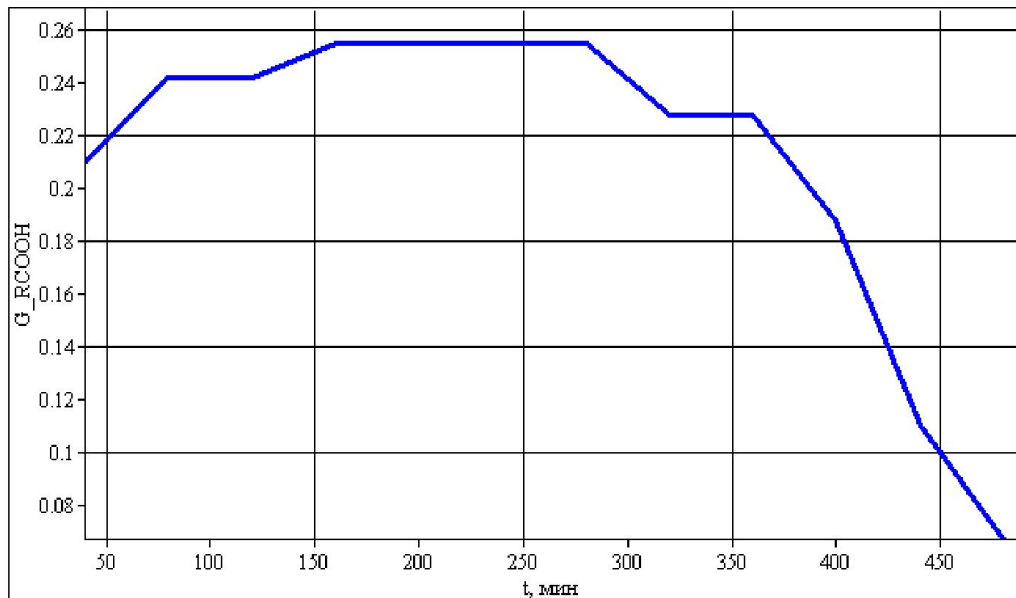


Рисунок 3.11– Рост культуры RCOOH в режиме восстановления

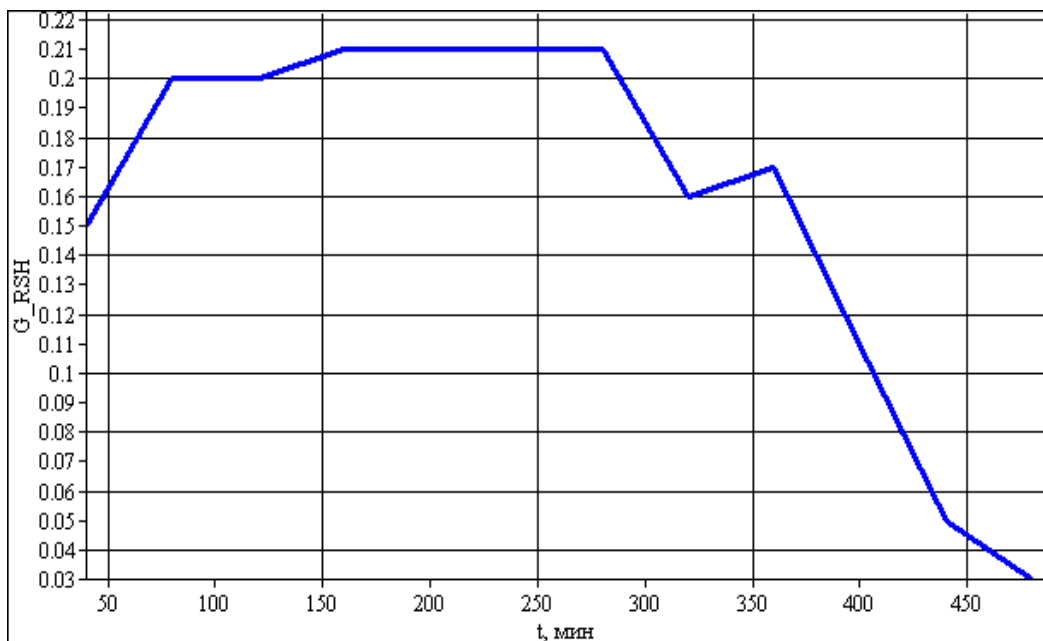


Рисунок 3.12– Рост культуры RSH в режиме восстановления

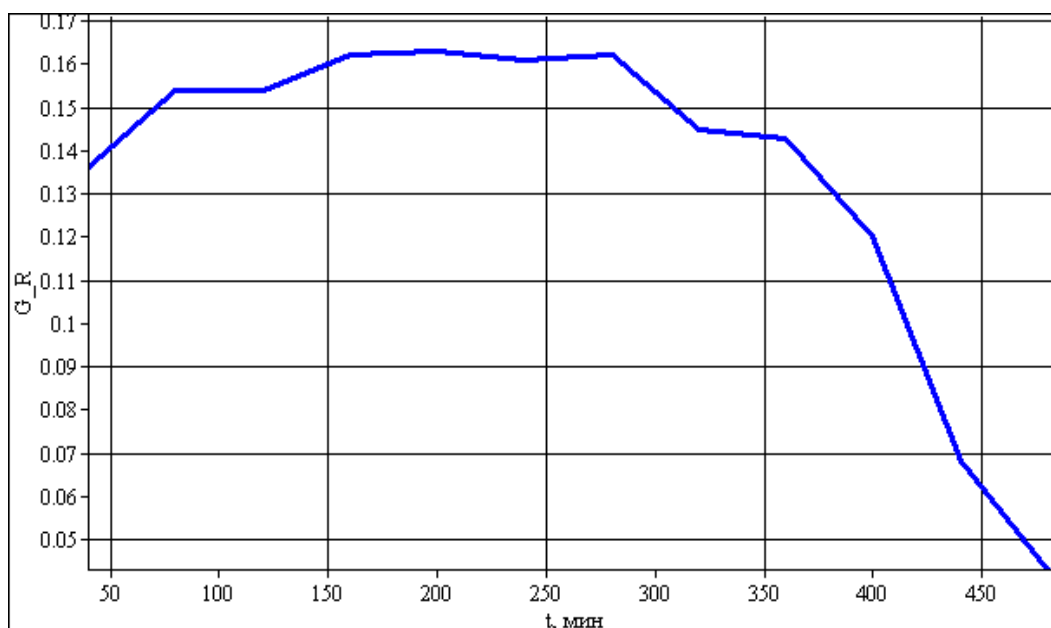


Рисунок 3.13– Рост культуры R в режиме восстановления

Как видно из графика, наиболее интенсивный рост культур RCOOH, RSH, R наблюдается с 80 по 280 минуты и переходит в режим насыщения к 480 минуте режима.

Приведённые зависимости показывают, что оптимальные решения задачи нижнего уровня соответствуют физико-химическим особенностям процессов сорбции и восстановления. Это свидетельствует о том, что оптимальное управление кинетикой процессов, протекающих в режимах сорбции и восстановления наилучшим образом использует свойства сорбента, что приводит к своевременному переключению режимов и увеличению производительности колонн участка биосорбции серебра.

3.8 Представление двух уровней управления в виде управляемой нейросети

Процессы, протекающие в каждой колонне, содержащей биосорбент, включая технологические циклы, режимы и фазы, представленные математической моделью прогноза состояний каждой колонны, согласно современным тенденциям, могут рассматриваться как слой нейросети [343]. Каждый нейрон этого слоя – дифференциальное уравнение, описывающее каждое

состояние. Таким образом, участок биосорбции, содержащий девять колонн, позволяет рассматривать нейросеть, состоящую из девяти слоёв.

Девятислойная нейросеть имеет множество входов с соответствующими взаимосвязями между слоями. Обучение нейросети осуществляется с помощью классических методов идентификации моделей, после чего каждое итеративное решение системы уравнений позволяет оценить состояния биосорбента и протекающего через него раствора. Логико-формальная модель предусматривает возможность технологического переключения в узлах нейросети с одного слоя на другой согласно матрице смежности (Таблица 3.5). Выход нейросети позволяет оценивать количество серебра, извлекаемого колоннами участка по завершении циклов использования биосорбента.

В первом технологическом цикле (первая строка таблицы 3.5) серебрясодержащий раствор протекает через колонны A_{11} , A_{26} , A_{38} . Если, в результате прогноза по математической модели процесса биосорбции (3.5) – (3.54), количество усвоенного первой колонной серебра $G_{11}^{Ag}(1)$ соответствует итерационным правилам (3.73), то есть достигает насыщения, осуществляется переключение колонны согласно логическому правилу (3.134), соответствующее второй строке таблицы 3.5. В этом случае работают колонны A_{12} , A_{26} , A_{38} . При этом связь между вторым, шестым и восьмым слоями нейросети осуществляется по нейрону, прогнозирующему изменения концентраций в растворе. После этого переключения первая колонна переходит на второй режим работы – восстановление технологических свойств сорбента. Восстановление технологических свойств сорбента осуществляется при всех оставшихся переключениях (2-5) первого цикла. Связь между составляющими первого слоя, характеризующего первую и вторую фазы, осуществляется по нейронам (3.18) – (3.20), характеризующим количество центров плесневой культуры.

Если прогноз состояний роста активных центров плесневой культуры (3.74) – (3.87) соответствует итеративным условиям (3.88), то, согласно правилу (3.136), происходит переключение нейронов нейросети на второй цикл (первая строка матрицы), в результате чего в первом слое нейросети прогноз состояний

процесса биосорбции осуществляется по другим начальным условиям с соответствующим входом в этот узел нейросети.

Таким образом, каждый слой нейросети состоит из нейронов, свойства которых описываются системами уравнений процессов биосорбции и восстановления технологических свойств (первая и вторая фазы). Количество таких составляющих нейросети кратно количеству циклов, присущих данному виду сорбента В. Оценка состояний в этой части нейросети подчинена итеративному правилу (3.126). После выполнения условий логического правила (3.135) осуществляется переключение колонны на режим десорбции (3.91) – (3.125), после завершения которой в колонне осуществляется замена сорбента. Использование новой порции сорбента, загруженного в колонну, соответствует заданию начальных условий на вход данного слоя нейросети.

Общая связь между колоннами осуществляется по нейронам, характеризующим свойства раствора, проходящего через колонны (слои нейросети), соответствующие каждой строке таблицы 3.5.

Функциональные особенности нейросети, входы и соответствующая оценка состояний отражены на рисунке 3.14, где приведена схема последовательного включения колонн A_{12} , A_{26} , A_{38} и указаны переключения в виде управляющих воздействий U_1 , U_4 , U_5 , в наименовании которых приведены номера колонн, на которых осуществляется переключение в соответствии с логическими правилами матрицы смежности (Таблица 3.5).

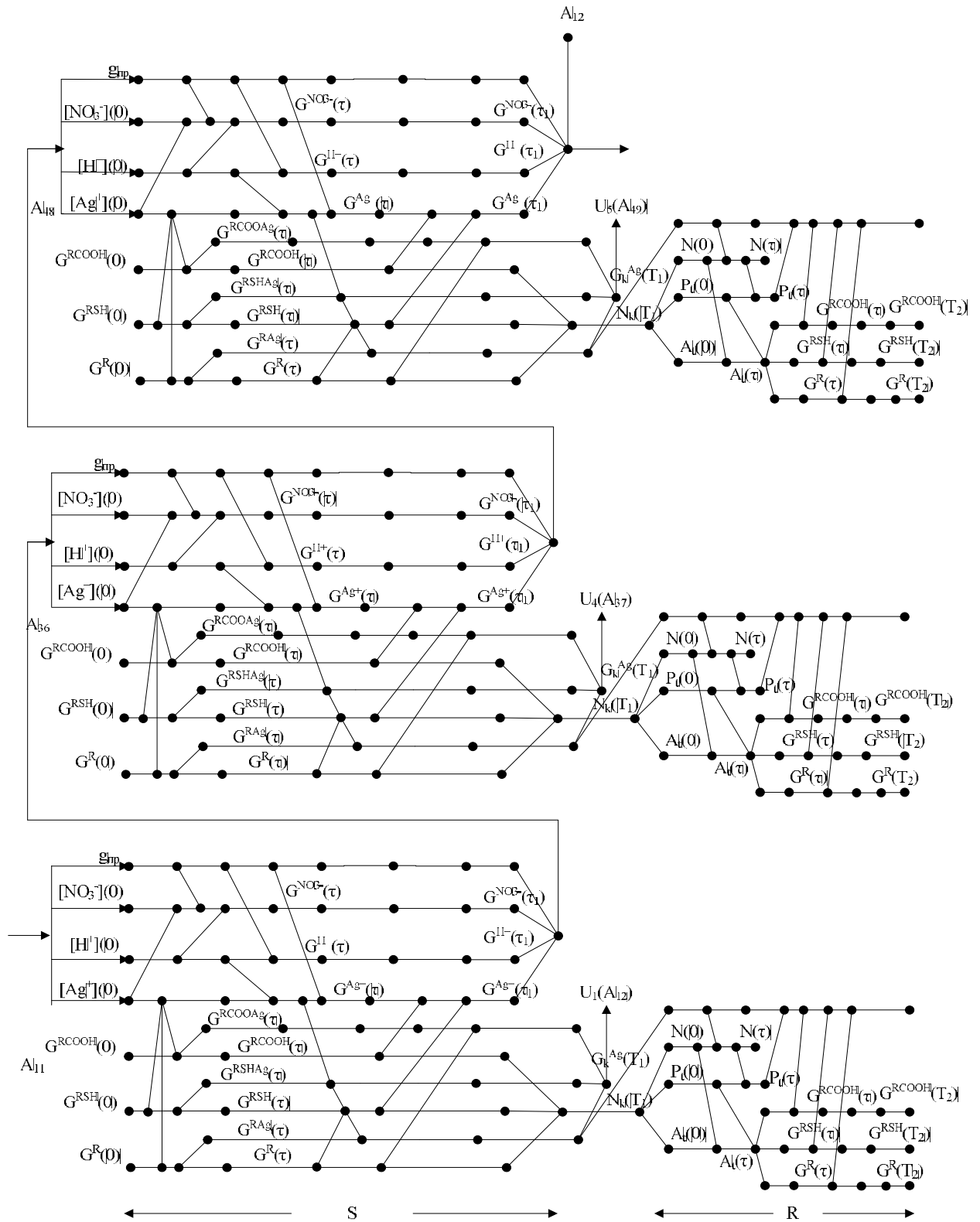


Рисунок 3.14 – Функциональная схема соединения нейронов

При рассмотрении функционирования нейросети для каждого слоя (колонны) выделены режимы: R (Restore) – восстановления сорбционной способности, S (Sorption) – сорбция, D (Desorption) – десорбция. Режимы

R-S составляют технологическую фазу функционирования слоя нейросети. Каждый технологический цикл R-S содержит пять фаз, а в зависимости от вида сорбента, каждый слой, характеризующий состояние сорбента, может использоваться 5-6 раз, последовательно чередуя режимы. По завершении последнего цикла осуществляется десорбция серебра, накопленного материалом колонны, то есть завершается использование сорбента в колонне, после чего следует его замена. Последовательность режимов, фаз и циклов, как отображение матрицы смежности (Таблица 3.5) приведена в таблице 3.15.

Таблица 3.15– Последовательность режимов переключения слоев и нейронов в слое

j \ i	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	D	0	0	S	R	R	S	S	R	
5		D	0	0	S	R	S	S	R	

В таблице: i – номер колонны, j – номер фазы. Последние строки таблицы характеризуют режим десорбции, после которого осуществляется замена сорбента в данной колонне и восстановление начальных условий и входов слоя нейросети, характеризующего работу данной колонны.

Аналогично, согласно таблице 3.15, выглядят схемы режимов функционирования нейросетей для последующих циклов. Сочетание режимов, фаз и циклов (Таблица 3.15) и графическое отображение соединений слоёв нейросети и выбора режимов, является основанием для разработки алгоритма принятия решений по переключению режимов на втором уровне системы управления.

3.9 Разработка алгоритма системы управления нижнего уровня

Укрупнённая блок-схема системы управления, представляющая все три уровня системы, представлена на рисунке 3.15.

В данном подразделе разработан алгоритм и представлена функциональная схема системы управления нижнего уровня (Рисунок 3.16).

На трубопроводе, подающем вторичный серебросодержащий раствор, установлены измерительные приборы, контролирующие показатели раствора: расходомер, измеряющий поток раствора ($g_{пр}$), концентратомер, измеряющий содержание серебра в растворе ($[Ag^+]_1$), измеритель активности ионов водорода в растворе (уровня pH).

Аналоговые сигналы, поступающие от этих приборов, проходят через блок 1.1 – аналогово-цифровой преобразователь устройства связи с объектом (АЦП УСО), где преобразуется в цифровую форму, доступную компьютерной обработке. Со второго уровня из устройства коммутации (блок 2.4), согласно логическим правилам переключения (3.133) и матрице смежности (Таблица 3.15), определяется очерёдность и номера колонн, соответствующие технологическому режиму (сорбция S или восстановление R), фазе и циклу. Оцифрованные характеристики раствора поступают в первую колонну фазы (Таблица 3.15),

задавая начальные условия задачи Коши, соответствующие слою нейросети (Рисунок 3.14).

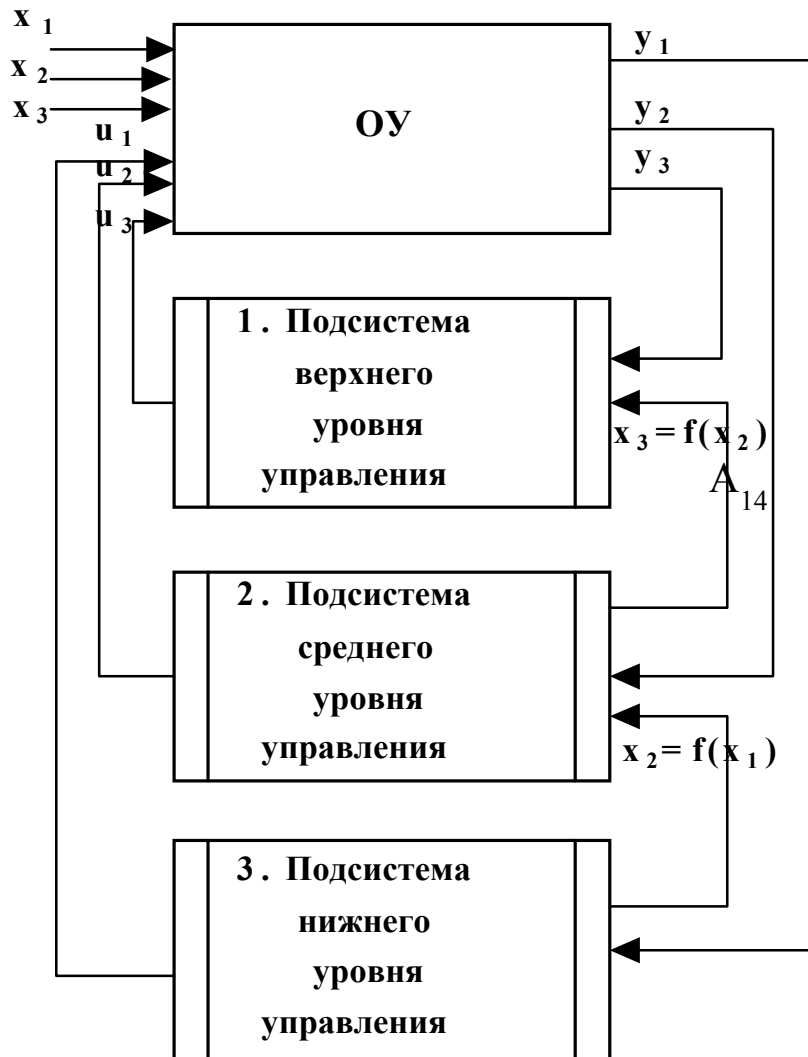


Рисунок 3.15 – Укрупнённая блок-схема системы управления

Оценка состояний (режим сорбции S) внутри колонны осуществляется в блоках 1.2, 1.3 – для первой колонны фазы, по уравнениям (3.5) – (3.54). Показатели раствора, выходящего из первой колонны (A_{11} , I режим, I фаза, I цикл), являются входными для второго слоя нейросети. Соответственно, оценка состояний (режим сорбции S) шестого слоя нейросети (колонна A_{26} , I режим, I фаза, I цикл) осуществляется по соответствующей модели (в блоках 1.4, 1.5).

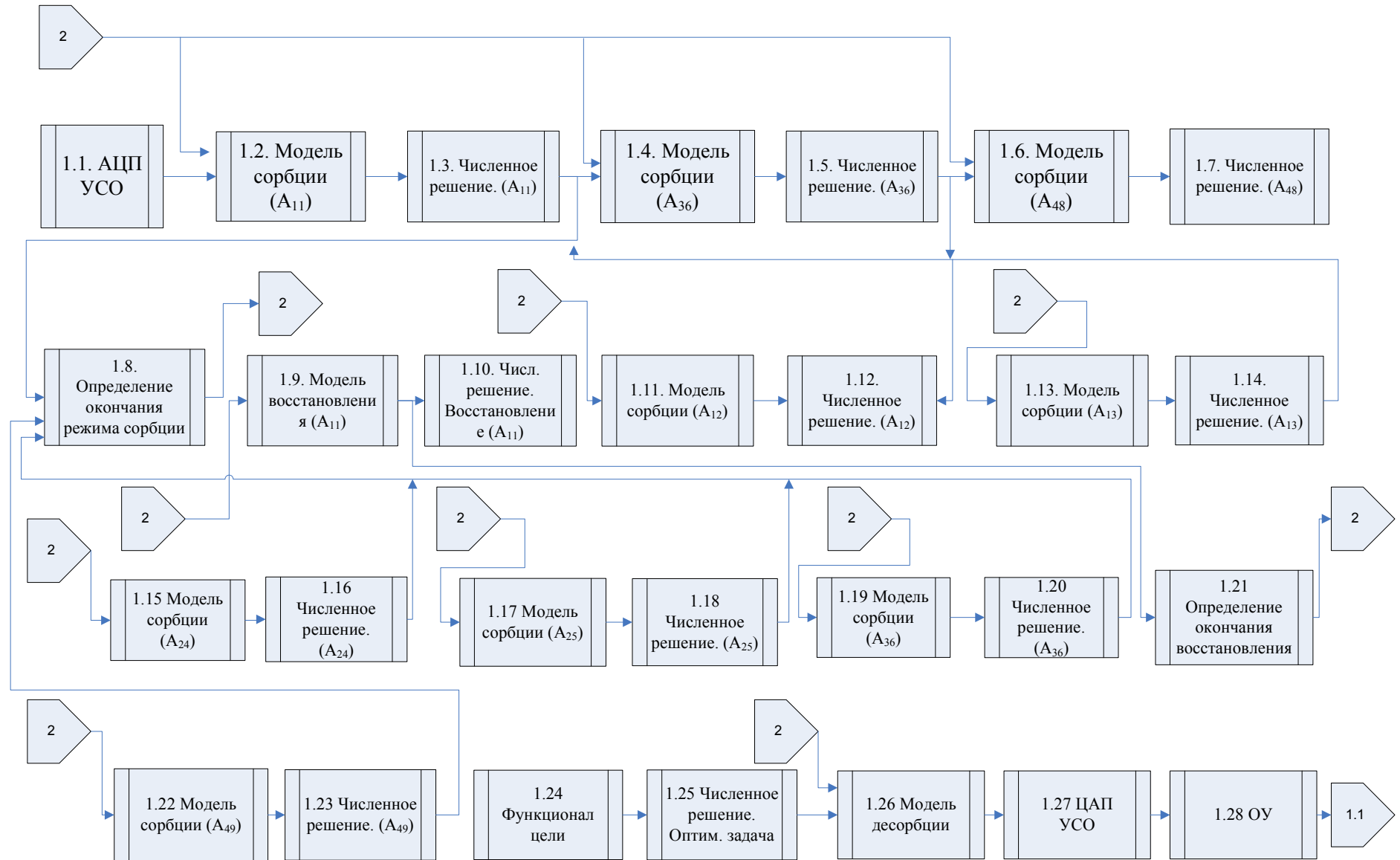


Рисунок 3.16– Функциональная схема системы управления нижнего уровня

Аналогично осуществляется оценка состояний восьмого слоя нейросети в блоках 1.6, 1.7 (колонна А38, I режим, I фаза, I цикл). В блоке 1.8 осуществляется оценка режимов насыщения по заданной точности ε_1 , ε_2 , ε_3 (правило 3.73) итеративной процедуры решения систем уравнений моделей методом Рунге-Кутты. Если прогноз показателей сорбции для первой колонны свидетельствует о нелинейности вида «насыщения», сигнал из блока 1.8 поступает в блоки 2.3, 2.4 системы второго уровня и, согласно правилу (3.134), матрице смежности (Таблица 3.15) коммутатор 2.4 вырабатывает сигнал на переключение подачи раствора, меняя первую колонну слоя.

Процесс переходит на вторую фазу первого цикла (A_{12} , I режим, II фаза, I цикл), при этом первая колонна (A_{11}) переводится в режим восстановления технологических свойств сорбента на последующие четыре фазы. Прогноз режима восстановления технологических свойств сорбента осуществляется с использованием уравнений (3.71) – (3.84).

Во второй фазе по начальным условиям задачи Коши, полученным из блока 1.2 по результатам измерений датчиков в растворе, прогноз показателей режима сорбции осуществляется для второго слоя нейросети (колонна A_{12} , I режим, 2 фаза, 1 цикл). Математическая модель, прогнозирующая состояния объекта управления в этом слое, позволяет осуществлять оценку показателей сорбции в колонне A_{12} (блоки 1.11, 1.12). Режимы коммутатора предусматривают переключение вторых колонн через 4 фазы, третьих колонны – через 10 фаз.

Аналогично, после того, как итеративный прогноз модели второго слоя, согласно правилам (3.73) показывает, что процесс в колонне A_{12} достиг насыщения, из блока 1.8 сигнал поступает на второй уровень, где в блоках 2.3, 2.4, согласно правилам (3.134) и матрице смежности (3.5) вырабатывается сигнал на переключение колонны A_{12} в режим восстановления R, переводя поступление серебросодержащего раствора в колонну A_{13} (A_{13} , I режим, III фаза, I цикл). При этом, вторая и третья колонны также работают в режиме сорбции. Колонна A_{13} работает в I режиме (режим S), III фазе, I цикла. Прогноз осуществляется по

модели третьего слоя нейросети, в блоках 1.13-1.14. При этом колонна A_{12} работает в режиме восстановления (R).

Работа колонны A_{13} в режиме сорбции (S) продолжается до тех пор, пока прогноз состояний колонны по третьему слою нейросети удовлетворяет итерационному неравенству (3.73). Невыполнение неравенства означает, что режим, осуществляемый в колонне A_{13} , соответствует насыщению сорбента. После итерационной оценки режима насыщения, реализуемой в блоке 1.8, в подсистему второго уровня поступает сигнал, на основании которого решения блоков 2.3, 2.4 этой системы, согласно правилам 3.134 и таблице 3.15, предусматривают переключение колонны A_{13} на режим восстановления (A_{13} , II режим (R), IV фаза, I цикл). В соответствии с командой переключения, выработанной системой второго уровня, изменяется подача раствора в первую колонну (A_{14} , I режим, IV фаза, I цикл), в соответствии со структурой переключения, приведённой на рисунке 3.8. При этом, прогноз состояния четвёртого слоя нейросети осуществляется в блоках 1.15 – 1.16. В пятой фазе, после оценки насыщения сорбента в первой колонне A_{14} и во второй колонне A_{26} по командам второго уровня осуществляется переключение потока серебросодержащего раствора на первую колонну A_{15} и вторую колонну A_{27} ($(A_{15}, I \text{ режим}, V \text{ фаза}, I \text{ цикл}) \wedge (A_{27}, I \text{ режим}, V \text{ фаза}, I \text{ цикл})$), а колонны A_{14} и A_{26} переводятся в режим восстановления ($(A_{14}, II \text{ режим}, V \text{ фаза}, I \text{ цикл}) \wedge (A_{26}, II \text{ режим}, V \text{ фаза}, I \text{ цикл})$). Для этой фазы оценка состояний осуществляется по моделям пятого (для колонны A_{15}) и седьмого (колонна A_{27}) слоёв нейросети в блоках 1.7 – 1.18, 1.19-1.20, соответственно. Прогноз режима восстановления технологических свойств сорбента осуществляется по составляющим моделям каждого слоя для каждой колонны в блоках 1.10 – 1.11. Оценка завершения роста плесневой культуры сорбента производится в блоке 1.21 согласно правилам (3.88).

В данном подразделе описана функциональная схема, характеризующая алгоритм системы управления первого уровня для пяти фаз, составляющих один цикл (первый). В зависимости от вида плесневой культуры (биосорбента типа B_i ,

$i = \overline{1,6}$), зафиксированного в базе данных системы второго уровня, осуществляется выбор параметров моделей сорбции и восстановления, представленных в программном обеспечении системы как нормативно-справочная информация (НСИ). Согласно этим данным, определяется количество фаз и циклов для каждого типа сорбента и, соответственно, количество строк матрицы смежности (Таблица 3.15).

После восстановления технологических свойств сорбента, прогнозируемых для каждого слоя, и оцениваемых по правилам 3.88, осуществляется переход на каждый последующий цикл. Переключение режима восстановления R на режим сорбции S в последующих циклах подчинено правилам (3.136). После использования предельных возможностей биосорбента и накопления определённого количества серебра, происходит переключение колонны на режим десорбции DS, согласно правилу (3.135). При этом оценка состояний режима десорбции, осуществляется в части нейрослоя, характеризующего переводимую в режим десорбции колонну по уравнениям (3.91) – (3.125) в блоке 1.26, после чего поступает команда на замену сорбента в колонне. Оптимальные решения по управлению процессом определяются в блоках 1.24-1.25, в результате чего цифровое управление передаётся на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП УСО), на основании которого изменяется расход серебросодержащего раствора и, соответственно, уровень и время пребывания раствора в колоннах.

3.10 Разработка алгоритма системы управления второго уровня

Этот алгоритм (Рисунок 3.17) содержит две составляющие: дискретное управление режимами переключения колонн (блоки 2.1-2.4) и непрерывное управление режимами (блоки 2.5-2.7). При дискретном управлении блок 2.1 с первого уровня управления (блоки 1.8-1.21) поступает сигнал о завершении режимов сорбции (S) и восстановления технологических свойств сорбента (R).

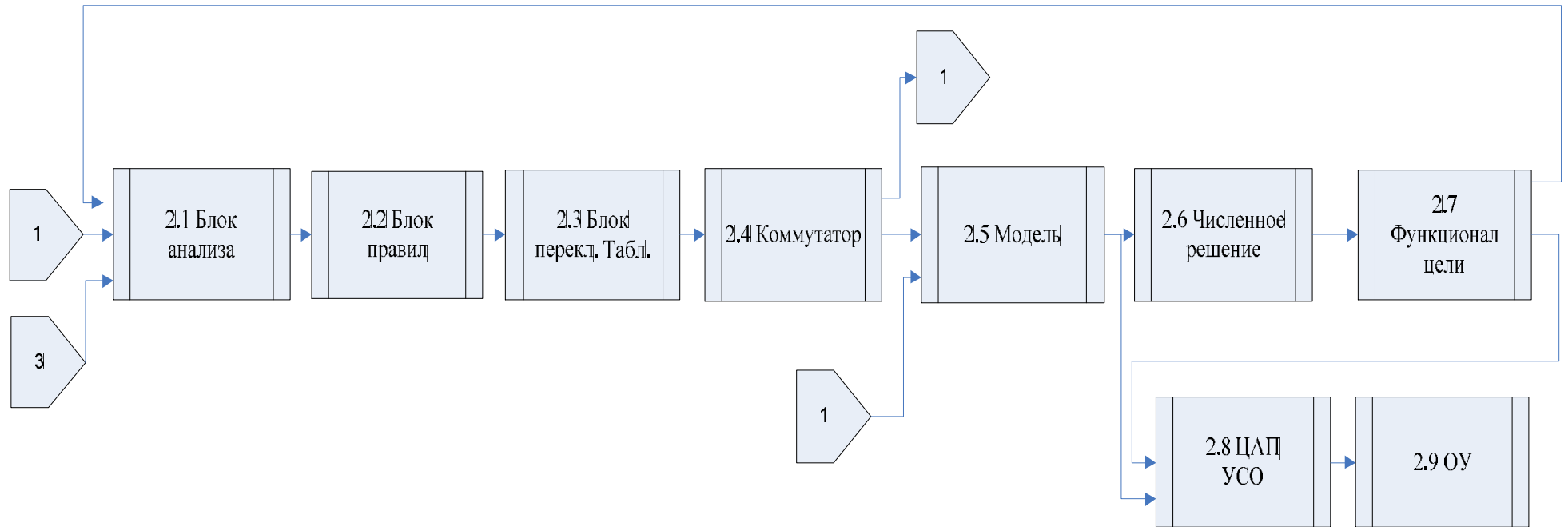


Рисунок 3.17– Алгоритм системы управления среднего уровня

В блоке 2.1 осуществляется анализ режима, фазы и цикла работы колонн, результаты которого затем сопоставляются с правилами переключения режимов (3.134) – (3.136, (3.145)). Если переключение режимов и колонн осуществляется в соответствии с командами системы второго уровня управления и установленными правилами окончания режимов, в блоке 2.3 определяется режим переключения в соответствии с матрицей смежности (Таблица 3.15).

Найденное в строке матрицы соответствующее переключение передается в блок 2.4, выполняющий функции коммутатора, который определяет, какая часть модели оценки состояний соответствующего слоя нейросети будет осуществлять прогноз кинетики протекающих процессов (для режимов сорбции S или восстановления R).

Выработанное в коммутаторе дискретное управление двоичного вида передается в систему первого уровня, определяя функционирование подмоделей оценки состояний слоя нейросети, выбранного в блоке 2.4. Непрерывная составляющая системы второго уровня управления осуществляет прогноз количества серебра, усвоенного сорбентом, в каждом режиме, фазе и цикле (блок 2.5.2, с использованием уравнений (3.137)-(3.140)), осуществляя расчет количества серебра, накопленного основными колоннами (первый – третий уровни) и, соответственно, расхода активных центров, уровня насыщения сорбционной способности плесневой культуры (3.141)-(3.144).

Полученные по модели расчётные значения этих показателей передаются в блок 2.7, в котором модели прогноза играют роль динамических ограничений оптимизационной задачи, решаемой в блоке 2.7. Кроме этого, прогноз количества серебра, накопленного за все циклы, в режимах сорбции, соответствующей типу сорбента, служит основанием для перевода конкретной колонны в режим десорбции (DS) с последующей заменой сорбента в колонне. В блоке 2.7 определяется управляющее воздействие, предназначенное для максимального использования свойств сорбента. Это сказывается на определении максимально возможного количества циклов.

Решение блока 2.7, определяющее количество циклов использования сорбента в колонне, передаётся в блок 2.1, корректируя законы дискретного управления и, соответственно, количество строк матрицы смежности (Таблица 3.15).

3.11 Разработка алгоритма системы управления верхнего уровня

Системы управления нижнего и среднего уровней предназначены для реализации автоматического управления режимами сорбции (S), восстановления технологических свойств сорбента (R) и десорбции (DS). Алгоритм системы верхнего уровня (Рисунок 3.18) предназначен для реализации автоматизированного управления участком биосорбции серебра, в котором часть информации (тип сорбента V_i , его количество $CG(V_i)$, цена плесневой культуры $CT(V_i)$), предлагаемой в качестве сорбента, интерактивно вводится лицом, принимающим решения (ЛПР), а алгоритм системы позволяет определять оптимальные решения о приобретении той или иной культуры. Данные о вариантах закупки сорбента обрабатываются в блоках 3.1-3.2, где модель представлена совокупностью двух типов уравнений. Дифференциальные уравнения (3.153) – (3.157) позволяют оценить динамику использования сорбентов различных типов при проведении процесса, обобщая результат функционирования всех колонн участка, заполненных сорбентом типа V_i . Данные для этого обобщения поступают из системы второго уровня. Вторая совокупность уравнений представлена регрессионными полиномами (3.158) – (3.164), которые позволяют осуществить статический, наилучший в среднеквадратическом смысле, расчёт технико-экономических и стоимостных показателей использования сорбентов различных типов плесневой культуры.

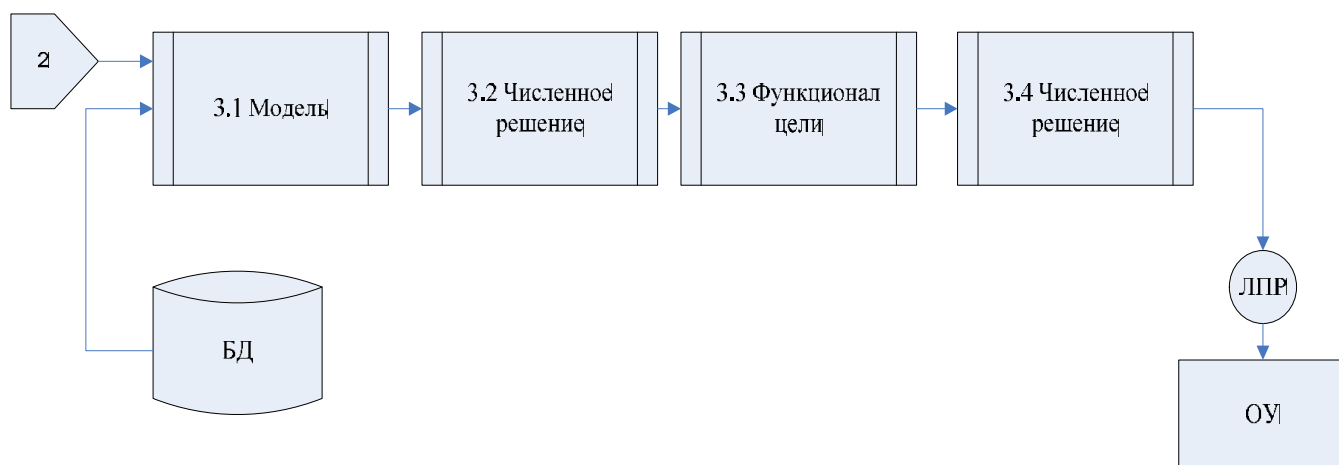


Рисунок 3.18 – Алгоритм системы управления верхнего уровня

Совокупность уравнений всех типов выступает в качестве ограничений решений оптимизационной задачи, реализованной в блоках 3.3-3.4. Решение этой задачи заключается в выработке рекомендаций, поступающих ЛПР о закупке сорбента (режим «Советчик»). На основании этих рекомендаций ЛПР может осуществлять заказ на приобретение определённого количества плесневой культуры, поставляемой фармацевтическими компаниями. База данных (БД) содержит характеристики различных типов сорбентов, на основании которых функционируют математические модели в блоках 3.1, 3.2.

3.12 Разработка функциональной структуры и блок-схемы алгоритма системы управления участком биосорбции серебра

На основании перечисленных особенностей трёхуровневой системы с использованием методологии функционального моделирования IDEF0 разработана функциональная схема системы, описывающая процессы, характеризующие деятельность системы управления (Рисунок 3.19).

В приведённой схеме отображены входы системы управления, действия, преобразующие эти входы, управляющие воздействия и ограничения, а также механизм – автоматизированная и автоматическая составляющие системы.

Согласно методологии разработки систем управления процессами, создана развёрнутая блок-схема алгоритма, представленная на рисунке 3.20.

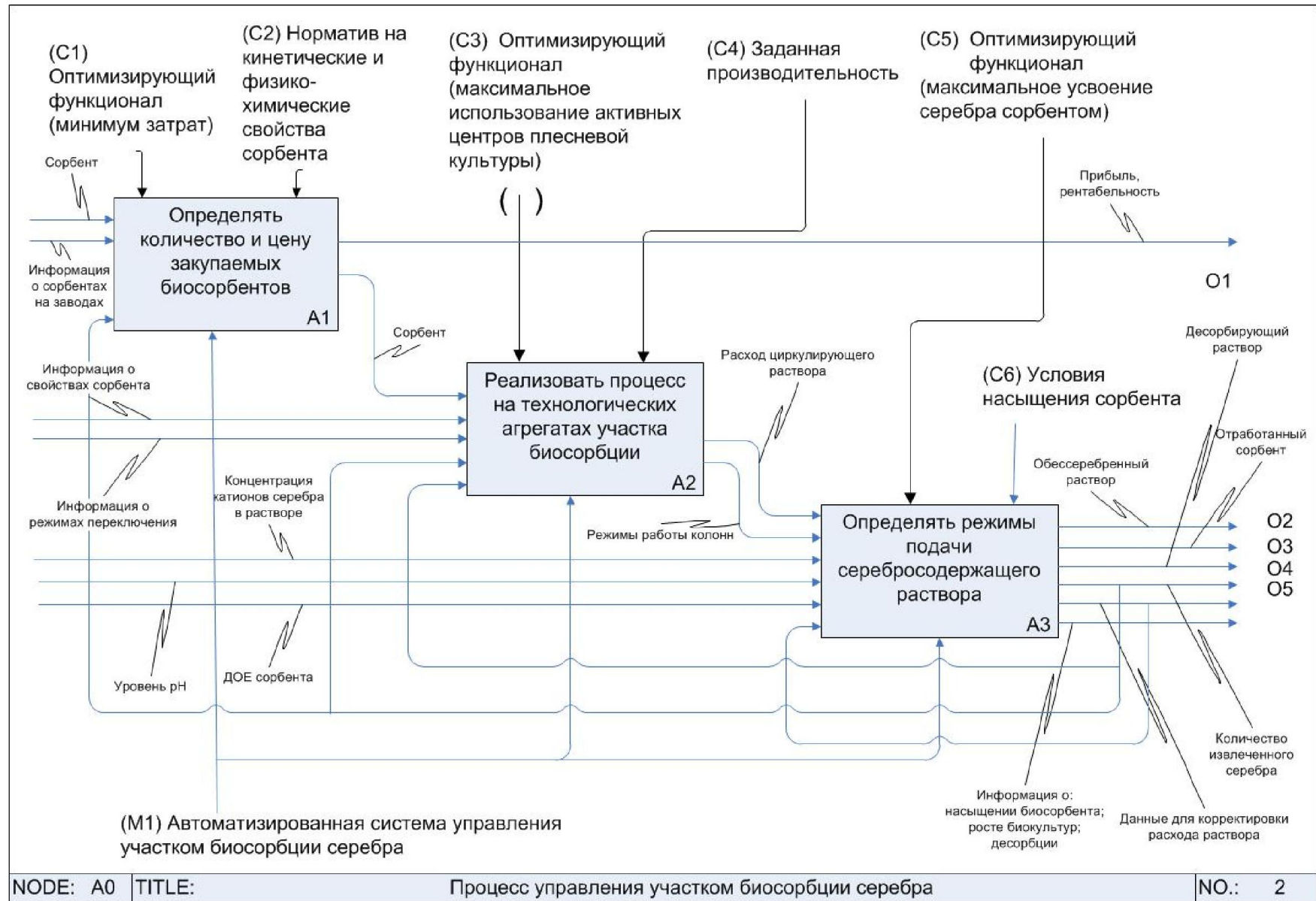


Рисунок 3.19– Функциональная схема системы

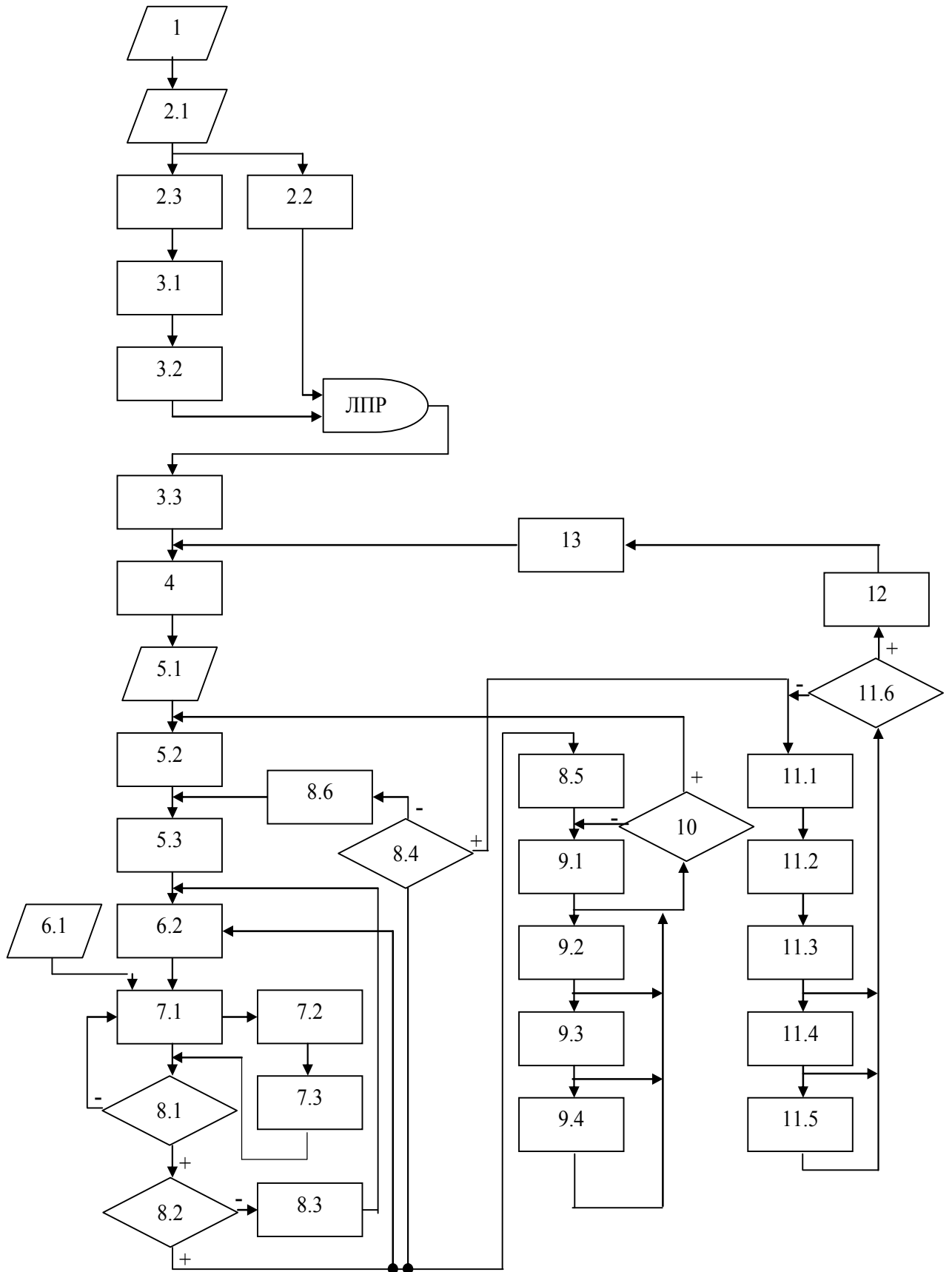


Рисунок 3.20– Блок-схема алгоритма системы управления участком биосорбции серебра

Описание функционирования блок-схемы:

1. Ввод данных об экономико-технических характеристиках сорбента, о количестве и цене различных видов 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 серебросодержащем 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.
 - 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.

На основании разработанных математических моделей, постановок задач управления и численных методов решения уравнений модели и поиска оптимальных значений, с использованием функциональной схемы и блок-схемы алгоритма, разработано программное обеспечение системы. Программное обеспечение представлено как экспертный программный комплекс и содержит структуру базы данных. Модульная структура элементов экспертного программного комплекса (ЭПК) «Моделирование процессов биосорбции серебра» представлена на рисунке 3.21.

В период опытной эксплуатации апробированы рекомендации системы в режиме «Советчик», которые позволили рассчитать обобщённые технико-экономические показатели функционирования системы при управлении участком биосорбции.

Основные узлы и программные модули экспертного программного комплекса (ЭПК). Структурная схема.

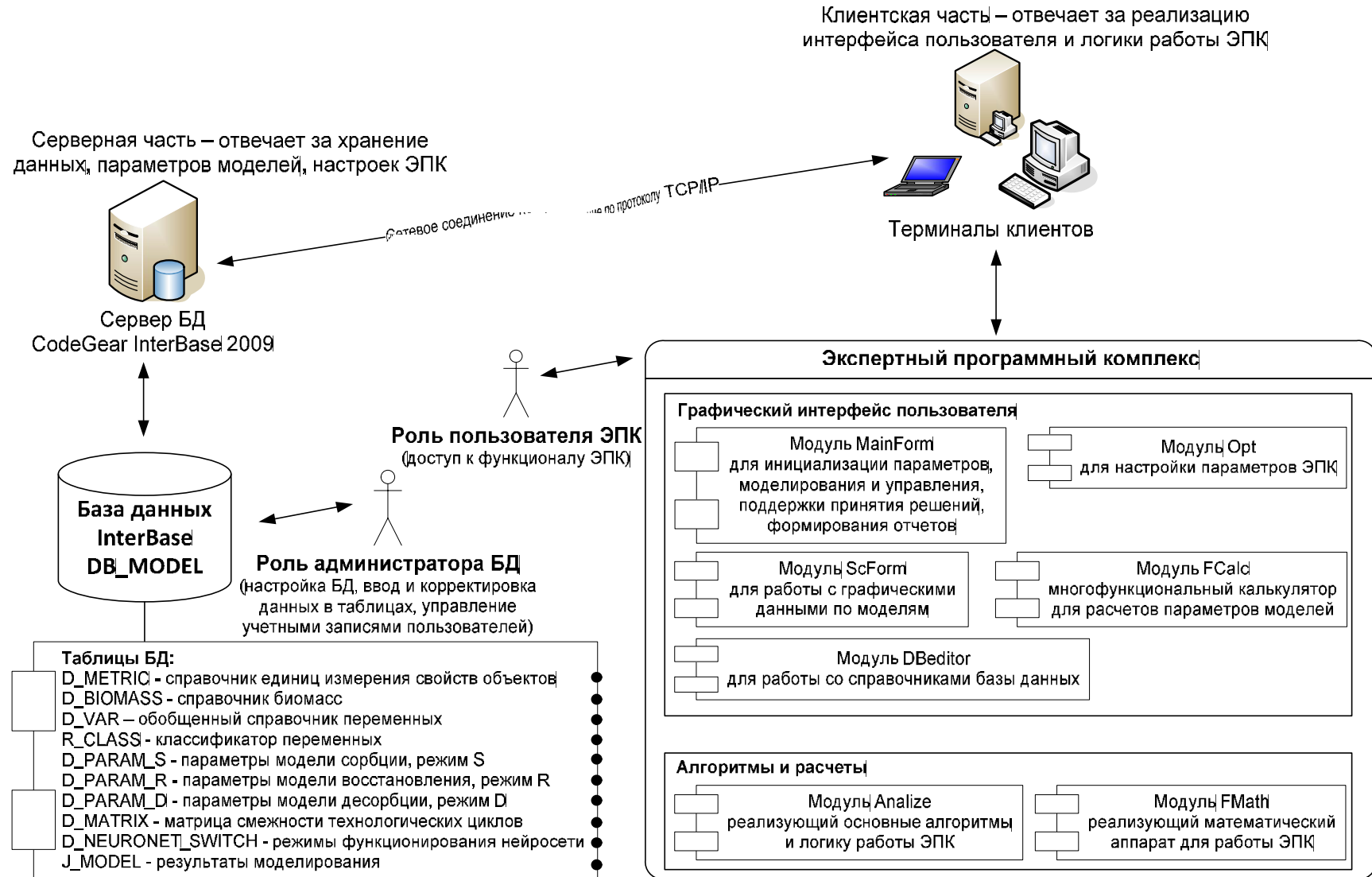


Рисунок 3.21– Общая структура программных модулей комплекса

3.13 Экономические показатели опытной эксплуатации системы управления участком биосорбции серебра

В этом подразделе приведены эксплуатационные и технико-экономические показатели биосорбентов, полученные в результате решений, рекомендуемых системой. Характеристики выбранных биомасс, используемых в процессах биосорбции серебра, приведены в таблице 3.16.

Таблица 3.16–Рекомендуемые системой характеристики биосорбентов

№ п/п	Наименование биокультуры	Предельные (заданные) уровни использования						ПСОЕ, гAg/кг
		0,5 ПСОЕ		0,4 ПСОЕ		0,3 ПСОЕ		
		К-во циклов	Время насыщ.	К-во циклов	Время насыщ.	К-во циклов	Время насыщ.	
1	Леворин	6	48	7	52	8	56	19,8
2	Неомицин	6	49	7	54	8	60	19,2
3	Гентамицин	6	51	6	56	7	64	17,2
4	Фузидин	5	54	6	60	7	64	15,0
5	Эритромицин	5	56	6	62	7	68	14,1
6	Линкомицин	4	60	5	66	6	70	12,0

Как видно из усреднённых данных, приведённых в таблице 3.16, время насыщения и количество циклов использования биосорбентов изменяется в зависимости от степени изменения обменной ёмкости, который задаётся ЛПР и поддерживается системами среднего и нижнего уровней управления.

Данные таблицы 3.16 в совокупности с решениями системы верхнего уровня позволили определить усреднённые показатели замен биосорбентов в одной колонне за месяц, результаты которых приведены в таблице 3.17.

Таблица 3.17– Усреднённые технологические показатели уровней использования биосорбентов, рекомендуемые системой

№ п/п	Наименование биокультуры	Предельные (заданные) уровни использования					
		0,5 ПСОЕ		0,4 ПСОЕ		0,3 ПСОЕ	
		Кол-во замен	Вес сорбента, кг	Кол-во замен	Вес сорбента, кг	Кол-во замен	Вес сорбента, кг
1	Леворин	15	218	13,8	201	12,9	186
2	Неомицин	14,7	213	13,3	193	12,0	174
3	Гентамицин	14,1	205	12,2	177	11,3	163
4	Фузидин	13,3	193	12,0	174	11,3	163
5	Эритромицин	12,9	186	11,6	168	10,6	153,5
6	Линкомицин	12,0	174	11	158	10,3	149

Как следует из приведённых в таблице 3.17 данных, количество и вес заменяемых в одной колонне за месяц биомасс зависит от их кинетических и эксплуатационных свойств. На основании показателей одной колонны рассчитаны обобщённые показатели замены сорбента на девяти колоннах участка биосорбции и, соответственно, расходы в долларах (у.е.) на приобретение этих культур. Данные приведены в таблице 3.18.

Таблица 3.18– Рекомендуемые объёмы закупаемых сорбентов и расходы на их приобретение

№ п/п	Наименование биокультуры	Предельные (заданные) уровни использования					
		0,5 ПСОЕ		0,4 ПСОЕ		0,3 ПСОЕ	
		Кол-во замен	Расход, у.е.	Кол-во замен	Расход, у.е.	Кол-во замен	Расход, у.е.
1	Леворин	1982	153,9	1809	144	1674	134,1
2	Неомицин	1917	172,9	1937	156,6	1566	141,3
3	Гентамицин	1845	168,3	1773	159,3	1467	132,3
4	Фузидин	1737	173,7	1566	156,6	1467	146,7
5	Эритромицин	1674	184,5	1512	166,5	1382	152,1
6	Линкомицин	1566	130,5	1422	120,6	1341	114,3

Приведённые в таблице 3.18 данные позволили рассчитать по уравнениям модели верхнего уровня обобщённые показатели расходов на приобретение биокультур для участка на месяц.

Данные, характеризующие количество серебра, извлекаемого сорбентом в одной колонне и соответствующий доход, оценённый по биржевой котировке серебра, приведён в таблице 3.19.

Таблица 3.19– Обобщённые показатели объёмов и доходов, рассчитанные системой на месяц

№ п/п	Наименование биокультуры	Предельные (заданные) уровни использования					
		0,5 ПСОЕ		0,4 ПСОЕ		0,3 ПСОЕ	
		Вес серебра, кг	Стоим., у.е.	Вес серебра, кг	Стоим., у.е.	Вес серебра, кг	Стоим., у.е.
1	Леворин	4,32	5184	3,98	4776	3,68	4416
2	Неомицин	4,09	4908	3,71	4452	3,34	4008
3	Гентамицин	3,53	4236	3,39	4068	2,8	3360
4	Фузидин	2,9	3480	2,6	3120	2,45	2940
5	Эритромицин	2,62	3144	2,37	2844	2,16	2592
6	Линкомицин	2,1	2520	1,9	2280	1,8	2160

Данные таблицы 3.19 свидетельствуют о том, что с уменьшением порогового значения использования сорбента количество извлекаемого серебра уменьшается. Обобщённые показатели количества серебра, извлекаемого девятью колоннами участка и соответствующий доход за месяц приведены в таблице 3.20.

Таблица 3.20– Обобщённые показатели технико-экономической деятельности участка за месяц

№ п/п	Наименование биокультуры	Предельные (заданные) уровни использования					
		0,5 ПСОЕ		0,4 ПСОЕ		0,3 ПСОЕ	
		Вес серебра, кг	Стоим., у.е.	Вес серебра, кг	Стоим., у.е.	Вес серебра, кг	Стоим., у.е.
1	Леворин	38,8	46656	35,82	42984	33,12	39744
2	Неомицин	36,8	44172	33,39	40068	30,06	36072
3	Гентамицин	31,8	38124	30,51	36612	25,2	30240
4	Фузидин	26,1	31320	23,4	28080	22,05	26466
5	Эритромицин	23,58	28296	21,33	21596	19,44	23328
6	Линкомицин	18	22680	17,1	20520	16,2	19440

На основании обобщённых показателей технико-экономической деятельности участка биосорбции за месяц осуществлена оценка затратного механизма при использовании биосорбентов за месяц. Данные приведены в таблице 3.21.

Таблица 3.21– Обобщённые показатели расчёта прибыли

№ п/п	Наименование биокультуры	Предельные (заданные) уровни использования								
		0,5 ПСОЕ			0,4 ПСОЕ			0,3 ПСОЕ		
		Расход, у.е.	Доход, у.е.	Прибыль, у.е.	Расход, у.е.	Доход, у.е.	Прибыль, у.е.	Расход, у.е.	Доход, у.е.	Прибыль, у.е.
1	Леворин	153,9	46656	46502	144	42984	42840	134,1	39744	39610
2	Неомицин	172,8	44172	43999	156,4	40068	39912	141,3	36072	35931
3	Гентамицин	168,3	38124	37956	159,3	36612	36453	132,3	30240	30108
4	Фузидин	173,7	31320	31146	156,6	28080	27923	146,7	26466	26319
5	Эритромицин	184,5	28296	28112	166,5	25596	25430	152,1	23328	23176
6	Линкомицин	130,5	22680	22550	120,5	20520	20400	114,3	19440	19326

При расчёте показателей, приведённых в таблицах 3.16 – 3.21 были использованы уравнения статистической статической модели 3.157 – 3.161.

Для сопоставления технико-экономических показателей серебра были рассчитаны показатели, характеризующие расход смол. Статистически известно, что измельчение (разрушение) смол в результате истирания в потоке может составлять 10-20 г/т, а длительность использования смол в рециклах сорбция-восстановление 100-300 часов, при стоимости смол 18000 у.е./т. Расчётные данные для девяти колонн участка на месяц, характеризующие показатели расходования смол приведены в таблице 3.22.

Таблица 3.22– Расходные показатели использования смол

Время использования					
100 часов		200 часов		300 часов	
Вес, кг	Стоимость, у.е.	Вес, кг	Стоимость, у.е.	Вес, кг	Стоимость, у.е.
955	17190	470	8460	313	5634

Показатели ПСОЕ для смолы не превышают 10 г/кг. Исходя из этого рассчитан доход от получаемого в результате сорбции на смолах серебра (Таблица 3.23).

Таблица 3.23– Показатели дохода от использования смол

Время использования					
100 часов		200 часов		300 часов	
Вес, кг	Стоимость, у.е.	Вес, кг	Стоимость, у.е.	Вес, кг	Стоимость, у.е.
9,55	11460	4,7	5760	3,13	3756

Данные таблиц 3.22 и 3.23 позволяют определить ценовой баланс расходов на приобретение смолы и доходов от реализации серебра (Таблица 3.24).

Таблица 3.24– Сопоставление расходов и доходов от использования смол

Время использования								
100 часов			200 часов			300 часов		
Доход, у.е.	Расход, у.е.	Баланс, у.е.	Доход, у.е.	Расход, у.е.	Баланс, у.е.	Доход, у.е.	Расход, у.е.	Баланс, у.е.
11460	17190	-5730	5760	8460	-2700	3756	5634	-1878

Приведённые данные показывают, что применение смол в процессах сорбции является убыточным. Экономические расчёты, приведённые в данном разделе, позволили оценить уровень рентабельности применения биосорбентов для извлечения серебра из отработанных растворов аффинажных заводов.

3.14 Выводы по третьему разделу

Третий раздел содержит разработанные математические модели, являющиеся основой прогноза и оценки процессов извлечения серебра из вторичных растворов. На основании материала, изложенного в данной главе, можно сделать следующие выводы.

1. Для прогноза состояний сорбента и раствора в колоннах, предназначенного для управления процессами в реальном времени, выбрана методика разработки динамических детерминированных моделей с нелинейным характером взаимосвязи переменных.

2. Разработаны математические модели-структуры процессов сорбции (режим S), восстановления технологических свойств сорбента (режим R), десорбции (режим DS). Модели представлены системами связанных параметрических дифференциальных уравнений с нелинейным характером взаимосвязей, вынесенными в отдельный расчётный блок. Модели процессов сорбции позволяют в реальном времени рассчитывать количество серебра, усваиваемого активными центрами биосорбента, а также сравнивать степень использования активных центров, на основании чего система управления переводит колонну в режим восстановления активных центров и переключение колонн. Решения этой модели относительно полного использования сорбционной ёмкости определяют окончание сорбционного режима и переход к режиму десорбции. Модели процесса десорбции предназначены для расчёта уровня извлечения чистого серебра из гранул биосорбента и снижение сорбционной способности гранул, приводящей к их замене.

3. Осуществлён выбор метода параметрической идентификации моделей («в малом»), включающий в себя метод чувствительности и метод двух моделей. Этот метод позволяет после завершения каждого цикла корректировать значения параметров модели, сохраняя заданную границу точности прогноза и нивелируя последствия временного дрейфа характеристик биосорбента и оборудования колонн.

4. Используя выбранный метод идентификации рассчитаны численные значения параметров моделей, проведено численное исследование и проверка адекватности моделей процессу. Адекватность моделей оценивалась по обучающей выборке статистических данных, собранных на участке биосорбции Щёлковского завода вторичных драгоценных металлов (ЩЗВДМ). Остаточная дисперсия оценки адекватности по обучающей выборке составляла менее 3,40%. Адекватность модели по контрольной выборке в период опытной эксплуатации на этом же предприятии характеризуется остаточной дисперсией 3,47%.

5. Численное исследование показало, что идентифицированные модели могут использоваться в алгоритме системы управления кинетикой процессов, протекающих в колонне. В период опытной эксплуатации на ЩЗВДМ численные решения уравнений модели совпадали с реальными значениями показателей с погрешностью менее 4%, а прогноз завершения активных режимов сорбции и перевод колонн в режим восстановления сорбционных свойств или режим десорбции согласно взятых проб отличался от реальных показателей на 3,0–3,2%. Исследование показало, что разработанные модели процессов сорбции и десорбции позволяют реализовать автоматический режим управления технологическими процессами, происходящими в сорбционной колонне извлечения серебра из грязных растворов.

6. Определены логические правила, характеризующие завершение режимов, на основании которых реализуется управление переключением колонн. Согласно этим правилам и расчётам, характеризующим режимы процессов по моделям сорбции, восстановления и десорбции, матриц смежности, сформирован алгоритм и логико-формальные модели автоматического управления переключением потоков растворов между серией колонн в автоматическом режиме управления. Переключение осуществляется по командам, поступающим на исполнительные клапаны, установленные на трубопроводе. Это характеризует второй уровень управления участком, содержащим 10 сорбционных колонн.

7. Для определения последовательности включения колонн различных уровней сформирована матрица смежности, предназначенная для размещения в базе данных системы и учитывающая временные соотношения режимов работы колонн. Согласно матрице смежности, разработаны логико-формальные модели последовательности режимов переключения.

8. Разработаны статические статистические модели расчёта технико-экономических показателей различного типа сорбентов, позволяющие осуществлять выбор биокультур, предлагаемых к закупке. На основании этих моделей можно рассчитывать стоимостные показатели приобретения отходов производства антибиотиков в зависимости от сорбционной способности биокультур, составляющих такие отходы. Это позволяет в автоматизированном режиме (третий уровень управления) осуществлять закупку биоматериалов.

9. Представленные в разделе материалы являются инструментарием трёхуровневой системы управления, алгоритмы которой позволяют реализовать автоматический и автоматизированный режимы. Данный инструментарий трёхуровневой системы управления пригоден для использования в различных производствах на участках с аналогичной организацией. Были проведены опытно-промышленные испытания на участке производства белковых соединений фирмы «ТПС СЕРВИС», которые позволили оценить погрешность прогноза показателей по модели не более 0,37%, а сочетание автоматического и автоматизированного режимов управления позволило увеличить производительность участка не менее, чем на 20% в год (Акт прилагается).

10. Осуществлена физическая постановка целей управления на каждом уровне. Цели управления формализованы в виде соответствующих функционалов, определена система ограничений. Это позволяет классифицировать системы управления каждого уровня, как оптимальные, решения которых соответствуют экстремальным значениям функционалов.

11. Выбраны численные методы решения оптимизационных задач. Эти методы позволяют осуществлять поиск оптимальных управляющих воздействий в ритме с процессами, протекающими на участке с учётом дискретно-непрерывной динамики этих процессов.

12. Разработана функциональная схема трёхуровневой системы управления. В системе стандартов IDEF0 представлены процессы, сопровождающие функционирование системы. Представление трёхуровневой системы управления в этом стандарте позволяет решать задачи проектирования АСУТП производственными участками предприятий с аналогичной технологической организацией.

13. Разработаны алгоритмы системы с идентификатором в контуре управления, представляющие собой структуру многослойной управляемой нейросети, нейроны которой — траектории итеративных процедур решения уравнений математических моделей. Математические модели выступают в качестве функций активации сети, а соответствующие концентрации веществ - в качестве синаптических весов. В качестве правил торможения выступают логические правила завершения режимов. Обучение нейросети осуществляется при помощи классических приёмов идентификации с оценкой допустимой ошибки. Методология, предусматривающая такого типа реализацию АСУП и АСУТП, позволяет использовать современные программные средства для трёхуровневых подразделений с более сложным характером производства, обладающих большими объёмами информации о производственных процессах.

14. Проведено численное исследование функционирования алгоритмов системы. Результаты исследования подтверждены опытно-промышленными испытаниями, проведёнными на участке биосорбции серебра Щелковского завода вторичных драгоценных металлов.

15. Создана база данных и программное обеспечение системы. Это позволяет формировать базы данных процессов и производств, характеризующихся

разнообразием показателей информационной, технологической и экономической деятельности поставляемых производств в условиях их трансформации.

16. Результаты опытно-промышленных испытаний показали, что использование биосорбентов при автоматическом управлении технологическими режимами повышает рентабельность процесса извлечения серебра из отработанных растворов и уменьшает количество серебра, уходящего в сточные воды, до 0,1 мг/л.

Материал, изложенный в данном разделе, позволяет оценивать практическую значимость основных научных положений диссертационной работы.

РАЗДЕЛ 4

МЕТОДОЛОГИЯ И ПРАВИЛА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СПЕЦИФИКУ СОЗДАНИЯ
СПЕЦИАЛЬНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕЛКОСЕРИЙНЫМ
ПРОИЗВОДСТВОМ, ПОЗВОЛЯЮЩЕЙ НОРМАЛИЗОВАТЬ ПОСТАВКИ
СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
ТРАНСФОРМАЦИИ

Исходя из полученных на первых трёх этапах планирования логико-формальных и аналитических моделей взаимосвязей между заказами, заготовками и особенностями предприятия в виде его характеристик, нормативных, технологических, регламентных условий и ограничений, в разделе необходимо:

1. Разработать структурные модели декомпозированных этапов планирования как основы ИТ СППР.

2. Поставить и формализовать задачу оптимального планирования с учётом регламентных ограничений, сформулировать правила формализации временных показателей изготовления заказов в процессе производства.

3. Усовершенствовать метод численного решения задачи оптимального планирования.

4. Сформировать правила и алгоритмы определения последовательности выполнения заказов, подчинённых задачам оптимального планирования и оптимального оперативного управления.

5. Определить особенности ПО и инструментария принятия оптимальных решений СППР.

4.1 Разработка структурной модели решения задач планирования

Разработанные в разделе модели и правила планирования обобщаются в виде структурных моделей. Структурная модель решения задач всех четырёх этапов представлена на рисунке 4.1 и включает в себя следующие узлы:



Рисунок 4.1 — Разработка структурной модели решения декомпозированных задач планирования

– A1: для решения задачи 1-го этапа планирования поступающие заказы объединяются в группы по типоразмерам заказов, выделяются характеристики заказов каждой из групп. На основании разработанного двойственного метода выполняется обратный прогноз типоразмеров заготовок для выполнения заказов групп;

– A2: при решении задачи 2-го этапа планирования осуществляется формализация технологических ограничений производства в виде логико-формальных моделей. Разработанные модели, в соответствии с предлагаемым в работе двойственным методом прямого расчёта типоразмеров заготовок, определяют правила формирования из групп кратных слябов, полученных на 1-м этапе, наборов партий кратных слябов для задания в производство;

– A3: 3-й этап задачи планирования необходим для расчёта времени преобразования наборов партий слябов, сформированных на 2-м этапе и расчёта планируемого времени поставки партий мерных слябов;

– A4: при решении задачи 4-го этапа планирования определяется очерёдность задания в производство сформированных партий кратных слябов, на основе которой формируется ПП изготовления заказов.

Составные части структурной модели задачи планирования 1-го этапа представлены на рисунке 4.2, а на рисунке 4.3 представлена детализация одной из подзадач задачи 1-го этапа (группировки заказов по типоразмерам листа). Развёрнутая структурная модель включает в себя следующую последовательность узлов:

– A11: сформировать базу данных поступающих заказов PLZ_p и определить основные характеристики прокатных листов;

– A12: сформировать сгруппированный портфель заказов объединением заказов в группы с одинаковыми типоразмерами:

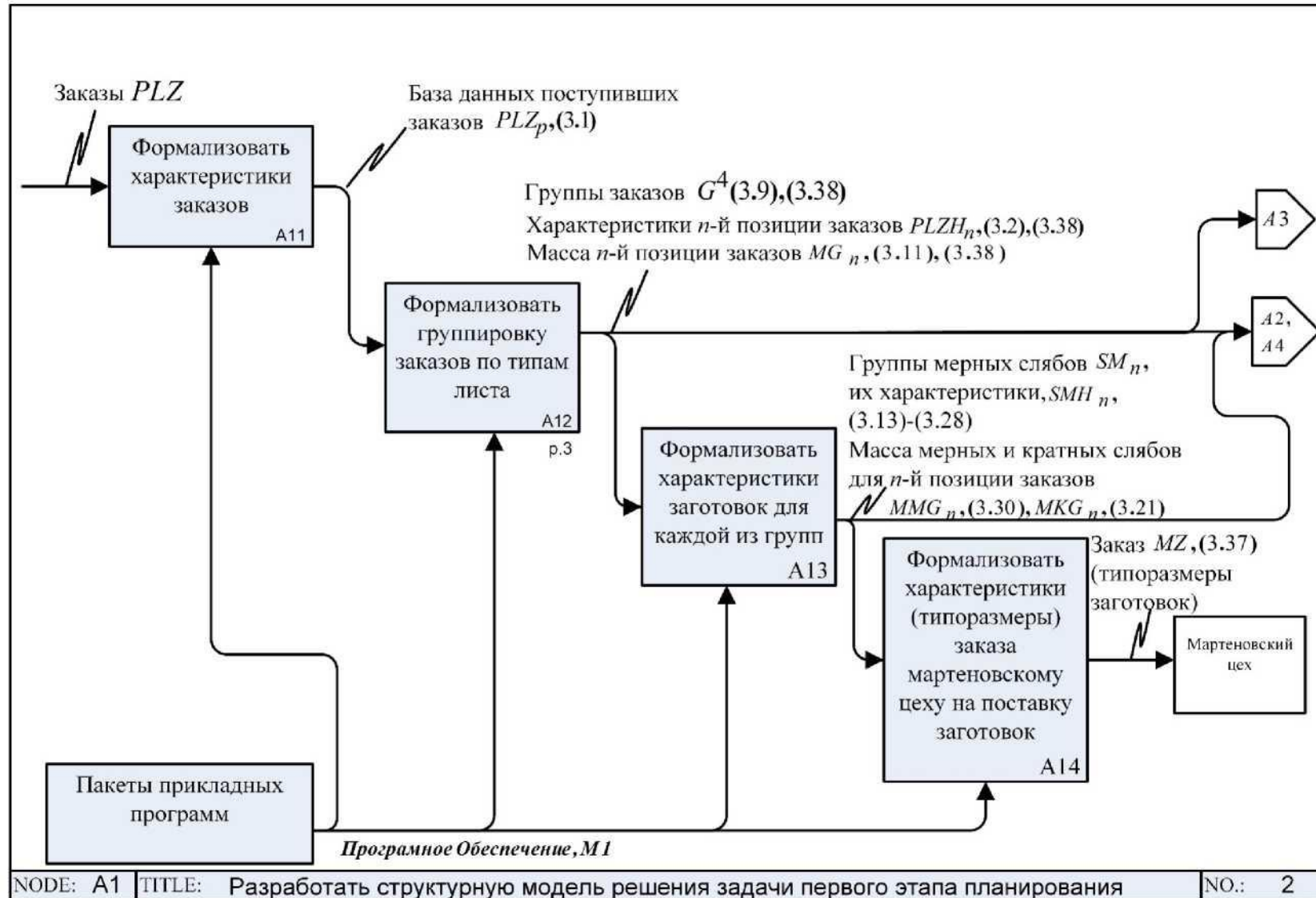


Рисунок 4.2 — Структурная модель решения задачи первого этапа планирования

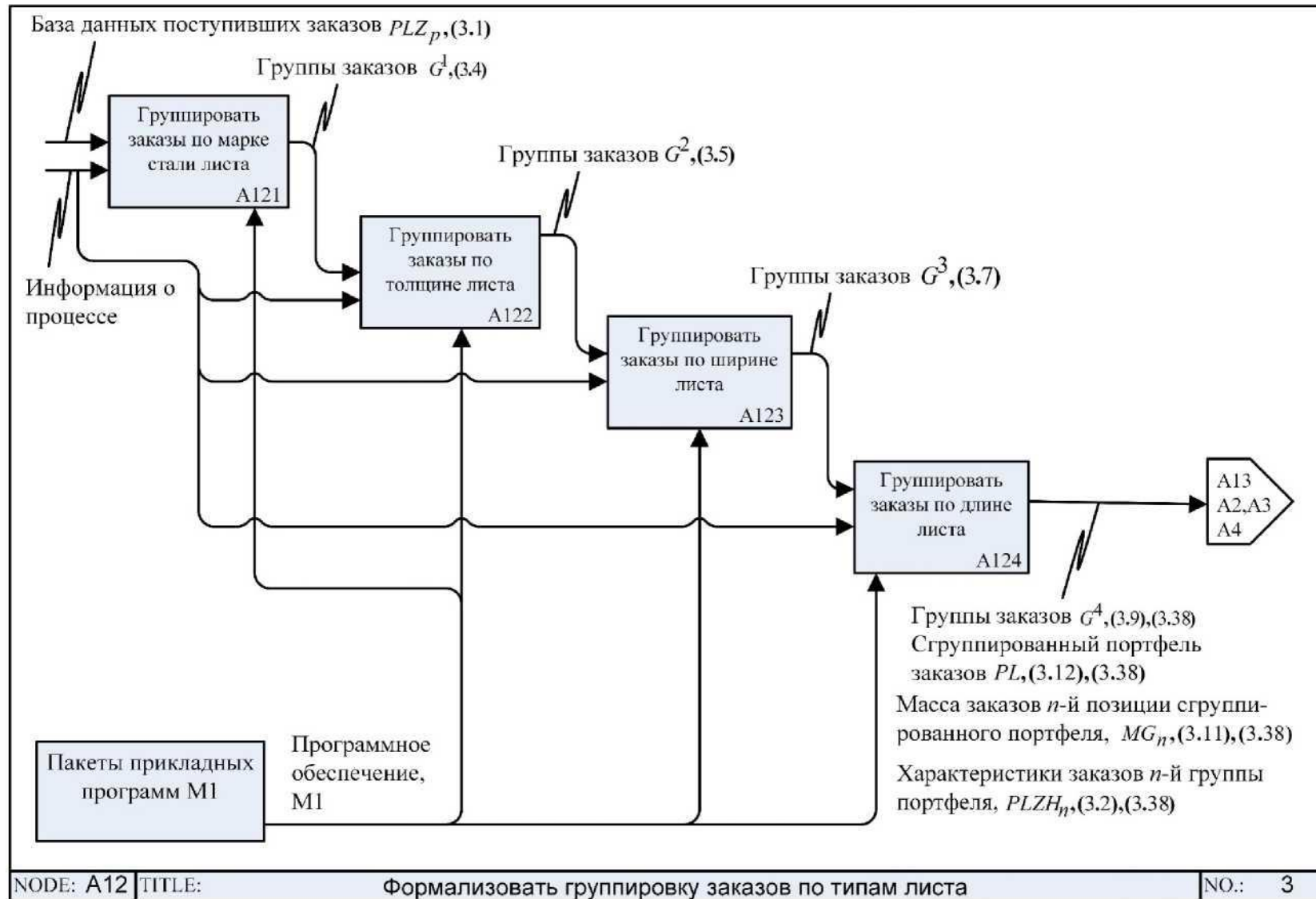


Рисунок 4.3 — Структурная модель решения задачи группировки заказов по типоразмерам листа

- A121: объединить заказы одинаковой марки стали в группы D^1 ;
- A122: выделить из каждой группы D^1 подгруппы D^2 заказов с одинаковой толщиной листа;
- A123: сформировать в каждой из групп D^2 подгруппы D^3 заказов с одинаковой шириной листа;
- A124: выделить в каждой группе D^3 подгруппы D^4 заказов с одинаковой длиной листа, определить массу MG_n заказов групп D^4 ;
- A13: сформировать группы SM_n мерных слябов, предназначенных для изготовления n -й позиции заказов и для каждой группы SM_n определить характеристики мерных SMH_n и кратных SKH_n слябов, задаваемых в производство для получения проката;
- A14: рассчитать заказ MZ на поставку всех групп заготовок для проката в течение планового периода. Заказ включает в себя типоразмеры, массу и количество мерных слябов каждой из групп четырёх уровней.

Структурная модель решения задачи планирования 2-го этапа (прямой расчёт характеристик партий кратных слябов для задания в производство) представлена на рисунке 4.4 и включает в себя следующую последовательность узлов:

- A21: формализуются технологические ограничения в виде логико-формальных и аналитических моделей;
- A22: в соответствии с логико-формальными и аналитическими моделями, подчинёнными ограничениям P_1^4, P_1 на допустимую массу партии, применяется правило разбиения групп SK_n кратных слябов на партии $SK_{n,r}^1$, где $r = \overline{1, Nr_n}, Nr_n$ – количество разбиений группы SK_n ;

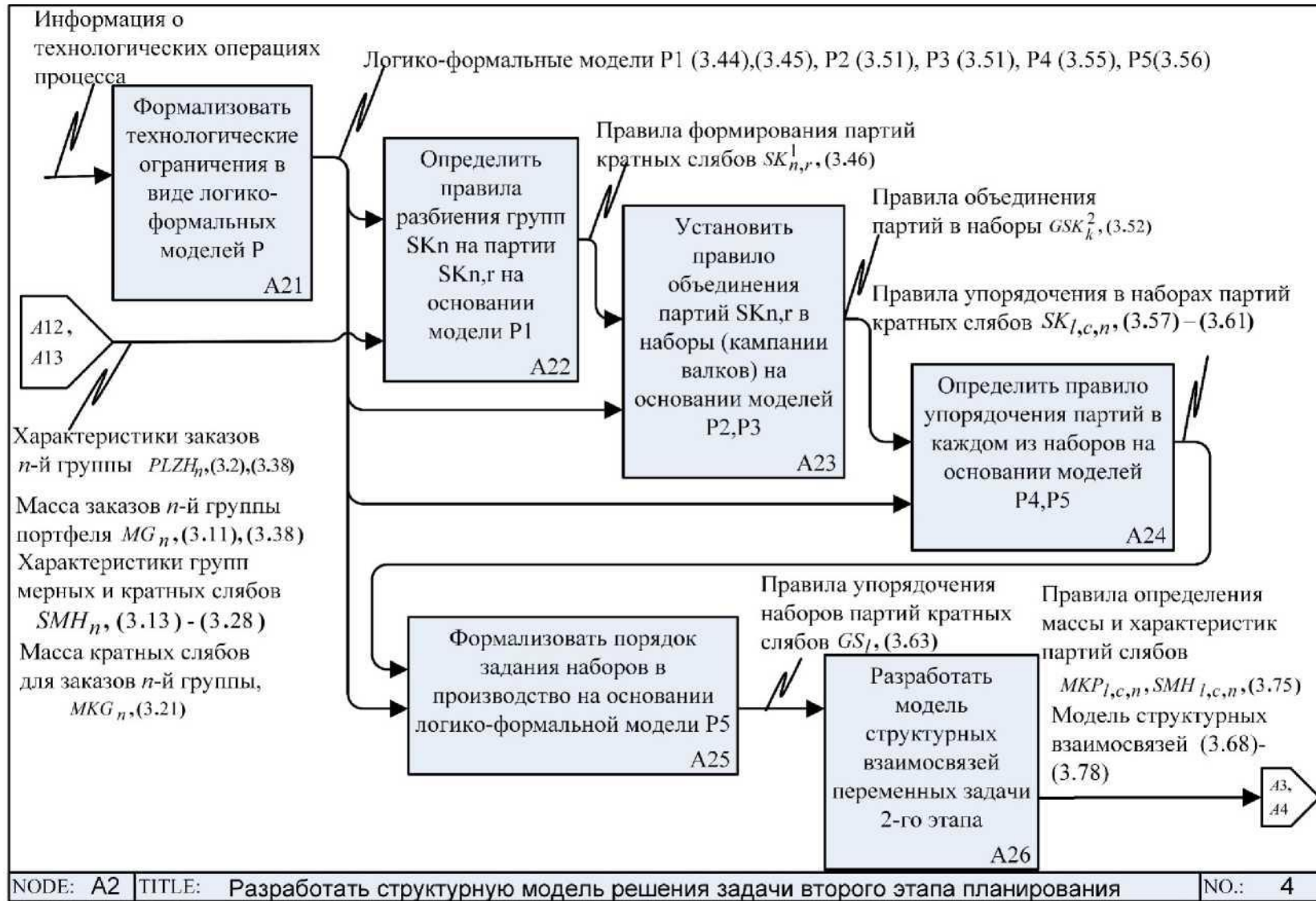


Рисунок 4.4 — Структурная модель решения задачи второго этапа планирования

– A23: согласно логико-формальным и аналитическим моделям, подчинённым ограничениям P_2 на предельно допустимую массу металла и P_3 на сумму масс партий одинакового профиля в кампании валков. используется правило объединения партий SK_n^1 в наборы GSK_k^1 , где $k = \overline{1, Nk}$, для прокатки партий каждого набора в одной кампании валков;

– A24: в соответствии с логико-формальными и аналитическими моделями, подчинёнными ограничениям P_4 на последовательность прокатки заказов с разной шириной листа в течение кампании валков и P_5 на разность масс кратного сляба двух последовательных партий, используется правило упорядочения партий $SK_{n,r}^1$ в каждом наборе GSK_k^2 для получения упорядоченных наборов GSK_k^3 [344];

– A25: определяются правила задания в производство наборов GSK_k^3 путём преобразования их в наборы GS_l , на основании логико-формальной и аналитической модели, подчинённой ограничению P_5 ;

– A26: разработанные модели позволяют сформировать структурную модель взаимосвязей входных и выходных переменных задачи 2-го этапа планирования.

Структурная модель решения задачи планирования 3-го этапа (определение временных показателей преобразования в конечный продукт наборов партий мерных слябов, рассчитанных на 2-м этапе [345]) представлена на рисунке 4.5 и включает последовательность решения следующих подзадач:

- A31: сформировать декомпозированную схему производства;
- A32: определить временные показатели преобразования наборов партий слябов — продолжительности $DI_{l,c}$, $DPI_{l,c}$ обработки одного и всех слябов каждой партии на устройствах каждого блока декомпозированной схемы. Затем рассчитать время $TKI_{l,c}$ завершения обработки на каждом блоке всех кратных слябов каждой партии с учётом наладок и плановых ремонтов;



Рисунок 4.5 — Структурная модель решения задачи третьего этапа планирования

– А33: рассчитать время обработки партий слябов на всех устройствах цеха, которые включают в себя продолжительность $TP_{l,c}$ обработки каждой партии, время $TN2_{l,c,n}$ задания в производство каждой партии с учётом наладок и плановых ремонтов, продолжительность TVS прокатки всех партий, время T_p выполнения каждого из заказов;

– А34: сформировать правила расчёта времени $TZ_{l,c,n}$, к которому необходимо поставить мерные слябы каждой партии $SM_{l,c,n}$.

Структурные модели трёх этапов планирования позволяют сформировать структурную модель 4-го этапа планирования, на котором определяются наборы партий кратных слябов и последовательность их задания в производство.

Классификация переменных задачи 4-го этапа планирования приведена в таблице 4.1, где характеристики заказа на поставку мерных слябов для проката (выходные переменные) представляют собой наборы $ZMH = \bigcup_{l=1}^{l_1} \bigcup_{c=1}^{Nc_l} (SMH_{l,c,n}, TZ_{l,c})$, где $TZ_{l,c,n}$ — время, к которому мартеновский цех должен обеспечить поставку мерных слябов партии $SM_{l,c,n}$.

Структурная модель решения задачи планирования 4-го этапа представлена на рисунке 4.6 и включает в себя следующую последовательность узлов:

– А41: формализовать ПП в виде наборов переменных, характеризующих производственную деятельность по изготовлению заказов на плановый период;

– А42: выполнить физическую и формальную постановку задачи оптимального планирования в следующей последовательности:

– сформулировать физическую постановку задачи оптимального планирования в соответствии с целями планирования;

– выполнить формальную постановку задачи оптимального планирования, задав целевую функцию в виде критерия оптимальности;

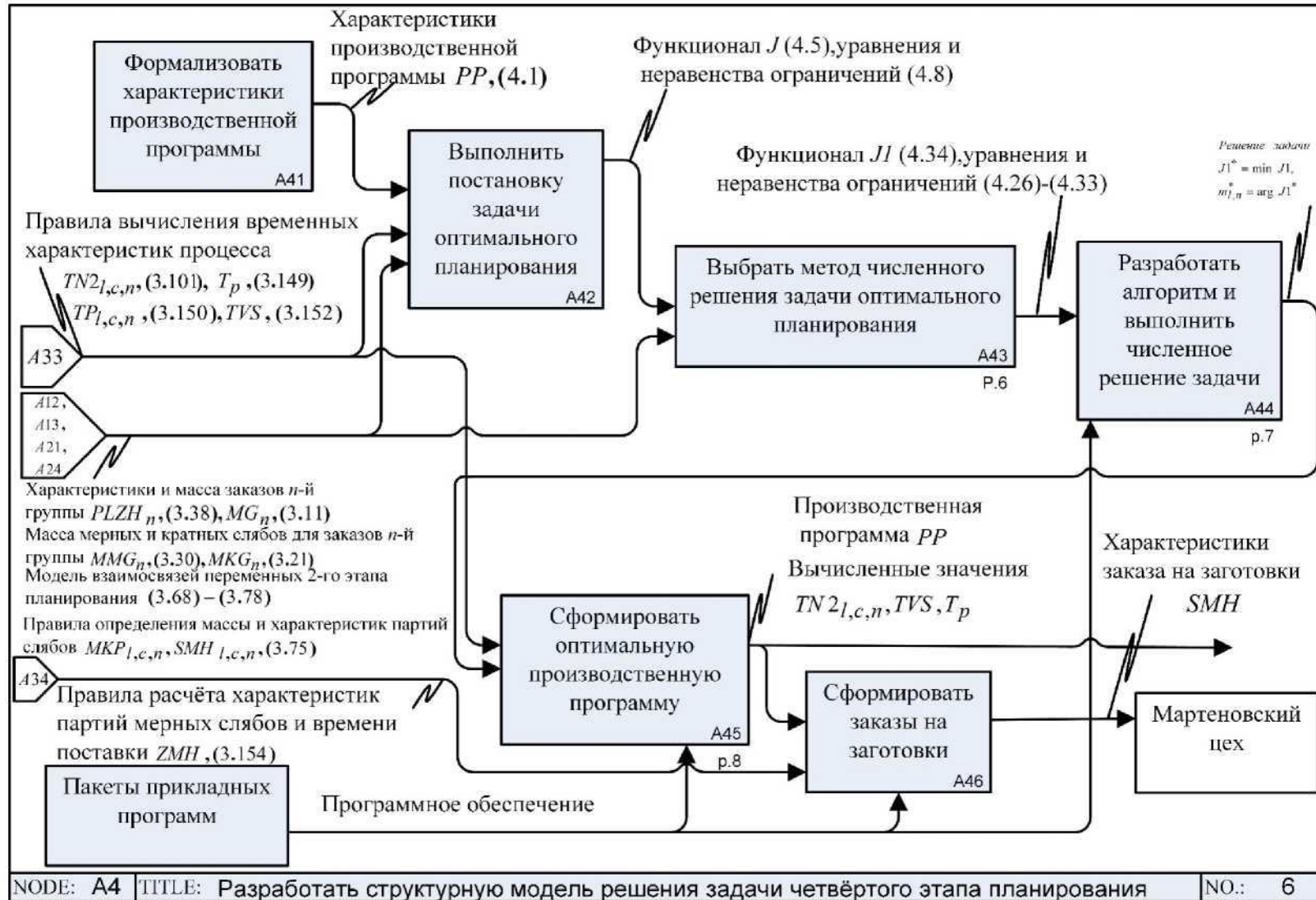


Рисунок 4.6 — Структурная модель решения задачи четвёртого этапа планирования

– сформировать ограничения задачи, используя разработанную на 2-м этапе планирования модель структурных взаимосвязей групп кратных слябов и наборов партий кратных слябов для задания в производство, а также модели регламентных ограничений $P_1 - P_5$ и технологического ограничения P_6 на время выполнения р-го заказа;

– А43: выбрать метод численного решения задачи планирования и преобразовать функционал цели задачи и систему ограничений к виду, необходимому для поиска оптимальных значений, п. 4.3;

– А44: разработать алгоритм численного решения задачи;

– А45: для полученных при численном решении характеристик оптимальных наборов партий кратных слябов, на основании разработанных аналитических моделей расчёта временных показателей прокатки, сформировать оптимальную программу производственной деятельности по изготовлению заказов;

– А46: на основании моделей расчёта графика поставок заготовок для проката, определить характеристики заказа на заготовки.

Структурная модель четвёртого этапа планирования позволяет перейти к изложению правил автоматизированной обработки информации и управления.

Для формализации производственной деятельности по выполнению портфеля заказов PL (узел А41, Рисунок 4.6), с учётом проведенного исследования характеристик заготовок для получения проката и временных показателей прокатки, ПП целесообразно представить в виде набора PP (4.1):

$$PP = (\|SKH_{l,c,n}\|, \|SMH_{l,c,n}\|, \|PLZH_{l,c,n}\|, \|TP_{l,c}\|, \|TN2_{l,c}\|, \|T_p\|, TVS), \quad (4.1)$$

$$l = \overline{1, Nl}, c = \overline{1, Nc_l}, n \in \{1, \dots, Nn\}, p = \overline{1, Np}.$$

Описание характеристик (4.1) представлено в таблице 4.1.

Таблица 4.1 — Классификация переменных задачи четвёртого этапа планирования

Обозначение переменной	Физический смысл
Входные переменные	
$PLZH_n$	Характеристики заказов n -й позиции, $n=1, Nn$
MG_n	Масса заказа n -й позиции
NZ_n	Номера заказов p , поступивших от заказчика, объединённые в n -ю группу заказов
TZP_p	Время выполнения p -го заказа, указывается заказчиком
MKG_n, MMG_n	Масса всех мерных и кратных слябов, используемых для выполнения n -й позиции заказов
$MKP_{l,c,n}$	Правило вычисления массы кратных слябов партии $SK_{l,c,n}$
$SMH_{l,c,n}, SKH_{l,c,n}$	Правило определения характеристик партий мерных и кратных слябов для задания в производство, l – порядковый номер кампании валков, в которой прокатывается партия, c – порядковый номер партии в кампании валков, n – номер позиции заказов, прокатываемой в партии, $l=1, Nl, c=1, Ncl$
$TP_{l,c}$	Правило определения продолжительности прокатки каждой партии $SK_{l,c,n}$ кратных слябов
TV_s	Правило определения продолжительности выполнения всех заказов портфеля
T_p	Правило определения времени, к которому планируется выполнить поступивший p -й заказ, $p=1, Np$
$TN2_{l,c,n}$	Правило определения времени задания в производство партии кратных слябов $SK_{l,c,n}$
ZMH	Правила задания характеристик заказов на поставку заготовок для проката (мерных слябов)
Выходные переменные	
PP	Вычисленные характеристики оптимальной ПП
$TN2_{l,c}$	Вычисленное время задания в производство партии кратных слябов партии $SK_{l,c,n}$
T_p	Вычисленное время выполнения поступившего -го заказа
$TP_{l,c}$	Вычисленная продолжительность прокатки каждой партии $SK_{l,c,n}$ кратных слябов
TVS	Вычисленная продолжительность выполнения всех заказов портфеля
ZMH	Вычисленные характеристики заказа мартеновскому цеху на поставку заготовок для проката (мерных слябов)

Для определения их оптимального значения следует формализовать задачу выполнения заказов как задачу оптимального планирования и разработать алгоритм её решения.

4.2 Постановка и формализация задачи оптимального планирования

При планировании производственного процесса стоит задача выполнить наибольшее количество заказов за плановый период, минимизировав время выполнения всех принятых заказов портфеля PL (узел А42, Рисунок 4.6). Для выполнения одного и того же портфеля заказов PL могут быть сформированы различные варианты упорядоченных наборов партий кратных слябов. Для каждого из таких вариантов время выполнения всех заказов будет различным. Поэтому постановка задачи оптимального планирования выполняется следующим образом.

Физическая постановка задачи планирования. Определить упорядоченное множество наборов партий заготовок (кратных слябов), предназначенных для выполнения портфеля заказов таким образом, чтобы время изготовления всех позиций было минимальным при выполнении нормативных, технологических и регламентных ограничений и требований о сроке выполнения заказов [346, 347].

Приведённая постановка задачи позволяет сформировать функционал цели в виде соответствующего критерия (4.2) – (4.3).

Формальная постановка задачи планирования:

$$J = F(D, Nl) \rightarrow \min_{D, Nl} \quad (4.2)$$

$$D = (\|SK_{l,c,n}\|, \|TPL_{l,c}\|), l = \overline{1, Nl}, c = \overline{1, Nc_l}, n \in \{1, \dots, Nn\}, \quad (4.3)$$

где $TPL_{l,c}$ – продолжительности обработки кратных слябов партии $SK_{l,c,n}$ на устройствах цеха, которые оказывают основное влияние на общую продолжительность всего технологического цикла.

Функционал J в развёрнутом виде должен учитывать количество Nl наборов партий кратных слябов и последовательность задания партий в наборах и наборов в производство. Поскольку последовательность задания, влияет лишь на продолжительность технологической паузы при поступлении слябов на прокатные клетки из нагревательных печей, а обработка на остальных устройствах

цеха не зависит от такой последовательности, то целесообразно определить $TPL_{l,c}$ согласно (4.4):

$$TPL_{l,c} = MKP_{l,c,n}/PPR_n + f1(SK_{l,c,n}), \quad (4.4)$$

где $MKP_{l,c,n}$ (кг) – масса кратных слябов партии $SK_{l,c,n}$; PPR_n (кг/час) – производительность обработки на прокатных клетях партии $SK_{l,c,n}$ кратных слябов, необходимых для выполнения заказов группы G_n^4 ; производительность является нормативной величиной и зависит от типоразмеров заказов группы G_n^4 ; $f1$ – функция, значение которой равно продолжительности технологической паузы перед обработкой партии $SK_{l,c,n}$.

Тогда функционал J может быть представлен в развёрнутом виде как функция от масс $MKP_{l,c,n}$ партий кратных слябов $SK_{l,c,n}$ (4.5) и от количества Nl наборов этих партий (4.6):

$$J = \sum_{l=1}^{Nl} (TPER + \sum_{c=1}^{Nc_l} (MKP_{l,c,n}/PPR_n + f1(SK_{l,c,n}))), \quad (4.5)$$

$$J = J(MKP_{l,c,n}) \rightarrow \min_{DD, Nl}$$

$$DD = \{ \|MKP_{l,c,n}\|, l = \overline{1, Nl}, c = \overline{1, Nc_l}, n \in \{1, \dots, Nn\} \}, \quad (4.6)$$

где $TPER = 0.67$ ч – время перевалки в конце каждой кампании валков.

Решением задачи оптимального планирования является матрица масс партий $\{ \|MKP_{l,c,n}^* \| \}$ и количество Nl сформированных наборов партий (4.7):

$$(\{ \|MKP_{l,c,n}^* \| \}, Nl^*) = \arg \min_{DD, Nl} J. \quad (4.7)$$

С целью учёта технологических ограничений листопрокатного производства формируются ограничения задачи оптимального планирования, задающие область определения DD функционала J . Для учёта технологических, нормативных и регламентных ограничений используются модели, которые представляются в виде, необходимом для решения задачи оптимального планирования (4.8):

$$\begin{aligned}
P_{1,1}(MKP_{l,c,n}): MKP_{l,c,n} \geq MIN_n \geq 0, l = \overline{1, Nl}, c = \overline{1, Nc_l}, \\
P_{1,2}(MKP_{l,c,n}): MKP_{l,c,n} \leq MAX_n, l = \overline{1, Nl}, c = \overline{1, Nc_l}, \\
P_2(\sum_{c=1}^{Nc_l} MKP_{l,c,n}): \sum_{c=1}^{Nc_l} MKP_{l,c,n} \leq 1800000, l = \overline{1, Nl}, \\
P_3(\sum_{c=1}^{Nc_l} MKP_{l,c,n1}): \sum_{c=1}^{Nc_l} MKP_{l,c,n1} \leq MAX_{n1}, \forall n1 \in \{1, \dots, Nn\}, l = \overline{1, Nl}, \\
P_4(B_{l,c,n}): B_{l,c,n}/B_{l,c-1,n1} \leq 1, \\
P_5(MS_{l,c,n}): |MS_{l,c,n} - MS_{l,c-1,n1}| \leq 600, l = \overline{1, Nl}, c = \overline{2, Nc_l}, \\
P_5(MS_{l,1,n}) |MS_{l,1,n} - MS_{l-1,c1_{l-1},n1}| \leq 600, l = \overline{2, Nl}, \\
P_6(\sum_{l=1}^{Nl} \sum_{c=1}^{Nc_l} MKP_{l,c,n1}): \sum_{l=1}^{Nl} \sum_{c=1}^{Nc_l} MKP_{l,c,n1} = MKG_{n1}, n1 = \overline{1, Nn},
\end{aligned} \tag{4.8}$$

где MAX_n , MIN_n – технологически допустимая масса металла n -й позиции заказов (всех заказов группы G_n^4) для одной кампании валков; MKG_n – масса всех кратных слябов, используемых для выполнения n -й позиции заказов; $MKP_{l,c,n}$ – масса партии кратных слябов, которая может принимать только значения, кратные массе $MS_{l,c,n}$ одного кратного сляба: $MKP_{l,c,n} = i \times MS_{l,c,n}$, где i – шаг кратности; $B_{l,c,n}$, $MS_{l,c,n}$ — толщина листа, получаемого в партии $SK_{l,c,n}$ и масса кратного сляба партии $SK_{l,c,n}$.

Кроме того, ограничение на максимально допустимую продолжительность $TMAX_n$ нагрева слябов в печах и ограничение по времени выполнения r -го заказа, установленному заказчиком, будут формализованы в подразделе 4.3.

Вышеизложенное позволяет развернуть постановку задачи оптимального планирования выполнения заказов с учётом технологических ограничений:

Определить оптимальное количество Nl наборов партий кратных слябов $SK_{l,c,n}$, необходимых для прокатки групп заказов, а также массы $MKP_{l,c,n}$ партий кратных слябов $SK_{l,c,n}$ прокатываемые в кампаниях валков, которые доставляют минимум функционалу J (4.5) и удовлетворяют ограничениям P , (4.8), где $l = \overline{1, Nl}$ – порядковый номер кампании валков в течение планового периода, $c = \overline{1, Nc_l}$ – порядковый номер партии в кампании валков, $n \in \{1, \dots, Nn\}$ – номер позиции заказов, изготавливаемых при прокатке партии $SK_{l,c,n}$.

Развёрнутая постановка задачи составления оптимальной ПП позволяет перейти к разработке правил формализации временных показателей изготовления заказов, включающих в себя представление в аналитическом виде зависимости суммарного времени изготовления всех заказов (целевой функции планирования) от последовательности задания партий в производство и приведение задачи к виду, позволяющему применить методы численного решения.

4.3 Разработка аналитической модели расчёта времени обработки партий и трансформация функционала цели

В соответствии с разработанными правилами, для формирования аналитической модели расчёта времени обработки партий (узел А43, Рисунок 4.6) необходимо, после заполнения базы данных нормативно-справочной информацией, ввести в рассмотрение матрицу масс партий всех позиций заказов в каждой кампании валков и выполнить расчёт матрицы переходов, элементы которой определяют длительность технологической паузы для всевозможных пар последовательно прокатываемых позиций заказов. Затем разработать модели взаимосвязи между переменными состояниями каждой партии (задающими номер предыдущей позиции заказов, выполняемой в кампании валков) и массами предыдущих партий. На основе матрицы переходов для каждой партии необходимо сформировать полином, определяющий продолжительность технологической паузы в виде зависимости от переменной состояния. Затем следует преобразовать функционал цели задачи, включив в целевую функцию сумму всех сформированных полиномов, которая будет определять суммарную продолжительность пауз в течение планового периода. После этого необходимо формализовать систему ограничений задачи с учётом выполненного преобразования задачи оптимального планирования [348, 349]. Последовательное выполнение вышеописанных этапов представлено на рисунке 4.7.

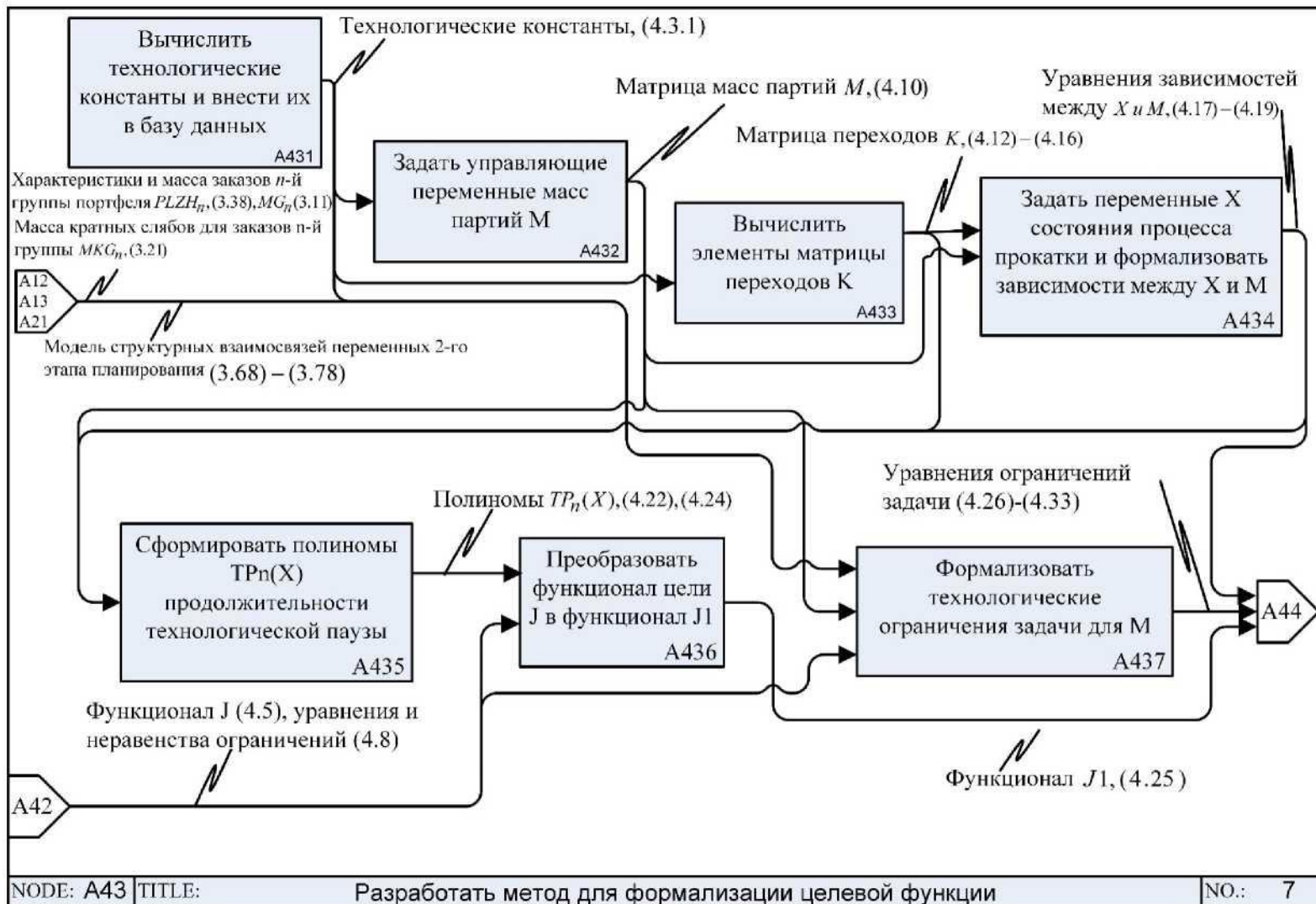


Рисунок 4.7 — Метод получения аналитической зависимости времени обработки партий от последовательности их задания в производство

4.3.1 Формирование раздела нормативной информации базы данных

Используя исследование технологического процесса прокатки, формируется раздел базы данных значений технологических нормативов, необходимых для решения задачи планирования (узел А431, Рисунок 4.7):

- производительности PRT_n , PRK_n (кг/час) прокатки заказов n -й позиции на клетях «трио» и «кварто»,
- коэффициента $KRZ = 0.2$, определяющего часть времени прокатки всей партии, выделяемого при планировании в качестве резерва (необходимо для оперативного управления при отклонении от плана),
- регламента минимально и максимально допустимых масс MIN_n и MAX_n партии, сформированной для прокатки n -й позиции заказов,
- регламента минимально и максимально допустимого времени $TMIN_n$, $TMAX_n$ нагрева одной загрузки печи партии, в которой изготавливается n -я позиция заказов,
- продолжительности TPR_n прокатки одной загрузки печи партии, в которой прокатывается n -я позиция заказов (4.9):

$$TPR_n = \max(D3_n, D4_n) \times CP_n, \quad (4.9)$$

где $D3_n$, $D4_n$ — продолжительности прокатки одного кратного сляба на клетки «трио» и клетки «кварто», CP_n — количество кратных слябов n -й позиции, которые можно разместить в нагревательных печах.

4.3.2 Задание управляющих переменных – масс партий

Матрица переменных $\|MKP_{l,c,n}\|$ характеризующих массы партий, преобразуется в матрицу $\|m_{l,n}\|$ (узел А432, Рисунок 4.7), где $m_{l,n}$ – масса партии n -й позиции заказов, запланированная для прокатки в l -й кампании валков (4.10):

$$M = \|m_{l,n}\|, \quad l = \overline{1, Nl}, n = \overline{1, Nn}. \quad (4.10)$$

Если в l -й кампании валков n -я позиция заказов не планируется для прокатки, то $m_{l,n} = 0$. С учётом ограничения P_5 осуществляется упорядочение столбцов матрицы M по убыванию ширины B_n заказанного листа (4.11):

$$B_n \geq B_i \quad \forall n > i. \quad (4.11)$$

Представление (4.10), (4.11) позволяет, в результате определения оптимальных условий, рассчитать продолжительность прокатки всего портфеля заказов, то есть переменные $m_{l,n}$ являются управляющими переменными задачи оптимального планирования.

4.3.3 Правило вычисления элементов матрицы переходов

Для получения зависимости функционала (4.5) от переменных $m_{l,n}$ (узел А433, Рисунок 4.7) необходимо определить продолжительности $f1(m_{l,n})$ пауз в обработке на клетях партии n -й позиции заказов в l -й кампании валков. Продолжительность паузы зависит от типоразмеров двух последовательно прокатываемых партий. Поэтому правило, определяющее разработку аналитической модели расчёта времени, включает введение матрицы переходов K (4.12):

$$K = \| \|k_{i,n}\| \|, \quad i = \overline{1, Nn}, \quad n = \overline{2, Nn}, \quad (4.12)$$

где $k_{i,n}$ — продолжительность паузы при переходе от прокатки i -й к n -й позиции заказов, которая может быть рассчитана согласно (4.13), (4.14):

$$k_{i,n} = \begin{cases} TMIN_n - TPR_i & \text{при } TMIN_n - TPR_i > 0 \\ 0 & \text{при } TMIN_n - TPR_i \leq 0 \end{cases} \quad \forall n > i, \quad (4.13)$$

$$k_{i,n} = 1000 \quad \forall n \leq i, \quad (4.14)$$

где $TMIN_n$ — минимально допустимое время нагрева одной загрузки печи прокатки слябов одной загрузки печи партии, в которой прокатывается i -я позиция заказов, (4.9); избыточность значений $k_{i,n}$, (4.14), связана с тем, что, поскольку типоразмеры упорядочены по убыванию ширин листа согласно (4.11), то прокатка не может выполняться по возрастанию ширин листа (ограничение P_4).

Кроме того, при определении величин $k_{i,n}$ учитываются ограничение P_5 на разность масс кратных слябов двух последовательно прокатываемых заказов и ограничение на максимально допустимую продолжительность $TMAX_n$ нагрева слябов в печах — вводится избыточность значений k_{in} пар (i, n) позиций заказов, для которых эти ограничения не выполняются (4.15) – (4.16):

$$k_{i,n} = 1000 \text{ при } |MS_i - MS_n| \leq 600, \quad (4.15)$$

$$k_{i,n} = 1000 \text{ при } TPR_i > TMAX_n. \quad (4.16)$$

4.3.4 Модель взаимосвязи между управляющими переменными и переменными состояния партии

Вводятся вспомогательные переменные (узел А434, Рисунок 4.7) состояния $x_{l,n}$ (4.17), которые определяются как номер позиции заказов, прокатываемой в формируемом плане перед прокаткой n -й позиции в l -й кампании валков (4.17):

$$x_{l,1} = 0, x_{l,2} = x_{l,1} + fk(m_{l,1}), \dots, x_{l,n} = x_{l,n-1} + fk(m_{l,n-1}) \times (n - x_{l,n-1}) \quad (4.17)$$

где коэффициент $fk(m_{l,n})$ присутствия партии n -й позиции в l -й кампании валков (4.18):

$$fk(m_{l,n}) = \begin{cases} 1 & \text{при } m_{l,n} > 0 \\ 0 & \text{при } m_{l,n} = 0 \end{cases} \quad (4.18)$$

в качестве коэффициента $fk(m_{l,n})$ выполнения заказов n -й позиции в l -й кампании валков при возможных значениях $m_{l,n}$ допустимо выбрать (4.19):

$$fk(m_{l,n}) = m_{l,n} / (m_{l,n} + 1). \quad (4.19)$$

Вспомогательные переменные состояния являются служебными и необходимы для формирования полиномов, определяющих продолжительность технологических пауз.

4.3.5 Разработка аналитической модели, характеризующей продолжительность технологической паузы

На основе матрицы переходов K , (4.12), разрабатывается аналитическая модель (узел А435, Рисунок 4.7) в виде системы полиномов $TP_n(x)$, определяющих продолжительность технологической паузы перед прокаткой n -й позиции заказов в зависимости от значения (4.17) переменной x состояния партии (4.20):

$$\begin{aligned} TP_1(x) &= 0 \\ TP_2(x) &= k_{1,2} \times x \\ TP_3(x) &= a_{3,1} \times x^2 + a_{3,2} \times x \\ &\dots \end{aligned} \quad (4.20)$$

где коэффициенты $a_{3,1}, \dots, a_{3,2}, \dots$ вычисляются из условия (4.21):

$$\begin{cases} a_{3,1} \times 1^2 + a_{3,2} \times 1 = k_{1,3} \\ a_{3,1} \times 2^2 + a_{3,2} \times 2 = k_{2,3} \end{cases} \quad (4.21)$$

или в общем виде (4.22):

$$\begin{aligned} TP_1(x) &= 0, TP_2(x) = k_{1,2} \times x, \dots, \\ TP_n(x) &= a_{n,1} \times x^{n-1} + \dots + a_{n,n-1} \times x, n = \overline{3, Nn}, \end{aligned} \quad (4.22)$$

где коэффициенты $a_{n,1}, \dots, a_{n,n-1}$ вычисляются как решение системы (4.23):

$$\begin{cases} a_{n,1} \times 1^{n-1} + \dots + a_{n,n-1} \times 1 = k_{1,n} \\ \dots \\ a_{n,1} \times (n-1)^{n-1} + \dots + a_{n,n-1} \times (n-1) = k_{n-1,n} \end{cases} \quad (4.23)$$

Уравнения (4.23) можно представить в более компактном виде (4.24):

$$\sum_{s=1}^{n-1} a_{n,s} \times (n-2)^{n-s} = k_{j,n}, \quad j = \overline{1, n-1}, n = \overline{3, Nn}. \quad (4.24)$$

Таким образом, предлагаемый в работе метод позволяет представить суммарную продолжительность пауз в течение планового периода как сумму всех полиномов $TP_n(x)$, входящих в состав целевой функции планирования.

4.3.6 Аналитическая трансформация функционала цели

Выполненная выше формализация даёт возможность преобразовать функционал J (4.5) в функционал $J1$ (узел А436, Рисунок 4.7) согласно (4.25):

$$\begin{aligned} J1 &= \sum_{l=1}^{Nl} (TPER + \sum_{n=1}^{Nn} (m_{l,n}/PPR_n + TP_n(x_{l,n}) \times fk(m_{l,n}))) = \\ &= \sum_{l=1}^{Nl} (40 \times Nl + \sum_{n=1}^{Nn} (m_{l,n}/PPR_n + TP_n(x_{l,n}) \times fk(m_{l,n}))). \quad (4.25) \\ J1 &= J1(M) \rightarrow \min_{M} M = \|m_{l,n}\|, \quad l = \overline{1, Nl}, n = \overline{1, Nn}. \end{aligned}$$

4.3.7 Разработка аналитической модели технологических ограничений

Поскольку учёт ограничений P_3, P_4, P_5 из (4.8) выполнен при введении матрицы M масс партий и матрицы переходов K , то, для трансформированной постановки задачи оптимального управления (узел А437, Рисунок 4.7), следует преобразовать ограничения $P_{1,1}, P_{1,2}, P_2, P_6$ из (4.8) в ограничения относительно переменных $m_{l,n}$. Логика преобразования ограничений заключается в следующем:

– представить в виде $P1$ ограничения $P_{1,1}, P_{1,2}$ на допустимую массу партии (4.26):

$$\begin{aligned} P1 &= P_1 \wedge P_2 \vee P_3, \\ l &= \overline{1, Nl}, n = \overline{1, Nn}: \quad (4.26) \end{aligned}$$

$$P_1(m_{l,n}): MIN_n \leq m_{l,n}, \quad P_2(m_{l,n}): m_{l,n} \leq MAX_n, \quad P_3(m_{l,n}): m_{l,n} = 0,$$

– преобразовать к виду (4.27), требуемому для решения задачи численными методами (4.27) – (4.28):

$$P1(m_{l,n}): \begin{cases} m_{l,n} \times (m_{l,n} - MIN_n) \geq 0 \\ m_{l,n} \times (m_{l,n} - MAX_n) \leq 0 \\ m_{l,n} \geq 0 \end{cases} \quad l = \overline{1, Nl}, n = \overline{1, Nn}, \quad (4.27)$$

где масса партий $m_{l,n}$ может принимать значения, кратные массе кратного сляба, $m_{l,n} = h \times MS_n$, де $h = 1, 2, \dots$ – шаг кратности.

$$P_2(m_{l,n}): \sum_{n=1}^{Nn} m_{l,n} \leq 1800000, \quad l = \overline{1, Nl}, \quad (4.28)$$

– представить ограничение P_6 по сумме масс всех партий кратных слябов, используемых для выполнения n -й позиции заказов во всех кампаниях валков, обеспечивающее прокатку всей массы n -й позиции (4.29):

$$P_6(m_{l,n}): \sum_{l=1}^{Nl} m_{l,n} = MKG_n, n = \overline{1, Nn}, \quad (4.29)$$

где MKG_n – масса кратных слябов, используемых для выполнения всех заказов n -й позиции заказов.

– разработать модель регламентного ограничения по срокам выполнения заказов, формализующая ограничение по времени в виде алгебраических выражений, включающих в себя переменные масс партий, что необходимо для реализации процедур численного поиска решения; в качестве математических объектов модели вводятся вспомогательные матрицы $MVZ(n) = \|mvz(n)_i\|, n = \overline{1, Nn}, i = \overline{1, Ni_n}$, где n — номер позиции заказа, i – номер поступившего заказа n -й позиции, а $mvz(n)_i$ определяет суммарную массу тех заказов n -й позиции, для которых требуемое заказчиком время выполнения TPZ_{p1} не больше требуемого времени выполнения i -го заказа этой же позиции:

$$mvz(n)_i = \sum_{p1 \in P1} MAS_{p1},$$

$$P1 = \{p1 | p1 = NZ_{n,i1}: TPZ_{p1} \leq TPZ_p, p = NZ_{n,i}\},$$

где $p, p1$ содержатся в наборах $NZ_n = (NZ_{n,1}, \dots, NZ_{n, Ni_n})$ как номера поступивших заказов PLZ_p , включённых на 1-м этапе планирования в группу G_n^4 заказов n -й позиции (номера упорядочены по возрастанию времени выполнения заказов), Ni_n — количество заказов n -й позиции, (3.39).

Также вводятся вспомогательные ступенчатые функции $TORD_n(m)$, определяющие время, к которому, для выполнения заказов в срок, должны быть прокатаны заказы n -й позиции суммарной массы m (4.30):

$$\begin{aligned} TORD_{1n}(m) &= \\ &= \begin{cases} TPZ_p \text{ при } m \in (0; mvz(n)_1], p = NZ_{n,1} \\ TPZ_p \text{ при } m \in (mvz(n)_{i-1}; mvz(n)_i], p = NZ_{n,i}, i = \overline{2; Ni_n}. \end{cases} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Аналогично вводятся матрицы $MPZ(n) = \|mpz(n)_l\|, n = \overline{2; Nn}, l \in \{1, \dots, Nl\}$, где l — номер кампании валков, в которой прокатывается лист n -й

позиции, $mpz(n)_l$ определяет сумму масс листов n -й позиции, прокатанных, согласно планируемой ПП, в первых l кампаниях валков (4.31):

$$TPR1_n(m) = \begin{cases} TK_{l_1,n} & \text{при } m \in (0; mpz(n)_{l_1}] \\ TK_{l,n} & \text{при } m \in (mpz(n)_{l_2}; mpz(n)_l], l \in \{l_1 + 1, \dots, Nl\}, \end{cases} \quad (4.31)$$

где l_1 — номер первой кампании валков, в которой выполняется заказ n -й позиции, l_2 — номер кампании валков, в которой выполняется заказ n -й позиции, предшествующей l -й кампании, время $TK_{l,n}$ окончания обработки листов n -й позиции в l -й кампании валков определяется согласно (4.32):

$$TK_{l,n} = \sum_{l_1=1}^{l-1} (40 \times Nl + \sum_{n_1=1}^{Nn} (m_{l_1,n_1}/PPR_{n_1} + TP_{n_1}(x_{l_1,n_1}) \times fk(m_{l_1,n_1}))) + \sum_{n_1=1}^n (m_{l,n_1}/PPR_{n_1} + TP_{n_1}(x_{l,n_1}) \times fk(m_{l,n_1})). \quad (4.32)$$

Тогда планируемая прокатка каждого из заказов n -й позиции должна завершаться раньше времени, указанного заказчиком, поэтому ограничение P_7 на время выполнения заказа представим в виде (4.33):

$$P_7(M): TORD1_n(mvz(n)_i) \geq TPR1_n(mvz(n)_i), n = \overline{1, Nn}, i = \overline{1, Ni_n}. \quad (4.33)$$

Согласно правил, трансформированный функционал цели принимает вид (4.34):

$$J1 = \sum_{l=1}^{Nl} \left(40 \times Nl + \sum_{n=1}^{Nn} \left(m_{l,n}/PPR_n + TP_n(x_{l,n}) \times fk(m_{l,n}) \right) \right), \quad (4.34)$$

$$J1 = J1(M) \rightarrow \min_M, M = \|m_{l,n}\|, l = \overline{1, Nl}, n = \overline{1, Nn}.$$

где переменные $x_{l,n}$ определяются согласно (4.17), полиномы $TP_n(x)$ согласно (4.22), (4.24), а область ограничений M на переменные $m_{l,n}$ задаётся условиями (4.26) – (4.33).

Функционал вида (4.34) позволяет выполнять поиск численного значения глобального экстремума на множестве переменных, принимающих дискретные значения. Поскольку точки экстремумов функционала $J1$ могут не совпадать с допустимыми целочисленными значениями $m_{l,n}$, то следует использовать целочисленный метод поиска глобального экстремума функционала $J1$. Данный подход реализован при разработке алгоритма решения задачи.

4.4 Разработка правил и алгоритма решения задачи оптимизации ПП

Алгоритм решения задачи оптимального планирования ПП [350], обеспечивающей выполнение всех позиций заказов (узлы А44, А45, А46, Рисунок 4.6), представлен на рисунке 4.8 в виде последовательности следующих действий.

Блок 1: вычисление минимально возможного количества кампаний валков в плановом периоде, обеспечивающего прокатку всего портфеля заказов.

Исходя из регламентного ограничения P_2 , вычисляется минимально возможное количество Nl кампаний валков, необходимых для прокатки суммы масс MKG_n , всех групп кратных слябов в течение планового периода (4.35):

$$Nl = \min l, l \in \{1, 2, \dots\}, l: \sum_{n=1}^{Nn} MKG_n \leq 1800000 \times l. \quad (4.35)$$

Пусть $Jl(Nl)$ — функционал (4.34) при фиксированном количестве Nl кампаний валков. При определении минимального значения функционала $Jl^*(Nl)$ для Nl кампаний валков реализованы следующие действия.

Блок 2.1: Для решения задачи поиска глобального минимума функционала $Jl(Nl)$, неприменимы градиентные методы в силу многоэкстремальности целевого функционала $Jl(Nl)$, большого количества переменных и наличия нелинейных ограничений. Для решения полученной задачи оптимального планирования поиск минимума целесообразно реализовать с помощью генетического алгоритма в комбинации с методом штрафных функций на основе инструментария пакета «Матлаб-2014». Согласно правилам работы с пакетом, необходима трансформация матриц ограничений (4.28), (4.29), и задание штрафных функций с целью учёта ограничения (4.33). В соответствии с этим, ограничения (4.28) по суммарной массе металла в кампании валков задаются в виде матриц A , B согласно (4.36), что позволяет представить (4.28) в виде (4.37):

$$A = \|a_{n,1}\|_{Nn \times 1}, B = \|b_{l,1}\|_{Nl \times 1}, \quad (4.36)$$

$$a_{n,1} = 1, n = \overline{1, Nn}, b_{l,1} = 1800000, l = \overline{1, Nl}. \quad (4.37)$$

$$M \times A \leq B.$$

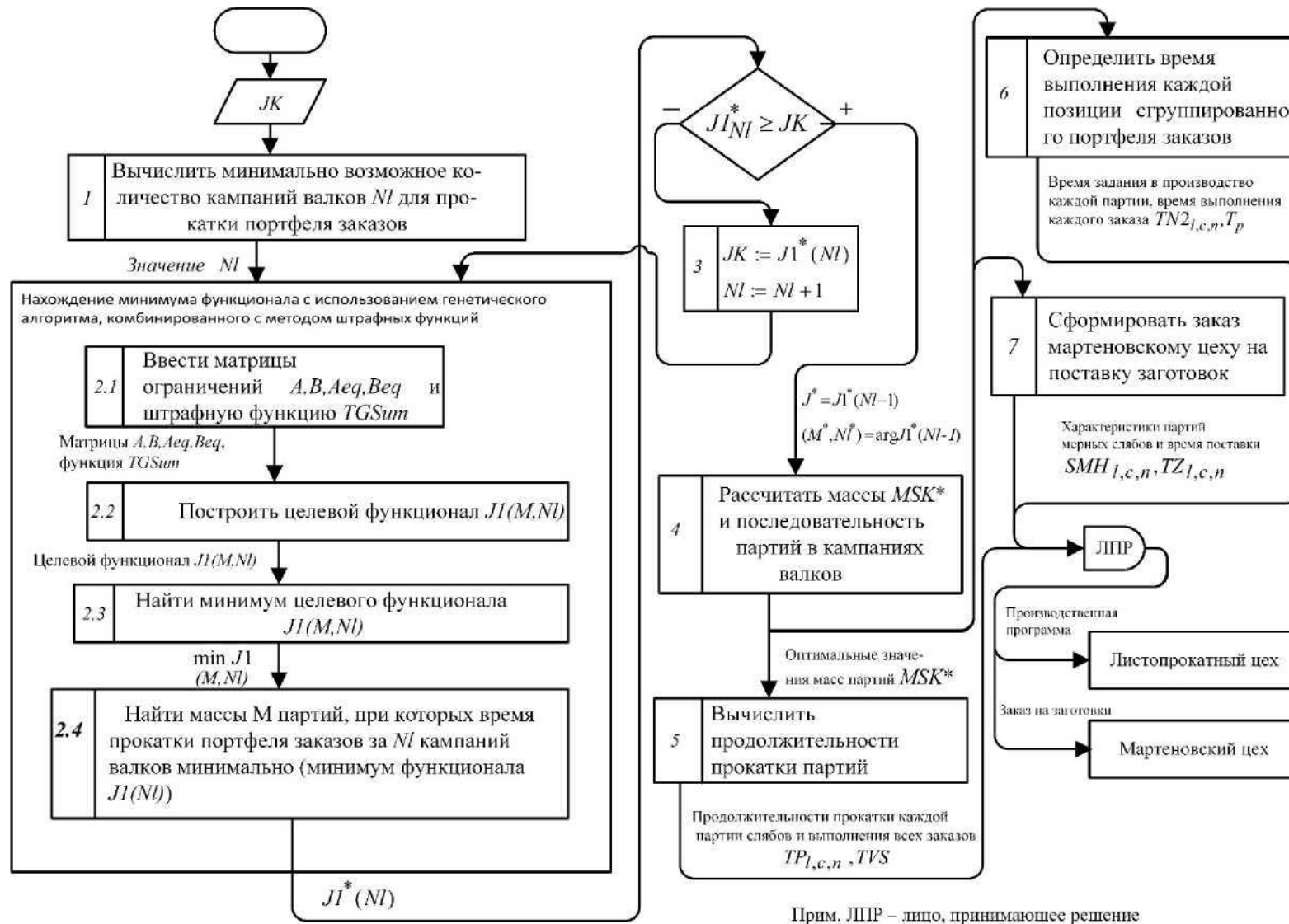


Рисунок 4.8 — Алгоритм решения задачи составления оптимальной производственной программы

Для трансформации ограничения (4.29) по суммарной массе листов n -й позиции задаются матрицы Aeq , Beq согласно (4.38), тогда (4.29) преобразуется к виду (4.39):

$$Aeq = \| \| aeq_{1,l} \| \|_{1 \times Nl}, Beq = \| \| beq_{1,l} \| \|_{1 \times Nn}, \quad (4.38)$$

$$aeq_{1,l} = 1, l = \overline{1, Nl}, beq_{1,n} = MKG_n, n = \overline{1, Nn}, \quad (4.39)$$

$$Aeq \times M = Beq.$$

Для формализации ограничения (4.33) вводятся штрафные функции $TG_{l,n,i}$ (4.40), каждая из которых принимает минимальное значение при выполнении (4.33), а сумма $TGSum$ штрафных функций определяется согласно (4.41):

$$TG_{l,n,i} = \begin{cases} 1000 & \text{при } TOR D1_n(mvz(n)_i) \geq TPR1_n(mvz(n)_i) \\ -1000 & \text{при } TOR D1_n(mvz(n)_i) < TPR1_n(mvz(n)_i) \end{cases} \quad (4.40)$$

$$l = \overline{1, Nl - 1}, n = \overline{1, Nn}, i = \overline{1, Ni_n}, \quad (4.41)$$

$$TGSum = \sum_{l=1}^{Nl} \sum_{n=1}^{Nn} \sum_{i=1}^{Ni_n} TG_{l,n,i},$$

где вспомогательные функции $TOR D_n(m)$ и $TPR1_n(m)$ формируются в соответствии с (4.30) и (4.31).

Блок 2.2, 2.3: В целевой функционал $J1$ включается штрафная функция $TGSum$ (4.42):

$$J1(Nl) = \sum_{l=1}^{Nl} \left(40 \times Nl + \sum_{n=1}^{Nn} \left(m_{l,n} / PPR_n + TP_n(x_{l,n}) \times fk(m_{l,n}) \right) \right) + TGSum. \quad (4.42)$$

Минимум $J1(Nl)$ определяется с помощью генетического алгоритма.

Далее, согласно разработанной процедуре решения, реализованной на рисунке 4.8 в виде цикла блоков 2 и 3, вычисляются минимумы функционалов $J1^*(Nl + i), i = 1, 2, \dots$, определяющие минимальное значение времени выполнения портфеля заказов при его прокатке в $Nl + i$ кампаний валков. В качестве критерия останова вычислений задаётся неравенство $J1^*(Nl + i) \leq J1^*(Nl) + i + 1$ тогда минимумом функционала является значение $j1^*(Nl + i)$, а множеством оптимальных значений масс M партий кратных слябов – $M^* = agrJ1^*(Nl + i)$.

Блоки 5, 6, 7: В этих блоках формируется оптимальная ПП, содержащая следующие значения временных характеристик:

- продолжительность $TP_{l,c,n}$ прохождения партии $SK_{l,c,n}$ по всем устройствам стана,
- продолжительность TVS прохождения всех партий кратных слябов по всем устройствам листопрокатного цеха,
- время $TN2_{l,c}$ задания в производство партии $SK_{l,c,n}$ слябов,
- время T_p , к которому планируется выполнить каждый из заказов,

Характеристики заказа на поставку мерных слябов задаются в виде (4.43):

$$ZMH = \bigcup_{l=1}^{Nl} \bigcup_{c=1}^{Nc_l} \{(SMH_{l,c,n}, TZ_{l,c,n})\}, \quad (4.43)$$

$$TZ_{l,c,n} = TN2_{l,c,n} - T1_{l,c,n},$$

где $TZ_{l,c,n}$ – время, к которому обеспечивается поставка мерных слябов партии $SM_{l,c,n}$, $T1_{l,c,n}$ – продолжительность порезки слябов на УПП (устройствах подготовки производства).

Разработанный алгоритм решения задачи оптимального планирования даёт возможность перейти к разработке структуры СППР и ПО для планирования выполнения заказов на листопрокатном производстве.

4.5 Разработка алгоритмов и программного обеспечения СППР

В данном разделе представлены инструментальные средства создания и использования ИТ СППР, допускающие автоматизированное планирование и управление предприятием конвейерного типа. В состав инструментальных средств входят алгоритмы и ПО подсистем планирования и оперативного управления, схема функционирования которых представлена на рисунке 4.9.

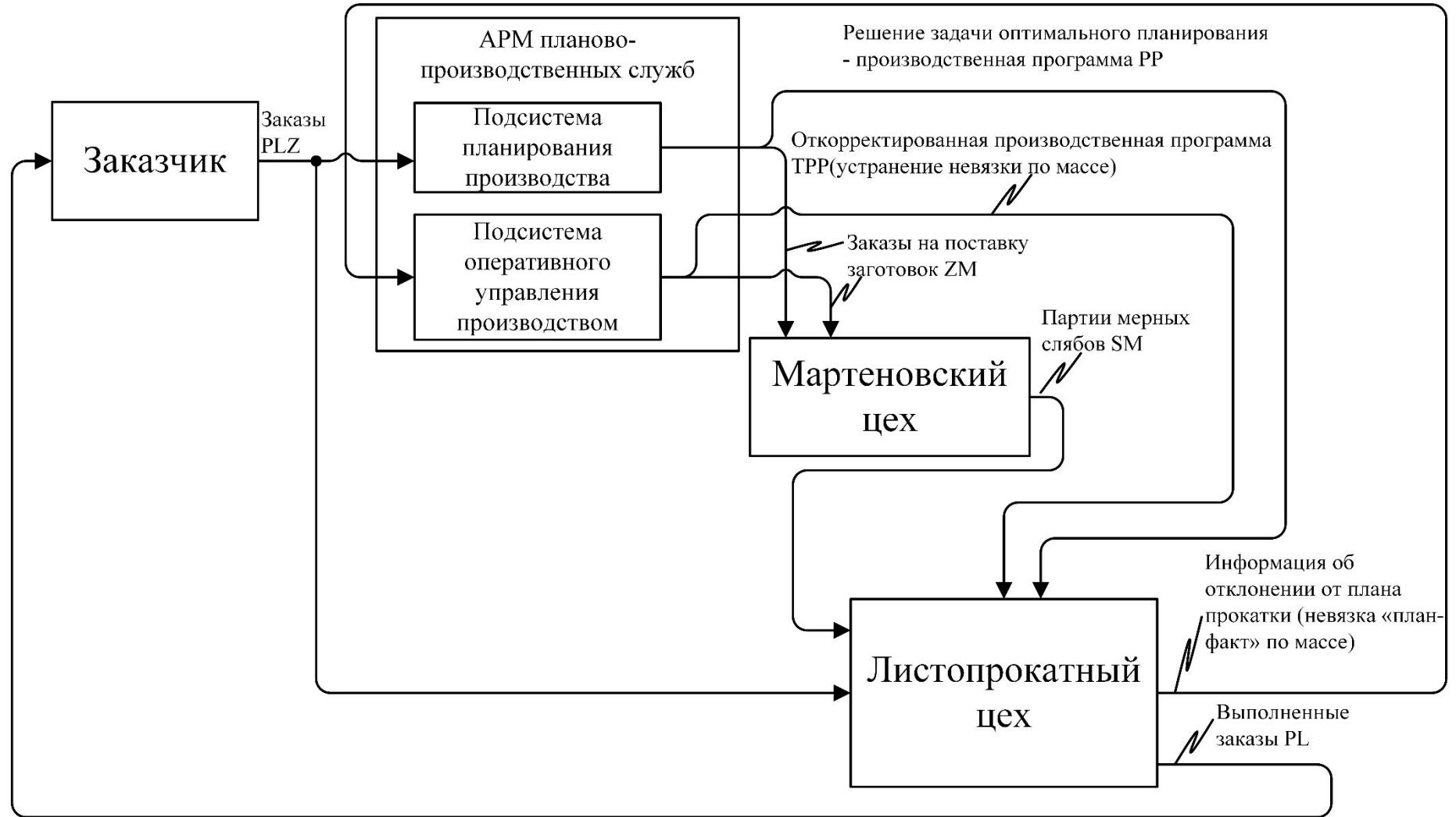


Рисунок 4.9 — Функциональная структура СППР планирования и оперативного управления листопрокатным производством

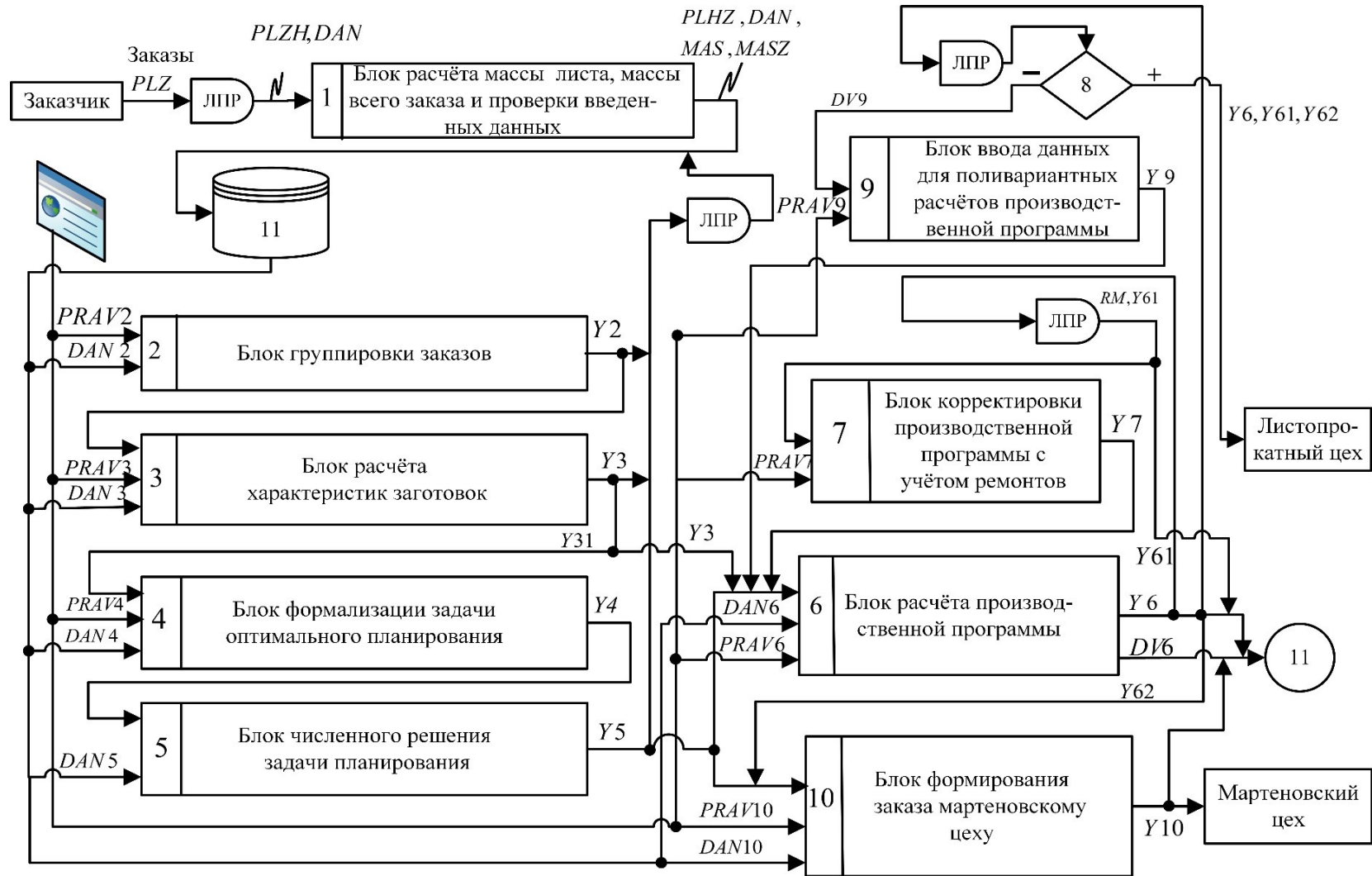
На основе введённых в подсистему планирования характеристик поступивших заказов, пользователь получает ПП работы листопрокатного цеха (обеспечивающую выполнение заказов за минимальное время) и характеристики заказа мартеновскому цеху на производство заготовок. Подсистема планирования также предусматривает возможность получения поливариантных расчётов ПП для оценки последствий реализации каждого из вариантов. Окончательный вариант ПП выбирается пользователем и направляется в листопрокатный цех для выполнения.

4.5.1 Разработка алгоритмов и ПО подсистемы принятия оптимальных решений при автоматизированном расчёте показателей ПП

В пункте излагается инструктивный материал, предписывающий правила использования разработанного ПО автоматизированных расчётов производственных показателей и включающий в себя: заполнение базы данных нормативно-справочной информацией, разработку базы знаний и правил её заполнения, использование правил базы знаний при автоматизированной переработке информации. Структура подсистемы планирования ПП выполнения заказов представлена на рисунке 4.10 и включает в себя следующие блоки.

4.5.1.1 Заполнение базы данных подсистемы планирования

Типоразмеры прокатных листов и время выполнения заказа указываются заказчиком и поступают пользователю СППР, который вносит их в базу данных системы планирования (Блок 1) в виде наборов $PLZH_p$, где $p = \overline{1, Np}$ — номер заказа. На основании этих типоразмеров в блоке 1 осуществляется расчёт и внесение в базу данных массы MAS_p листа заказа и массы $MASZ_p$ заказа.



8 - решение о принятии производственной программы (+) или запрос на получение поливариантных расчётов производственной программы (-)

Рисунок 4.10 — Функциональная структура подсистемы оптимального планирования выполнения заказов

Кроме того, пользователь вносит в базу данных значения технологических нормативов, представленных на рисунке 4.10 в виде множества DAN (4.44):

$$DAN = \{KFB_n, KFL_n, KS1_n, KM1_n, KGP, NP, MIN_n, MAX_n, TMIN_n, TMAX_n, PRT_n, PRK_n, TP7_n, TH7_n, TPER, KRZ, VG, PPR_n, D3_n, D4_n, CP_n\} \quad (4.44)$$

где $n = \overline{1, Nn}$ – номер позиции заказов.

Таким образом, полученные в результате расчётов показатели заносятся в базу данных подсистемы планирования. Автоматизированная переработка информации и решения оптимизационных задач осуществляется с помощью разработанных правил, составляющих наполнение базы знаний.

4.5.1.2 Формирование базы знаний подсистемы планирования

База знаний формируется на основании следующих правил реализации функций блоками подсистемы планирования, приведёнными на рисунке 4.10:

- правил *PRAV2* группировки входящих заказов на листовой прокат для расчёта характеристик $PLZH_n$ n -й позиции заказов и расчёта суммарной массы MG_n всех листов заказов n -й позиции;

- правил *PRAV3* расчёта характеристик SKH_n кратных слябов, используемых для проката n -й позиции заказов; характеристик SMH_n мерных слябов, необходимых для расчёта массы MKG_n кратных и MMG_n мерных слябов, необходимых для получения листового проката n -й позиции, вычисления коэффициента KUG_n угара сляба при порезке мерного сляба на кратные;

- правил *PRAV4* расчёта характеристик партий заготовок и последовательности их задания в производство, включающие в себя формирование функционала цели и ограничений задачи оптимального планирования, (4.10) – (4.34); расчёт времени TPR_n прокатки одной загрузки печи партии, в которой изготавливается n -я позиция, (4.9), продолжительности прокатки одного кратного сляба на клетки «трио» и на клетки «кварто»: $D3_n, D4_n$, количества CP_n кратных слябов n -й позиции, которые можно разместить в нагревательных печах;

- правил *PRAV6* выполнения автоматизированных расчётов по аналитическим моделям определения временных характеристик преобразования партий кратных слябов в заказанный прокат на оборудовании цеха;
- правил *PRAV7* корректировки ПП в зависимости от времени проведения ремонтов прокатного стана;
- правил *PRAV9* проверки выполнимости технологических ограничений (4.8) для введённых пользователем партий при поливариантном расчёт ПП;
- правил *PRAV10* формирования заказов на поставку мерных слябов всех типоразмеров.

4.5.1.3 Использование правил базы знаний при автоматизированной переработке информации

Функционирование подсистемы осуществляется согласно вышеуказанным правилам в блоках подсистемы на рисунке 4.10.

1. Блок 2 — на основании типоразмеров заказов на листовой прокат, поступивших от различных заказчиков для выполнения в течение планового периода и правил *PRAV2* группировки заказов рассчитывается масса групп однотипных заказов. Затем группы однотипных заказов упорядочиваются по убыванию ширин заказанного листа. В базу данных вносятся рассчитанные в блоке 2 значения выходных переменных $Y2$ (4.45):

$$Y2 = \{PLZH_n, MG_n, NZ_n\}, n = \overline{1, Nn}, \quad (4.45)$$

описание переменных (4.45) и классификация переменных подсистемы приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Классификация переменных блока группировки заказов (блок 2, Рисунок 4.10)

Обозначение переменной	Физический смысл
Входные переменные	
$DAN2=\{PLZH_p, KLZ_p, MASZ_p\}, p=1, Np$ – номер заказа $PLZH=\{MRSp, Hp, Bp, Lp, MASp\}$	
$PLZH_p$	Типоразмеры прокатных листов, указываются заказчиком
$MRSp, Hp, Bp, Lp, MASp$	Марка стали, толщина, ширина, длина и масса листа заказа
$KLZ_p, MASZ_p$	Количество листов и масса заказа, указываются заказчиком
$PRAV2$	Правила группировки входных заказов на листовой прокат для получения характеристик $PLHn$ листов n -й позиции заказов и правила вычисления массы $M Gn$ листов n -й позиции портфеля заказов
Выходные переменные	
$Y2=\{PLZHn, MGn, NZn\}, n=1, Nn$	
$PLZHn$	Типоразмеры листов n -й позиции заказов, упорядоченные по убыванию ширин прокатного листа
$M Gn$	Масса листов n -й позиции заказов
$N Zn$	Номера заказов p , поступивших от заказчика, объединённые в n -ю группу заказов

2. Блок 3 — на основании правил $PRAV3$ вычисляются типоразмеры и масса заготовок, необходимых для выполнения поступивших заказов, для каждой из сформированных в блоке 2 групп заказов. В базу данных вносятся рассчитанные в блоке 3 значения выходных переменных $Y3$ (4.46):

$$Y3 = \{SMH_n, MMG_n, MKG_n, KUG_n\}, n = \overline{1, Nn}, \quad (4.46)$$

описание переменных (4.46) и классификация переменных блока 3 приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 — Классификация переменных блока расчёта характеристик заготовок (блок 3, Рисунок 4.10)

Обозначение переменной	Физический смысл
Входные переменные	
$Y2=\{PLZHn, MGn, NZn\}, n=1, Nn$, блок 2	
$PLZHn$	Типоразмеры листов n -й позиции заказов
$M Gn$	Масса листов n -й позиции заказов
$N Zn$	Номера заказов p , поступивших от заказчика, объединённые в n -ю группу заказов
$DAN3=\{KFBn, KFLn, KS1n, KM1n, KGP\}, n=1, Nn$	
$KFBn, KFLn$	Коэффициент припуска на боковую и торцевую обрешь, DAN , (4.44)

Продолжение таблицы 4.3

$KS1n$	Количество листов n -й позиции заказов, получаемых из одного кратного сляба, определяется пользователем СППР с учётом условия 3.17), DAN, (4.44)
$KM1n$	Количество кратных слябов, получаемых при порезке мерного сляба n -й позиции заказов, определяется пользователем СППР с учётом DAN, (4.44)
KGP	Коэффициент угара кратного сляба в печи, DAN, (4.44)
$PRAV3$	Правила вычисления характеристик $SMHn$ мерных слябов, необходимых для получения листового проката n -й позиции заказов, массы $MMGn$ мерных и кратных $MKGn$ слябов, коэффициента $KUGn$ угара сляба при порезке мерного сляба на кратные
Выходные переменные	
$Y3=\{SMHn,MMGn,MKGn,KUGn\},n=1,Nn$	
$SMHn$	Характеристики мерных и кратных слябов для листового проката n -й позиции
$MKGn,MMGn$	Масса кратных и мерных слябов необходимых для получения листового проката n -й позиции заказов
$KUGn$	Коэффициент угара при порезке мерного сляба на кратные

3. Блок 4 — с учётом правил $PRAV4$ и $PRAV6$ рассчитываются параметры функционала цели задачи оптимального планирования и системы ограничений задачи. Классификация переменных блока приведена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 — Классификация переменных блока формализации задачи оптимального планирования (блок 4, Рисунок 4.10)

Обозначение переменной	Физический смысл
Входные переменные	
$Y31=\{MSn,MKGn\},n=1,Nn$, блок 3	
MSn	Масса кратного сляба, используемого для выполнения n -й позиции заказов, характеристика $SMHn$, $Y3$, (4.46)
$MKGn$	Масса всех кратных слябов, используемых для выполнения n -й позиции заказов, $Y3$, (4.46)
NZn	Номера заказов p , поступивших от заказчика, объединённые в n -ю группу заказов, $Y2$, блок 2, (4.45)
$TZPp$	Время выполнения p -го заказа, указывается заказчиком, вводится пользователем СППР в базу данных, блок 1
$DAN4=\{Bn,PRTn,PRKn,TMINn,TMAXn,MINn,MAXn,NP\},n=1,Nn$	
Bn	Ширина листа n -й позиции заказов, содержится в $PLZHn$, $Y2$, блок 2, (4.45)
$PRTn,PRKn$	Производительность (кг/час) прокатки заказов n -й позиции заказов на клетки «трио» и клетки «кварто», вводится пользователем СППР, DAN, (4.44)
$TMINn,TMAXn$	Минимально и максимально допустимое время нагрева одной загрузки печи партии, в которой прокатывается n -я позиция заказов, DAN, (4.44)
$MINn,MAXn$	Минимально и максимально допустимая масса металла партии, в которой прокатывается n -я позиция заказов, в кампании рабочих валков клетки «кварто», DAN, (4.44)

Продолжение таблицы 4.4

<i>NP</i>	Количество нагревательных печей, находящихся в рабочем состоянии в течение периода планирования, определяется пользователем СППР, <i>DAN</i> , (4.44)
<i>PRAV4</i>	Правила вычисления времени <i>TPRn</i> прокатки одной загрузки печи партии, в которой прокатывается <i>n</i> -я позиция заказов, (4.9), продолжительности прокатки одного кратного сляба на клетки «трио» и на клетки «кварто» <i>D3n</i> , <i>D4n</i> , количества <i>CPn</i> кратных слябов <i>n</i> -й позиции, которые можно разместить в нагревательных печах, формирования функционала цели и ограничений задачи оптимального планирования, (4.10) – (4.34)
<i>PRAV6</i>	Математические модели прогноза временных характеристик преобразования партий кратных слябов на технологическом оборудовании листопрокатного цеха
Выходные переменные	
<i>Y4</i>	Функционал цели и ограничения задачи оптимального планирования, (4.10) – (4.34)

4. Блок 5 — реализуется процедура численного решения оптимизационной задачи с помощью генетического алгоритма в комбинации с методом штрафных функций (подраздел 4.4, Рисунок 4.8), классификация переменных блока приведена в таблице 4.5.

Таблица 4.5 — Классификация переменных блока численного решения задачи оптимального планирования (блок 5, Рисунок 4.10)

Обозначение переменной	Физический смысл
Входные переменные	
$DAN5 = \{MKGn, MSn, KS1n, MASn\}, n=1, Nn$	
<i>MKGn</i>	Масса всех кратных слябов, используемых для выполнения <i>n</i> -й позиции заказов, <i>Y3</i> , блок 3, (4.46)
<i>MSn</i>	Масса кратного сляба, используемого для выполнения <i>n</i> -й позиции заказов, характеристики <i>SMHn</i> , <i>Y3</i> , блок 3, (4.46)
<i>KS1n</i>	Количество листов <i>n</i> -й позиции заказов, получаемых из одного кратного сляба, характеристики <i>SMHn</i> , <i>DAN</i> , (4.44)
<i>MASn</i>	Масса листа <i>n</i> -й позиции заказов, характеристики <i>PLZHn</i> , <i>Y2</i> , блок 2, (4.45)
<i>Y4</i>	Функционал цели и ограничения задачи оптимального планирования, (4.10) – (4.34), блок 4
Выходные переменные	
$Y5 = \{NML,c, ml,n, MKPl,c, KSPl,c, MASLl,c, Ncl, Nl\}, l=1, Nl, c=1, Ncl, n=1, Nn$	
<i>NML,c</i>	Номер позиции заказов, выполняемой в <i>c</i> -й партии <i>l</i> -й кампании валков, (4.50)
<i>ml,n</i>	Масса партии кратных слябов, задаваемой в производство для выполнения <i>n</i> -й позиции в <i>l</i> -й кампании валков, (4.50)
<i>MKPl,c</i>	Масса <i>c</i> -й партии кратных слябов в <i>l</i> -й кампании, (4.47)

Продолжение таблицы 4.5

$KSP_{l,c}$	Количество кратных слябов c -й партии в l -й кампании, (4.48)
$MASL_{l,c}$	Масса всех листов готового проката, изготавливаемых в c -й партии l -й кампании валков, (4.49)
Ncl, Nl	Количество партий в l -й кампании валков, количество кампаний валков, за которое планируется прокатать весь портфель заказов на плановый период

Решением подсистемы являются численные значения матрицы переменных масс партий $M = \|m_{l,n}\|$. Номера типоразмеров n всех ненулевых элементов полученной матрицы M присваиваются переменным $NM_{l,c}$ — таким образом, в $NM_{l,c}$ фиксируется номер позиции n заказов для партии, выполняемой c -й по порядку в l -й кампании валков. Тогда масса $MKP_{l,c}$ c -й партии, задаваемой в производство в l -й кампании валков определяется согласно (4.47):

$$MKP_{l,c} = m_{l, NM_{l,c}}, l = \overline{1, Nl}, c = \overline{1, Nc_l}. \quad (4.47)$$

Количество $KSP_{l,c}$ кратных слябов, задаваемых в производство, а также суммарная масса $MASL_{l,c}$ листов готового проката для c -й партии l -й кампании валков определяются согласно (4.48), (4.49):

$$KSP_{l,c} = MKP_{l,c} / MS_{NM_{l,c}}, l = \overline{1, Nl}, c = \overline{1, Nc_l}, \quad (4.48)$$

$$MASL_{l,c} = MAS_{NM_{l,c}} \times KSP_{l,c} \times KS1_{NM_{l,c}}, l = \overline{1, Nl}, c = \overline{1, Nc_l}, \quad (4.49)$$

где MAS_n , MS_n — масса листа и масса кратного сляба n -й позиции заказов, таблица 4.2, В.28, $KS1_n$ — количество листов n -й позиции заказов, получаемых из одного кратного сляба, таблица 4.3.

В базу данных вносятся рассчитанные в блоке 5 значения выходных переменных $Y5$ (4.50):

$$Y5 = \{NM_{l,c}, m_{l,n}, MKP_{l,c}, KS_{l,c}, MASL_{l,c}, Nc_l, Nl\}, \quad (4.50)$$

5. Блок 6 — на основании полученных оптимальных решений блока 5 и правил $PRAV6$ расчёта временных показателей преобразования партий кратных слябов на технологическом оборудовании листопрокатного цеха, формируется ПП работы цеха на плановый период, содержащая в себе временные показатели

прокатки заказов $DV6$, которые заносятся в базу данных вместе с другими выходными переменными $Y6, Y61, Y62$ блока 6 (4.51) – (4.52):

$$DV6 = \{DN2_{l,c}, TK3_{l,c}, TZ2_{l,c}, TZP2_{l,c}, D5_{l,c}, D6_{l,c}\}, \quad (4.51)$$

$$Y6 = \{TN2_{l,c}, TP_{l,c}, TVS, T_p\}, Y61 = \{TK2_{l,c}, D2_{l,c}, DP2_{l,c}, T1_{l,c}\}, \quad (4.52)$$

$$Y62 = \{TZ_{l,c}\}, l = \overline{1, Nl}, c = \overline{1, Nc_l}, p = \overline{1, Np},$$

описание переменных (4.51), (4.52) и классификация переменных блока 3 приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 — Классификация переменных блока расчёта производственной программы (блок 6, Рисунок 4.10)

Обозначение переменной	Физический смысл
Входные переменные	
$Y5 = \{NML, c, Ncl, Nl, MKPl, c, KSPl, c, MASLl, c\}, l = \overline{1, Nl}, c = \overline{1, Ncl}$	
NML, c	Номер позиции заказов, изготавливаемых в c -й партии l -й кампании валков, блок 5
Ncl, Nl	Количество партий в l -й кампании валков, количество кампаний валков, за которое планируется прокатать весь портфель заказов на плановый период, , блок 5
$MKPl, c$	Масса партии кратных слябов, задаваемых в производство в c -й партии l -й кампании валков, (4.47), блок 5
$KSPl, c$	Количество кратных слябов, задаваемых в производство в c -й партии l -й кампании валков, (4.48), блок 5
$MASLl, c$	Масса всех листов готового проката, получаемых в c -й партии l -й кампании валков, (4.49), блок 5
$DAN6 = \{MASZp, NZn, KS1n, PLZHn, SMHn, D3n, D4n, CPn, TMINn, TMAXn, TP7n, TH7n, TPER, VG, KRZ\}, n = \overline{1, Nn}, p = \overline{1, Np}$	
$MASZp$	Масса p -го заказа
NZn	Номера заказов p , поступивших от заказчика, объединённые в n -ю группу заказов, $Y2$, блок 2
$KS1n$	Количество листов n -й позиции заказов, получаемых из одного кратного сляба, определяется пользователем СППР, DAN , (4.44)
$PLZHn$	Характеристики заказа n -й позиции, $Y2$, блок 2
$SMHn$	Характеристики мерных и кратных слябов, необходимых для получения листового проката n -й позиции заказов, $Y3$, блок 3
$D3n, D4n$	Продолжительности прокатки кратного сляба на клетки «трио» и клетки «кварто», DAN , (4.44)
CPn	Количество кратных слябов n -го типоразмера, которые можно разместить в печах нагрева, DAN , (4.44)
$TMINn, TMAXn$	Минимально и максимально допустимое время нагрева одной загрузки печи партии, в которой изготавливают n -ю позицию, вводится пользователем СППР, DAN , (4.44)

Продолжение таблицы 4.6

$TP7n$	Продолжительность проведения проб и анализов одного листа готового проката n -й позиции заказов, вводится пользователем СППР, DAN , (4.44)
$TH7n$	Продолжительность охлаждения листа готового проката n -й позиции заказов, вводится пользователем СППР, DAN , (4.44)
$TPER$	Продолжительность выполнения перевалки на клетки «кварто», вводится пользователем СППР, DAN , (4.44)
VG	Время года, вводится пользователем СППР, DAN , (4.44)
KRZ	Коэффициент резервного времени, устанавливается пользователем СППР, DAN , (4.44)
$PRAV6$	Математические модели прогноза временных показателей преобразования партий кратных слябов на технологическом оборудовании цеха
Выходные переменные	
$Y6=\{TN2l,c,TPl,c,TVS,Tp\}$, $Y61=\{TK2l,c,D2l,c,DP2l,c,T1l,c\}$, $Y62=\{TZl,c\}$, $l=1,Nl$, $c=1,Ncl$, $p=1,Np$	
$TN2l,c$	Время задания в производство партии кратных слябов SKl,c,n
TPl,c,TVS	Продолжительность прокатки партии SKl,c,n кратных слябов, продолжительность выполнения всех заказов портфеля
Tp	Время выполнения каждого заказа, p – номер заказа
$TK2l,c$	Время $TK2l,c$ окончания нагрева всех кратных слябов партии SKl,c,n
TZl,c	Время, к которому мартеновский цех должен обеспечить поставку мерных слябов партии SML,c,n
$DV6=\{D2l,c,DN2l,c,DP2l,c,T1l,c,TK2l,c,TK3l,c,TZ2l,c,TZP2l,c,D5l,c,D6l,c\}$, $l=1,Nl$, $c=1,Ncl$	
$D2l,c,DP2l,c$	Продолжительность $D2l,c$ нагрева одной загрузки печи кратными слябами партии SKl,c,n , продолжительность нагрева всех кратных слябов партии SKl,c,n
$DN2l,c$	Продолжительность $DN2l,c$ нагрева первой загрузки печи кратными слябами партии SKl,c,n
$T1l,c$	Продолжительность $T1l,c$ порезки на УПП и доставки в листопрокатный цех партии SKl,c,n кратных слябов
$TK3l,c$	Время окончания прокатки на клетки «трио» слябов партии SKl,c,n
$TZ2l,c,TZP2l,c$	Продолжительность запаздывания в обработке одной за-грузки печи и всей партии SKl,c,n
$D5l,c,D6l,c$	Продолжительность обработки одного листа на устройствах блоков 5,6

Разработанная ПП представляется пользователю, который, на её основании и, с учётом технологических нормативов ремонта оборудования, определяет время проведения ремонтов в виде пар: $RM = \{RM1_k, RM2_k\}$, $k = \overline{1, Nk}$, где $RM1_k$ — время начала k -го ремонта, $RM2_k$ — время завершения k -го ремонта стана. На основании величин $RM1_k$, $RM2_k$, выходных переменных блока 6 — временных

характеристик прокатки $Y61$, и правил корректировки $PRAV7$ производится корректировка ПП.

В блоке 7 рассчитываются корректируемые выборочные значения временных показателей прокатки $Y7$ (Таблица 4.7), которые направляются на вход блока 6. Значения $Y7$ используются в блоке 6 для формирования окончательной ПП работы листопрокатного цеха на плановый период (выполняется расчёт значений переменных $Y6$, $Y61$, $Y62$).

Таблица 4.7 — Классификация переменных блока корректировки производственной программы с учётом ремонтов стана (блок 7, Рисунок 4.10)

Обозначение переменной	Физический смысл
Входные переменные	
Ncl, Nl	Количество партий в l -й кампании валков, количество кампаний валков, за которое планируется прокатать весь портфель заказов на плановый период, $Y5$, блок 5
$Y61 = \{TK2l,c, D2l,c, DP2l,c, T1l,c\}, l=1, Nl, c=1, Ncl$	
$TK2l,c$	Время окончания нагрева всех кратных слябов партии SKl,c,n , блок 6
$D2l,c, DP2l,c$	Продолжительность нагрева одной загрузки печи кратными слябами партии SKl,c,n , продолжительность нагрева всех кратных слябов партии SKl,c,n , блок 6
$T1l,c$	Продолжительность $T1l,c$ порезки на УПП и доставки в цех партии SKl,c,n кратных слябов, блок 6
$RM = \{RM1k, RM2k\}, l=1, Nl, c=1, Ncl, k=1, Nk$	
$RM1k, RM2k$	Время начала и окончания k -го ремонта, вводится пользователем СППР
$PRAV7$	Правила корректировки ПП в зависимости от времени проведения ремонтов прокатного стана
Выходные переменные	
$Y7 = \{TN2l,c, TK2l,c, TZl,c\}, l=1, Nl, c=1, Ncl$	
$TN2l,c, TK2l,c$	Откорректированное с учётом ремонтов время задания в производство кратных слябов партии SKl,c,n и времени окончания нагрева всех кратных слябов партии SKl,c,n
TZl,c	Откорректированное значение времени поставки мартеновским цехом мерных слябов партии SML,c,n

6. Блок 8 — рассчитанная оптимальная ПП $Y6$ представляется пользователю, который может принять решение об использовании этой программы, либо субъективно изменяет массы некоторых партий и последовательность задания их в производство, определяя их значения в запросе

$DV9$ (Таблица 4.8) для формирования квазиоптимального или субъективного расчёта.

7. Блок 9 — расчёт ПП субъективного характера. Для вводимых с помощью правил $PRAV9$ пользователем характеристик партий выполняется автоматизированная проверка выполнимости технологических и регламентных ограничений. При условии непротиворечивости субъективных данных ограничениям, вычисляются значения выходных переменных $Y9$ блока 9 (Таблица 4.8) и вместе со значениями переменных $DV9$ направляются в блок 6 в качестве входных переменных для расчёта новой ПП. При автоматизированном расчёте субъективно вводимых показателей возможно получение поливариантных расчётов ПП, оценка эффективности которых осуществляется пользователем или экспертом.

Таблица 4.8 — Классификация переменных блока ввода данных для поливариантных расчётов производственной программы (блок 9, Рисунок 4.10)

Обозначение переменной	Физический смысл
Входные переменные	
$DV9 = \{NML, c, Ncl, Nl, MKPl, c\}, l=1, Nl, c=1, Ncl$	
NML, c	Номер позиции заказов, выполняемой в c -й партии l -й кампании валков, определяется пользователем СППР
Ncl, Nl	Количество партий в l -й кампании валков, количество кампаний валков, за которое планируется прокатать портфель заказов на плановый период, определяется пользователем СППР
$MKPl, c$	Масса кратных слябов c -й партии l -й кампании валков, определяется пользователем СППР для поливариантных расчётов
$PRAV9$	Правила проверки выполнимости технологических ограничений (4.8) для введённых пользователем СППР партий для поливариантных расчётов ПП
Выходные переменные	
$Y9 = \{DV9, KSPl, c, MASLl, c\}, l=1, Nl, c=1, Ncl$	
$KSPl, c$	Количество кратных слябов, задаваемых в производство в c -й партии l -й кампании валков, (4.48)
$MASLl, c$	Масса всех листов готового проката, получаемых в c -й партии l -й кампании валков, (4.49)

8. Блок 10 — согласно правилам $PRAV10$ формируется заказ $Y10$ на поставку заготовок всех типоразмеров, в основе которого лежат оптимальные решения блока 6 или субъективные показатели ПП1 блока 9. Заказ $Y10$ содержит характеристики: MZ — массы и количества мерных слябов, предназначенных для

изготовления заказов; наборы ZMH , содержащие характеристики мерных слябов для каждой из партий, задаваемых в производство (согласно разработанному в блоке 6 плану) и планируемое время поставки мерных слябов для каждой партии. Классификация переменных подсистемы приведена в таблице 4.9.

Таблица 4.9 — Классификация переменных блока формирования заказа мартеновскому цеху (блок 10, Рисунок 4.10)

Обозначение переменной	Физический смысл
Входные переменные	
$DAN10 = \{NML,c, Ncl, Nl, TZl,c, SMHn, MMGn\}, l=1, Nl, c=1, Ncl, n=1, Nn$	
NML,c	Номер позиции заказов, выполняемой в c -й партии l -й кампании, $Y5$, блок 5, $Y9$, блок 9
Ncl, Nl	Кол-во партий в l -й кампании, кол-во кампаний, за которое планируется прокатать портфель заказов на плановый период, $Y5$, блок 5, $Y9$, блок 9
TZl,c	Время, к которому мартеновский цех должен поставить слябы партии SMl,c,n , $Y7$, блок 7
$SMHn$	Характеристики мерных и кратных слябов, необходимых для получения листового проката n -й позиции заказов, $Y3$, блок 3
$MMGn$	Масса мерных и кратных слябов необходимых для получения проката n -й позиции заказов, $Y3$, блок 3
$PRAV10$	Правила формирования заказа мартеновскому цеху на поставку мерных слябов всех типоразмеров
Выходные переменные	
$Y10 = \{Ncl, Nl, MZ, ZM\}, l=1, Nl$	
Ncl, Nl	Количество партий в l -й кампании валков, количество кампаний, за которое планируется прокатать портфель заказов
$MZ = \{MZ1m, MZ2m, h, MZ3m, h, b, MZ4m, h, b, l\}$ $MZ1m = (MST1m, KMG1m, MMG1m), m=1; Nm$ $MZ2m, h = (MST1m, HS2m, h, KMG2m, h, MMG2m, h), h=1; Nhm$ $MZ3m, h, b = (MST1m, HS2m, h, BS3m, h, b, KMG3m, h, b, MMG3m, h, b), b=1; Nbm, h$ $MZ4m, h, b, l = (MST1m, HS2m, h, BS3m, h, b, LS4m, h, b, l, KMG4m, h, b, l, MMG4m, h, b, l) l=1; Nlm, h, b$	
Nm	Количество различных марок стали в заказах на плановый период (количество групп $Gm1$ по марке стали заказов)
Nhm	Количество различных толщин листа в заказах группы $Gm1$ (кол-во групп $Gm, h2$ 2-го уровня по толщине заказанного листа в группе $Gm1$)
Nbm, h	Количество различных ширин листа в заказах группы $Gm, h2$ (кол-во групп $Gm, h, b3$ 3-го уровня по ширине листа в группе $Gm, h2$)
Nlm, h, b	Кол-во различных длин листа, указанных в заказах группы $Gm, h, b3$ (количество групп $Gm, h, b, l4$ 4-го уровня по длине заказанного листа в группе $Gm, h, b3$)
$MST1m$	Марка стали мерных слябов группы
$HS2m, h,$ $BS3m, h, b,$ $LS4m, h, b, l$	Толщина, ширина, длина мерных слябов группы

Продолжение таблицы 4.9

<i>KMG1m,</i> <i>KMG2m,h,</i> <i>KMG3m,h,b,</i> <i>KMG4m,h,b,l</i>	Количество мерных слябов группы <i>Gm1, Gm,h2, Gm,h,b3, Gm,h,b,l4</i>
<i>MMG1m,</i> <i>MMG2m,h,</i> <i>MMG3m,h,b,</i> <i>MMG4m,h,b,l</i>	Масса мерных слябов группы <i>Gm1, Gm,h2, Gm,h,b3, Gm,h,b,l</i>
$ZMH = \cup\cup\{(SMHl,c,n;TZl,c)\}Nclc=1Nll=1$	
<i>SMHl,c,n</i>	Характеристики мерных слябов, используемых в <i>c</i> -й партии <i>l</i> -й кампании валков, включающие в себя характеристики кратных слябов
<i>TZl,c</i>	Время, к которому мартеновский цех должен обеспечить поставку мерных слябов партии <i>SML,c,n</i>

Значения выходных переменных Y_{10} блока 10 заносятся в базу данных процесса (4.53):

$$Y_{10} = \{Nc_l, Nl, MZ, ZMH\}, l = \overline{1, Nl}. \quad (4.53)$$

Для корректировки ПП в случае нарушения планового задания в работе предлагается инструментарий оперативного управления производством.

4.5.2 Разработка структурной модели, алгоритмов и ПО подсистемы оперативного управления

В течение планового периода может возникнуть нарушение ПП, в результате чего некоторая часть заказов остаётся не выполненной, то есть, появляется «невязка» план-факт. В связи с этим возникает необходимость определить в ритме с производственным процессом возможные варианты отработки образовавшейся «невязки» в текущем плановом периоде при условии, что задание ПП на эти периоды будет выполнено вместе с «невязкой». Это определяет целесообразность разработки структурной модели подсистемы оперативного управления, в функции которой входит выработка решений по изготовлению не выполненных в результате нарушения ПП заказов.

Для разработки структурной модели подсистемы необходимо определить правила заполнения базы данных оперативной информацией, определить правила

наполнения базы знаний, разработать правила использования подсистемы при автоматизированной переработке оперативной информации. Структура подсистемы оперативного управления представлена на рисунке 4.11.

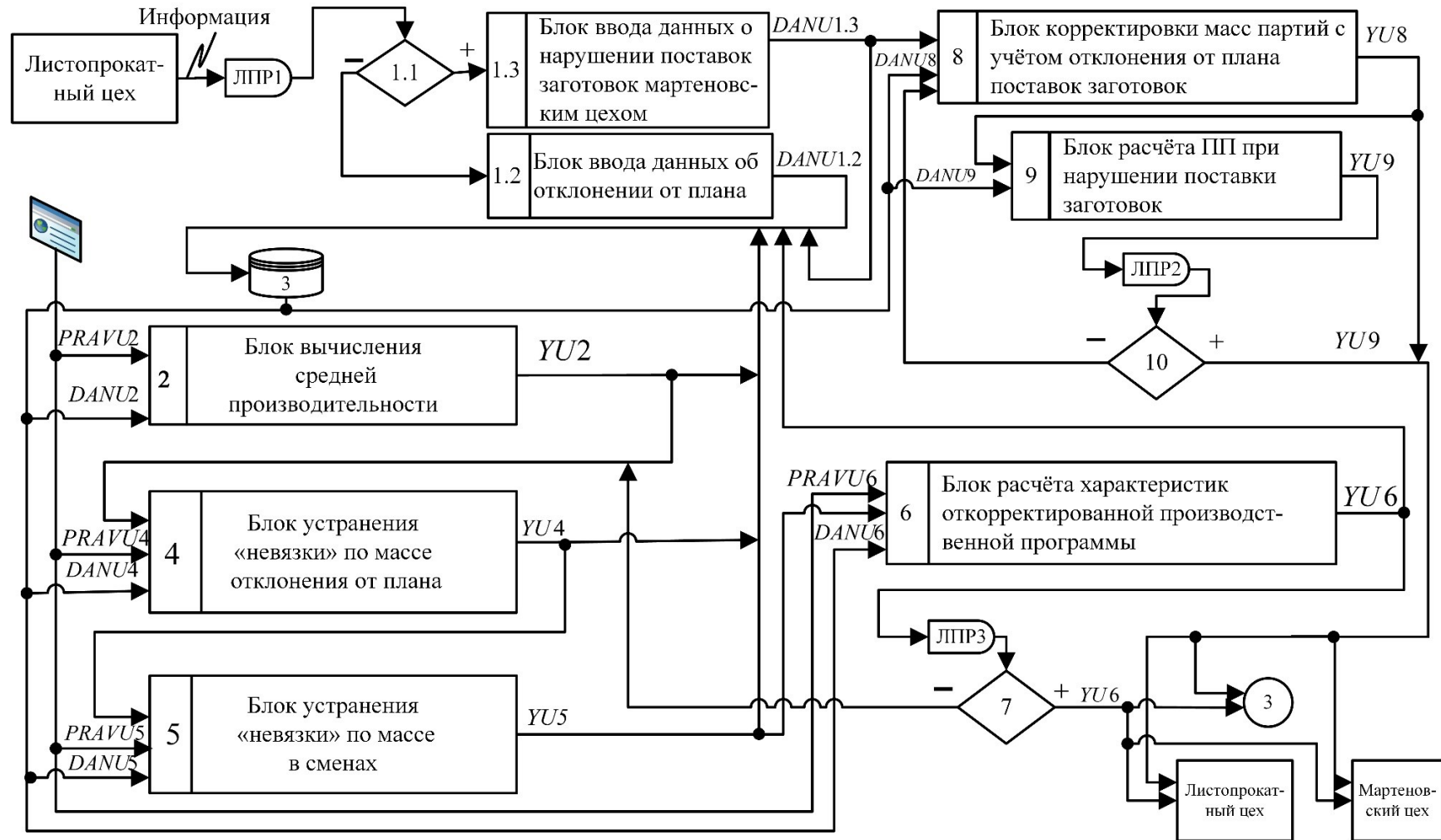
4.5.2.1 Разработка правил формирования базы данных подсистемы оперативного управления

База данных подсистемы оперативного управления имеет доступ и оперирует с нормативно-справочной информацией подсистемы планирования, а модель подсистемы оперирует с переменными подсистемы планирования. В базу данных подсистемы оперативного управления вводится информация о нарушениях ПП, возникающих в оперативном режиме. Пользователь СППР задаёт тип отклонения от планового задания с помощью переменной SIT (блок 1.1, Рисунок 4.11). Заданное значение переменной SIT определяет следующее правило заполнения базы данных.

1. При отклонении от плана из-за невыполнения одной из рабочих смен задания, $SIT=1$, информация передаётся в блок ввода данных (блок 1.2). Для ввода данных об отклонении используется набор переменных (4.54):

$$DANU1.2 = \{ ivb, isb, lb, cb, nzb, MB, lsl, KRZ1_{iv,is} \}, \quad (4.54)$$

где ivd, isb — номер выхода смены в течение планового периода и номер смены, во время работы которой не выполнено плановое задание; lb, cb, nzb — номер кампании валков, партии кратных слябов в этой кампании и номер позиции заказов, не прокатанной согласно плану; MB — масса не прокатанного согласно плану металла партии $SK_{ld,cd,nzd}$; lsl — номер кампании валков, к окончанию которой будет обеспечена поставка заготовок, необходимых для выполнения «невязки»; $KRZ1_{iv,is}$ — исходное значение коэффициента, характеризующего резерв времени, определяет часть общей длительности выхода смены, выделяемую в качестве резерва при планировании для iv -го (в течение планового периода) выхода is -й смены, $iv = \overline{1,21}, is = \overline{1,6}$.



1.1 - определяется тип «невязки»: непоставка мартеновским цехом слэбов для проката(+) или отклонение от плана (-)

7,10 - ЛПП утверждает ГПП (+) или ЛПП отправляет требование о расчёте другого варианта устранения невязок (-)

Рисунок 4.11 — Структурная модель подсистемы оперативного управления производством

2. При нарушении графика поставок мерных слябов, $SIT = 2$, информация передаётся в блок ввода данных о нарушении поставок (блок 1.3, Рисунок 4.11).

Для ввода данных об отклонении используется набор переменных (4.55):

$$DANU1.3 = \{lbm, cbm, nzm, lm1 \}, \quad (4.55)$$

где lbm , cbm , nzm – номер кампании валков, номер партии кратных слябов в этой кампании, номер позиции заказов, для которой мартеновский цех не поставил мерные слябы; $lm1$ – номер кампании валков, к которой мартеновский цех сможет поставить мерные слябы для выполнения nzm -й позиции заказов.

4.5.2.2 Разработка правил наполнения базы знаний и их использования подсистемой оперативного управления

База знаний подсистемы оперативного управления формируется из следующих элементов:

- правил $PRAVU2$ расчёта функции средней производительности прокатки металла в течение планового периода, (4.56), (4.57),
- правил $PRAVU4$ формализации технологических ограничений и функционала цели задачи оптимизации, (4.58) - (4.65),
- правил $PRAVU5$ корректировки коэффициента $KRZ1_{iv,is}$ резервного времени, отводимого на iv -й выход is -й смены, (4.67) – (4.74),
- правил $PRAVU6$ использования математических моделей расчёта временных показателей преобразования партий кратных слябов на технологическом оборудовании листопрокатного цеха для расчёта временных показателей прокатки откорректированных партий кратных слябов,
- правил $PRAVU8$ изменения масс запланированных в исходном плане партий с учётом технологических ограничений производства при нарушении плана поставок заготовок, (4.58) – (4.66).

Эти правила используются при реализации функций на блоках рисунка 4.11.

При устранении «невязок» необходимо, чтобы откорректированные партии удовлетворяли согласованным на начало планового периода объемам и срокам поставки заготовок, а также технологическим ограничениям. Для достижения этой цели разработаны правила оперативного управления.

4.5.2.3 Разработка правил принятия оперативных решений

В этом подпункте формулируется разработка правил принятия оперативных решений, сохраняющих значения показателей оптимального плана за пределами интервала оперативного управления, обеспечивающим неизменность согласованных объемов и сроков поставки заготовок.

Для принятия оперативных решений, согласно разработанным правилам, предлагается в следующих за *lsl*-й кампаниях валков увеличивать массы партий *nzb*-й позиции заказов, по которой возникла «невязка», и уменьшать массы партий остальных позиций (если это необходимо для выполнения технологических ограничений). Тем самым обеспечивается сохранение графика поставки заготовок для откорректированного плана. Правила включают в себя следующую постановку задачи оптимального оперативного управления:

Осуществить корректировку запланированных масс партий, задаваемых в производство после нарушения плана, обеспечивающую минимальное время прокатки скорректированных партий при сохранении графика поставки заготовок для партий других позиций.

Инструментарий правил принятия оперативных решений включает в себя:

1. Вычисление средней производительности $FV(t)$ прокатки металла на клетях в момент времени t , которая учитывает скорость прокатки и технологические паузы в обработке металла из-за дополнительного нагрева кратных слябов в печах и определяется согласно (4.56):

$$FV(t) = \begin{cases} MS_{l,c} \times CP_{l,c,n} / (D2_{l,c} + ZP_{l,c,n}), & t \in [TN3_{l,c}; TN3_{l,c} + D2_{l,c} + ZP_{l,c,n}] \\ MS_{l,c} \times CP_{l,c,n} / D2_{l,c}, & t \in [TN3_{l,c} + D2_{l,c} + ZP_{l,c,n}; TK3_{l,c}] \end{cases} \quad (4.56)$$

где $MS_{l,c}$ — масса кратных слябов партии $SK_{l,c}$, БД задачи планирования; $CP_{l,c,n}$ — количество кратных слябов для n -й позиции заказов, которые можно разместить в нагревательных печах, БД задачи планирования; $D2_{l,c}$ — продолжительность нагрева одной загрузки печи кратными слябами партии $SK_{l,c,n}$, БД задачи планирования; $ZP_{l,c}$ — продолжительность технологической паузы при прокатке первой загрузки печи слябами партии $SK_{l,c}$ (4.57):

$$ZP_{l,c} = \begin{cases} TPER & \text{при } l \neq 1, c = 1 \\ TZP2_{l,c} & \text{при } c \neq 1 \end{cases} \quad (4.57)$$

где $TZP2_{l,c}$ — продолжительность дополнительного нагрева кратных слябов партии $SK_{l,c,n}$ в печах, БД задачи планирования; $TPER$ — продолжительность выполнения перевалки на клетки «кварто», БД задачи планирования; $TN3_{l,c}$, $TK3_{l,c}$ — время начала и окончания прокатки на клетки «трио» партии $SK_{l,c,n}$ кратных слябов, $TK3_{l,c}$ определяется согласно условию:

$$TN3_{l,c} = \begin{cases} 0 & \text{при } l = 1, c = 1 \\ TK3_{l-1, Nc_{l-1}} & \text{при } l \neq 1, c = 1 \\ TK3_{l,c-1} & \text{при } c \neq 1 \end{cases}$$

2. Задание управляющих переменные $Y1_{l,n}$ — массы, на которую надо изменить определённую при оптимальном планировании массу $m_{l,n}$ партий, чтобы за оставшиеся с $(lsl + 1)$ -й по Nl -ю кампании валков была прокатана масса MB «невязки» с учётом ограничений. Модели ограничений на допустимые технологией значения масс $Y1_{l,n}$ приведены в (4.58):

$$\begin{aligned} Y1_{l,n} \geq 0, Y1_{l,n} \leq m_{l,n}, Y1_{l,n} = h \times MS_n \quad l = \overline{lsl + 1, Nl}, n = \overline{1, Nn}, \\ \sum_{l=lsl+1}^{Nl} Y1_{l,nzb} = MB, \end{aligned} \quad (4.58)$$

где h — шаг кратности.

Тогда откорректированные значения масс партий определяются согласно (4.59):

$$m_{l,n}^c = m_{l,n} + a_{l,n} \times Y1_{l,n}, \quad l = \overline{lsl + 1, Nl}, n = \overline{1, Nn}, \quad (4.59)$$

где выбор коэффициентов $a_{l,n}$ выполняется так, чтобы массы партий nzb -й позиции заказов, по которой возникла «невязка», в следующих за lsl -й кампаниях

валков могли только увеличиваться, а массы партий остальных позиций — уменьшаться в сравнении с запланированными массами $m_{l,n}$ (4.60):

$$a_{l,n} = \begin{cases} 1 & \text{при } n = nzb \\ -1 & \text{при } n \neq nzb \end{cases}, l = \overline{lsl + 1, Nl}, n = \overline{1, Nn}. \quad (4.60)$$

3. Преобразование технологических ограничений $P_1 - P_6$, (4.8), к виду (4.61) – (4.63):

– ограничения P_1, P_3 , (4.27), на минимально MIN_n и максимально MAX_n допустимые массы партий преобразуются к виду (4.61); с учётом, что массы партий nzb -й позиции заказов могут только увеличиваться, а массы партий остальных позиций уменьшаться, то требуется, чтобы для первых выполнялось ограничение на максимально, а на вторые — на минимально допустимые массы партий. Аналитические модели ограничений приведены в (4.61):

$$l = \overline{lsl + 1, Nl}, n = \overline{1, Nn}:$$

$$m_{l,nzb} + a_{l,nzb} \times Y1_{l,nzb} \leq MAX_{nzb}, \quad (4.61)$$

$$(m_{l,n} + a_{l,n} \times Y1_{l,n}) \times (m_{l,n} + a_{l,n} \times Y1_{l,n} - MIN_n) \geq 0, n \neq nzb$$

– ограничение P_2 , (4.28), на массу металла в l -й кампании валков преобразуется с помощью аналитической модели (4.62):

$$\sum_{n=1}^{Nn} (m_{l,n} + a_{l,n} \times Y1_{l,n}) \leq 180000, l = \overline{lsl + 1, Nl}; \quad (4.62)$$

– ограничение P_6 , (4.29), на сумму масс $MKGU_n$ партий n -й позиции, которую осталось прокатать в плановом периоде, обеспечивающего прокатку всего портфеля заказов, трансформируется с помощью аналитической модели (4.63):

$$\sum_{l=lsl+1}^{Nl} (m_{l,n} + a_{l,n} \times Y1_{l,n}) = MKGU_n, n = \overline{1, Nn}, \quad (4.63)$$

– выполнение ограничения P_4 , (4.8), гарантируется расстановкой позиций заказов в матрице масс $m_{l,n}$ и по убыванию ширин прокатного листа, (4.11).

Поскольку в следующих за lsl -й кампанией валков скорректированной ПП могут появляться, в сравнении с запланированной ПП, новые партии заказов nzb -й позиции и исчезать партии остальных позиций, то для выполнения ограничения P_5 , (4.8), по массе кратного сляба двух последовательных партий, как и в задаче

планирования, применяется матрица переходов $\|k_{i,n}\|$, (4.12); в которой необходимо задать согласно (4.15) избыточность коэффициентов $k_{i,n}$ тех пар позиций заказов, для которых P_5 не выполняется.

4. Формирование функционала цели задачи оптимального оперативного управления. Согласно физической постановке задачи оптимального оперативного управления функционал цели формируется в виде (4.64):

$$\begin{aligned} J2 &= \sum_{l=\overline{lsl+1}}^{Nl} \left(40 \times Nl + \sum_{n=1}^{Nn} \left(m_{l,n}^c / PPR_n + TP_n(x_{l,n}) \times fk(m_{l,n}^c) \right) \right) + \\ TU &= \sum_{l=\overline{lsl+1}}^{Nl} Y1_{l,nzb} \times l \times 10^{-6}, \\ m_{l,n} &= m_{l,n} + a_{l,n} \times Y1_{l,n}, \end{aligned} \quad (4.64)$$

$$J2 = J2(Y1) \rightarrow \min, Y1 = \|Y1_{l,n}\|, l = \overline{lsl+1, Nl}, n = \overline{1, Nn},$$

где переменные состояния $x_{l,n}$ определяются согласно (4.17), полиномы $TP_n(x)$ по (4.22), (4.24), функция $fk(m_{l,n}^c)$ присутствия партии n -й позиции в кампании — согласно (4.19), а область ограничений на переменные $Y1_{l,n}$ задаётся условиями (4.58) – (4.63); включение штрафной функции TU в функционал обеспечивает при численном поиске преимущество решениям с более быстрым выполнением «невязки».

Значения $Y1_{l,n}$, доставляющие минимум функционалу (4.64), являются решением задачи оптимального оперативного управления. Если определяемая ограничениями (4.58) – (4.63) область не содержит допустимых решений $Y1$, то, по решению пользователя СППР, прокатка переносится на следующий плановый период или в последней кампании валков добавляется партия, в которой прокатывается «невязка» (4.65):

$$\begin{aligned} Nc_{Nl} &:= Nc_{Nl} + 1, m_{Nl, Nc_{Nl}} := MB, \\ Y1_{l,n} &= 0, l = \overline{lsl+1, Nl}, n = \overline{1, Nn}. \end{aligned} \quad (4.65)$$

При устранении «невязки», возникшей из-за нарушения графика поставки заготовок, задача оптимального оперативного управления (4.58) – (4.65), дополняется условием (4.66), учитывающим невозможность изменения масс партий до $lm1$ -й кампании валков, для которой мартеновский цех успеет

поставить мерные слябы для заказов n -й позиции (при этом допускается изменение запланированных масс партий других позиций):

$$m_{l,n} = Y1_{l,n} = 0, \quad l = \overline{lbm, lm1 - 1}, \quad n = nzm, \quad (4.66)$$

где lbm — номер кампании валков, для которой мартеновский цех не поставил мерные слябы для изготовления n -й позиции заказов, (4.55); $lm1$ — номер кампании валков, к которой мартеновский цех сможет поставить слябы для выполнения n -й позиции, (4.55).

Решение задачи оптимального оперативного управления распределяет прокатку «невязки» по кампаниям валков (с $lm1$ -й по Nl -ю кампании).

Полученное решение в виде рекомендаций по корректировке ПП, позволяет пользователю распределить выполнение «невязки» по рабочим бригадам, отдавая предпочтение той бригаде, в смену которой образовалась «невязка».

4.5.2.4 Решение задачи устранения «невязки» по массе в сменах

Для корректировки производственных заданий с учётом трудозатрат производственных бригад разработан алгоритм, основанный на расчёте откорректированной массы $MZS_{iv,is}$ прокатанного по сменам металла и корректировки коэффициента $KRZ1_{iv,isb}$, (4.54), характеризующего резерв времени, выделяемого при планировании на iv -й выход isb -й смены. Формирование правил оперативного перераспределения заданий основано на использовании кусочно-линейной функции производительности (4.56) и включает в себя следующий инструментарий.

1. Для расчёта изменения массы $MZS_{iv,is}$ металла, прокатанного за iv -й выход is -й смены при изменении исходного коэффициента $KRZ1_{iv,is}$ на величину $DKRZ_{iv,is}$ используется модель (4.67):

$$MZS_{iv,is}(DKRZ_{iv,is}) = \int_a^{b1} FV(t)dt - \int_a^{b2} FV(t)dt, \quad (4.67)$$

где a — время начала работы is -й смены в iv -м выходе; $b1, b2$ — время окончания работы смены с учётом корректировки коэффициента резерва времени; запланированное время окончания работы is -й смены в iv -м выходе (4.68):

$$\begin{aligned} a &= 360 \times (is - 1) + 2160 \times (iv - 1), \\ b1 &= 360 \times is + 2160 \times (iv - 1) + DKRZ_{iv,is} \times 360, \\ b2 &= 360 \times is + 2160 \times (iv - 1), \end{aligned} \quad (4.68)$$

$FV(t)$ — функция средней производительности прокатки на клетях в момент времени t , вычисляется после устранения «невязки» по массе в результате решения задачи оптимального оперативного управления, (4.64). Первый интеграл в (4.67) определяет массу металла, которую прокатает смена после изменения коэффициента, характеризующего резерв времени, а второй интеграл в (4.67) — запланированную массу (до изменения коэффициента).

2. Алгоритм корректировки масс металла $MZS_{iv,is}$, прокатанного по сменам определяет, что первоначально изменение осуществляется для следующих выходов isb -й смены, которая допустила отклонение от плана, а затем по остальным сменам до тех пор, пока вся «невязка» будет прокатана. Логическая модель способов корректировки определяется согласно (4.69) – (4.74). Модель задаёт условие возможных изменений. Для корректировки масс определяется, позволяет ли максимально возможное изменение $DKRZ_{iv,isb} = KRZ1_{iv,isb}$ прокатать массу MB всей «невязки» за iv -й выход isb -й смены. При этом возможны две ситуации:

Для каждого iv -го выхода isb -й смены, $iv = \overline{ivb + 1, 21}$

— Если (4.69):

$$MZS_{iv,isb}(DKRZ_{iv,isb}) < MB \text{ при } DKRZ_{iv,isb} = KRZ1_{iv,isb}, \quad (4.69)$$

где ivb — номер выхода isb -й смены, во время которого не выполнено плановое задание, то всю массу MB «невязки» невозможно прокатать за iv -й выход isb -й смены. В этом случае принимается решение прокатать в iv -м выходе isb -й смены максимально возможной массы $MZS_{iv,isb}$, согласно (4.70) и соответствующей максимально возможному значению $DKRZ_{iv,isb} = KRZ1_{iv,isb}$

$$MZS_{iv,isb}(DKRZ_{iv,isb}) = \int_a^{b1} FV(t)dt - \int_a^{b2} FV(t)dt, \quad (4.70)$$

$$DKRZ_{iv,isb} = KRZ1_{iv,isb},$$

где $a = 360 \times (isb - 1) + 2160 \times (iv - 1)$, $b1 = 360 \times isb + 2160 \times (iv - 1) + DKRZ_{iv,isb} \times 360$, $b2 = 360 \times isb + 2160 \times (iv - 1)$.

Для устранения возможной «невязки» в последующих плановых периодах определяется новое значение коэффициента резервного времени $KRZ_{iv,isb} = 0$.

— Если (4.71):

$$MZS_{iv,isb}(DKRZ_{iv,isb}) \geq MB \text{ при } DKRZ_{iv,isb} = KRZ1_{iv,isb}, \quad (4.71)$$

то всю массу «невязки» возможно прокатать за iv -й выход isb -й смены и принимается решение о прокатке всей массы MB невязки в этот выход, соответственно, масса $MZS_{iv,isb}$ определяется согласно (4.72):

$$MZS_{iv,isb} = MB. \quad (4.72)$$

Для устранения возможной «невязки» в последующих плановых периодах определяется новое значение коэффициента резервного времени $KRZ_{iv,isb}$ (4.73):

$$KRZ_{iv,isb} = KRZ1_{iv,isb} - DKRZ_{iv,isb}, \quad (4.73)$$

где $DKRZ_{iv,isb}$, вычисляется как решение уравнения

$$MZS_{iv,isb}(DKRZ_{iv,isb}) = MB.$$

3. Алгоритм включает корректировку функции $FV(t)$ средней производительности прокатки на клетях в момент времени t после каждого переопределения $KRZ_{iv,isb}$. Модель корректировки (4.74) представлена на основе кусочно заданных условий:

$$FV(t) := \begin{cases} FV(t + DKRZ_{iv,isb} \times 360) & \text{при } t > b2 \\ KFV_{iv,isb} \times FV(KFV_{iv,isb} \times t) & \text{при } a \leq t \leq b2 \\ FV(t) & \text{при } t < a \end{cases} \quad (4.74)$$

где $a, b2$ — время начала и окончания работы isb -й выход смены в iv -м выходе; $KFV_{iv,isb} = (DKRS_{iv,isb} \times 360 + b2 - a) / [b2 - a]$ — коэффициент

преобразования функции производительности на промежутке времени $[a, b2]$, соответствующем работе isb -й смены в iv -м выходе.

Если во всех оставшихся до конца планового периода выходах isb -й смены полностью устранить «невязку» невозможно и условие (4.71) не выполняется для всех $iv = \overline{ivd} + 1, 21$, то оставшаяся «невязка» устраняется в выходах остальных смен аналогично (4.69) – (4.74).

Разработанные правила принятия оперативных решений и перераспределения выполняемых заданий являются теоретической основой инструментария подсистемы оперативного управления. Рекомендации по корректировке ПП вырабатываются в подсистеме с учётом допущения, что не выполнена прокатка только одной партии (всей партии или её части).

4.5.2.5 Использование правил принятия оперативных решений и перераспределения заданий при автоматизированном расчёте производственных заданий

Функционирование подсистемы оперативного управления осуществляется согласно приведённых правил в блоках, указанных на рисунке 4.11:

– блок 1 — пользователь СППР вносит в базу данных значение переменных $SIT, DANU1.2, DANU1.3$, (4.54), (4.55), характеризующие отклонение от 1П1;

– блок 2 — на основании правил $PRAVU2$ выполняется расчёт функции средней производительности прокатки металла в течение планового периода, (4.56), необходимой при расчётах в блоке 5 для перераспределения заданий по сменам. Классификация переменных блока 2 приведена в таблице 4.10.

Таблица 4.10 — Классификация переменных блока вычисления откорректированной производительности (блок 2, Рисунок 4.11)

Обозначение переменной	Физический смысл
Входные переменные	
$DANU2l,c,n = \{Nml,c, Ncl, Nl, MSn, CPn, D2l,c, TZP2l,c, TK3l,c, TPER, MB\}$, $n=1, Nn, l=1, Nl, c=1, Ncl$	

Продолжение таблицы 4.10

NMl,c	Номер позиции заказов, выполняемой в c -й партии l -й кампании валков, $Y5$, (4.50) или $DV9$
Ncl,Nl	Количество партий в l -й кампании валков, количество кампаний валков, за которое планируется прокатать весь портфель заказов на плановый период, $Y10$, (4.53)
MSn	Масса кратного сляба, используемого для выполнения n -й позиции заказов, характеристики $SMHn$, $Y3$, (4.46)
CPn	Количество кратных слябов n -го типоразмера, которые можно разместить в нагревательных печах, DAN , (4.44)
$D2l,c$	Продолжительность нагрева одной загрузки печи кратными слябами партии SKl,c,n , $DV6$, (4.51)
$TZP2l,c$	Продолжительность запаздывания в обработке всей партии SKl,c,n , $DV6$, (4.51)
$TK3l,c$	Время окончания прокатки на клети «трио» слябов партии SKl,c,n , $DV6$, (4.51)
$TPER$	Продолжительность выполнения перевалки на клети «кварто», вводится пользователем СППР, DAN , (4.44)
MB	Масса не прокатанного согласно плану металла партии $SKlb,cb$, $DANU1.2$, (4.54)
$PRAVU2$	Правила расчёта производительности прокатки металла в течение планового периода, (4.56), (4.57)
Выходные переменные	
$YU2l,c=\{TK3l,c,FV(x)\}$, $l=1,Nl$, $c=1,Ncl$	
$TK3l,c$	Время окончания прокатки на клети «трио» слябов партии SKl,c,n
$FV(t)$	Функция производительности прокатки на прокатных клетях в момент времени t с учётом запаздывания, (4.56)

Результаты вычислений в блоке вносятся в базу данных подсистемы в виде множества $YU2$ (4.75):

$$YU2 = \{TK3_{l,c}, FV(x)\}, l = \overline{1, Nl}, c = \overline{1, Ncl}; \quad (4.75)$$

– блок 4 — на основании правил $PRAVU4$ формализуется задача оптимального управления при отклонении от плана из-за невыполнения производственного задания, (4.58) – (4.65), решение которой позволит устранить «невязку» по массе отклонения от плана. Классификация переменных блока 4 приведена в таблице 4.11.

Таблица 4.11 — Классификация переменных блока устранения невязки по массе отклонения от плана (блок 4, Рисунок 4.11)

Обозначение переменной	Физический смысл
Входные переменные	
$DANU4l,c,n=\{Nml,c,Ncl,Nl,lb,cb,nzb,lsl,csl,ml,n,MKPl,c,MB,MSn,MAXn,MINn\}$, $n=1,Nn$, $l=1,Nl$, $c=1,Ncl$	

Продолжение таблицы 4.11

NMl,c	Номер позиции заказов, выполняемой в c -й партии l -й кампании валков, $Y5$, (4.50) или $DV9$
Ncl,Nl	Количество партий в l -й кампании валков, количество кампаний валков, за которое планируется прокатать весь портфель заказов на плановый период, $Y10$, (4.53)
lb,cb,nzb	Номер кампании валков, партии кратных слябов в кампании и номер позиции заказов, не прокатанной согласно плану, вводится пользователем, $DANU1.2$, (4.54)
lsl,csl	Номер кампании валков, к окончанию которой будет обеспечена поставка заготовок, необходимых для выполнения «не-вязки» и номер партии кратных слябов, с прокатки которых начинает работу следующая за isb -й смена, вводится пользователем, $DANU1.2$, (4.54)
ml,n	Масса n -й позиции заказов, прокатываемая в l -й кампании валков, $Y5$, (4.50)
$MKPl,c$	Масса партии кратных слябов, задаваемых в производство в c -й партии l -й кампании валков, $Y5$, (4.50), $Y10$, (4.53)
MB	Масса не прокатанного согласно плану металла партии $SKlb,cb$, $DANU1.2$, (4.54)
MSn	Масса кратного сляба, используемого для выполнения n -й позиции заказов, характеристики $SMHn$, $Y3$, (4.46)
$MAXn,MINn$	Максимально и минимально допустимая масса металла партии, в которой прокатывается n -я позиция заказов, в кампании рабочих валков клетки «кварто», табл. А.13, DAN , (4.44)
$PRAVU4$	Правила формализации технологических ограничений для откорректированных партий и функционала цели задачи оптимизации, (4.58) – (4.65)
Выходные переменные	
$YU4l,c,n = \{Y1l,n, NMl,c, Ncl,Nl\}$, $l=1, Nl$, $c=1, Ncl$	
$Y1l,n$	Масса, на которую надо изменить определённую при оптимальном планировании массу ml,n партий, (4.58) – (4.66)
NMl,c	Номер позиции заказов, выполняемой в c -й партии l -й кампании валков
Ncl,Nl	Количество партий в l -й кампании валков, количество кампаний валков, за которое планируется прокатать весь портфель заказов на плановый период, (4.65)

Результаты вычислений в блоке вносятся в базу данных подсистемы в виде множества $YU4$ (4.76):

$$YU4 = \{X1_{l,n}, NM_{l,c}, Nc_l, Nl, KDP\}, l = \overline{1, Nl}, c = \overline{1, Nc_l}, n = \overline{1, Nn}; \quad (4.76)$$

– блок 5 — на основании правил $PRAVU5$, (4.67) – (4.74), выполняется перераспределение «невязки» среди подразделений предприятия. Классификация переменных блока 5 приведена в таблице 4.12.

Таблица 4.12 — Классификация переменных блока устранения невязки по массе в сменах (блок 5, Рисунок 4.11)

Обозначение переменной	Физический смысл
Входные переменные	
$YU4 = \{NML, c, Ncl, Nl, Y1l, n\}$, $l=1, Nl$, $c=1, Ncl$	
NML, c	Номер позиции заказов, выполняемой в c -й партии l -й кампании валков, $YU4l, c, n$, блок 4
Ncl, Nl	Количество партий в l -й кампании валков, количество кампаний валков, за которое планируется прокатать весь портфель заказов на плановый период, $YU4l, c, n$, блок 4
$Y1l, n$	Изменение массы ml, n партий, определённой при оптимальном планировании, $YU4l, c, n$, блок 4
$DANU5 = \{ivb, isb, nzb, MB, ml, n, MSn, KS1n, MASn, CPn\} \cup \{TPER, MASn, D3n, D4n, TMINn, DN2l, c, TK3l, c, KRZiv, is, FV(t)\}$, $n=1, Nn$, $l=1, Nl$, $c=1, Ncl$, $iv=1, 21$, $is=1, 6$	
ivb, isb	Номер выхода смены в течение планового периода и номер смены, во время работы которой не выполнено плановое задание, $DANU1.2$, (4.54)
nzb	Номер позиции заказов, не прокатанной согласно плану, вводится пользователем, $DANU1.2$, (4.54)
MB	Масса не прокатанного согласно плану металла партии $SKlb, cb$, $DANU1.2$, (4.54)
ml, n	Масса n -й позиции заказов, прокатываемая в l -й кампании валков, $Y5$, (4.50)
MSn	Масса кратного сляба, используемого для выполнения n -й позиции заказов, характеристики $SMHn$, $Y3$, (4.46)
$KS1n$	Количество листов n -й позиции заказов, получаемых из одного кратного сляба, характеристики $SMHn$, DAN , (4.44)
CPn	Количество кратных слябов n -го типоразмера, которые можно разместить в нагревательных печах, DAN , (4.44)
$TPER$	Продолжительность выполнения перевалки на клетки «кварто», вводится пользователем СППР, DAN , (4.44)
$MASn$	Масса листа n -й позиции, характеристики $PLHn$, $Y2$
$D3n, D4n$	Продолжительности прокатки одного кратного сляба на клетки «трио» и на клетки «кварто», DAN , (4.44)
$TMINn$	Минимально допустимое время нагрева загрузки печи партии, в которой прокатывается n -я позиция, DAN , (4.44)
$D2l, c, DN2l, c$	Продолжительность нагрева одной загрузки печи, первой за-грузки печи кратными слябами партии SKl, c, n , $DV6$, (4.51)
$TK3l, c$	Время окончания прокатки на клетки «трио» слябов партии SKl, c, n , $YU2$, блок 2
$KRZ1iv, is$	Исходный коэффициент резервного времени, выделяемый при планировании для iv -го (в течение планового периода) вы-хода i -й смены, $iv=1, 21$, $is=1, 6$, $DANU1.2$, (4.54)
$FV(t)$	Функция производительности прокатки на клетях во время t с учётом запаздывания, (4.56), $YU2$, блок 2
$PRAVU5$	Правила корректировки коэффициента резервного времени, отводимого на iv -й (в течение планового периода) выход is -й смены, (4.67) – (4.74)
Выходные переменные	
$YU5 = \{MKPl, c, KRZiv, is, FV(t)\}$, $iv=1, 21$, $is=1, 6$	

Продолжение таблицы 4.12

$MKP_{l,c}$	Масса партии кратных слябов c -й партии l -й кампании вал-ков, вычисляется с учётом (4.70), (4.72)
$KRZ_{iv,is}$	Откорректированный коэффициент резервного времени, выделяемый при планировании для iv -го (в течение планового периода) выхода i -й смены, $iv=1,21, is=1,6$, (4.73)
$FV(t)$	Откорректированная функция производительности прокатки на клетях в момент времени t с учётом запаздывания, (4.74)

Результаты вычислений в блоке вносятся в базу данных подсистемы в виде набора $YU5$ (4.77):

$$YU5 = \{MKP_{l,c}, KRZ_{iv,is}, FVV(x)\}, \quad (4.77)$$

где $l = \overline{1, Nl}$, $c = \overline{1, Nc_l}$, $iv = \overline{1, 21}$, $isv = \overline{1, 6}$;

– блок 6 — на основании правил $PRAVU6$ выполняется расчёт значений показателей ПП прокатки откорректированных партий кратных слябов. Классификация переменных блока 6 приведена в таблице 4.13.

Таблица 4.13 — Классификация переменных блока расчёта характеристик откорректированной производственной программы (блок 6, Рисунок 4.11)

Обозначение переменной	Физический смысл
Входные переменные	
$YU5 = \{MKP_{l,c}, KRZ_{iv,is}, FV(t)\}$, $iv=1,21, is=1,6$	
$MKP_{l,c}$	Масса партии кратных слябов c -й партии l -й кампании валков, вычисляется с учётом (4.70), (4.72)
$KRZ_{iv,is}$	Откорректированный коэффициент резервного времени, выделяемый при планировании для iv -го (в течение планового периода) выхода i -й смены, $iv=1,21, is=1,6$, (4.73)
$FV(t)$	Откорректированная функция производительности прокатки на клетях в момент времени t с учётом запаздывания, (4.74)
$DANU6 = \{NML,c, Ncl, Nl, ivb, isb, lsl, csl, D3n, D4n, D5l,c, D6l,c, \} \cup \{TH7l,c, TP7l,c, TK3l,c, KRZ_{iv,is}, MGZp\}$, $n=1, Nn$, $l=1, Nl$, $c=1, Nc_l$, $iv=1,21, is=1,6$	
NML,c	Номер позиции заказов, выполняемой в c -й партии l -й кампании валков, $YU4l,c,n$, блок 4
Ncl, Nl	Количество партий в l -й кампании валков, количество кампаний, за которое планируется прокатать весь портфель заказов на плановый период, (4.65), $YU4l,c,n$, блок 4
ivb, isb	Номер выхода смены в течение планового периода и номер смены, не выполнившей плановое задание, $DANU1.2$, (4.54)

Продолжение таблицы 4.13

lsl, csl	Номер кампании валков, к окончанию которой будет обеспечена поставка заготовок, необходимых для выполнения «не-вязки» и номер партии кратных слябов, с прокатки которых начинает работу следующая за isb -й смена, $DANU1.2$, (4.54)
$D3n, D4n$	Продолжительности прокатки одного кратного сляба на клети «трио» и на клети «кварто», DAN , (4.44)
$D5l, c, D6l, c$	Продолжительность обработки одного листа на устройствах блоков 5,6, $DV6$, (4.51)
$TH7l, c$	Продолжительность охлаждения листа готового проката n -й позиции, вводится пользователем, DAN , (4.44)
$TP7l, c$	Продолжительность проведения проб и анализов одного листа готового проката n -й позиции заказов, вводится пользователем, DAN , (4.44)
$TK3l, c$	Время окончания прокатки на клети «трио» слябов партии SKl, c, n , $DV6$, (4.51)
$KRZiv, is$	Исходный коэффициент резервного времени, выделяемый при планировании для iv -го (в течение планового периода) вы-хода i -й смены, $iv=1,21, is=1,6$, $DANU1.2$, (4.54)
$MGZp$	Масса каждого заказа, DAN , (4.44)
$MASll, c$	Масса всех листов готового проката, получаемых в c -й партии l -й кампании валков, $Y9$
NZn	Номера заказов p , поступивших от заказчика, объединённые в n -ю группу заказов, $i=1, Nin$, $Y2$, (4.45)
$FV(t)$	Функция производительности прокатки на клетях в момент времени t с учётом запаздывания, (4.56), блок 2, $YU2$
$PRAVU6$	Правила использования математических моделей расчёта временных показателей преобразования партий кратных слябов на технологическом оборудовании листопрокатного цеха
Выходные переменные	
$YU6 = \{MKPl, c, TN2l, c, TPl, c, TVS, Tp, KRZiv, is, FV(t)\},$ $l=1, Nl, c=1, Ncl, p=1, Np, iv=1,21, is=1,6$	
$MKPl, c$	Масса партии кратных слябов, задаваемых в производство в c -й партии l -й кампании валков, $YU5$
$TN2l, c$	Время задания в производство партии SKl, c, n
TPl, c	Продолжительность прокатки партии SKl, c, n
TVS	Продолжительность выполнения заказов портфеля
Tp	Время выполнения каждого заказа, p – номер заказа
$KRZiv, is$	Откорректированный коэффициент резервного времени, запланированный для iv -го (в течение планового периода) выхода is -й смены, $iv=1,21, is=1,6$, (4.73)
$FV(t)$	Откорректированная функция производительности прокатки на клетях в момент времени t с учётом запаздывания, (4.74)

Результаты вычислений в блоке вносятся в базу данных подсистемы в виде множества $YU6$ (4.78):

$$YU6 = \{MKP_{l,c}, TN2_{l,c}, TP_{l,c}, TVS, T_p, KRZ_{iv,is}, FVV(x)\}; \quad (4.78)$$

где $l = \overline{1, Nl}$, $c = \overline{1, Ncl}$, $iv = \overline{1,21}$, $isv = \overline{1,6}$, $p = \overline{1, Np}$;

– блок 7 — пользователь принимает решение об исполнении рассчитанных значений показателей ПП устранения «невязки». Если он не согласен с расчётными значениями, то он обращается в блок 5 и вводит другие номера *isb* смен (бригад), которым передаётся исполнение «невязки»;

– блок 8 — на основании правил *PRAVU8*, (4.58) – (4.71), выполняется численное решение задачи оптимального управления при нарушении графика поставки заготовок, которое позволяет рассчитать массы партий в кампаниях валков с учётом корректировки поставки заготовок по одной позиции заказа. Классификация переменных блока 8 приведена в таблице 4.14.

Таблица 4.14 — Классификация переменных блока корректировки масс партий с учётом отклонения от плана поставок заготовок (блок 8, Рисунок 4.11)

Обозначение переменной	Физический смысл
Входные переменные	
$DANU1.3=\{lbm,cbm,nzm,lm1\}$	
<i>lbm,cbm</i>	Номер кампании валков, номер партии кратных слябов в кампании, для которой мартеновский цех не поставил мерные слябы, вводится пользователем СППР, (4.55)
<i>nzm</i>	Номер позиции заказов, для которой мартеновский цех не поставил мерные слябы, вводится пользователем СППР, (4.55)
<i>lm1</i>	Номер кампании валков, к которой мартеновский цех сможет поставить мерные слябы для выполнения <i>nz</i> -й позиции заказов, вводится пользователем СППР, (4.55)
$DANU8=\{NML,c,Ncl,Nl,Nn,ml,n,MKPl,c,MSn,MAXn,MINn\}$ $n=1,Nn, l=1,Nl, c=1,Ncl$	
<i>NML,c</i>	Номер позиции заказов, выполняемой в <i>c</i> -й партии <i>l</i> -й кампании валков, <i>Y5</i> , (4.50) или DV9
<i>Ncl,Nl</i>	Количество партий в <i>l</i> -й кампании валков, количество кампаний валков, за которое планируется прокатать весь портфель заказов на плановый период, <i>Y10</i> , (4.53)
<i>Nn</i>	Количество позиций заказов, <i>Y2</i> , (4.45)
<i>ml,n</i>	Масса <i>n</i> -й позиции заказов, прокатываемая в <i>l</i> -й кампании валков, <i>Y5</i> , (4.50)
<i>MKPl,c</i>	Масса партии кратных слябов, задаваемых в производство в <i>c</i> -й партии <i>l</i> -й кампании валков, <i>Y5</i> , (4.50), <i>Y10</i> , (4.53)
<i>MSn</i>	Масса кратного сляба, используемого для выполнения <i>n</i> -й позиции заказов, характеристики <i>SMHn</i> , <i>Y3</i> , (4.46)
<i>MAXn,MINn</i>	Максимально и минимально допустимая масса металла партии, в которой прокатывается <i>n</i> -я позиция заказов, в кампании валков клетки «кварто», <i>DAN</i> , (4.44)
<i>PRAVU8</i>	Правила изменения масс запланированных в исходном плане партий с учётом технологических ограничений производства при нарушении плана поставок заготовок, (4.58) – (4.66)

Продолжение таблицы 4.14

Выходные переменные	
$YU8 = \{NML,c, Ncl, Nl, Y1l, n\}, l = \overline{lbm, Nl}, n = \overline{1, Nn}$	
NML,c	Номер позиции заказов, выполняемой в c -й партии l -й кампании валков
Ncl, Nl	Количество партий в l -й кампании валков, количество кампаний валков, за которое планируется прокатать весь портфель заказов на плановый период, (4.65)
$Y1l, n$	Масса, на которую надо изменить определённую при оптимальном планировании массу ml, n партий, (4.58) – (4.66)

Результаты вычислений в блоке вносятся в базу данных подсистемы в виде набора $YU8$ (4.79):

$$YU8 = \{NM_{l,c}, Nc_l, Nl, X1_{l,n}, KDPM\}, l = \overline{1, Nl}, c = \overline{1, Nc_l}, n = \overline{1, Nn}; \quad (4.79)$$

– блок 9 — на основании правил $PRAVU9$ пересчитываются откорректированные значения временных характеристик прокатки и формируется ПП. Классификация переменных подсистемы блока 9 приведена в таблице 4.15. Таблица 4.15 — Классификация переменных подсистемы расчёта производственной программы при нарушении поставки заготовок (блок 9, Рисунок 4.11)

Обозначение переменной	Физический смысл
Входные переменные	
$YU8 = \{NML,c, Ncl, Nl, Y1l, n\}, l = \overline{lbm, Nl}, n = \overline{1, Nn}$	
NML,c	Номер позиции заказов c -й партии l -й кампании, блок 8
Ncl, Nl	Количество партий в l -й кампании валков, количество кампаний валков, за которое планируется прокатать весь портфель заказов на плановый период, блок 8
$Y1l, n$	Масса, на которую надо изменить определённую при оптимальном планировании массу ml, n партий, блок 8
$DANU9 = \{lbm, cbm, zm, ml, n, MASLl, c, MGZp, NZn, MSn, MASn, KS1n, D2l, c\} \cup \{DN2l, c, D3n, D4n, D5l, c, D6l, c, TH7l, c, TP7l, c, TK2l, c, CPn, TMINn, TPER\},$ $n = \overline{1, Nn}, l = \overline{1, Nl}, c = \overline{1, Ncl}, p = \overline{1, Np}$	
lbm, cbm	Номер кампании валков, номер партии кратных слябов в кампании, для которой мартеновский цех не поставил слябы, вводится пользователем, $DANU1.3$, (4.55)
nzm	Номер позиции заказов, для прокатки которой мартеновский цех не поставил мерные слябы, $DANU1.3$, (4.55)
ml, n	Откорректированная масса n -й позиции заказов, прокатываемая в l -й кампании валков, $Y5$, (4.50)
$MASLl, c$	Масса всех листов готового проката, получаемых в c -й партии l -й кампании валков, $Y9$
$MGZp$	Масса каждого заказа, DAN , (4.44)

Продолжение таблицы 4.15

NZn	Номера заказов p , поступивших от заказчика, объединённые в n -ю группу заказов, $Y2$, (4.45)
$D2l,c, DN2l,c$	Продолжительность нагрева одной загрузки печи, первой загрузки печи кратными слябами партии SKl,c,n , $DV6$, (4.51)
$D3n, D4n$	Продолжительности прокатки одного кратного сляба на клетки «трио» и на клетки «кварто», DAN , (4.44)
$D5l,c, D6l,c$	Продолжительность обработки одного листа на устройствах блоков 5,6, $DV6$, (4.51)
$TH7l,c$	Продолжительность охлаждения одного листа готового проката n -й позиции заказов, вводится пользователем, DAN , (4.44)
$TP7l,c$	Продолжительность проведения проб и анализов одного листа готового проката n -й позиции заказов, вводится пользователем, DAN , (4.44)
$TK2l,c$	Время окончания нагрева слябов партии SKl,c,n , $Y7$
CPn	Количество кратных слябов для n -й позиции заказов, которые можно разместить в печах, DAN , (4.44)
$TMINn$	Минимально допустимое время нагрева загрузки печи партии n -й позиции, DAN , (4.44)
$TPER$	Продолжительность выполнения перевалки на клетки «кварто», вводится пользователем, DAN , (4.44)
$PRAVU6$	Математические модели прогноза временных показателей преобразования партий слябов
Выходные переменные	
$YU9 = \{TN2l,c, TPl,c, TVS, Tp, MKPl,c\}, l=1, Nl, c=1, Ncl, p=1, Np$	
$TN2l,c$	Время задания в производство партии слябов SKl,c,n
TPl,c	Продолжительность прокатки партии SKl,c,n слябов
TVS	Продолжительность выполнения заказов портфеля
Tp	Время выполнения каждого заказа, p – номер заказа
$TK2l,c$	Время окончания нагрева кратных слябов партии SKl,c,n с учётом ремонтов

Результаты вычислений в блоке вносятся в базу данных подсистемы в виде набора $YU9$ (4.80):

$$YU9 = \{TN2_{l,c}, TPl_{c}, TVS, Tp, MKPl_{c}\}, l = \overline{1, Nl}, c = \overline{1, Ncl}, p = \overline{1, Np}; \quad (4.80)$$

– блок 10 — ЛПП принимает решение об исполнении рассчитанных значений показателей 11 устранения «невязки», возникшей из-за нарушения графика поставки заготовок. Если расчётные значения его не удовлетворяют, то он обращается в блок 5 и вводит другие номера isb смен (бригад), которым передаётся исполнение «невязки».

Функционирование подсистемы позволяет производить поливариантные расчёты 11, подчинённые требованиям ЛПП. Если не существует решений задачи

оптимального оперативного управления, то ЛПП принимает решение о переносе не выполненных заказов на следующий плановый период.

Интерфейс взаимодействия программного комплекса СППР с персоналом планово-производственных служб представляется следующим образом. Исходя из модульного принципа построения *IT*-систем планирования, результатом диссертационной работы является система принятия решений (СПР) при планировании и оперативном управлении выполнения заказов листопрокатного производства в виде отдельного программного модуля. Класс СПР определён как *Model-Driven DSS* с организацией *Data Warehouses* в виде базы данных с дополнительной функциональностью и представлением знаний в *KE* в виде формальных логических моделей. Для поддержки включения модуля в структуру существующих *IT*-систем класса *DSS* интерфейс программного комплекса реализован на основе среды программы *Excel-2013*, оснащённой надёжными инструментами для интеграции с другими программными продуктами. Следует отметить, что возможности *Excel-2013* для организации структуры базы данных решаемой задачи приемлемы с учётом необходимого размера базы данных и скорости доступа к данным. Подсистема управления моделями, включающая в себя блок численного решения задач оптимизации, реализована средствами пакета *Matlab-2014*. Исследование организационной структуры планирования на предприятии позволяет определить пользователей СПР — руководителей производственного и планово-экономического отделов предприятия.

Для оценки преимуществ разработанной СПР по сравнению с используемыми на предприятии алгоритмами планирования, в работе выполнено исследование полученных результатов.

4.6 Численное исследование решения задачи оптимального планирования и оперативного управления прокатным производством ПАО «ДМЗ»

Для оценки возможностей разработанной СППР во время опытно-промышленных испытаний системы было выполнено сравнение результатов

планирования с помощью используемых на предприятии методик и планирования на основе предлагаемой системы. Проводилась оценка по таким аспектам деятельности системы, как определение времени выполнения всего портфеля заказов за плановый период, наполненность кампаний валков до нормативного значения, продолжительность внутрисменных простоев рабочих бригад, экономический эффект от использования системы при планировании.

Во время испытаний анализировались результаты автоматизированных расчётов в подсистемах программного комплекса:

1. Подсистема определения характеристик сгруппированного портфеля заказов и расчёт типоразмеров заготовок (слябов) для изготовления позиций портфеля заказов листопрокатного производства.

2. Подсистема определения оптимальной последовательности выполнения заказов.

3. Подсистема принятия решений по оперативному управлению листопрокатным производством, которая позволяет корректировать запланированную последовательность выполнения заказов при появлении дополнительных заказов в течение планового периода при неполной загрузке оборудования.

4. Подсистема формирования заказов на поставку заготовок (слябов) для листопрокатного производства.

Опытно-промышленные испытания перечисленных подсистем позволяют уменьшать время изготовления позиций портфеля заказов, сократить внутрисменные простои с экономическим эффектом — 18.000 тыс. долларов за три месяца.

В период испытаний решения программ задавались в производство, при этом фиксировалось время выполнения заказа и возникающие простои.

Для сравнения времени выполнения портфеля заказов за плановый период использованы рекомендации, полученные при решении задачи оптимального планирования и расчётов оптимальной 11 в блоках 5, 6, 7 подсистемы планирования СПР. Полученные результаты сравнения приведены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 — Сравнение времени выполнения портфеля заказов за плановый период

	Плановый период							
	1.-31. 01.12	1.-29. 02.12	1.-31. 03.12	1.-30. 04.12	1.-31. 05.12	1.-30. 06.12	1.-31. 07.12	1.-31. 08.12
Уменьшение времени выполнения портфеля заказов согласно оптимальным расчётам СППР, %	12	17	13	14	11	12	14	15

Анализ приведённых в таблице 4.16 данных показывает, что оптимальные расчёты СППР позволяют, в среднем, на 14% сократить время выполнения портфеля заказов за плановый период.

Кроме этого, численное исследование проводилось для сравнения технологических возможностей, характеризующих время использования валков (наполнение кампаний валков). Расчёты осуществлялись на основе автоматизированной обработки информации в блоке 5 подсистемы планирования СППР. Полученные результаты сравнения приведены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 — Сравнение выполнения нормативных показателей использования валков

Плановый период	Выполнение нормативных показателей использования валков	
	в результате планирования на предприятии, %	согласно рекомендации СППР, %
1.01.12 – 31.01.12	15	9
1.02.12 – 29.02.12	8	2
1.03.12 – 31.03.12	14	4
1.04.12 – 30.04.12	13	4
1.05.12 – 31.05.12	13	8
1.06.12 – 30.06.12	11	7
1.07.12 – 31.07.12	16	5
1.08.12 – 31.08.12	15	8

Данные таблицы 4.17 показывают, что численные расчёты, осуществляемые в подсистеме планирования СППР, позволяют повысить степень нормативного использования валков, в среднем, на 7% за плановый период.

Для анализа трудозатрат, характеризующих внутрисменные простои рабочих бригад, проводилось численное исследование результатов

автоматизированной обработки информации в блоках 5, 6, 7 подсистемы планирования СППР с существующим традиционным планированием. Полученные результаты сравнения приведены в таблице 4.18.

Таблица 4.18 — Сравнение по продолжительности внутрисменных простоев рабочих бригад

Плановый период	Показатели времени простоя бригад в результате планирования на предприятии, %	Показатели времени простоя бригад согласно рекомендации СППР, %
1.01.12 – 31.01.12	10	4
1.02.12 – 29.02.12	9	6
1.03.12 – 31.03.12	15	9
1.04.12 – 30.04.12	11	6
1.05.12 – 31.05.12	13	6
1.06.12 – 30.06.12	9	7
1.07.12 – 31.07.12	17	7
1.08.12 – 31.08.12	14	5

Как следует из сравнения результатов расчётов, приведённых в таблице 4.18, автоматизированная обработка информации в подсистеме планирования СППР позволяет сократить время внутрисменных простоев бригад, в среднем, на 6%.

Результаты исследования, приведённые в таблицах, демонстрируют эффективность результатов расчётов разработанной СППР в сравнении с существующей методикой планирования на предприятии. Таким образом, СППР даёт руководству предприятия *IT*-инструментарий расчёта оптимальных показателей производственной деятельности, что позволит повысить эффективность производства. В результате опытно-промышленных испытаний на предприятии установлено, что экономический эффект, полученный за счёт улучшения показателей таблиц 4.16 – 4.18, составляет 18.000 тыс. долларов.

4.7 Выводы по четвёртому разделу

В данном разделе, с учётом выполненных в предыдущих разделах исследований, были получены следующие результаты:

1. Предложен алгоритм многоэтапной декомпозиции, на основании которого выделены задачи 4-х этапов планирования и разработаны структурные модели решения задач. Данный алгоритм даёт возможность классифицировать сырьевые материалы любого мелкосерийного производства при отсутствии процедур нормализации видов сырья по физическим признакам. Алгоритм является составной частью методологии пополнения информации об объекте управления в условиях технологической, производственной и экономической трансформаций.

2. Сформирована постановка задачи оптимального планирования, с помощью которой осуществляется физическая трактовка предметов планирования и её формальное представление в виде функционала цели. Это даёт возможность эффективно компоновать сырьевые материалы и перерабатывать их с минимальными отходами.

3. Определены закономерности формирования базы данных СПР в виде разделов нормативно-справочной информации (НСИ), содержащей нормативные, технологические и регламентные условия ведения процесса и использования оборудования. Это позволяет пополнить информацию об объекте управления в условиях информационной трансформации и эффективно использовать её в планировании мелкосерийного производства.

4. Впервые разработаны правила формализации временных показателей ПП, основанные на полиномиальной модели расчёта продолжительности выполнения всех заказов на основе матрицы переходов, полиномов и ступенчатых штрафных функций. Правила позволили получить развёрнутый вид функционала цели и разработать аналитические модели ограничений. В соответствии с этим, в АСУП возможно рассчитывать временные показатели переработки сырьевых продуктов в готовую продукцию, обеспечивая максимальную производительность.

5. Разработаны правила оптимального оперативного управления, обеспечивающие сохранение показателей оптимального плана за пределами интервала оперативного управления. Для распределения задач оперативного управления между исполнителями предложен алгоритм устранения невязки на

основе кусочно-линейной функции производительности. Как составная часть методологии пополнения информации об объекте управления эти правила позволяют учитывать неритмичность позиций портфеля заказов в условиях технологической трансформации.

6. Усовершенствованы правила, определяющие информационное пополнение АСУП – предложен генетический алгоритм поиска оптимального решения, позволяющий рассчитывать оптимальные решения задачи планирования с функционалом, определённым на множестве целых чисел и с нелинейными ограничениями, формализованными в виде штрафных функций. Эти правила могут быть использованы в любых разработках управляющих систем мелкосерийных производств.

7. Разработаны структурные модели подсистемы оптимального планирования и оперативного управления, на базе которых созданы алгоритмы и программное обеспечение АСУП, позволяющее определять показатели производственной программы и оптимальные корректировки производственных показателей, что позволяет использовать аспекты этой методологии для решения производственных и экономических задач в условиях их трансформации. Предложенные правила были апробированы в АСУП фирмы «ВЕЛДЕ», реализованной на компьютерах Lenovo 2015 года выпуска при формировании производственной программы в течение трёх месяцев. По данным специалистов фирмы, за счёт улучшения экономических показателей и оптимизации заказов на сырьевые материалы, за три месяца экономический эффект составляет 18.000 тыс. долларов. В предоставленном акте отмечено, что представленные материалы АСУП мелкосерийного производства могут быть использованы на аналогичных предприятиях.

8. Согласно методологии, предложенной в работе, алгоритм может быть адаптирован к любому мелкосерийному производству и позволяет находить оптимальные решения с достаточно высокой степенью точности. Испытания подтвердили корректность специального математического обеспечения АСУП.

9. Проведены опытно-промышленные испытания СППР на ПАО «ДМЗ», результаты которых использованы для численного исследования и сопоставления решений, предлагаемых подсистемами СППР с реальными производственными программами. Исследование показало, что оптимальные решения СППР позволят сократить на 14% время выполнения портфеля заказов. Повысить степень нормативного использования валков на 7%, сократить время внутрисменных простоев бригад более, чем на 6% с экономическим эффектом — 18.000 тыс. долларов.

10. Изложенный в данном разделе материал представляет собой инструментальное средство ИТ СППР, доведённое до уровня инженерных методик, что позволяет использовать эти средства для проектирования СПР родственных предприятий конвейерного класса.

РАЗДЕЛ 5

МЕТОДОЛОГИЯ И ПРАВИЛА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ
СПЕЦИАЛЬНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЕБЕСТОИМОСТЬЮ
ПРОДУКЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ
ИНФОРМАЦИОННОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИЙ

Методология динамического прогноза себестоимости продукции предоставляет возможность эффективного управления затратами предприятия при решении задач формирования портфеля заказов, планирования и оперативного перепланирования производства, разработки графика планово-предупредительных ремонтов. В данном разделе осуществляется разработка автоматизированной системы управления себестоимостью продукции в задаче планирования и оперативного перепланирования производства для Артёмовского завода обработки цветных металлов (ОАО «АЗОЦМ»).

Синтез системы включает:

- разработку математических моделей прогноза себестоимости;
- постановку и формализацию задачи управления себестоимостью;
- синтез алгоритма системы управления;
- разработку программного обеспечения и численное исследование алгоритма.

5.1 Разработка моделей прогноза себестоимости продукции

Осуществим разработку моделей прогноза себестоимости продукции для АЗОЦМ как объекта управления. Учитывая нестационарность экономических процессов (спад объёмов производства, нестабильность портфеля заказов, инфляция), синтез моделей проводится на основе общей методологии динамического прогноза себестоимости. Согласно данной методологии, разработка моделей прогноза себестоимости продукции АЗОЦМ включает [351,

352, 353, 354]:

– идентификацию множественной логико-концептуальной модели;
 – задание нелинейностей и параметрическую идентификацию математических моделей прогноза себестоимости.

Множество $A = \{a_1^{00}, a_1^{11}, a_2^{11}, a_3^{11}\}$, где a_1^{00} — предприятие АЗОЦМ в целом, a_1^{11} — литейный цех, a_2^{11} — цех круглого проката, a_3^{11} — цех плоского проката. Множество конечных подразделений $A^* = A \setminus a_1^{00}$. Характеристики материальных превращений и калькулирования себестоимости подразделений включают множества видов продукции P_i^k , ресурсов R_i^k , полуфабрикатов B_i^k , объектов калькулирования Q_i^k и статей себестоимости S_i^k с классификацией на статьи прямых материальных SM_i^k , прямых нематериальных SP_i^k и косвенных затрат SI_i^k , где $k=0, 1, i=1$ для $k=0$ и $i=1, 2, 3$ для $k=1$.

В информационных модулях для элемента a_1^{00} (предприятие АЗОЦМ в целом) приведены множества:

- 1) видов продукции $P_1^0 = \{p_{25}, \dots, p_{34}\}, p_l \in P$;
- 2) ресурсов $R_1^0 = \{p_1, \dots, p_7, p_{12}, \dots, p_{16}\}$;
- 3) полуфабрикатов $B_1^0 = \{p_8, \dots, p_{11}, p_{17}, \dots, p_{24}\}$;
- 4) объектов калькулирования $Q_1^0 = \{p_{17}, \dots, p_{34}\}$;
- 5) статей себестоимости $S_1^0 = \{s_1, s_2, s_3\}$ (элементы данного множества приведены в таблице 5.1);
- 6) статей прямых материальных затрат $SM_1^0 \neq \emptyset$, прямых нематериальных затрат $SP_1^0 \neq \emptyset$ и косвенных затрат $SI_1^0 = S_1^0$.

Таблица 5.1 — Элементы множества статей себестоимости S_1^0

Элемент	Наименование статьи
s_1	общезаводские расходы
s_2	прочие производственные расходы
s_3	внепроизводственные расходы

Аналогично для элемента a_1^{11} (литейный цех) определены множества:

- 1) видов продукции $P_1^1 = \{p_{17}, \dots, p_{34}\}$;
- 2) ресурсов $R_1^1 = \{p_1, \dots, p_{11}, p_{13}, p_{16}\}$;

- 3) объектов калькулирования $Q_1^1 = \{p_{17}, \dots, p_{34}\}$;
- 4) статей себестоимости $S_1^1 = \{s_1, \dots, s_{15}\}$ (элементы данного множества приведены в таблице 5.2);
- 5) статей прямых материальных затрат $SM_1^1 = \{s_1, \dots, s_9\}$, прямых нематериальных затрат $SP_1^1 = \{s_{10}, \dots, s_{13}\}$ и косвенных затрат $SI_1^1 = \{s_{14}, s_{15}\}$.
- Таблица 5.2 — Элементы множества статей себестоимости S_1^1

Элемент	Наименование статьи
s_1	цинк
s_2	медь
s_3	свинец
s_4	лом медный
s_5	лом л63
s_6	лом л90
s_7	лом лс59-1
s_8	электроэнергия
s_9	сжатый воздух
s_{10}	вспомогательные материалы
s_{11}	оплата труда произв. рабочих
s_{12}	доп. зарплата произв. рабочих
s_{13}	отчисления в соц. страх
s_{14}	расходы по содержанию и эксплуатации оборудования
s_{15}	цеховые расходы

Для элемента a_2^{11} (цех круглого проката) определены множества:

- 1) видов продукции $P_2^1 = \{p_8, \dots, p_{11}, p_{25}, \dots, p_{28}\}$;
- 2) ресурсов $R_2^1 = \{p_{12}, p_{13}, p_{15}, \dots, p_{20}\}$;
- 3) объектов калькулирования $Q_2^1 = \{p_{25}, \dots, p_{28}\}$;
- 4) статей себестоимости $S_2^1 = \{s_1, \dots, s_{14}\}$ (приведены в таблице 5.3);
- 5) статей прямых материальных затрат $SM_2^1 = \{s_1, \dots, s_8\}$, прямых нематериальных затрат $SP_2^1 = \{s_9, \dots, s_{12}\}$ и косвенных затрат $SI_2^1 = \{s_{13}, s_{14}\}$.

Таблица 5.3 — Элементы множества статей себестоимости S_2^1

Элемент	Наименование статьи
s_1	слиток М 185x325
s_2	слиток ЛС59-1 185x510
s_3	слиток Л63 185x510
s_4	слиток Л63 150x250
s_5	газ

Продолжение таблицы 5.3

Элемент	Наименование статьи
s_6	электроэнергия
s_7	вода
s_8	сжатый воздух
s_9	вспомогательные материалы
s_{10}	оплата труда произв. рабочих
s_{11}	доп. зарплата произв. рабочих
s_{12}	отчисления в соц. страх
s_{13}	расходы по содержанию и эксплуатации оборудования
s_{14}	цеховые расходы

Для элемента a_3^{11} (цех плоского проката) определены множества:

1) видов продукции $P_3^1 = \{p_8, \dots, p_{11}, p_{29}, \dots, p_{34}\}$;

2) ресурсов $R_3^1 = \{p_{13}, p_{14}, p_{16}, p_{21}, \dots, p_{24}\}$;

3) объектов калькулирования $Q_3^1 = \{p_{29}, \dots, p_{34}\}$;

4) статей себестоимости $S_3^1 = \{s_1, \dots, s_{13}\}$ (элементы данного множества приведены в таблице 5.4);

5) статей прямых материальных затрат $SM_3^1 = \{s_1, \dots, s_8\}$, прямых нематериальных затрат $SP_3^1 = \{s_9, \dots, s_{12}\}$ и косвенных затрат $SI_3^1 = \{s_{13}, s_{14}\}$.

Таблица 5.4 — Элементы множества статей себестоимости S_3^1

Элемент	Наименование статьи
s_1	Слиток ЛС59-1 176x610x1550
s_2	слиток Л63 176x595x1550
s_3	слиток М 200x595x1720
s_4	слиток Л90 176x595x1550
s_5	газ
s_6	электроэнергия
s_7	пар
s_8	сжатый воздух
s_9	вспомогательные материалы
s_{10}	оплата труда произв. рабочих
s_{11}	доп. зарплата произв. рабочих
s_{12}	отчисления в соц. страх
s_{13}	расходы по содержанию и эксплуатации оборудования
s_{14}	цеховые расходы

Математическая модель прогноза себестоимости для элемента a_2^{11} (цех

круглого проката), согласно методике моделирования для конечного подразделения, декомпозирована на подмодель материальных превращений и формирования затрат, подмодель распределения затрат между готовой продукцией и незавершённым производством и блок расчёта себестоимости объектов калькулирования.

Блок подмодели материальных превращений и формирования затрат содержит зависимости (5.1) – (5.23).

Скорость выпуска готовой продукции видов ассортимента p_l , $l=25, 26, 27, 28$ [44]:

$$\frac{dGP_{2l}^1}{dt} = pr_{2l}^1 \quad (5.1)$$

$$pr_{2l}^1 = \begin{cases} \alpha_{2l1}^1 \cdot prp_{2l}^1 + \alpha_{2l2}^1, & \alpha_{2l1}^1 \cdot prp_{2l}^1 + \alpha_{2l2}^1 \leq PMAx_{2l}^1 \\ PMAx_{2l}^1, & \alpha_{2l1}^1 \cdot prp_{2l}^1 + \alpha_{2l2}^1 > PMAx_{2l}^1 \\ 0, & prp_{2l}^1 = 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

где GP_{2l}^1 – количество изготовленной продукции (тонны); prp_{2l}^1 – плановое задание на выпуск продукции вида p_l (тонн/сутки); $PMAx_{2l}^1$ – максимально возможный объем выпуска продукции вида p_l (тонн/сутки); α_{2l1}^1 и α_{2l2}^1 – параметры, характеризующие фактический выпуск продукции данного вида.

Изменение количества полученных отходов GP_{2l}^1 (тонны) видов p_l , $l=8, 9, 10, 11$:

$$\frac{dGP_{2l}^1}{dt} = \sum_{i=25}^{28} \alpha_{2li-24}^1 \cdot nro_{2li}^1 \cdot pr_{2i}^1 \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dGZR_{212}^1}{dt} = & \sum_{i=25}^{28} \beta_{212i-24}^1 \cdot nr_{212i}^1 \cdot \int_0^{th_{12i}^1} pr_{2i}^1 (t + \tau_{2i}^1 - \varphi) d\varphi + \\ & + \beta_{2125}^1 \cdot nr_{212}^1 \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$nor_{212}^1 = \begin{cases} norc_{212}^1, & \sum_{i=25}^{28} pr_{2i}^1(t + \tau_{2i}^1) = 0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (5.5)$$

где nro_{2li}^1 — норматив величины отходов вида p_l на продукцию p_i , \vec{a}_{2l}^1 — параметры, характеризующие фактическую величину отходов.

Скорость расхода ресурса p_{12} (газ) ($\text{м}^3/\text{сутки}$):

где GZR_{212}^1 — количество израсходованного газа (м^3) (далее GZR_{2l}^1 — количество израсходованного ресурса p_l); nr_{212i}^1 — норматив величины расхода газа на единицу продукции p_i ($\text{м}^3/\text{т}$) (далее nr_{2li}^1 — норматив величины расхода ресурса p_l на единицу продукции p_i); $norc_{212}^1$ — норма расхода газа в сутки на поддержание печи в горячем состоянии при отсутствии выпуска продукции ($\text{м}^3/\text{сутки}$); $\vec{\beta}_{212}^1$ — параметры, характеризующие фактическую величину расхода газа (далее $\vec{\beta}_{2l}^1$ — параметры, характеризующие фактическую величину расхода ресурса p_l); τ_{2i}^1 — длительность технологического цикла производства продукции p_i); th_{12i}^1 — среднее время нагрева слитков при изготовлении вида продукции p_i).

Потребление ресурса p_{13} (электроэнергия) ($\text{квт}\cdot\text{ч}/\text{сутки}$):

$$\frac{dGZR_{213}^1}{dt} = \sum_{i=25}^{28} \int_0^{\tau_{2i}^1} \beta_{213i-24}^1 \cdot nr_{213i}^1 \left(pr_{2i}^1(t + \tau_{2i}^1 - \varphi) \right) d\varphi + \quad (5.6)$$

$$+ \beta_{2135}^1 \cdot nor_{213}^1$$

$$nr_{213i}^1(x) = \begin{cases} nr1_{213i}^1 \cdot x, & x \leq LPR_i \\ nr2_{213i}^1 \cdot x, & x > LPR_i \end{cases}, \quad (5.7)$$

где $nr1_{213i}^1$ и $nr2_{213i}^1$ — норма расхода электроэнергии на единицу продукции соответственно при объёме производства не превосходящем LPR_i (тонны) в сутки и большем него.

Норма расхода ресурса p_{13} (электроэнергия) ($\text{квт}\cdot\text{ч}/\text{сутки}$):

$$nr_{213}^1 = \begin{cases} nor1_{213i}^1, \sum_{i=25}^{28} \int_0^{\tau_{2i}^1} pr_{2i}^1(t + \tau_{2i}^1 - \varphi) d\varphi \neq 0 \\ nor2_{213}^1, \text{ иначе} \end{cases}, \quad (5.8)$$

где $nor1_{213i}^1$ и $nor2_{213i}^1$ — норма расхода электроэнергии в сутки как общецеховых затрат соответственно при наличии и отсутствии производства.

Скорость расхода ресурса p_{15} (вода) ($\text{м}^3/\text{сутки}$):

$$\frac{dGZR_{215}^1}{dt} = \sum_{i=25}^{28} \beta_{215i-24}^1 \cdot nr_{215i}^1 \cdot pr_{2i}^1 + \beta_{2155}^1 \cdot nor_{215}^1, \quad (5.9)$$

где nor_{215}^1 — норма расхода воды в рамках общецеховых затрат.

Потребление ресурса p_{15} (сжатый воздух) ($\text{м}^3/\text{сутки}$):

$$\frac{dGZR_{216}^1}{dt} = \sum_{i=25}^{28} \beta_{216i-24}^1 \cdot nr_{216i}^1 \cdot pr_{2i}^1(t + \tau_{2i}^1), \quad (5.10)$$

Расход ресурсов p_l , $l = \overline{17, 20}$:

$$\frac{dGZR_{2l}^1}{dt} = \beta_{2ll+8}^1 \cdot nr_{2ll+8}^1 \cdot pr_{2l+8}^1(t + \tau_{2l+8}^1), \quad (5.11)$$

где GZR_{2l}^1 — количество израсходованного ресурса (тонны).

Изменение количества затрат GZM_{2ni}^1 (тонны), $i = \overline{25, 28}$, по статье $s_n \in SM_2^1, n = \overline{1, 4}$, на производство объекта калькулирования $p_i \in Q_2^1, i = \overline{25, 28}$ (далее GZM_{2ni}^1 — количество прямых материальных затрат по статье $s_n \in SM_2^1$, относимых на объект калькулирования p_i):

$$\frac{dGZM_{2ni}^1}{dt} = \frac{dGZR_{2i-8}^1}{dt}, \quad (5.12)$$

Изменение количества газа, затраченного по статье $s_5 \in SM_2^1$ и относимого на себестоимость объекта калькулирования $p_i, i = \overline{25, 28}$ ($\text{м}^3/\text{сутки}$):

$$\frac{dGZM_{25i}^1}{dt} = \int_0^{\tau_{2i}^1} \beta_{213i-24}^1 \cdot nr_{213i}^1 \left(pr_{2i}^1(t + \tau_{2i}^1 - \varphi) \right) d\varphi \quad (5.13)$$

Потребление электроэнергии по статье $s_6 \in SM_2^1$ при производстве объекта калькулирования $p_i, i = \overline{25, 28}$ (квт.ч/сутки):

$$\frac{dGZM_{26i}^1}{dt} = \int_0^{\tau_{2i}^1} \beta_{213i-24}^1 \cdot nr_{213i}^1 \left(pr_{2i}^1(t + \tau_{2i}^1 - \varphi) \right) d\varphi \quad (5.14)$$

Расход воды по статье $s_7 \in SM_2^1$ при производстве объекта калькулирования $p_i, i = \overline{25,28}$ (м³/сутки):

$$\frac{dGZM_{27i}^1}{dt} = \beta_{215i-24}^1 \cdot nr_{215i}^1 \cdot pr_{2i}^1 \quad (5.15)$$

Изменение количества затраченного сжатого воздуха по статье $s_8 \in SM_2^1$ на

$$\frac{dGZM_{28i}^1}{dt} = \beta_{216i-24}^1 \cdot nr_{216i}^1 \cdot pr_{2i}^1(t + \tau_{2i}^1) \quad (5.16)$$

производство объекта калькулирования $p_i, i = \overline{25,28}$ (м³/сутки):

Потребление средств GZP_{29i}^1 (руб.) по статье $s_9 \in SP_2^1$ (вспомогательные материалы) на производство объекта калькулирования $p_i, i = \overline{25,28}$:

$$\frac{dGZP_{29i}^1}{dt} = \int_0^{\tau_{2i}^1} \xi_{29i-24}^1 \cdot np_{29i}^1 \cdot pr_{2i}^1(t + \tau_{2i}^1 - \varphi) / \tau_{2i}^1 d\varphi \quad (5.17)$$

где np_{29i}^1 — норматив величины затрат по данной статье на единицу продукции вида p_i (руб./т); ξ_{29}^1 — параметры, характеризующие фактическую величину затрат (далее ξ_{2n}^1 — параметры, характеризующие фактическую величину затрат по статье $s_n \in SP_2^1$).

Изменение количества затрат GZP_{210i}^1 (руб.) по статье $s_{10} \in SP_2^1$ (основная заработная плата производственных рабочих) на производство объекта калькулирования $p_i, i = \overline{25,28}$:

$$\frac{dGZP_{210i}^1}{dt} = \int_0^{\tau_{2i}^1} \xi_{210i-24}^1 \cdot np_{210i}^1 \cdot pr_{2i}^1(t + \tau_{2i}^1 - \varphi) / \tau_{2i}^1 d\varphi + nrd_{210i}^1, \quad (5.18)$$

где np_{210i}^1 — норматив величины затрат заработной платы на единицу продукции вида p_i (руб./т).

$$nrd_{210i}^1 = \begin{cases} nrs_{210i}^1, & \int_0^{\tau_{2i}^1} pr_{2i}^1(t + \tau_{2i}^1 - \varphi) d\varphi = 0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (5.19)$$

где nrs_{210i}^1 — заработная плата рабочих в сутки при отсутствии выпуска продукции (руб./сутки).

Уравнение, описывающее расход средств по статье $s_{11} \in SP_2^1$ (дополнительная заработная плата) аналогично (5.17).

Изменение количества затрат GZP_{212i}^1 (руб.) по статье $s_{12} \in SP_2^1$ (отчисления в соц. страх), относимых на себестоимость объекта калькулирования $p_i, i = \overline{25, 28}$:

$$\frac{dGZP_{212i}^1}{dt} = kcs \cdot \left(\frac{dGZP_{210i}^1}{dt} + \frac{dGZP_{211i}^1}{dt} \right), \quad (5.20)$$

где kcs — коэффициент отчислений на социальное страхование с фонда заработной платы.

Расход средств GZI_{213}^1 (руб.) по статье $s_{13} \in SI_2^1$ (расходы по содержанию и эксплуатации оборудования):

$$\frac{dGZI_{213}^1}{dt} = \sum_{i=25}^{28} \int_0^{\tau_{2i}^1} \lambda_{213i-24}^1 \cdot np_{213i}^1 \cdot pr_{2i}^1(t + \tau_{2i}^1 - \varphi) / \tau_{2i}^1 d\varphi + \lambda_{2131}^1 \cdot nrc_{213}^1, \quad (5.21)$$

где np_{213i}^1 (руб./т) и nrc_{213}^1 (руб.) — соответственно нормативы условно-переменных и условно-постоянных затрат средств по данной статье на выпуск продукции; $\vec{\lambda}_{213}^1$ — параметры, характеризующие фактическую величину затрат.

Изменение количества затрат GZI_{214}^1 (руб.) по статье $s_{14} \in SI_2^1$ (общецеховые расходы):

$$\frac{dGZI_{214}^1}{dt} = \lambda_{2141}^1 \cdot ni_{214}^1 + \lambda_{2142}^1 \quad (5.22)$$

где $\vec{\lambda}_{214}^1$ — параметры, характеризующие фактическую величину затрат.

$$ni_{2\ 14}^1 = \begin{cases} ni_{2\ 14}^1, & \sum_{i=25}^{28} \int_0^{\tau_{2i}^1} pr_{2i}^1(t + \tau_{2i}^1 - \varphi) d\varphi \neq 0 \\ ni_{2\ 14}^2, & \text{иначе} \end{cases} \quad (5.23)$$

где $ni_{2\ 14}^1$ и $ni_{2\ 14}^2$ — нормы общецеховых затрат (руб./сутки) соответственно при наличии и отсутствии производства продукции.

Значения содержащихся в уравнениях модели (5.1) – (5.23) параметров $\vec{\alpha}_{2l}^1$, $\vec{\beta}_{2l}^1$, $\vec{\xi}_{2n}^1$, $\vec{\lambda}_{2\ 14}^1$ определяются в ходе процедуры идентификации.

Представленные выше зависимости (5.1) – (5.23) образуют систему обыкновенных дифференциальных уравнений со следующими начальными

$$\begin{cases} GP_{2l}^1(t_0) = 0 \\ GZR_{2j}^1(t_0) = GZNR_{2j}^1(t_0) \\ GZM_{2n}^1(t_0) = GZNM_{2n}^1(t_0) \\ GZP_{2n}^1(t_0) = GZNP_{2n}^1(t_0) \\ GZI_{2n}^1(t_0) = 0 \end{cases} \quad (5.24)$$

условиями (5.24):

где $GZNR_{2j}^1(t_0)$, $GZNM_{2n}^1(t_0)$, $GZNP_{2n}^1(t_0)$ — затраты соответственно вида ресурса $r_j \in R_i^k$, величины расходов по статьям $s_n \in SM_2^1$ и $s_n \in SP_2^1$ в незавершённом производстве в момент времени t_0 .

Блок подмодели распределения затрат между готовой продукцией и незавершённым производством содержит зависимости (5.25) – (5.31).

Величина затрат в незавершённом производстве по статьям $s_n \in SM_2^1$, $n = \overline{1,8}$, относимых на себестоимость объекта калькулирования p_i , $i = \overline{25,28}$:

$$GZNM_{2ni}^1(t) = dm_{2i}^1(t) \cdot GZM_{2ni}^1(t), n = \overline{1,6,8}, i = \overline{25,28}. \quad (5.25)$$

Доля dm_{2i}^1 затрат по статье $s_n \in SM_2^1$ в незавершенном производстве для объекта калькулирования p_i , $i = \overline{25,28}$:

$$dm_{2i}^1 = \frac{\int_0^{\tau_{2i}^1} pr_{2i}^1(t + \tau_{2i}^1 - \varphi) d\varphi}{GP_{2i}^1} \quad (5.26)$$

$$GZNM_{27i}^1(t) = 0. \quad (5.27)$$

Количество затрат в незавершённом производстве по статьям $s_n \in SP_2^1$, $n = \overline{9,12}$:

$$GZNP_{2ni}^1(t) = dm_{2i}^1(t) \cdot GZP_{2ni}^1(t), \quad i = \overline{25,28} \quad (5.28)$$

Косвенные затраты по статьям $s_n \in SI_2^1$ $n = 13, 14$ на незавершенное производство не относятся, поэтому:

$$GZNI_{2n}^1(t) = 0, \quad n = 13, 14 \quad (5.29)$$

Величина прямых затрат, относимых на себестоимость объектов калькулирования $p_i, i = \overline{25,28}$ по статьям $s_n, n = 1, 12$:

$$GZSP_{2ni}^1(t) = GZP_{2ni}^1(t) - GZNP_{2ni}^1(t). \quad (5.30)$$

Количество косвенных затрат, относимых на себестоимость объектов калькулирования $p_i, i = \overline{25,28}$ по статьям $s_n, n = 13, 14$:

$$GZSI_{2n}^1(t) = GZI_{2n}^1(t). \quad (5.31)$$

Используя полученные величины, осуществляется расчёт себестоимости объектов калькулирования $p_i, i = \overline{25,28}$.

Блок расчёта себестоимости объектов калькулирования содержит зависимости (4.31) – (4.33).

Величина затрат, относимых на себестоимость объекта калькулирования $p_i, i = \overline{25,28}$:

$$GS_{2i}^1(t) = \sum_{n=1}^8 GZSM_{2n}^1 \cdot gs_{2n}^1 + \sum_{n=9}^{12} GZSP_{2n}^1 + \sum_{n=13}^{14} GZSI_{2n}^1 \cdot dri_{2i}^1(t), \quad (5.32)$$

где $gs_{2n}^1(t)$ — средняя стоимость (себестоимость) единицы ресурса, расходуемого по статье $s_n \in SM_2^1$.

Доля dri_{2i}^1 объекта калькулирования $p_i, i = \overline{25,28}$ в косвенных расходах определяется величиной прямой заработной платы основных рабочих:

$$dri_{2i}^1 = \frac{GZSP_{210i}^1}{\sum_{i=25}^{28} GZSP_{210i}^1}. \quad (5.33)$$

Себестоимость калькуляционных единиц объектов калькулирования p_i , $i = \overrightarrow{25,28}$ рассчитывается по формуле:

$$gs_{2i}^1 = \frac{GS_{2i}^1(t)}{GP_{2i}^1(t)}. \quad (5.34)$$

Зависимости (5.1) – (5.34) составляют математическую модель прогноза себестоимости для подразделения a_2^{11} (цех круглого проката). Уравнения моделей для остальных подразделений множества A имеют аналогичный вид. Общее число уравнений моделей равно 214.

Идентификация моделей проведена на основании статистических данных [355], собранных на предприятии за 2008 год. Получены значения параметров моделей, обеспечивающие точность прогноза 3,5% по всем выходным переменным ($\overrightarrow{GP}_i^k, \overrightarrow{gs}_i^k, \overrightarrow{GZR}_i^k$, где $k=0,1, i=1$ для $k=0$ и $i=1, 2, 3$ для $k=1$).

Разработанные модели прогноза себестоимости продукции позволяют поставить и формализовать задачу управления затратами для Артёмовского завода обработки цветных металлов.

5.2 Постановка и формализация задачи управления себестоимостью

На основе разработанных математических моделей прогноза себестоимости продукции производственных подразделений из множества A осуществляется постановка и формализация задачи управления затратами [48, 117].

Физическая постановка задачи имеет вид: определить для цехов АЗОЦМ такие плановые задания по выпуску продукции до конца текущего месяца с шагом квантования сутки, которые обеспечат выполнение всех позиций портфеля заказов с минимальными затратами.

В результате формализации данной задачи получен функционал цели управления (5.35), определяющий общие затраты предприятия по выполнению производственной программы:

$$\sum_{p_i \in Q_1^0} GS_{1i}^0(T) \rightarrow \min, \tag{5.35}$$

где T — период времени (в сутках), на котором решается задача.

Минимум функционала (5.35) ищется при помощи методов динамического программирования по переменным prp_{il}^k (рекомендуемый объем выпуска l -го вида продукции в сутки подразделением a_i^k , где $k=0,1, i=1$ для для $k=0$ и $i=1, 2, 3$ для $k=1$) при ограничениях, в роли которых выступают зависимости динамические модели прогноза себестоимости продукции [356] подразделений из множества A , а также выражения вида (5.36) – (5.37):

$$GP_{1l}^0(T) = PLMZ_{1l}^0(T), \tag{5.36}$$

$$prp_{il}^k(t) \leq PMAX_{il}^k(t), \tag{5.37}$$

где $PLMZ_{1l}^0$ — плановое задание на месяц по выпуску продукции вида p_l .

Согласно общей постановки задачи (5.35), динамических ограничений в виде системы уравнений моделей прогноза себестоимости продукции для подразделений множества A с начальными условиями и ограничений (5.36), (5.37), развёрнутая постановка задачи для её численного решения имеет вид (5.38) – (5.43):

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{l=17}^{34} GS_{1l}^1(prp_{1\ 17}^1, \dots, prp_{3\ 34}^1, t) + \sum_{n=1}^3 GZSI_{1n}^0 t \Big|_{t=T} \rightarrow \min, \tag{5.38}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dGP_{1\ 17}^1}{dt} = pr_{1\ 17}^1(prp_{1\ 17}^1, t) \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \frac{dGZI_{13}^0}{dt} = \lambda_{1\ 3\ 1}^0 \cdot ni_{13}^0(prp_{1\ 17}^1, \dots, prp_{3\ 34}^1, t) + \lambda_{1\ 3\ 2}^0 \end{array} \right. \tag{5.39}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} GP_{1\ 17}^1(t_0) = 0 \\ GZR_{11}^1(t_0) = GZNR_{11}^1(t_0) \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ GZI_{33}^1(t_0) = 0 \end{array} \right. \tag{5.40}$$

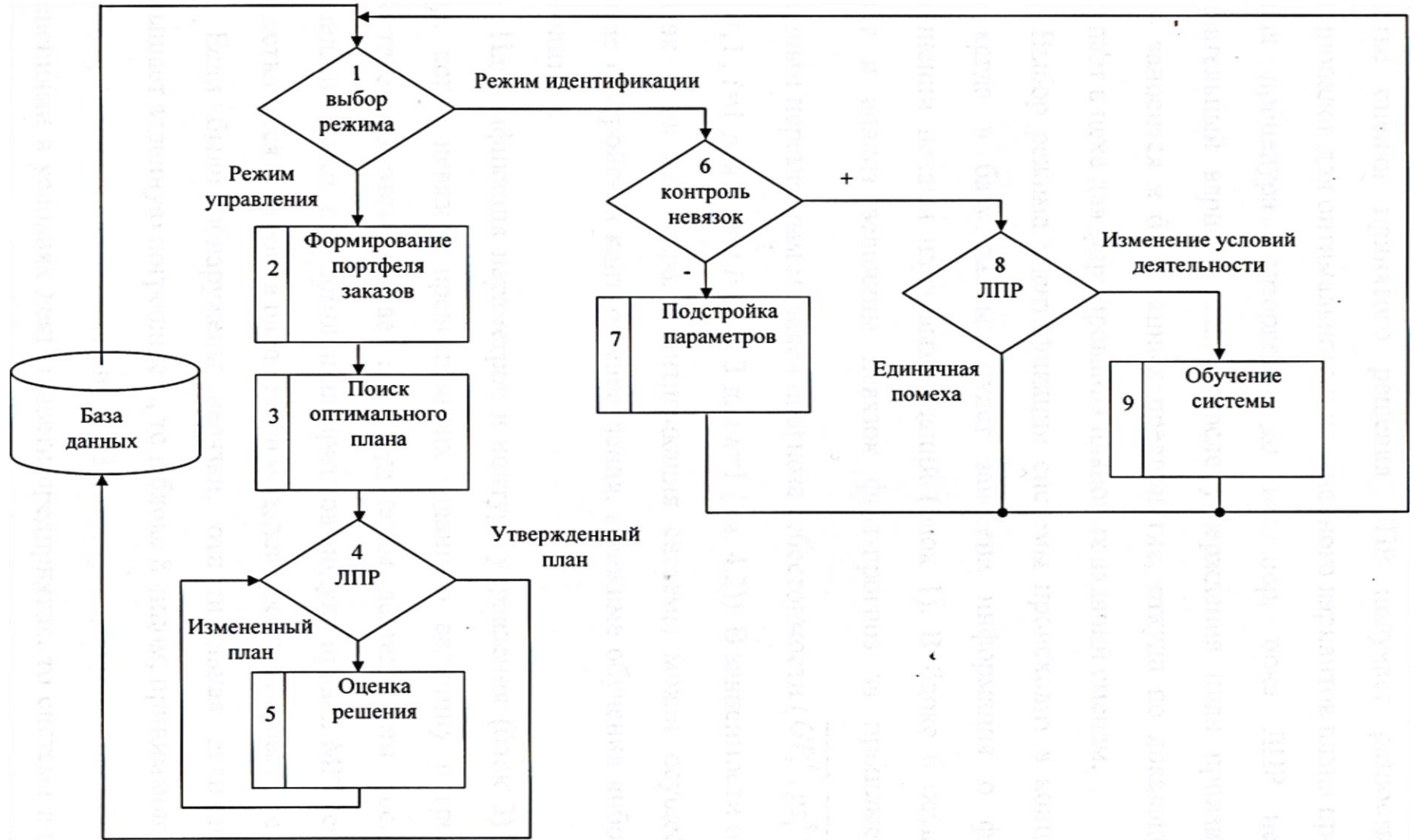


Рисунок 5.1 — Функциональная схема алгоритма системы управления себестоимостью продукции ОАО «АЗОЦМ»

В режиме управления подсистема формирования портфеля заказов (блок 2), на основании хранящейся в базе данных предприятия информации об поступивших заказах и данных о фактическом выпуске продукции за предыдущие дни месяца, определяет объёмы продукции, которые необходимо произвести заводу до конца текущего месяца. Затем в блоке 3, при помощи динамического программирования, осуществляется решение задачи (5.38) – (5.43), в результате чего формируются плановые задания $prp_{ii}^k(t)$ по выпуску продукции видов $p_i \in P$ подразделениями a_i^k (где $k = 0, 1$, $i=1$ для $k=0$ и $i=1, 2, 3$ для $k=1$) на промежутке времени $[t_0, T]$ (t_0 — текущий день, T — число дней в данном месяце) с шагом квантования сутки. Полученное решение в качестве рекомендаций предоставляется для анализа лицу, принимающему решение (ЛПР), в роли которого выступает начальник планово-экономического отдела (блок 4). ЛПР может принять его без изменений либо внести коррективы по своему усмотрению. В случае внесения изменений в плановые задания, в блоке 5 при помощи моделей прогноза себестоимости осуществляется прогноз величины затрат для нового варианта плана.

На основании этого прогноза рассчитывается значение функционала (5.38) и в качестве оценки принятого решения ЛПР получает разность значений функционалов для оптимального и изменённого вариантов плана производства. Данная процедура повторяется до тех пор, пока ЛПР не утвердит окончательный вариант плана. После утверждения план производства для цехов заносится в базу данных предприятия, откуда по локальной сети он поступает в цеха для формирования плановых заданий сменам.

Выбор режима идентификации системы происходит в конце текущего дня, когда в базу данных будет занесена информация о фактическом выполнении цехами плановых заданий (блок 1). В блоке 6 осуществляется расчёт и анализ величины невязок факт-прогноз за прошлые сутки по выходным переменным моделям прогноза себестоимости $(\overrightarrow{GP}_i^k, \overrightarrow{gs}_i^k, \overrightarrow{GZR}_i^k)$, где $k=0, 1$, $i=1$ для $k=0$ и $i=1, 2, 3$ для $k=1$ (см. 5.1)). В зависимости от величины невязок и их характера, идентификация системы может осуществляться в режиме настройки в контуре

управления, в режиме обучения либо вообще не проводиться.

Идентификация параметров в контуре управления (блок 3) проводится тогда, когда невязок, превышающих заданную величину погрешности, не существует. В этом случае, по результатам деятельности предприятия за прошедшие сутки, при помощи алгоритмов модуля правил МРІ осуществляется настройка параметров моделей прогноза себестоимости.

Если были обнаружены невязки, относительная величина которых превышает заданную погрешность, то в блоке 8 лицом, принимающим решение (ЛПР), проводится анализ их причин. В том случае, если невязки были вызваны изменениями в условиях деятельности предприятия, то система планирования переходит в режим обучения (блок 9). В этом режиме происходит накопление информации о работе завода, после чего, при участии эксперта, проводится идентификация моделей системы [358, 359, 360, 361]. Если отклонения факта от прогноза были обусловлены случайными единичными помехами, то настройка параметров моделей по результатам этого дня не проводится.

Разработанный алгоритм предназначен для управления себестоимостью продукции Артёмовского завода ОЦМ в ритме с процессом производства. Для практического использования данного алгоритма в задачах планирования и оперативного перепланирования необходимо разработать соответствующее программное обеспечение и провести численное исследование на контрольном примере.

5.4 Разработка программного обеспечения, опытно-промышленные испытания и численное исследование результатов

Для полученного в подразделе 5.3 алгоритма системы управления себестоимостью продукции ОАО «АЗОЦМ» осуществлена программная реализация и проведено численное исследование на контрольном примере.

Программная реализация осуществлялась в среде Borland Delphi 3.0, для создания и работы с базой данных использовался Borland Database Engine.

Программное обеспечение построено по модульному принципу. Оно предназначено для работы в операционных средах Windows 95/98 и Windows NT 4.0, обладает надёжностью, имеет дружественный интерфейс, позволяет решать задачи планирования и перепланирования производства в режиме реального времени.

Используя разработанное программное обеспечение, проведено численное исследование алгоритма на контрольном примере в течение марта 2009 года. С целью иллюстрации качества работы системы в течение этого периода на рисунке 5.2 представлены прогнозируемые графики затрат предприятия для рекомендуемых оптимальных и принятых ЛПР решений по планированию производства, а также график фактических затрат. Анализ этих кривых и соответствующих статистических данных позволяет сделать вывод о достоверности и эффективности решений, вырабатываемых системой, так как погрешность получаемой оценки затрат не превышает 5%. Величина прогнозируемых затрат для решений по оперативному планированию производства, принятых ЛПР, не меньше оптимального значения приращения функционала цели для представленных ему рекомендаций. Отказ ЛПР от представленных рекомендаций обусловлен субъективными причинами. В общем использование алгоритма системы при решении задач оперативного планирования и перепланирования производства позволило сократить общие затраты при изготовлении продукции на 4,7% экономического эффекта рассчитывался при помощи прогноза затрат для оптимального варианта плана и плана, полученного по ранее применяемой на предприятии методике).

Вывод об адекватности прогноза себестоимости продукции, выдаваемого системой, подтверждают графики, представленные на рисунках 5.3 – 5.8. На них приведены для сравнения прогнозируемые при помощи математических моделей и построенные на основе фактических данных кривые объёмов производства продукции и её себестоимости для прутков ЛС59-1 и ленты Л63 (0,3 – 0,75), а также количества затраченной меди и электроэнергии.

В течение планового периода месяца фиксировались фактические

показатели производства данной продукции, расход меди и электроэнергии, и сопоставлялись с результатами расчётов по разработанному программному обеспечению.

Анализ обработанных статистических данных работы предприятия позволяет сделать вывод об адекватности и достоверности прогноза показателей работы предприятия, получаемого при помощи разработанных математических моделей (относительная величина ошибки прогноза не превышает 5%). Относительно большое значение ошибки прогноза в начале месяца (см. Рисунки 5.3, 5.5 и 5.7) объясняется переходом к автоматизированному планированию производственной деятельности предприятия, уменьшение ошибки к концу рассматриваемого периода обусловлено поэтапной настройкой параметров математических моделей в контуре управления. Полученные результаты численного исследования говорят об адекватности и практической значимости синтезированных математических моделей и алгоритма прогноза и управления себестоимостью продукции ОАО «АЗОЦМ», что подтверждает справедливость положений общей методологии динамического прогноза себестоимости.

Затраты
(млн. у.е./сутки)

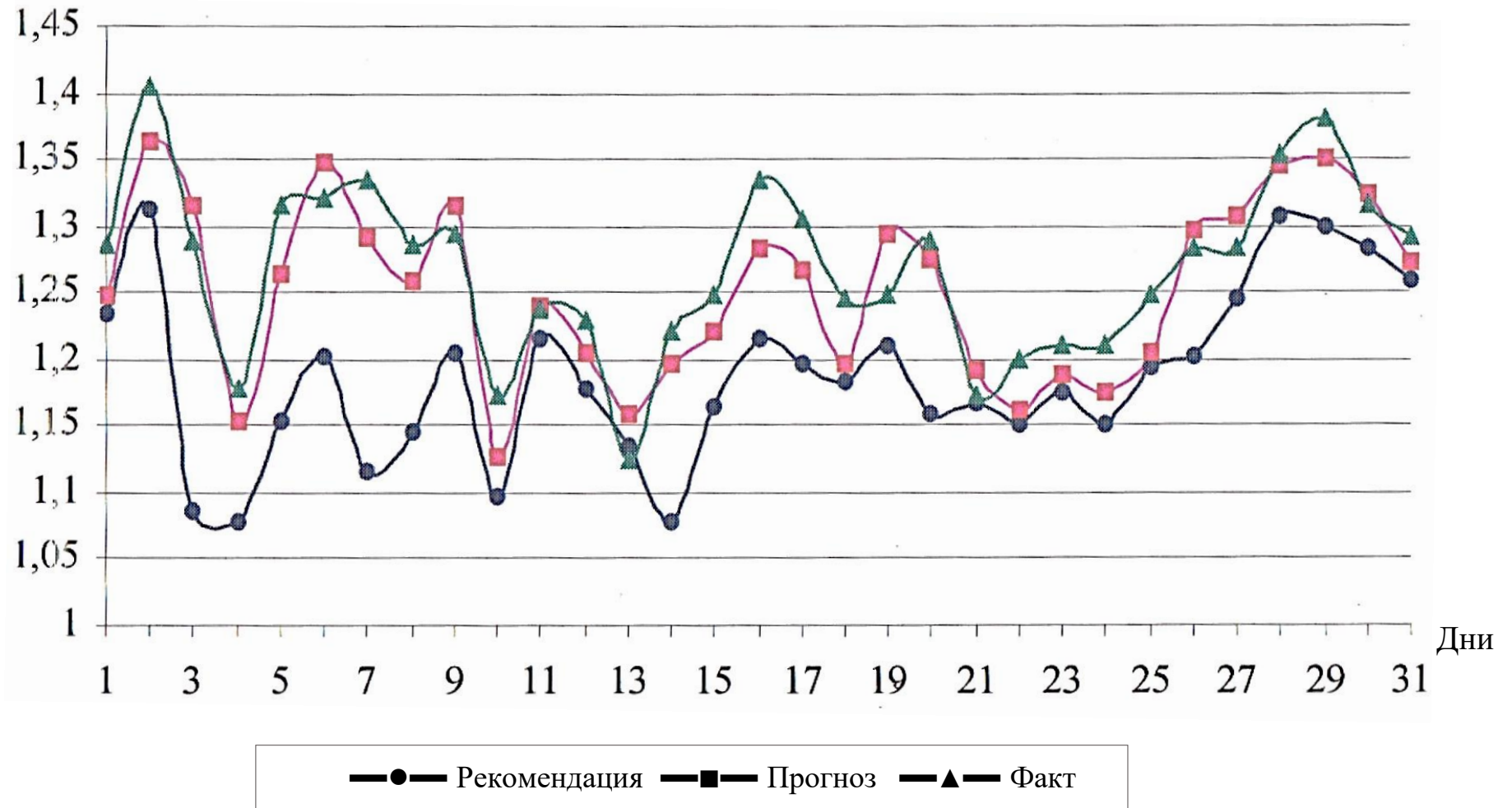


Рисунок 5.2 — Приращение общих затрат предприятия в течение марта 2009 г.

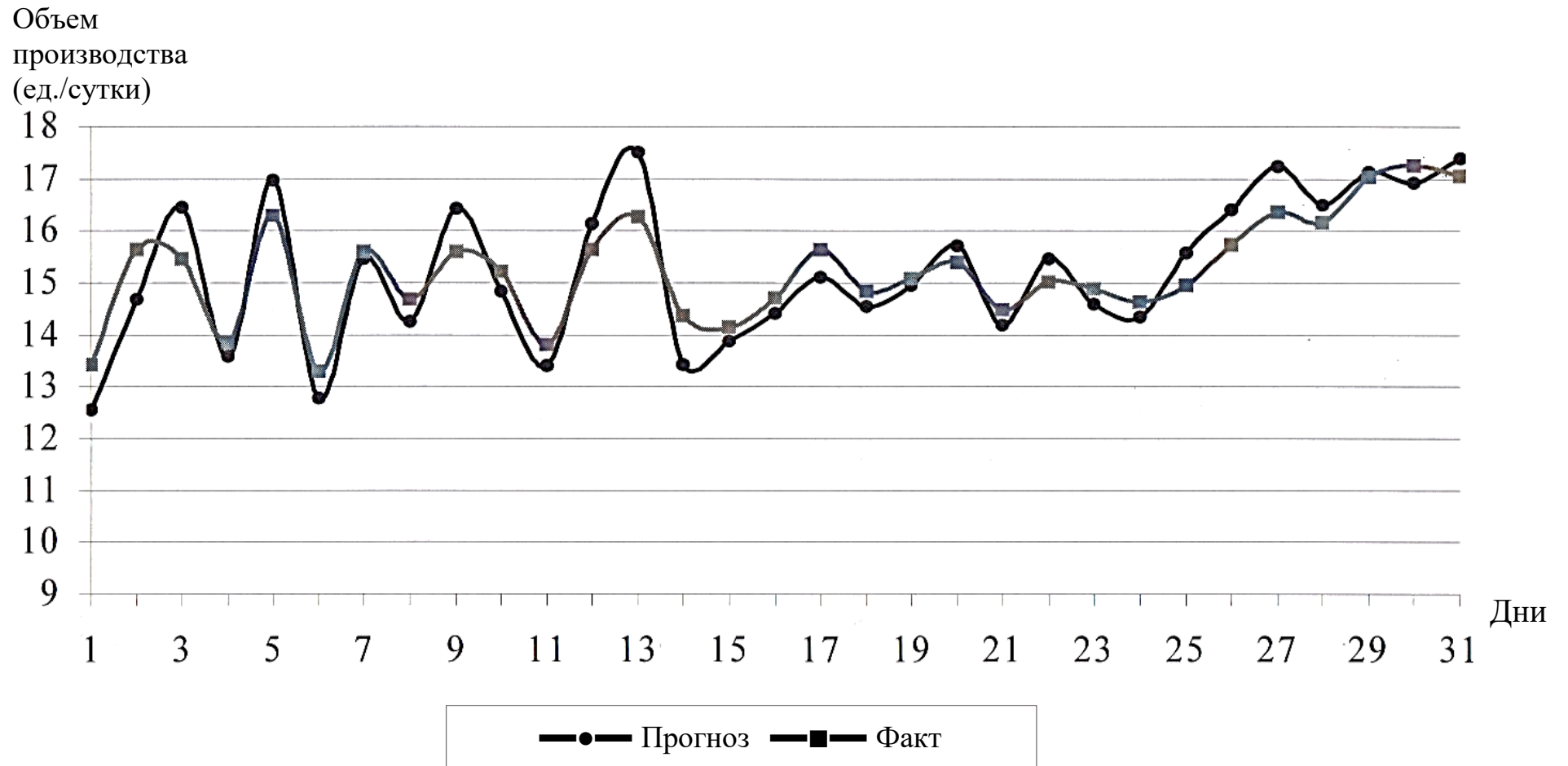


Рисунок 5.3 — Прогнозируемый и фактический объем выпуска прутков ЛС59-1 в течение марта 2009 г.

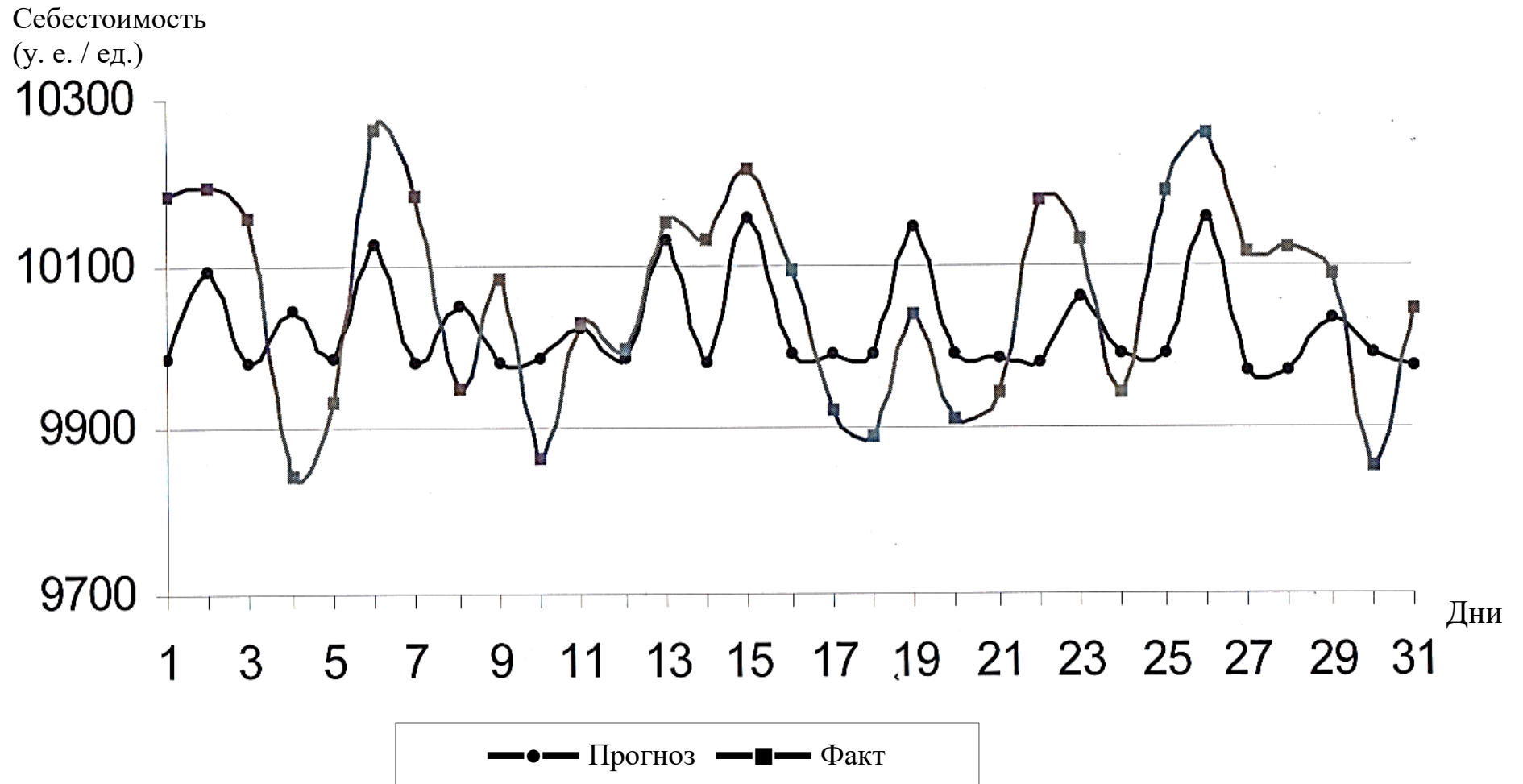


Рисунок 5.4 — Прогнозируемая и фактическая себестоимость прутков ЛС59-1 в течение марта 2009 г.

Объем
производства
(ед./сутки)

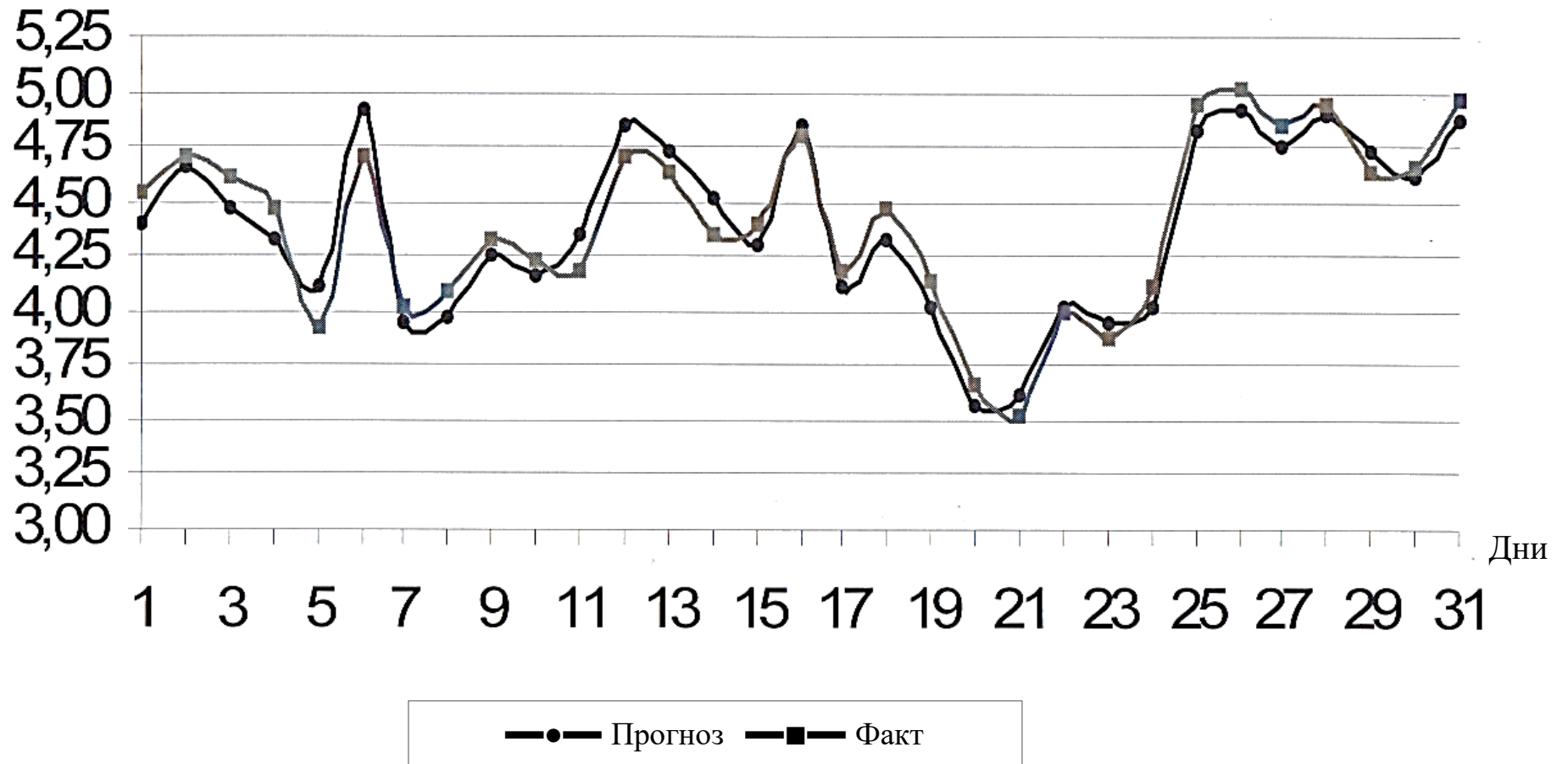


Рисунок 5.5 — Прогнозируемый и фактический объем выпуска ленты Л63 (0,3 – 0,75) в течение марта 2009 г.

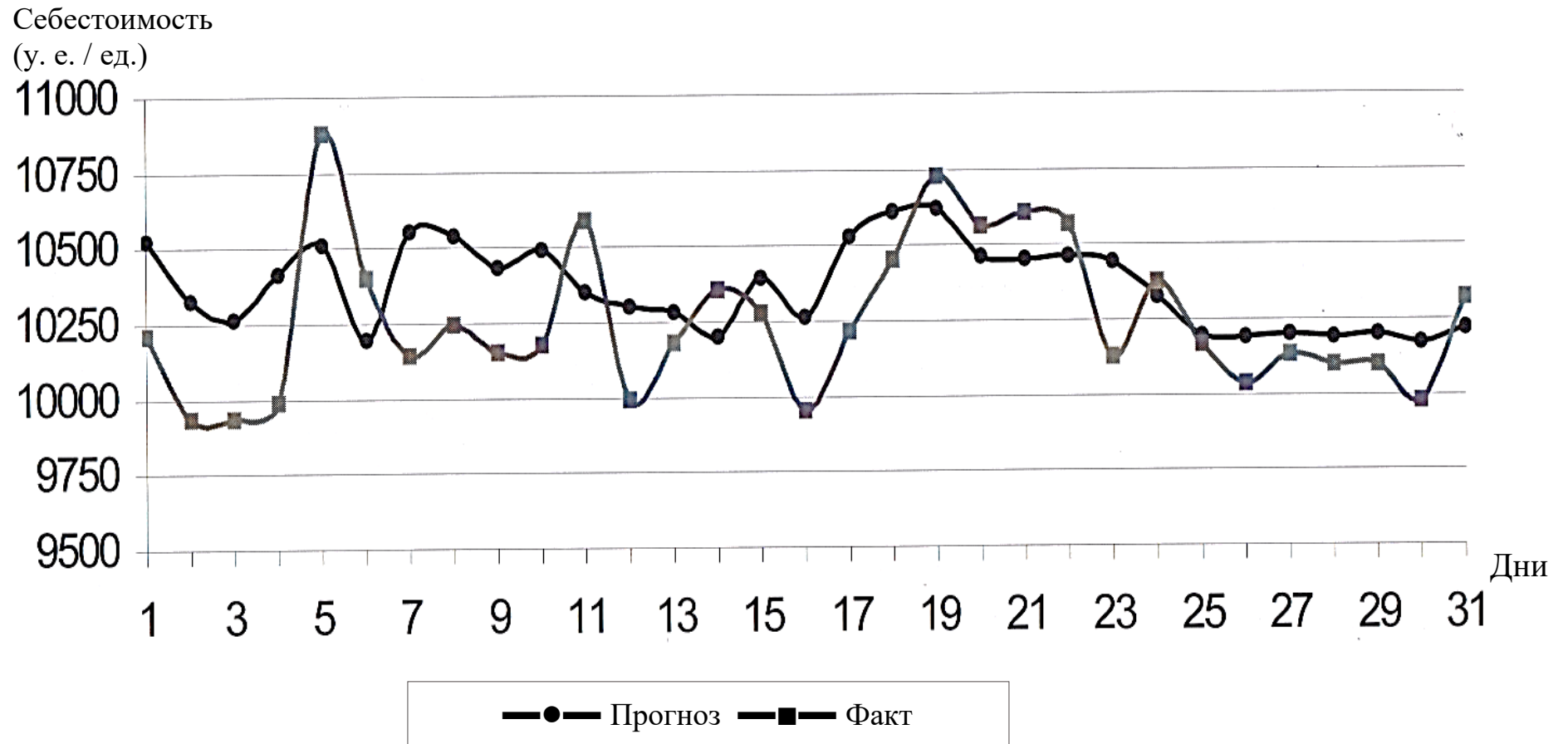


Рисунок 5.6 — Прогнозируемая и фактическая себестоимость ленты Л63 (0,3 – 0,75) в течение марта 2009 г.

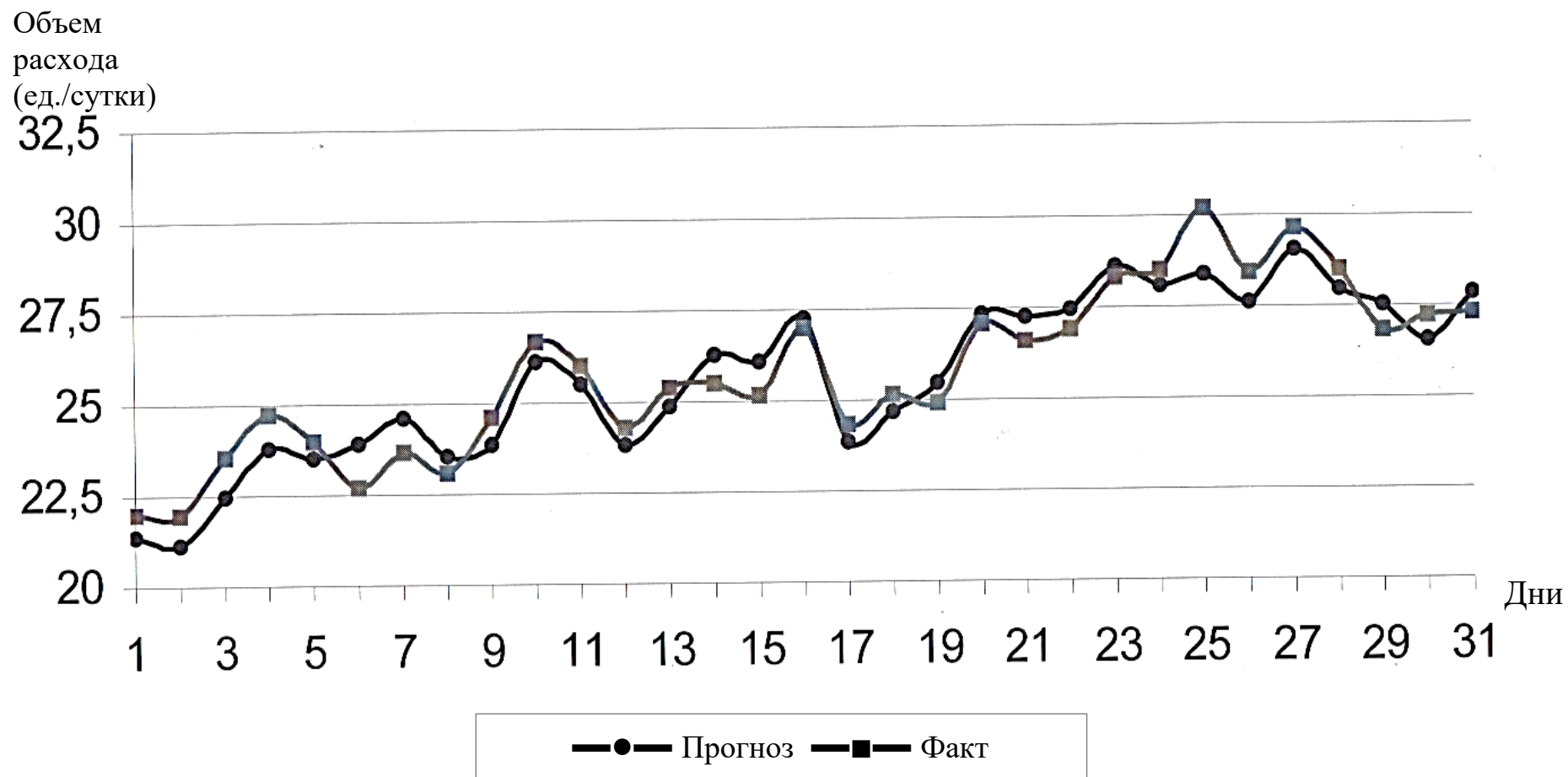


Рисунок 5.7 — Прогнозируемый и фактический расход меди в течение марта 2009 г.

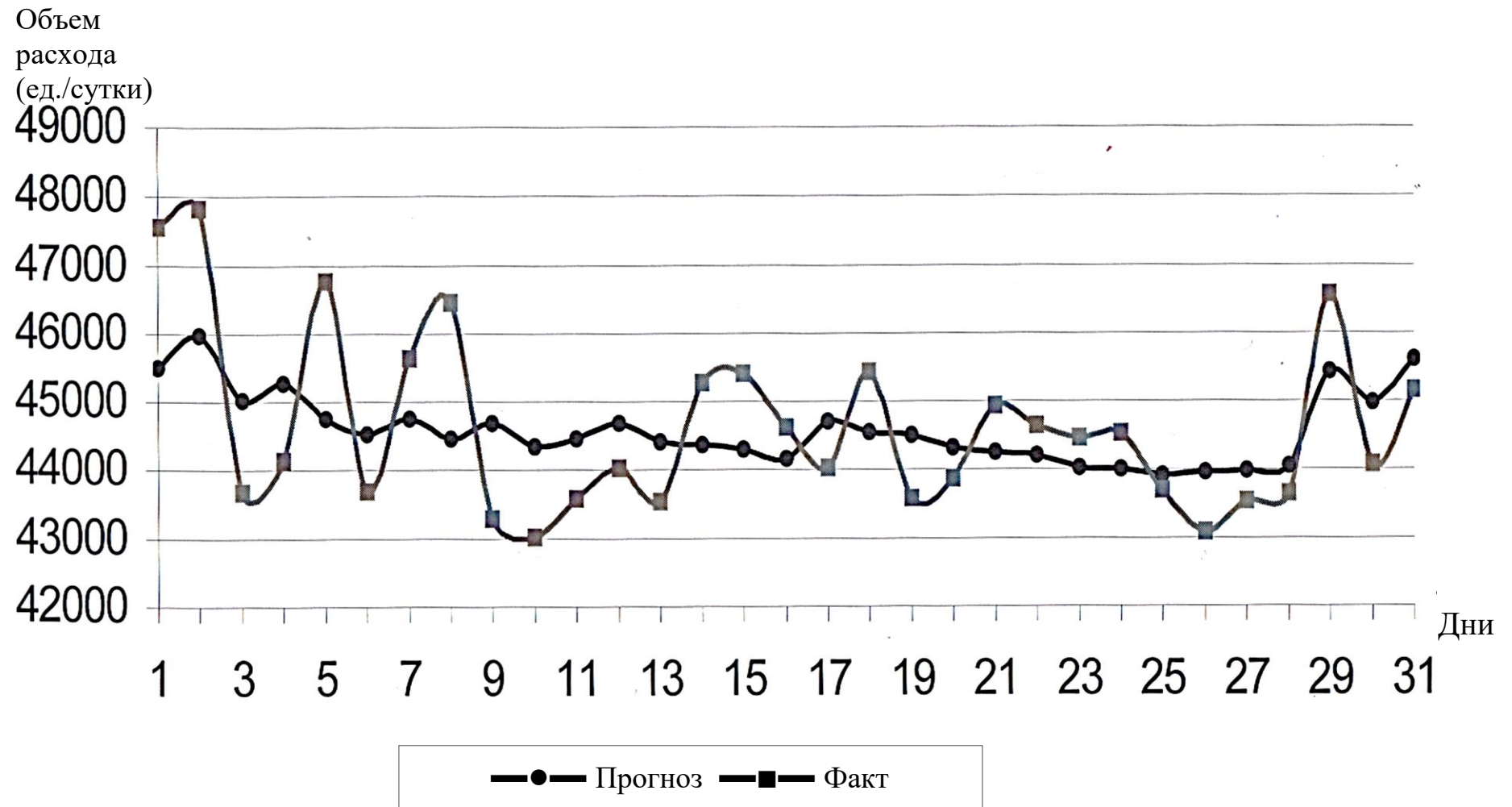


Рисунок 5.8 — Прогнозируемое и фактическое количество израсходованной электроэнергии в течение марта 2009 г.

5.5 Выводы по пятому разделу

1. Системный анализ ОАО «АЗОЦМ» как объекта управления в задаче управления себестоимостью продукции позволил выделить структуру предприятия, провести её декомпозицию на 3 уровня, исследовать особенности материальных превращений и движения материалов для каждого подразделения, оценить затратный механизм, сопровождающий эти превращения. Учитывая существующее на предприятии сокращение номенклатуры портфеля заказов, выделено 10 видов готовой продукции и определены правила её группировки по материалу и ассортименту. Системный анализ методик калькулирования, существующих на ОАО «АЗОЦМ», дал возможность выделить статьи калькулирования и совокупность показателей, характеризующие себестоимость продукции. Анализ показал необходимость разработки для данного завода автоматизированной системы управления затратами, в основе которой лежит методология динамического прогноза себестоимости. Изложенный в работе материал отражает сущность методологии, предназначенной для проектирования и разработки автоматизированных систем управления затратным механизмом многоуровневого производства в условиях технологической и экономической трансформаций.

2. В соответствии с методологией динамического прогноза себестоимости, при помощи информационных модулей и модулей правил, разработаны множественная логико-концептуальная модель и динамические модели прогноза себестоимости продукции подразделений ОАО «АЗОЦМ». По результатам работы предприятия в 2008 году собран статистический материал и проведена параметрическая идентификация моделей. Определены значения параметров. Погрешность предлагаемых моделей не выше 5%. Формирование информационных модулей и модулей правил позволит разрабатывать специальное математическое и программное обеспечение многоуровневых систем и пополнять информацию об объекте управления в условиях информационной и экономической трансформаций. Опытная эксплуатация представленных

разработок характеризуется уменьшением себестоимости продукции по всей номенклатуре динамически меняющейся номенклатуры портфеля заказов не менее, чем на 0,5%.

3. Для задачи оперативного управления предприятием осуществлена постановка задачи, формализованная в виде функционала цели с системой динамических ограничений, представленная математической моделью. Решением задачи минимизации функционала цели являются суточные задания на производство позиций портфеля заказов, обеспечивающие минимум себестоимости производства. Приведённая постановка задачи позволяет оценивать влияние на себестоимость маркетинговых предложений, возникающих в плановые периоды, и отказов от ранее заказанного ассортимента. Апробация разработанной системы в опытной эксплуатации на фирме «Оптимум инжиниринг», изготавливающей детали специального назначения, позволила оценить оптимальные решения, предлагаемые системой, в размере 8.000 тыс. долларов в месяц.

4. Разработки, приведённые в данном разделе, положены в основу алгоритма системы принятия решений, вырабатывающей рекомендации для планово-экономического отдела и службы снабжения предприятия. Функционирование алгоритма апробировано оценкой экономической эффективности решений, вырабатываемых системой и принимаемых службами предприятия. Представленные в работе правила функционирования автоматизированной системы управления могут быть использованы при пополнении информации об объекте, разработке специального математического и программного обеспечения многоуровневых систем управления (второй уровень производственной иерархии) в условиях информационной и экономической трансформаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная научная проблема, заключающаяся в развитии теории и практики управления технологическими процессами мелкосерийных производств в условиях информационной и технологической трансформаций на основе совершенствования методологии создания систем управления производственными процессами и принципов реализации управляющих функций. Основные научные результаты и выводы, полученные в работе, состоят в следующем.

1. Определено, что технологическое перевооружение производственных мощностей включает в себя многоуровневые системы управления процессами и производствами, реализованные как связанные сложноподчинённые структуры, основанные на вычислительных сетях. Это определяет необходимость технико-экономического обоснования проектируемых систем.

2. Установлено, что поставляемые с технологическим оборудованием системы управления процессами и производствами рассчитаны на стабильность характеристик исходных сырьевых материалов. Несоблюдение этого требования приводит к тому, что алгоритмы и программное обеспечение систем управления нуждается в разработке альтернативных решений, учитывающих изменяющиеся условия. Это обуславливает необходимость трансформации традиционной классификации систем управления процессами и производствами, и учёта на каждом уровне доли задач управления технологией и экономикой в многоуровневых системах управления производственными процессами.

3. В практике организации производства в странах СНГ предприятия авансируют налоги, что приводит к дефициту оборотных средств во второй половине планового периода, и обращению в банки за кредитными средствами, процентная ставка которых ещё более осложняет поддержание рентабельности производства. Это обуславливает необходимость учёта динамики движения средств и, в первую очередь, показателей себестоимости.

4. Доказано, что в существующей практике вычислительных процедур поиск решения осуществляется в области их определения путём перебора значений баз данных, что увеличивает время принятия решений и усложняет вычислительные процедуры.

5. Установлено, что на большинстве предприятий, производящих серебро, в качестве извлекающих элементов-сорбентов используются синтезируемые материалы высокой стоимости (около 20 тыс. долларов за тонну). Эти материалы могут быть заменены на отходы производства антибиотиков, стоимость которых на 4-5 порядков ниже. Применение таких материалов обуславливает изменение технологий, включающих в себя трёхуровневую систему управления процессом извлечения серебра.

6. Впервые сформированы методы представления систем управления процессами и производствами в трёхортовом пространстве, что позволяет осуществлять оценку полноты информации и выбор комплекса технических средств системы управления производственными процессами, повышающие экономическую эффективность технических проектов.

7. Обосновано, что представление систем управления производственными процессами в трёхортовом пространстве позволяет оценивать уровень отношений характеристик сырьевых материалов к алгоритму и программному обеспечению поставляемой технологии и систем управления процессами и производствами.

8. Получили дальнейшее развитие правила представления характеристик предприятия в функциональных пространствах, что позволяет связывать цели управления в многоуровневых системах в условиях соподчинённости задач управления технологических процессов и производств.

9. Обоснованы и предложены новые модели прогноза плановых показателей мелкосерийного производства, которые предусматривают расчёт заказов на сырьевые материалы путём обратного расчёта от изготовления продукции и эффективности их переработки в производстве, что позволяет принимать экономически-обоснованные решения в условиях экономической трансформации.

Эффективность выполненных предложений оценена в размере 18.000 тыс. долларов (подтверждено актом опытно-промышленных испытаний).

10. Впервые сформированы правила определения критериев оценки качества в системах управления себестоимостью продукции с учётом оперативной информации об изменении технологических и экономических показателей, характеризующих технологическую трансформацию деятельности предприятия. Правила позволяют принимать обоснованные решения по управлению деятельностью предприятия. Опытно-промышленная эксплуатация моделей и алгоритмов, предложенных в работе, позволила оценить эффективность принимаемых решений сокращением себестоимости на 15%.

11. Получили дальнейшее развитие правила сокращения процедур поиска решений и уменьшения размеров области определения функций и функционалов в алгоритмах управления. Эти правила основываются на отображении областей значений показателей и выделения эквивалентных (в логическом, нумерологическом, числовом и семантическом смыслах) и неэквивалентных множеств значений. Элементы неэквивалентных множеств исключаются из анализа данных.

12. Впервые сформированы правила создания трёхуровневой системы управления технологическим процессом биосорбции серебра из растворов. Предложенные модели и алгоритмы сочетают в себе решения взаимосвязанных с технологией экономических и организационных управлений. Акт опытно-промышленных испытаний оценивает точность прогноза по модели и рост производительности технологического участка не менее 20% в год.

13. Получили дальнейшее развитие методы создания динамической математической модели расчёта нестационарных процессов биосорбции и десорбции серебра, которые заключаются в оценке физико-химических превращений ионов серебра в среде антибиотиков. Это позволило реализовать новый технологический процесс четвёртого уровня иерархии и систему управления процессом извлечения серебра с высокими экономическими показателями.

14. Впервые разработаны динамические модели в алгоритме трёхуровневой системы управления производственными процессами с идентификатором в контуре управления, которые могут быть использованы при техническом проектировании систем четвёртого уровня иерархии — производственным участком любого предприятия.

15. Разработанные динамические модели и алгоритмы управления себестоимостью продукции содержат идентификатор в контуре управления, который допускает адаптацию алгоритмов и их применение в техническом проектировании аналогичных систем второго уровня иерархии — производственных цехов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фельдбаум, А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем / А.А. Фельдбаум. – М.: Наука, 1966. – 624 с.
2. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния / П. Эйкхофф. – М.: Мир, 1975. – 684 с.
3. ERP-системы (мировой рынок). Прогнозирование и тенденции [Электронный ресурс] // Интернет-платформа Tadviser. – 2016. – Режим доступа к ресурсу: http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:ERP%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D1%8B_%28%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA%29. – Заголовок с экрана.
4. ERP software – a global strategic business report [Электронный ресурс] // ERP Software (MCP-6578) – Global Industry Analysts, Inc. – 2016. – Mode of access: http://www.strategyr.com/ERP_Software_Market_Report.asp. – Title from the screen.
5. Jacobs, F. R. Enterprise resource planning: developments and directions for operations management research / F. R. Jacobs, E. Bendoly // European Journal of Operational Research. – 2003. – № 146 (2). – PP. 233–240.
6. Лодон, Дж. Управление информационными системами / Дж. Лодон, К. Лодон. – СПб.: Питер, 2005. – 912 с.
7. Макленнен, Дж. Microsoft SQL Server 2008: Data Mining – интеллектуальный анализ данных: Пер. с англ. / Дж. Макленнен, Чж. Танг, Б. Криват. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 720 с.
8. Павличева, Е.Н. Введение в информационные системы управления предприятием: учеб. пособие / Е.Н. Павличева, В.А. Дикарев. – М.: МГПУ, 2013. – 84 с.
9. Ситник, В.Ф. Системи підтримки прийняття рішень. Навч. посіб. / В.Ф. Ситник. – К.: КНЕУ, 2004. – 614 с.
10. Eom, S. B. Decision Support Systems Research and Reference Disciplines, 1970 – 2001 / S. B. Eom. – Lewiston, NY: Edwin Mellen Press, 2003. – 288 p.

11. Рыбин, В. Облачно-ориентированная ИТ-инфраструктура: возможности и проблемы управления сервисами в облаке [Электронный ресурс] / В. Рыбин // Rational Enterprise Management. – 2013. – № 5–6. – С. 14–16. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.remmag.ru/journal/?journal=50>. – Заголовок с экрана.
12. Объем и крупнейшие игроки мирового рынка ERP-систем [Электронный ресурс] // Независимый ERP-портал "ERP-online". – 2007. – Режим доступа к ресурсу: http://www.erp-online.ru/phparticles/show_news_one.php?n_id=514. – Заголовок с экрана.
13. Power, D. J. Decision Support Systems Discipline: Achievements and Needs / D. J. Power, S. B. Eom // Journal of Decision Systems. – 2006. – Vol. 15, No. 1. – PP. 9–21.
14. Marakas, G. M. Decision Support Systems in the 21st Century / G. M. Marakas. – Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2003. – 611 p.
15. Гудвин, Г. К. Проектирование систем управления / Г. К. Гудвин, С. Ф. Гребен, М. Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
16. Коршевнюк, Л.А. Проблема поддержки принятия решений при управлении бизнес-процессами на предприятиях / Л.А. Коршевнюк, П.И. Бидюк // Систем. Технології. – 2000. – Вип. 3. – С. 40–51.
17. Banerjee, S. Hierarchical modeling and analysis for spatial data / S. Banerjee, B. P. Carlin, A. E. Gelfand. – Chapman and Hall/CRC, 2004. – 584 p.
18. Power, D. J. Emerging Decision Support Technologies: An Historical Perspective / D. J. Power, S. Kaparthy, R. Karsten // Journal of Decision Systems. – 2001. – Vol. 10, No. 2. – PP. 133–148.
19. Bhargava, H. Decision Support Systems and Web Technologies: A Status Report / H. Bhargava, D. J. Power, D. Sun // Decision Support Systems, special issue on Web-based DSS. – 2007. – Vol. 43, Iss. 4. – PP. 1085–1095.
20. Power, D. J. Model-Driven DSS: Concepts and Research Directions / D. J. Power, R. Sharda // Decision Support Systems, special issue on Integrated Decision Support. – 2007. – Vol. 43, Iss. 3. – PP. 1044–1061.

21. Нестационарные системы автоматического управления. Анализ, синтез и оптимизация: Монография / Н.Д. Егупов, К.А. Пупков, А.И. Гаврилов, В.Г. Коньков – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 632 с.
22. Принципы математического моделирования ХТС / Кафаров В.В. [и др.]. – М.: Химия, 1974. – 344 с.
23. Пьявченко, Т.А. Автоматизированные информационно-управляющие системы / Т.А. Пьявченко, В.И. Финаев. – Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007. – 271 с.
24. Определение управляемости сложных химико-технологических систем на основе принципа декомпозиции / Кафаров В.В. [и др.]. – ДАН СССР, 1976. – Т.228. – №3. – С. 666–669.
25. Wilson, I.D. Three applications of decomposition method for designing hierarchical control system / I.D. Wilson // Inter. J. Contr. – 1979. – V. 29. – № 6. – PP. 935–947.
26. Пупков, К.А. Методы анализа и оптимизации нестационарных систем автоматического управления / К.А. Пупков, Н.Д. Егупов – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 684 с.
27. Koppel, L.V. Input multiplicities in nonlinear, multivariable control systems / L.V. Koppel // AIChE Journal. – 1983. – V. 28. – №6. – PP. 935-945.
28. Кини, Р.Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р.Л. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
29. Салихов, З.Г. Системы оптимального управления сложными технологическими объектами / З.Г. Салихов, Л.А. Рутковский, Г.Г. Арунцянц. – М.: Теплоэнергетика, 2004. – 495 с.
30. Елкин, В.И. Построение подсистем для нелинейных управляемых систем / В.И. Елкин. – М.: Автомат. и телемех., 2010. – № 5. – С. 11–20.
31. Буков, В.Н. Децентрализованное управление с модельной координацией составной многосвязной системой / В.Н. Буков, А.М. Бронников, Н.И. Сельвесюк. – М.: Автомат. и телемех., 2009. – № 10. – С. 3–14.

32. Фигура, А. Методы продолжения решений в прикладных задачах оптимального управления : диссертация ... доктора физико-математических наук : 05.13.01 / Адам Фигура. - Москва, 2001. - 158 с. : ил.

33. Тятюшкин, А.И. Конструктивные методы оптимизации управлений в нелинейных системах / А.И. Тятюшкин, О.В. Моржин. – М.: Автомат. и телемех., 2009. – № 5. – С. 35–50.

34. Згуровский, М.З. Системный анализ: проблемы, методология, приложения / М.З. Згуровский, Н.Д. Панкратова. – К.: Наук. думка, 2005. – 744 с.

35. Рыков, А.С. Модели и методы системного анализа: принятие решений. Курс лекций для аспирантов и соискателей / А.С. Рыков. – М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2005. – 99 с.

36. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Маке, Я. Такахара. – М.: Мир, 1973. – 344 с.

37. Ли, Э.Б. Основы теории оптимального управления / Э.Б. Ли, Л. Маркус. – М.: Наука, 1972. – 578 с.

38. Яковенко, Г.Н. Нестационарно робастные системы – обобщение класса управляемых систем / Г.Н. Яковенко. – М.: Автомат. и телемех., 2011. – № 7. – С. 75–82.

39. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.

40. Квейд, Э. Анализ сложных систем / Э. Квейд. – М.: Мир, 1969. – 526 с.

41. Месарович, М. Общая теория систем: математические основы / М. Месарович, Я. Такахара. – М.: Мир, 1978. – 311 с.

42. Хайкин, С. Нейронные сети. Полный курс / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.

43. Каллан, Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан. – М.: Вильямс, 2001. – 288 с.

44. Круглов, В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2002. – 382 с.

45. Masters, T. Neural, Novel & Hybrid Algorithms for Time Series Prediction / T. Masters. – N.Y.: John Wiley & Sons. Inc., 1995. – 514 p.
46. Zbikowski, R. Neural Adaptive Control Technology / R. Zbikowski, K.J. Hunt. – Singapore: World Scientific, 1996. – 347 p.
47. Гудвин, Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Греббе, М.Э. Сальгадо. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
48. Салихов, З.Г. Справочник по созданию АСУ и определению базовой цены / З.Г. Салихов // Учебное пособие, УМО. – М., Теплоэнергетика, 2006. – С. 53.
49. Салихов, З.Г. Метрология. Компьютерно-технические средства и программное обеспечение в интеллектуальных системах управления. Лабораторный практикум по 5-ти дисциплинам с грифом УМО / Под общей редакцией проф. З.Г. Салихова. – М.: Изд. дом МИСиС, 2008. – С. 180.
50. Салихов, З.Г. Теория автоматического управления [Текст]: линейные системы: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению Металлургия / З.Г. Салихов, А.В. Сириченко; М-во образования и науки РФ, Федеральное гос. авт. образовательное учреждение высш. проф. образования «Нац. исследовательский технологический ун-т «МИСиС», Каф. компьютерных информ. и управляющих систем автоматизации. - Москва: Издательский дом МИСиС, 2012. - 83 с.: ил.; 21 см.; ISBN 978-5-87623-632-6.
51. Методология функционального моделирования IDEF0. Руководящий документ. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 75 с.
52. Колмогоров, А.Н. Теория информации и теория алгоритмов / А.Н. Колмогоров. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
53. Игошин, В.И. Математическая логика и теория алгоритмов / В.И. Игошин. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 448 с.
54. Миллер, Р. Последовательные и параллельные алгоритмы / Р. Миллер, Л. Боксер. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. – 408 с.

55. Угаров, П.А. Двухуровневые верифицированные системы с динамическим выбором алгоритмов управления / П.А. Угаров // Исследовано в России: Электронный журнал. – С. 2335-2344. Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/220.pdf>

56. Стрижко, Л.С. Metallургия благородных металлов / Л.С. Стрижко. – М.: МИСиС, 2001. – 336 с.

57. Котляр, Ю.А. Metallургия благородных металлов / Ю.А. Котляр, М.А. Меретуков, Л.С. Стрижко. – М.: МИСиС, Издательский дом «Руда и Металлы», 2005. – 824 с.

58. Коростышевский, Н.Б. Metallургия золота и серебра / Н.Б. Коростышевский // Metallургия цветных металлов. Том 17 (Итоги науки и техники ВИНТИ АН СССР). – М., 1987. – С. 174.

59. Metallургия благородных металлов / И.Н. Масленицкий, Л.В. Чугаев [и др.]. – М.: Metallургия, 1987. – 432 с.

60. Лолейт, С.И. Разработка экологически чистых технологий комплексного извлечения благородных и цветных металлов из электронного лома: автореф. дис. на соиск. ученой степ. докт. техн. наук: 05.16.02. / Лолейт Сергей Ибрагимович; Нац. исслед. технол. ун-т "МИСиС". – М., 2010. – 41 с.

61. Погосян, А.Т. Разработка рациональной технико-экономической структуры переработки электронного лома : диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.01, 05.16.02 / Аркадий Тигранович Погосян. - Москва, 2007. - 154 с. : ил.

62. Серебро и его сплавы / В.М. Денисов, С.А. Истомина, Н.В. Белоусова, Л.Т. Денисова, Э.А. Пастухов. – Екатеринбург.: Уро РАН, 2011. – 368 с.

63. Переработка производственных отходов и вторичных сырьевых ресурсов, содержащих редкие, благородные и цветные металлы / В.И. Букин, М.С. Игумнов, В.В. Сафонов, Вл.В. Сафонов. – М.: Изд. дом «Деловая столица», 2002. – 224 с.

64. Колобов, Г.А. Сбор и обработка вторичного сырья цветных металлов. Учебник для вузов / Г.А. Колобов, В.Н. Бредихин, В.М. Чернобаев. – М.: Металлургия, 1992. – 288 с.

65. Бабаханов, Д.Ш. Организация заготовки и переработки лома и отходов цветных металлов / Д.Ш. Бабаханов, Г.Х. Халикулов. – Ташкент, 2001. – 224 с.

66. Барченков, В.В. Основы сорбционной технологии извлечения золота и серебра из руд / В.В. Барченков. – М.: Металлургия. – 1982. – 128 с.

67. Гросс, Д. Осаждение золота и серебра из цианистых растворов древесным углем / Д. Гросс, В. Скотт. – М.: ГОНТИ, 1938. – 71 с.

68. Eisele, I.A. Carbon adsorption-desorption / I.A. Eisele // Inf. Circ. Bur. Mines US Dep. Inter. – 1986. – 9059. – P. 34-36.

69. Zadra, J.B. A process for the recovery of gold and silver from activated carbon by leaching and electrolysis / J.B. Zadra // U.S. Bureau of Mines Reports of Investigations, 4672. – 1950, April. – P. 4672-4677.

70. Zadra, J.B. A process for the recovery of gold and silver from activated carbon by leaching and electrolysis / J.B. Zadra, A.L. Engle, H.J. Heinen // U.S. Bureau of Mines Reports of Investigations, 4843. – 1952. – 32 p.

71. Низамутдинова, Р.А. Применение активированного зернистого угля для адсорбции золота и серебра из цианистых пульп / Р.А. Низамутдинова // Бюл. ОНТИ ВИЭМС. - М., 1964. – №3. – С. 91.

72. Низамутдинова, Р.А. Уточнение условий извлечения золота и серебра адсорбцией на угле в связи с проектированием промышленной адсорбционно-десорбционной установки / Р.А. Низамутдинова // Тр. ЦНИГРИ. – М., 1963. – Вып. 54. – С. 143.

73. Низамутдинова, Р.А. Бесфильтрационное цианирование руд с применением активированных углей в качестве сорбентов / Р.А. Низамутдинова, Г.Л. Чевашева // Обогащение руд и песков благородных металлов. – М., 1971. – С. 103-108.

74. Ласкорин, Б.Н. Современное состояние и перспективы развития гидрометаллургических процессов / Б.Н. Ласкорин // Гидрометаллургия золота. – М., 1976. – С. 7-19.

75. Плаксин, И.Н. Гидрометаллургия с применением ионитов / И.Н. Плаксин, С.А. Тэтару. – М., 1964. – 282 с.

76. Гельферих, Ф. Иониты. Основы ионного обмена / Ф. Гельферих. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. – 492 с.

77. Зеликман, А.Н. Теория гидрометаллургических процессов / А.Н. Зеликман, Г.М. Вольдман, Л.В. Белявская. – М.: Metallurgy, 1983. – 424 с.

78. Кафаров, В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств: Учеб. пособие для вузов / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М.: Высш. шк., 1991. – 400 с.

79. Резчиков, А.Ф. Причинно-следственные комплексы взаимодействий в производственных процессах / А.Ф. Резчиков, В.А. Твердохлебов // Проблемы управления. – 2010. – №3. – С.51-60.

80. Цымбал, В.П. Математическое моделирование металлургических процессов / В.П. Цымбал. – М.: Metallurgy, 1986. – 240 с.

81. Зарубин, В.С. Математическое моделирование в технике / В.С. Зарубин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 496 с.

82. Федоткин, И.М. Математическое моделирование технологических процессов / И.М. Федоткин. – М.: Либроком, 2011. – 416 с.

83. Математическое моделирование химико-технологических процессов / Ас. М. Гумеров, Н.Н. Валеев, Аз.М. Гумеров, В.М. Емельянов. – М.: Колосс, 2008. – 160 с.

84. Рутковский, А.Л. Методы математического моделирования и управления многофазными технологическими процессами производства полупроводников АЗВ5 / А.Л. Рутковский, З.Г. Салихов, В.И. Алехин // Известия ВУЗов. – М.: Материалы электронной техники. – 2007. – № 3. – С. 68-71.

85. Рутковский, А.Л., К вопросу математического моделирования процесса электролиза полупроводников / А.Л. Рутковский, З.Г. Салихов, В.И. Алехин // Известия ВУЗов. – М.: Цветная металлургия. – 2007. – № 4. – С. 70-73.
86. Кроу, К. Математическое моделирование химических производств / К. Кроу, А. Гамилец, Т. Хоффман. – М.: Мир, 1973. – 392 с.
87. Таганов, И.Н. Моделирование процессов массо- и энергопереноса: нелинейные системы / И.Н. Таганов. – Ленинград: Химия, 1979. – 204 с.
88. Фрэнкс, Р. Математическое моделирование в химической технологии / Р. Фрэнкс. – М.: Химия, 1971. – 273 с.
89. Стрижко, Л.С. Извлечение серебра из разбавленных растворов биосорбентами / Л.С. Стрижко, В.И. Захарова, Ж.Н. Безрукова // Известия ВУЗов. – М.: Цветная металлургия, 2006. – №2. – С. 32-40.
90. Азизов, А.М. Анализ технологических процессов. Параметрические и нелинейные явления / А.М. Азизов. – Ленинград: Химия, 1992. – 336 с.
91. Калиткин, Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 592 с.
92. Криводубский, О.А. Модели в многоуровневых системах управления [Текст] / О.А. Криводубский // Матеріали десятої міжнародної науково-технічної конференції «Системний аналіз та інформаційні технології». 20–24 травня 2008 р. – Київ: НТУ У «КПІ», 2008. – С. 94.
93. Криводубский, О.А. Прогноз оборачиваемости производственных фондов предприятия / О.А. Криводубский, А.В. Жилин // Математическое и информационное моделирование. – Тюмень: Изд-во ТГУ, 2000. – С.105–111.
94. Андросова, А.А. Задачи моделирования страховой деятельности / А.А. Андросова. – Донецк: Искусственный интеллект, 2004. – № 4. – С. 229-234.
95. De Andrade Lima, L.R.P. Modeling of gold heap leaching for criteria of sustainability targets / L.R.P. De Andrade Lima, R.C. Villas-Bôas, H.M. Kohler // Indicators of Sustainability for the Mineral Extraction Industries. – Rio de Janeiro, 2002. – P. 225-244.

96. De Andrade Lima, L.R.P. A mathematical model for isothermal heap and column leaching / L.R.P. De Andrade Lima. – Braz. J. Chem. Eng., vol.21, n.3, 2004. P. 435-447.

97. Ai-xiang, Wu Simulation of coupled flowing-reaction-deformation with mass transfer in heap leaching processes / Wu Ai-xiang, Liu Jin-zhi and Tang Ling-yan // APPLIED MATHEMATICS AND MECHANICS. Volume 28, Number 3, 327-335.

98. Bioleaching model of a copper-sulfide ore bed in heap and dump configurations / J. M. Casas, T. Vargas, J. Martinez, L. Moreno // METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B Volume 29, Number 4.

99. Naja, G. Behavior of the mass transfer zone in a biosorption column / G. Naja, B. Volesky // Environmental science technology (2006) Volume: 40, Issue: 12.

100. Volesky, B. BIOSORPTION: APPLICATION STRATEGIES / B. Volesky, G. Naja // Environmental science technology (2006) Volume: 40, Issue: 12.

101. Roman, R.J. Diffusion model for heap leaching and its application to scale-up / R.J. Roman, B.R. Benner, G.W. Becker // Chemical Engineering Science, Volume 53, Issue 2, January 1998. p. 348-356.

102. Weinstein, O. Modeling, simulation and control of liquid-liquid extraction columns / O. Weinstein, R. Semiat, D.R. Lewin // Chemical Engineering Science, Volume 53, Issue 2, January 1998. p. 325-339.

103. Davisa, T.A. A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae / T.A. Davisa, B. Volesky, A. Muccib // Chemical Engineering Science, Volume 53, Issue 2, January 1998. p. 301-309.

104. Мэрди, Дж. Математическое моделирование. Пер. с английского / Дж. Мэрди. – М.: Наука, 1979. – 425 с.

105. Криводубский, О.А. Математическая модель процесса жидкостной экстракции с поропластовым носителем органической фазы / О.А. Криводубский, В.А. Иванов, М.А. Меретуков // Изв. ВУЗов. – М.: Цветная металлургия, 1976. – №5. – С. 129-133.

106. Криводубский, О.А. Математическая модель связи параметров процесса жидкостной экстракции с поропластовым носителем органической фазы

/ О.А. Криводубский, В.А. Иванов, М.А. Меретуков // Изв. ВУЗов. – М.: Цветная металлургия, 1976. – №6. – С. 105-109.

107. Криводубский, О.А. Статистическое моделирование и оптимизация процесса жидкостной экстракции металла / О.А. Криводубский, В.А. Иванов, М.А. Меретуков // Вопросы автоматизации технологических и производственных процессов. – Ярославль, 1976. – С. 164-171.

108. Computational modelling of unsaturated flow of liquid in heap leaching using the results of column tests to calibrate the model / G.A. Sheikhzadeh, M.A. Mehrabian, S.H. Mansouri, A. Sarrafi // International Journal of Heat and Mass Transfer. – Vol. 48, Issue 2. – 2005. – p. 279-292.

109. Кельтон, В. Имитационное моделирование / В. Кельтон, А. Лоу // Классика CS. 3-е изд. – СПб.: Питер; Киев: Изд. гр. ВНУ, 2004. – 847с.

110. Bartlett, R.W. Simulation of ore heap leaching using deterministic models / R.W. Bartlett // Hydrometallurgy. Theory and Practice Proceedings of the Ernest Peters International Symposium. Vol. 29, Issues 1-3, 1992. p.231-260.

111. Цао, Сижень Сравнительный анализ динамики непрерывных и дискретно-событийных систем / Сижень Цао // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. – М.: Мир, 1989. – Том 77. – №1. – С.10-17.

112. Колмогоров, А.Н. Математическая логика. Дополнительные главы / А.Н. Колмогоров, А.Г. Драгалин. – М.: МГУ, 1984. – 120 с.

113. Скобелев, В.Г. Анализ дискретных систем / В.Г. Скобелев. – Донецк: Изд-во ИПММ НАНУ, 2002. – 172с.

114. Беляев, В.И. Основы логико-информационного моделирования сложных геосистем / В.И. Беляев, М.Ю. Худошина. – Киев: Наукова думка, 1989. – 244 с.

115. Дискретная математика и математические вопросы кибернетики // Под ред. С.В. Яблонского и О.Б. Лупанова. – Т.1. – М.: Наука, 1974. – 312 с.

116. Сачков, В.Н. Комбинаторные методы дискретной математики / В.Н. Сачков. – М.: Наука, 1977. – 320 с.

117. Hennie, F.C. Finite-states models for logical machines / F.C. Hennie. – John Wiley & Sons INC.: NY, 1962. – 466 p.

118. Безрукова, Ж. Н. Разработка процесса и технологии извлечения серебра из растворов биосорбентами : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.16.02 / Безрукова Жанна Николаевна; Моск. гос. ин-т стали и сплавов. – Москва, 2006. – 24 с.

119. Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг. – М.: Наука, 1991. – 432 с.

120. Сейдж, Э.П. Идентификация систем управления / Э.П. Сейдж, Дж.Л. Мелса. – М.: Наука, 1974. – 246 с.

121. Каханер, Д. Численные методы и программное обеспечение / Д. Каханер, К. Моулер, С. Нэш. – М.: Мир, 1998. – 575 с.

122. Самарский, А.А. Введение в численные методы / А.А. Самарский. – М.: Лань, 2009. – 288 с.

123. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. – 640 с.

124. Дьяконов, В.П. Компьютерная математика. Теория и практика / В.П. Дьяконов. – М.: Нолидж, 2001. – 1296 с.

125. Ginzburg, V. V. Flat Rolling Fundamentals / V. V. Ginzburg, R. Ballas. – CRC Press, 2000. – p. 85.

126. Чернега, Д. Ф. Основи металургійного виробництва металів і сплавів / Д. Ф. Чернега, В. С. Богушевський, Ю. Я. Готвянський. – К.: Вища школа, 2006. – 503 с.

127. Рудской, А. И. Теория и технология прокатного производства [Текст]: учеб. пособие / А. И. Рудской, В. А. Лунев. – СПб.: Наука, 2008. – 527 с.

128. Смирнов, В.С. Методы и модели управления проектами в металлургии / В. С. Смирнов [и др.] – М.: СИНТЕГ, 2001. – 176 с.

129. Сеничев, Г.С. Система управления производством и качеством продукции электросталеплавильного и сортопрокатного цехов / Г. С. Сеничев, И. В. Виер, Д. С Каплан [и др.] // Сталь. – 2006. – № 7. – С. 95–98.

130. Лямбах, Р. В. Проблемы автоматизации прокатного производства (Аналитический обзор) / Р. В. Лямбах, М. Д. Климовицкий // Сталь. – 1999. – № 2. – С. 43–47.

131. Томашевський, В.М. Моделювання систем. / В.М. Томашевський. – К.: Видавнична група ВНУ, 2005. – с. 352.

132. Методология построения эффективного решения многоэтапных задач календарного планирования на основе принципа иерархии и комплекса взаимосвязанных моделей и методов / М.З. Згуровский, А.А. Павлов, Е.Б. Мисюра, О.В. Мельников // Вісник НТУУ “КПІ”. Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – 2009. – №50. – С. 8–18.

133. Турчин, О.Я. Построение математической модели оптимизации производственного расписания металлургического производства / О. Я. Турчин. // Supplement to International Journal «Information Technologies and Knowledge». – 2009. – Vol. 3. – P. 134–138. – (International Book Series «Information Science and Computing»; № 15).

134. Шаталов, Р. Л. Автоматизация технологических процессов прокатки и термообработки металлов и сплавов / Р. Л. Шаталов, Т. А. Койнов, Н. Н. Литвинова. – М.: ЗАО «Металлургиздат», 2010. – 368 с.

135. Карманов, В. Г. Математическое программирование / В. Г. Карманов. – М: ФИЗМАТЛИИТ, 2004. – 264 с.

136. Alba, E. Optimization techniques for solving complex problems / E. Alba. – John Wiley and Sons, 2009. – p. 476.

137. Ткаченко, В. Н. Математическое моделирование, идентификация и управления технологическими процессами тепловой обработки материалов. / В. Н. Ткаченко. – К.: Наукова думка, 2008. – с. 241. – (Задачи и методы: математика, механика, кибернетика; Т. 13).

138. A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production / L. X. Tang, J. Y. Liu, A. Y. Rong, Z. H. Yang // European Journal of Operational Research. – 2001. – № 133 (1). – P. 1 – 20.

139. Клименко, А. В. Технология проката / А. В. Клименко. – К.: Наукова думка, 1999. – 245 с.

140. NIIR Board of Consultants and Engineers. Steel Rolling Technology Handbook / NIIR Board of Consultants and Engineers. – ASIA PACIFIC BUSINESS PRESS Inc., 2006. – p. 544.

141. Коновалов, Ю. В. Металлургия: учебное пособие в 3 кн. К. 2. Металловедение и основы термической обработки металлов. Теоретические основы обработки металлов давлением. Сортамент прокатной продукции. Производство заготовок, листопрокатное производство / Ю. В. Коновалов, А. А. Минаев. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – С. 352–488.

142. Василев, Я.Д. Теорія поздовжньої прокатки [Текст]: підручник / Я.Д. Василев, О.А. Мінаєв. – Донецьк: УНІТЕХ, 2009. – 488 с.

143. Колесов, Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем / Ю. Б. Колесов. – СПб: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 239 с.

144. Кузнецов, Л.А. Объектно-ориентированный подход к моделированию сложных производств Текст. / Л. А. Кузнецов, А. К. Погодаев, В. Д. Бурцев // Изв. ВУЗов. – М.: Черная металлургия. – 2001. – № 7. – С. 55–58.

145. Левин, В.И. Структурно-логические методы исследования сложных систем. / В. И. Левин. – М.: Наука, 1987. – 304 с.

146. Diasio, S. R. The evolution of expertise in decision support technologies: A challenge for organizations / S. R. Diasio, N. Agell // International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, Santiago, Chile, 22–24 Apr. 2009. – 2009. – P. 692–697.

147. Синтез интегрированной системы управления производством / Л. А. Кузнецов, А. М. Корнеев, В. В. Поляков, Д. А. Немой // Известия ВУЗов. – М.: Черная металлургия. – 2002. – № 5. – С. 48–53.

148. Хэмди, А. Т. Введение в исследование операций / Т. А. Хэмди. – М.: Вильямс, 2007. – 912 с.

149. Снитюк, В. Є. Прогнозування. Моделі. Методи. Алгоритми: Навчальний посібник / В. Є. Снитюк. – К.: Маклаут, 2008. – 364 с.

150. Rao, S. S. Engineering optimization: theory and practice / S. S. Rao. – John Wiley and Sons, 1996. – p. 903.
151. A survey of scheduling problems with setup times or costs / A. Allahverdi, C. T. Ng, T. C. Cheng, M. Y. Kovalyov // European Journal of Operational Research. – 2008. – № 187 (3). – P. 985–1032.
152. Пупков, К.А. Теория оптимизации систем автоматического управления / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 744 с.
153. Гвоздинский, А.Н. Методы оптимизации в системах принятия решений / А. Н. Гвоздинский, Н. А. Якимова, В. А. Губин. – Харьков: ХНУРЭ. – 2006. – 325 с.
154. Шор, Н.З. Квадратичные экстремальные задачи и недифференцируемая оптимизация / Н. З. Шор, С. И. Стеценко. – К.: Наук. Думка. – 1989. – 203 с.
155. Liua, S. Order-planning model and algorithm for manufacturing steel sheets / S. Liua, J. Tanga, J. Song // International Journal of Production Economics. – 2006. – Vol. 100, Iss. 1. – P. 30–43.
156. Смирнов, В. С. Теория прокатки [Текст]: учебное пособие для вузов / В. С. Смирнов. – М.: Металлургия, 1967. – 460 с.
157. Гилл, Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – М.: Мир, 1985. – 510 с.
158. Аттетков, А.В. Методы оптимизации: учебник для вузов / А. В. Аттетков, С. В. Галкин, В. С. Зарубин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 440 с.
159. Lu, S. Modeling and optimization methods of integrated production planning for steel plate mill with flexible customization / S. Lu, H. Su, C. Johnsson // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2015. – № 23 (12). – P. 2037-2047.
160. Orcun, S. General continuous time models for production planning and scheduling of batch processing plants: Mixed integer linear program formulations and computational issues / S. Orcun, I. K. Altinel, O. Hortacsu // Computers and Chemical Engineering. – 2001. – Vol. 25, No. 2. – P. 371-389.

161. Ng, T. S. Production planning with flexible customization using a branch-price-cut method / T. S. Ng, E. L. Johnson // *IEE Transactions*. – 2008. – Vol. 40, Iss. 12. – P. 1198-1210.

162. Leyffer, S. Integrating SQP and branch-and-bound for mixed integer nonlinear programming / S. Leyffer // *Computational Optimization and Applications*. – 2001. – № 18 (3). – P. 295-309.

163. Cowling, P.I. Multi-agent architecture for dynamic scheduling of steel hot rolling / P. I. Cowling, D. Ouelhadj, S. Petrovic // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2003. – Vol. 14, No. 5. – P. 457-470.

164. Cormen, T. H. Introduction to Algorithms / T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest. – London: MIT Press, 2001. – p. 984.

165. Галкин, С.В. Методы оптимизации в инженерных задачах / Текст.: под ред. С. В. Галкина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1991. – 160 с.

166. Ronald, L. R. Optimization in Operations Research / L. R. Ronald. – Prentice Hall, 1998. – 919 с.

167. Даффин, Р. Геометрическое программирование / Р. Даффин, Э. Питерсон, К. Зенер. – М.: Мир, 1972. – 311 с.

168. Крот, А.М. Дискретные модели динамических систем на основе полиномиальной алгебры / А. М. Крот. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 312 с.

169. Bazaraa, M. S. Nonlinear Programming: Theory and Algorithms / M. S. Bazaraa, H. D. Sherali, C. M. Shetty. – John Wiley and Sons, 2013. – p. 872.

170. Трифонов, А. Г. Optimization Toolbox 2.2. Руководство пользователя. Последовательное квадратичное программирование SQP [Электронный ресурс] / А. Г. Трифонов // Интернет-портал MATLAB.Exponenta. – Режим доступа к ресурсу: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/15.php#1. – Заголовок с экрана.

171. Трифонов, А. Г. Optimization Toolbox 2.2. Руководство пользователя. Методы на основе использования доверительных областей в задачах нелинейной оптимизации [Электронный ресурс] / А. Г. Трифонов // Интернет-портал

MATLAB.Exponenta. – Режим доступа к ресурсу: http://matlab.expo-nenta.ru/optimiz/book_1/17.php. – Заголовок с экрана.

172. Павлов, А.А. Минимизация суммарного запаздывания при выполнении независимых заданий с общим директивным сроком идентичными параллельными приборами, моменты запуска которых произвольны / А.А. Павлов, Е.Б. Мисюра // Вісник НТУУ "КПІ". Інформатика, управління та обчислювальна техніка: Зб. наук. пр. – 2013. – №59. – С. 28–34.

173. Згуровский, М.З. Иерархическое планирование в системах, имеющих сетевое представление технологических процессов и ограниченные ресурсы, как задача принятия решений / М.З. Згуровский, А.А. Павлов // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2009. – №.3 – С. 67–75.

174. A decomposition-based hierarchical optimization algorithm for hot rolling batch scheduling problem / S. Jia, J. Zhu, G. Yang, J. Yi, B. Du // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2011. – № 61 (5 – 8) – P. 487–501.

175. Floudas, C.A. A review of recent advances in global optimization / C. A. Floudas, C. E. Gounaris // Journal of Global Optimization. – 2009. – Vol. 45, No. 1. – P. 3–38.

176. Салихов, З.Г. Системы оптимального управления сложными технологическими объектами / З. Г. Салихов, Г. Г. Арунянц, А. Л. Рутковский. – М.: Теплоэнергетик, 2004. – 496 с.

177. Marler, R. T. Survey of multi-objective optimization methods for engineering / R. T. Marler, J. S. Arora // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2004. – Vol.26, No.6. – P. 369–395.

178. Файнштейн, С. И. Адаптивная оптимизационная модель для задач оперативного планирования листопрокатного производства / С. И. Файнштейн // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2010. – № 1. – С. 92–96.

179. Ткаченко, В.Н. Параметрическая идентификация нелинейных систем в условиях бифуркации / В. Н. Ткаченко, А. В. Ткаченко // Научные труды ДНТУ. Сер.: Вычислительная техника и автоматика. –2004. – Вып.74. – С. 25 –31.

180. Эвристический полиномиальный алгоритм оперативного планирования размещения готовой продукции на складах металлургических предприятий / Д. С. Каплан, Д. Х. Девятов, С. И. Файнштейн, В. Д. Тутарова, А. Н. Калитаев // Автоматизация и современные технологии. – 2009. – №6. – С. 35–39.

181. Кельтон, В. Имитационное моделирование / В. Кельтон, А. Лоу. – СПб: Питер, 2004. – 848 с.

182. Хоботов, Е.Н. Оптимизационно-имитационный подход к моделированию сложных систем / Е. Н. Хоботов // Изв. РАН. Сер.: Теория и системы управления. – 1996. – № 1. – С. 12–24.

183. Godfrey, C. New optimization techniques in engineering / C. Godfrey, V. V. Onwubolu. – Springer, 2004. – p. 712.

184. Емельянов, А.А. Имитационное моделирование экономических процессов / А. А. Емельянов, Е. А. Власова, Р. В. Дума. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.

185. Карпов, Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю. Карпов. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 400 с.

186. Information-guided genetic algorithm approach to the solution of MINLP problems / C. T. Young, Y. Zheng, C. W. Yeh, S. S. Jang // Industrial and Engineering Chemistry Research. – 2007. – Vol. 46, Iss 5. – P. 1527–1537.

187. Costa, L. Evolutionary algorithms approach to the solution of mixed integer non-linear programming problems / L. Costa, P. Oliveira // Computers and Chemical Engineering. – 2001. – Vol. 25, No. 2. – P. 257–266.

188. Sriprasert, E. Genetic algorithms for multi-constrained scheduling: an application for the construction industry / E. Sriprasert, N. N. Dawood // Proceedings of the CIB W78's 20th International Conference on Construction IT, Construction IT Bridging the Distance, CIB Report 284, Waiheke Island, New Zealand, 23-25 April 2003. – 2003. – P. 341–353.

189. Мышенков, К. С. Метод решения задачи календарного планирования ремонтов технологического оборудования предприятия с использованием

генетического алгоритма / К. С. Мышенков, А. Ю. Романов // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2011. – № 9. – С. 1-10.

190. Osaba, E. Simulation tool based on a memetic algorithm to solve a real instance of a dynamic TSP / E. Osaba, R. Carballedo, F. Diaz // Proceedings of the IASTED International Conference Applied Simulation and Modelling, Napoli, Italy, June 25–27, 2012. – 2012. – P. 27–33.

191. Антонова, А. С. Генетическая оптимизация при решении задачи планирования проектных работ [Электронный ресурс] / А. С. Антонова, К. А. Аксёнов // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». – 2012. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.science-education.ru/ru/article/-view?id=7409#w0-tab4>. – Заголовок с экрана.

192. Норенков, И. П. Эволюционные методы в задачах выбора проектных решений [Электронный ресурс] / И. П. Норенков, Н. М. Арутюнян // Научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана Наука и образование. – 2007. – Режим доступа к ресурсу: <http://technomag.bmstu.ru/doc/68376.html>. – Заголовок с экрана.

193. Мясников, А. С. Островной генетический алгоритм с динамическим распределением вероятностей выбора генетических операторов [Электронный ресурс] / А. С. Мясников // Научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана Наука и образование. – 2013. – Режим доступа к ресурсу: <http://technomag.bmstu.ru/doc/136503.html>. – Заголовок с экрана.

194. Гвоздинский, А.Н. Применение генетических алгоритмов для решения оптимизационных задач / А. Н. Гвоздинский, Е. Г. Климно // Харьков: Радиоэлектроника и информатика. – 2001. – №2. – С. 109–113.

195. Субботін, С. О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: Монографія / С. О. Субботін, А. О. Олійник, О. О. Олійник; Під заг. ред. С. О. Субботіна. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 375 с.

196. Конвей, Р. В. Теория расписаний / Р. В. Конвей, В. Л. Максвелл, Л. В. Миллер. – М.: Наука, 1975. – 360 с.

197. Johnson, S.M. Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included / S. M. Johnson // *Naval Research Logistics Quarterly*. – 1954. – Vol. 1. – P. 61.

198. Averbakh, I. Simple Heuristic for m-machine Flow-Shop and its Applications in Routing-Scheduling Problems / I. Averbakh, O. A. Berman // *Operations Research*. – 1999. – Vol. 47(1) – P. 165–170.

199. Зак, Ю.А. Решение обобщённой задачи Джонсона с ограничениями на сроки выполнения заданий и времена работы машин. Ч. 2. Приближенные методы решения / Ю.А. Зак // *Проблемы управления*. – 2010. – № 4. – С. 8–19.

200. Павлов, А.А. Составление расписания выполнения независимых заданий идентичными параллельными приборами, моменты запуска которых меньше общего директивного срока / А.А. Павлов, Е.Б. Мисюра, Т.Н. Лисецкий // *Вісник НТУУ “КПІ”. Інформатика, управління та обчислювальна техніка: Зб. наук. пр.* – 2013. – №58. – С. 11–23.

201. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. – 400 с.

202. Albers, S. The complexity of one-machine batching problems / S. Albers, P. Brucker // *Discrete Applied Mathematics*. – 1993. – Vol. 47, Iss. 2. – P. 87–107.

203. IT для бизнеса. Системы автоматизации деятельности предприятий [Электронный ресурс] // Интернет-проект исследования рынков РБК. – 2016. – Режим доступа к ресурсу: http://marketing.rbc.ru/reviews/it-business/chapter_2_1.shtml. – Заголовок с экрана.

204. О'лири, Д. ERP системы. Современное планирование и управление ресурсами предприятия / Д. О'Лири. – М.: ООО «Вершина», 2004. – 272 с.

205. Грицунов, О. В. Інформаційні системи та технології. Навчальний посібник / О. В. Грицунов. – Х.: ХНАМГ, 2010. – 222 с.

206. Избачков, Ю. С. Информационные системы: учебник [Текст] / Ю. С. Избачков – 2-е изд. – СПб: Питер, 2008. – 656 с.

207. Гаврилов, Д. А. Управление производством на базе стандарта MRP II, 2-е изд. / Д. А. Гаврилов. – СПб: Питер, 2005. – 416 с.

208. Soffer, P. ERP modeling: a comprehensive approach / P. Soffer, B. Golany, D. Dori // Information Systems. – 2003. – Vol.28, № 6. – P. 673–690.

209. Sowa, J.F. Extending and Formalizing the Framework for Information System Architecture / J. F. Sowa, J. A. Zachman // IBM System Journal. – 2000. – Vol. 31, № 3. – P. 12–18.

210. Силенко, О.Н. Организация взаимодействия систем уровня управления предприятием и производством [Электронный ресурс] / О. Р. Силенко // Rational Enterprise Management. – 2012. – №1. – С. 4–6. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.remmag.ru/journal/?journal=40>. – Заголовок с экрана.

211. One for All: 365 days of SAP Business Suite [Электронный ресурс] // Сайт SAP Corporation. – 2016. – Mode of access: <http://news.sap.com/business-suite-erp/> – Title from the screen.

212. Microsoft Dynamics [Электронный ресурс] // Сайт Microsoft Corporation. – 2016. – Mode of access: <https://www.microsoft.com/en-gb/dynamics/default.aspx> – Title from the screen.

213. Plazma Business Solution. User guide [Электронный ресурс] // Project Plazma ERP+CRM. – 2016. – Mode of access: <http://plazma.sourceforge.net/en/docs/usr-guide/index.html>. – Title from the screen.

214. Manufacturing execution system (MES) – a global strategic business report [Электронный ресурс] // ERP Software (MCP-6578) – Global Industry Analysts, Inc. – 2016. – Mode of access: http://www.strategyr.com/Manufacturing_Execution_Systems_MES_Market_Report.aspx. – Title from the screen.

215. Загидуллин, Р. Р. Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP / Р. Р. Загидуллин. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 372 с.

216. Филиппов, А. Планирование и контроллинг производства в металлургии на уровне MES [Электронный ресурс] / А. Филиппов // Rational Enterprise Management. – 2010. – №6. – С. 37–39. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.remmag.ru/journal/?journal=33>. – Заголовок с экрана.

217. Power, D. J. Business Expert Press digital library. Information systems collection / D. J. Power. – Business Expert Press, 2009. – p. 125.
218. Уринцов, А.И. Системы поддержки принятия решений и управления эффективностью бизнеса / А. И. Уринцов, В. В. Дик. – М.: МЭСИ, 2009. – 244 с.
219. Marakas, G. M. Decision support systems in the twenty-first century / G. M. Marakas. – Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1999. – p. 528.
220. Arnott, D. A critical analysis of decision support systems re-search / D. Arnott, G. Pervan // Journal of Information Technology. – 2005. – Vol.20, № 2. – P. 67–87.
221. Turban, E. Decision Support Systems and Intelligent Systems / E. Turban, J. E. Aronson. – Pearson/Prentice Hall, 2005. – p. 936.
222. Математические модели производства с учетом его системной автоматизации / М.Д. Мамедов, В.Ю. Дохукин, Л.В. Журавский [и др.] // Математическое моделирование систем. – М., 1990. – С. 22-27.
223. Kloock, Josef. Kurzfristige Productions planungs modelle aufoler basic von entscheidungs feldem minden altemativen Frumd - und eigenfertigung (min variablen produktionstie fen) / Josef. Kurzfristige Kloock // Schmalen boehs Z. Betriebswirt. – 1974. – V. 26. – №10. – P. 671-682. (нем.).
224. Лифшиц, А.Л. Моделирование динамики производства на структурной имитационной модели предприятия / А.Л. Лифшиц, Т.П. Розенблат // Автоматизированное управление технологическими процессами на промышленных предприятиях. – Пермь, 1984. – С. 40-54.
225. Леванова, Н.Г. Совершенствование методов планирования и калькулирования себестоимости продукции в условиях АСУП / Н.Г. Леванова // Экономика и планирование на предприятиях хим. машиностроения. – Пермь, 1981. – С. 44-50.
226. Тищенко, А.Н. Многофакторные экономикоматематические модели анализа и прогнозирования затрат на ремонты / А.Н. Тищенко, Т.П. Сверхина // Организация производства в черной металлургии. – М., 1981. – С. 66-68.

227. Зуев, С.М. Динамическая модель массового производства / С.М. Зуев, В.М. Хоменко // Информационные системы и моделирование. – Новосибирск, 1975. – С 32-36.

228. Мамиконов, А.Г. Методика проектирования автоматизированной системы оперативного управления основным производством / А.Г. Мамиконов, С.М. Почовян // Институт телекоммуникаций и систем управления Грузинского технического университета. – Тбилиси, 1992. – 4с.

229. Troie, L. Modele statistice de deterrminare a trendului cheltuielilor de intretinere si seperatii / L. Troie // Rev. rom. statist. –1993. – № 12. – С. 34-40. (рум.)

230. Лебедева, О.Л. Оперативное проектирование себестоимости пряжи для ниток / О.Л. Лебедева // Текстильная промышленность. – М.:1990. – № 7. – С. 38-39.

231. Брюханов, В.Н. Моделирование структуры производственных систем / В.Н. Брюханов, Я.Д. Липатов //Станки и конструкции. — М.: 1992. – №8. – С.2-3.

232. Лутков, В.М. Имитационное моделирование и управление производством / В.М. Лутков. – М.: Наука, 1978. – 44 с.

233. Моделирование производственного процесса выработки кож / А.А. Никольский, В.М. Анохина, В.А. Афанасьев [и др.] // Совершенствование хоз. механизма в легкой промышленности / Московская государственная академия легкой промышленности. – М., 1994. – С. 125-128.

234. Ешкилев, А.Б. Имитационная модель экономики предприятия в условиях хозрасчета / А.Б. Ешкилев, Е.Л. Смирнова // Судостроительная промышленность, серия «Системы автоматизированного проектирования, производства и управления». – М., 1990. – №20. – С. 10-14.

235. Выварец, А.Д. Экономико-математическое моделирование производственных систем / А.Д. Выварец, О.П. Могиленских, В.Л. Уланов. – Екатеринбург: УГТУ, 1995. – 133с.

236. Добровольский, В.К. Экономико-математическое моделирование / В.К. Добровольский. – К.: Наукова думка, 1975. – 184с.

237. Byers, J.D. Forecasting industrial production using non-linear methods / J.D. Byers, D.A. Peel // J. Forecast. – 1995. – V.14. – № 4. – P. 325-336. (англ.)

238. Kroller, Uwe Frarbeitung eines mathematischen modells cler simultanten progektion fur den entwurt von muhrprodutanlagen / Uwe Kroller, Gunter Fichther, Gunter Gruhn // Wiss. Z. Techn. Hochsch. – Carlforlemmer leunaBMerseburg. –1987. – V.29. – № 1. – P. 62-72. (нем.)

239. Иванов, Н.И. Экономико-математическое моделирование объектов и процессов управления в условиях АСУП / Н.И. Иванов. – К.: Наукова думка, 1977. – 193 с.

240. Иозайтгис, В.С. Экономико-математическое моделирование производственных систем / В.С. Иозайтгис, Ю.А. Львов. – М.: Высш, школа, 1991. – 192 с.

241. Фирман, Б.И. Математическая модель формирования затрат при комплексной переработке сырья / Б.И. Фирман // Повышение комплексности использования сырья в свинцово-цинковой подотрасли. – Усть-Каменогорск, 1981. – С. 12-18.

242. Турило, А.М. Динамическое моделирование себестоимости добычи железорудного сырья / А.М. Турило // Криворожский горнорудный институт. – Кривой Рог, 1985. – 8 с.

243. Beyer, O. Mathematik in Volkswirtschaft und Industrie. / O. Beyer, C. Frischmuth, H. Juttier // Entwicklung Math. DDR. – Berlin, 1974. – С. 657-692. (нем.).

244. Кулешов, В.В. Модели предприятия в экономическом анализе и управлении производством / В.В. Кулешов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 168 с.

245. Матекеев, А.К. Структура динамических моделей производства / А.К. Матекеев, Я.М. Лотош. – Ташкент: Фан, 1987. – 96 с.

246. Силаев, И.А. О динамическом моделировании производственно-экономических систем с неопределенностями / И.А. Силаев, О.И. Герасимов // Ленинградский электротехнический институт. – Л., 1991. – 6 с.

247. Низамутдинов, О. Б. Управление материальным потоком с использованием фильтра Кармана в условиях случайных возмущений типа коррелированных случайных полей / О. Б. Низамутдинов, И. Н. Липатов // Пермский государственный технический университет. – Пермь, 1996. – 42с.

248. Новаковская, Э.Г. О задаче динамического прогноза оборачиваемости средств предприятия / Э.Г. Новаковская, А.В. Жилин // Контроль и управление в сложных системах. – Винница: Универсум, 1999. – С. 269-275.

249. Черноудов, Н.Н. Планирование и калькулирование себестоимости продукции / Н.Н. Черноудов, Н.М. Юрьев. – М.: Экономика, 1971. – 183 с.

250. Линц, Н.И. Моделирование формирования издержек производства на промышленном предприятии / Н.И. Линц, Р.А. Давидович // Экономика и математические методы. – М., 1975. – №5. – С. 985-990.

251. Авершин, А.Е. Определение себестоимости и цен на новые изделия / А.Е. Авершин // ВНИИ горноспасательного дела. – Донецк, 1985. – 63 с.

252. Севрук, В.Т. Анализ себестоимости станкостроительной продукции методом главных компонент / В.Т. Севрук // Математико-статистический анализ в экономике и производстве. – М., 1988. – С. 93-98.

253. Грига, Ю.М. Применение матричной модели при планировании затрат на производство продукции с помощью ЕС-ЭВМ / Ю.М. Грига // Создание интегрированной ОАСУ-ХИМ. – М., 1985. – С. 119-121.

254. Баранов, А.В. Матричный метод планирования себестоимости коксохимической продукции / А.В. Баранов // Экономика и организация производства. – М, 1992. – №28. – С. 3-6.

255. Зима, Т.М. Анализ и управление себестоимостью в условиях функционирования АСУП / Т.М. Зима // Анализ и моделирования промышленного производства в условиях интенсификации экономики. – Днепропетровск, 1988. – С. 168-174.

256. Химич, А.И. Экономико-математические зависимости для определения нормативов себестоимости содержания машин и оборудования на нижних складах / А.И. Химич, З.С. Максимова, В.И. Соболев // Вопросы экономики и

организации лесозаготовительного производства. – Химки, 1979. – С. 99-103.

257. Анциферова, Л.Т. Факторная модель расчета себестоимости спеченных изделий / Л.Т. Анциферова // Экономическая кибернетика в задачах управления производством. — М., 1979, №2. – С. 62-66.

258. Живова, Я.В. Прогнозирование уровня себестоимости добычи газа / Я.В. Живова, Л.А. Чаруйская, С.И. Шабарова // Проблемы совершенствования отраслевого планирования и методов управления в газовой промышленности. – М., 1982. – С.113-120.

259. Саканцев, М.Г. Прогнозирование стоимостных показателей на основе многофакторных статистических моделей / М.Г. Саканцев, Г.Г. Саканцев // Эффективность разработки месторождений руд цветных металлов и схем их переработки. – Свердловск, 1982. – С. 3-10.

260. Урусова, Е.А. Экономико-математические модели в прогнозировании затрат при постройке судов / Е.А. Урусова // Экономика и организация производства в судостроении. / Николаевский кораблестроительный институт. – Николаев, 1990. – С. 54-58.

261. Мубаракзянов, Г.М. Математическая модель себестоимости продукции / Г.М. Мубаракзянов // Труды НИИ управляющих машин и систем. – М., 1974. – № 12. – С. 145-155.

262. Ямпольский, М.Н. Математическая модель формирования затрат при флотации угля / М.Н. Ямпольский, Л.П. Мироненко, Н.С. Здыхальский // Обогащение полезных ископаемых / Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – Вып. 16. – 1975. – С. 62-68.

263. Аржанова, Т.Д. Прогнозирование показателей себестоимости в энергетике с помощью адаптивного экспоненциального сглаживания / Т.Д. Аржанова // Экономико-математические модели оптимизации проектирования и планирования развития электроэнергетики. – М., 1985. – №7. – С. 84-88.

264. Кудянкин, Н.Н. Прогнозирование затрат на производство новой техники в условиях малой выборки / Н.Н. Кудянкин // Вопросы повышения

эффективности разработки производства и эксплуатации РЭА. – Рязань, 1982. – С. 23-28.

265. Кабуябекова, Р.Г. Математическая модель себестоимости черного свинца / Р.Г. Кабуябекова, Т.Д. Шокобаев, Р.А. Кабулова // Экономика промышленности. — Вып. 6. — Алма-ата, 1976. — С. 111-114.

266. Каллас, К.Э. Калькулирование себестоимости продукции способом суммирования затрат / К.Э. Каллас // Труды Таллиннского института. – Таллин, 1974. – №370. – С. 29-38.

267. Соколов, В.Н. Экономико-математические модели распределения расходов на содержание и эксплуатацию оборудования литейного цеха / В.Н. Соколов // Имитационные экономико-математические модели производственных процессов. – Ярославль, 1979. – №4. – С. 127-137.

268. Шафроновская, И.В. Алгоритм расчета оперативной себестоимости в АСУ химической промышленности / И.В. Шафроновская, Т.Б. Белова, Ф.Т. Орлов // Гос. научно-исследовательский институт азотной промышленности и продуктов органического синтеза. – М., 1984. – 14 с.

269. Алтухов, Ю.В. Экономико-математические модели расчета себестоимости производства фанеры / Ю.В. Алтухов // ЦНИИ фанеры НПО научфинпром. – Л., 1986. – 7 с.

270. Периклеус, Т. Математическая модель расчета себестоимости изделий для условий малого предприятия / Т. Периклеус // Донецкий гос. университет. – Донецк, 1992. – 7 с.

271. Усов, Л.В. Математическая модель для расчета себестоимости продукции и услуг подразделения торфо-предприятия / Л.В. Усов // Вологодский политехнический институт. – Вологда, 1988. – 6 с.

272. Juruga, Alicia Kostenin formation beinder productions vor bereitung / Alicia Juruga // Stat. Prax. – 1975. – V. 30. – № 6. – p. 57-58. (нем.)

273. Одинцова, Т.М. Методологические проблемы учета и управления издержками фирм / Т.М. Одинцова, Е.А. Ткачук // Севастопольский приборостроительный институт. – Севастополь, 1994. – 20 с.

274. Раковицян, Дан-Михай Математическая модель расчетов по учету затрат на производство и калькуляции себестоимости продукции / Дан-Михай Раковицян // Организация обработки экономической информации на ЭВМ. – М., 1976. – С. 33-56.

275. Линнакс, Э.А. Методика расчета полных материальных затрат продукции промышленного предприятия / Э.А. Линнакс // Труды Таллиннского института. – Таллин, 1974. – №370. – С. 49-88.

276. Волков, А.С. К вопросу автоматизации расчётов планирования себестоимости продукции / А.С. Волков // Теория и практика машинной обработки экономической информации. – М., 1979. – № 5. – С. 44-50.

277. Грига, Ю.М. Пакет прикладных программ «Калькулирование себестоимости продукции» / Ю.М. Грига, В.Ф. Семенихин // Создание интегрированной ОАСУ-ХИМ. – М., 1985. – С. 117-119.

278. Терехов, Л.Л. Математические методы и модели в планировании / Л.Л. Терехов, А.Д. Шарапов, А.С. Бернштейн. – К.: Вища школа, 1981. – 272 с.

279. Таранникова, Е.Н. Нормативы чистой продукции и себестоимости в условиях АСУ / Е.Н. Таранникова. – М.: Машиностроение, 1986. – 128 с.

280. Гаррифулин, К.М. Автоматизированная подсистема управления себестоимостью продукции по нормативному методу / К.М. Гаррифулин // НИИ управляющих машин и систем. – Пермь, 1983. – 399 с.

281. Жарова, Н.В. Анализ себестоимости продукции / Н.В. Жарова // Практические рекомендации по совершенствованию финансово-экономической деятельности предприятий в новых условиях / НПО ВНИИ стройдормаш. – М., 1991. – С. 84-98.

282. Вайсман, Б.Г. Опыт разработки подсистемы оперативного учета и анализа технико-экономических показателей трубно-электросварочного производства / Б.Г. Вайсман, В.И. Эзаколи, А.А. Валикидзе // Проектно-конструкторский институт «Автопром». – Рустави, 1974. – 17 с.

283. Кубанов, Б.А. Построение факторной модели затрат и организация системы управления себестоимости внутри предприятия / Б.А. Кубанов, Е.С. Чинова // Экономические проблемы управления производством. – Л., 1988. – С. 69-78.

284. Дурнайкин, А.Я. О системе управления затратами на производство / А.Я. Дурнайкин // Вопросы повышения эффективности и совершенствование управления производством. – Саранск, 1983. – С. 113-117.

285. Артыкова, С. Математико-статистическое моделирование себестоимости сухих коконов / С. Артыкова, Н. Кариева, М.В. Сидиков. – Ташкент, 1975. – №79. – С. 50-54.

286. Ливадина, С.Л. Параметрическая модель оценки изменения уровня себестоимости суровых тканей / С.Л. Ливадина, В.В. Симонов // Известия вузов технологии текстильной промышленности. — М., 1990, №6. – С. 8-12.

287. Волокитина, Л.А. Экономико-математическое моделирование основных параметров, влияющих на себестоимости фосфатной продукции / Л.А. Волокитина // Экономика горнорудной промышленности. – Алма-ата, 1984. – С. 48-52.

288. Рыбина, О.И. Использование модели взаимосвязи факторов изменения себестоимости в управлении предприятием / О.И. Рыбина // Известия Ленинградского электротехнического института. – Л., 1977. – № 225. – С. 46-53.

289. Хаметов, Г.Ш. Использование экономико-математических методов при исследовании материальных затрат при бурении скважин / Г.Ш. Хаметов // Экономические предпосылки ресурсосбережения в нефтяной промышленности. Уфинский нефтяной институт. – Уфа, 1992. – С. 36-40.

290. Михаева, Л.В. Экономико-статистическая модель уровня затрат на 1 руб. товарной продукции Подмосковного горно-химического завода / Л.В. Михаева, В.П. Якушкин // Организация информации и управления в горно-химической промышленности. — М., 1979. – С. 25-31.

291. Морева, В.Н. Факторный анализ затрат на 1 руб. товарной продукции / В.Н. Морева, В.Е. Крылова // Пути и методы эффективного использования производственных ресурсов в текстильной и лёгкой промышленности и производстве химических волокон. – Л., 1981. – С. 74-77.

292. Таалер, Я.Э. О планировании себестоимости продукции по факторам / Я.Э. Таалер // Труды Таллиннского политехнического института. – Таллин, 1975. – №374. – С. 45-50.

293. Klumpar, Ivan V. Updated cost factors: process equipment / Ivan V. Klumpar, Steven T. Slavsky // Chem. Eng (USA). – 1985. – V. 92. – № 15. – P. 73-75. (англ.)

294. Поклад, И.И. Учет, калькулирование и анализ себестоимости промышленной продукции / И.И. Поклад. – М.: Финансы, 1966. – 255 с.

295. Петрова, В.И. Системный анализ себестоимости / В.И. Петрова. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 175 с.

296. Меликов, А.Н. Построение многофакторных моделей производственных процессов / А.Н. Меликов, Н.Е. Розинкин // Всероссийский заочный институт инженеров железнодорожного транспорта. – М., 1992. – 11 с.

297. Шокобаев, Т.Д. Математические модели затрат по стадиям технологического процесса / Т.Д. Шокобаев // Экономика промышленности. – Вып. 4. – Алма-ата, 1975. – С. 90-91.

298. Максимов, Ю.И. Стохастическое моделирование в промышленности / Ю.И. Максимов. – Новосибирск: Наука, 1981. – 285 с.

299. Терьян, Б.М. Расчет себестоимости сложных изделий / Б.М. Терьян // Радиопромышленность. – М., 1992. – № 3. – С. 36-37.

300. Матлина, Н.А. Экономико-математическая модель формирования себестоимости добычи угля / Н.А. Матлина // Московский горный институт. – М., 1988. – 4 с.

301. Хапирашвили, Л.А. Применение экономикоматематических методов для анализа себестоимости продукции / Л.А. Хапирашвили, Е.В. Ермакова // Использование резервов производства в текстильной и легкой промышленности в

новых условиях хозяйствования. / Ленинградский институт текстильной и легкой промышленности. – Л., 1988. – С. 110-113.

302. Миненко, В.А. Экономико-математические модели для расчётов технико-экономических показателей развития чёрной металлургии / В.А. Миненко, И.П. Дьяченко, В.Н. Тищенко // Организация труда в чёрной металлургии, – Вып. 8. – М.: Металлургия, 1979. – С. 5-10.

303. Ошурканов, Ы. К. Статистическое моделирование себестоимости продукции (на примере отрасли нерудных строительных материалов) / Ы. К. Ошурканов // Методологические проблемы статистических исследований социально-экономического потенциала. – М., 1989. – С. 82-85.

304. Полякова, О.В. Модели и алгоритмы организации на ЭВМ расчёта и анализа рентабельности / О.В. Полякова // Днепропетровский горный институт. – Днепропетровск, 1986. – 59 с.

305. Коломиец, Р.А. Экономико-математические методы в планировании снижения себестоимости выпускаемой продукции / Р.А. Коломиец, Н.А. Кизим // Мат. методы принятия плановых и управленческих решений. – Новосибирск, 1985. – С. 66-70.

306. Моделирование в системах управления / А.Д. Краснощёков, С.В. Тюлевин, И.Н. Козлова, А.В. Токарева // Вестник СГАУ. – 2011. – №7. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-v-sistemah-upravleniya> (дата обращения: 18.03.2020).

307. Люстерник, Л.А. Элементы функционального анализа / Л.А. Люстерник, В.И. Соболев. — М.: Наука, 1965. — 520 с.

308. Криводубский, О.А. Обобщенное представление систем управления / О.А. Криводубский // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – Донецк, 2003. – №. 1 – С. 62–66.

309. Криводубский, О.А. Обобщенное представление задач управления производством / О.А. Криводубский // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – Донецк, 2005. –

№4. – С. 489–497.

310. Афанасьев, В.Н. Математическая теория конструирования систем управления / В.Н. Афанасьев, В.Б. Колмановский, В.Р. Носов. — М.: Высшая школа, 2003. – 615 с.

311. Мэтьюз, Д. Г. Численные методы / Д. Г. Мэтьюз, К. Д. Финк. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2001. – 713 с.

312. Криводубский, О.А. Представление систем управления в функциональных пространствах. / О.А. Криводубский // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія Обчислювальна техніка та автоматизація. – 2003. – Вип. 64. – С. 205–211.

313. Криводубский, О.А. Задачи и функционалы управления предприятием / О.А. Криводубский // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія Обчислювальна техніка та автоматизація. – 2004. – Вип. 74. – С. 233–240.

314. Криводубский, О.А. Задачи управления предприятием / О.А. Криводубский, П.О. Чикунов // Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані компютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2007»: Тези доповідей – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2007. – С. 600–601.

315. Лэсдом, Л.С. Оптимизация больших систем / Л.С. Лэсдом. – М.: Наука, 1975. – 543 с.

316. Криводубский, О.А. Задачи планирования и управления в многоуровневых системах / О.А. Криводубский // Всеукраинский научно-технический межведомственный сборник «Автоматизированные системы управления и приборы автоматики». – Х.: ХНУРЭ, 2004. – № 125. – С. 98–106.

317. Мангейм, М. Иерархические структуры. Модель прогноза производства и проектирование / М. Мангейм. – М.: Мир, 1970. – 180 с.

318. Медницкий, В.Т. О декомпозиции одной задачи оптимального управления / В.Т. Медницкий, Ю.А. Медницкий // Изв. РАН, ТИСУ. – 1995. – №3. – С. 10-15.

319. Криводубский, О.А. Критерий декомпозиции в многоуровневых системах управления / О.А. Криводубский // Сборник тезисов X Международной научно-технической конференции. – Донецк: Изд. Института прикладной математики и механики НАН Украины, 2007. – С. 12–13.

320. Криводубский, О.А. Критерии декомпозиции систем управления / О.А. Криводубский // Матеріали загальноінститутської наукової конференції. – Донецьк: Донецький інститут автомобільного транспорту, 2008. – С. 141.

321. Колемаев, Е.А. Математическая экономика / Е.А. Колемаев. – М.: ЮНИТИ. – 2002. – 398 с.

322. Криводубский, О.А. Методология, определяющая правила разработки моделей и алгоритмов систем управления в условиях информационной и технологической трансформации / О.А. Криводубский // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – Донецк, 2020. – № 1 (16). – С. 18–27.

323. Криводубский, О.А. Полиномы Лагерра в прогнозе деятельности предприятий в условиях ограниченных ресурсов / О.А. Криводубский, С.Г. Ковалёв // Сборник тезисов X Международной научно-технической конференции. – Донецк: Изд. Института прикладной математики и механики НАН Украины, 2007. – С. 89.

324. Криводубский, О.А. Полиномы наилучшего приближения в прогнозе показателей деятельности предприятий / О.А. Криводубский, А.В. Грищенко // Сборник тезисов X Международной научно-технической конференции. – Донецк: Изд. Института прикладной математики и механики НАН Украины, 2007. – С. 90–91.

325. Криводубский, О.А. Метод эквивалентных отображений в алгоритмах систем управления / О.А. Криводубский // Научный журнал «Информатика и кибернетика». – Д.: ДонНТУ, 2020. – №2(20). – С. 27–33.

326. Криводубский, О.А. Анализ современных методов построения систем поддержки принятия решений для многоуровневых предприятий / О.А. Криводубский, П.О. Чикунов // Философские проблемы информационных

технологий и киберпространства. – 2014. – №2. – С. 20-40.

327. Пупков, К.А. Оптимальное управление многообъектными многокритериальными системами, структурный синтез и иерархическое уравнивание в интеллектуальных системах управления / К.А. Пупков, Е.М. Воронов, А.А. Карпунин // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2010. – №4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimalnoe-upravlenie-mnogoobektnymi-mnogokriterialnymi-sistemami-strukturnyyu-sintez-i-ierarhicheskoe-uravnoveshivanie-v> (дата обращения: 19.02.2020).

328. Криводубский, О.А. Двухуровневое автоматизированное управление логистической системой / О.А. Криводубский, С.М. Селякова // Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2007»: Тези доповідей – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2007. – С. 596–598.

329. Натансон, И. П. Теория функций вещественной переменной / И. П. Натансон. – М.: Наука, 1974. – 484 с.

330. Криводубский, О.А. Прогнозирование процессов биосорбции серебра / О.А. Криводубский, А.О. Новаковская // Системи обробки інформації: сб. наук. пр. Харківського університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – Вып. 2 (76). – Х., 2009. – С. 113 – 117.

331. Стрижко, Л.С. Динамическая модель процесса биосорбции серебра / Л.С. Стрижко, С.И. Лолейт, А.О. Новаковская // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия – Вып. 4 (2009). – М.: МИСиС, 2009. – С. 55-60.

332. Strizhko, L. S. A Dynamic Model of the Process of Biosorption of Silver / L. S. Strizhko, S. I. Loleit, A. O. Novakovskaya // Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2009. – Vol. 50. – No. 4. – pp. 377-382.

333. Криводубский, О.А. Проблемы экспертного оценивания решений в многоуровневых системах / О.А. Криводубский, Э.Г. Новаковская // Одиннадцатая международная научно-техническая конференция «Моделирование, идентификация, синтез систем управления», 14–21 сентября 2008: сборник

тезисов. – Донецк: Изд. Инст. ПМиМ НАН Украины, 2008. – С. 116–117.

334. Криводубский, О.А. Поведенческие особенности СППР при анализе деятельности предприятия / О.А. Криводубский, Т.В. Нескородева // Одиннадцатая международная научно-техническая конференция «Моделирование, идентификация, синтез систем управления», 14–21 сентября 2008: сборник тезисов. – Донецк: Изд. Инст. ПМиМ НАН Украины, 2008. – С. 86–87.

335. Криводубский, О.А. Математическая модель восстановления активных свойств сорбента / О.А. Криводубский, А.О. Новаковская // Информатика, кібернетика та обчислювальна техніка: сб. наук. пр. Донецького нац. технічного ун-ту. – Вип. 10 (153). – Д., 2009. – С. 251–254.

336. Криводубский, О.А. Прогнозирование процесса десорбции серебра / О.А. Криводубский, А.О. Новаковская // Радіоелектронні і комп'ютерні системи: сб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. Н.Є. Жуковського «ХАІ». – Вип. 1 (35). – Х., 2009. – С. 93–99.

337. Стрижко, Л.С. Исследование поведения серебра при переработке вторичных материалов / Л.С. Стрижко, С.И. Лолейт, А.О. Новаковская // Цветные металлы. – 2009. – №10. – С. 41-45.

338. Новаковская, А.О. Модель прогноза процессов десорбции // А.О. Новаковская // Гагаринские чтения: сб. науч. тр. 35-й Междунар. молодежной науч. конф. 7-10 апреля 2009 г. – Москва: МАТИ, 2009. – Т.1. – С. 54-55.

339. Стрижко, Л.С. Реализация управления процессами в серии сорбционных колонн / Л.С. Стрижко, С.И. Лолейт, А.О. Новаковская // Моделирование, идентификация, синтез систем управления: сб. тез. докл. Междунар. науч-тех. конф. 16-23 сентября 2009 г. – Москва-Донецк, 2009. – С. 179-180.

340. Криводубский, О.А. Математическая модель в управлении участком биосорбции серебра / О.А. Криводубский, А.О. Новаковская // Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении — Х.: ХАИ, 2009. – Т.2. – С. 10.

341. Криводубский, О.А. Задачи и критерии принятия решений при управлении предприятием / О.А. Криводубский, Э.Г. Новаковская // Двенадцатая

международная научно-техническая конференция «Моделирование, идентификация, синтез систем управления», 16–23 сентября 2009: сборник тезисов. – Донецк: Изд. Инст. ПММиМ НАН Украины, 2009. – С. 144–145.

342. Новаковская, А.О. Идентификация процессов сорбции серебра // А.О. Новаковская // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта: сб. науч. тр. Междунар. науч. конф. 18-22 мая 2009 г. – Евпатория, 2009. – Т.1. – С.96-97.

343. Салихов, З.Г. Нейросетевой подход к разработке прогнозирующих моделей в системах управления процессами биосорбции серебра [Электронный ресурс] / З.Г. Салихов, Л.С. Стрижко, А.О. Новаковская // Управление большими системами: электронное научное периодическое издание. – ИПУ РАН, 2012. – №2. – URL:<http://www.ubs.mtas.ru>.

344. Криводубский, О.А. Логико-формальная модель упорядочения слябов при планировании производства проката / О.А. Криводубский, С.А. Косилов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк, 2009. – Вип. 16(147). – С. 163–170. – ISSN 1996-1588, ISSN 1680-0044, ISSN 2074-6652, ISSN 2073-9575.

345. Криводубский, О.А. Определение временных характеристик листопрокатного процесса / О.А. Криводубский, С.А. Косилов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – Донецьк, 2010. – Вип. 11 (164). – С. 172–180. – ISSN 1996-1588.

346. Криводубский, О.А. Постановка задачи планирования листопрокатного производства как задачи оптимального управления / О.А. Криводубский, С.А. Косилов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – Донецьк, 2011. – Вип. 13. – С. 173–179. – ISSN 1996-1588.

347. Криводубский, О.А. Решение задачи оптимального планирования выполнения заказов на листопрокатном производстве / О.А. Криводубский,

С.А. Косилов // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків: НТУ "ХПІ", 2013. – № 2(976). – С. 13–21. – ISSN 2079-0023.

348. Криводубський, О.А. Формалізація технологічних обмежень при плануванні прокатного виробництва / О.А. Криводубський, С.А. Косилов // Дванадцята міжнародна науково-технічна конференція «Моделювання, ідентифікація, синтез систем управління», 16 – 23 вересня 2009: збірник тезисів. – Донецьк: Вид. Інст. ПМіМ НАН України, 2009. – С. 177 – 178.

349. Криводубський, О.А. Формалізація задачі вибору оптимальних рішень при плануванні листопрокатного виробництва / О.А. Криводубський, С.А. Косилов // Тринадцята міжнародна науково-технічна конференція «Моделювання, ідентифікація, синтез систем управління», 13 – 20 вересня 2010: Збірник тезисів. – Донецьк: Вид. Інст. ПМіМ НАН України, 2010. – С. 132 – 133.

350. Криводубський, О.А. Розробка алгоритму прийняття рішення при плануванні листопрокатного виробництва / О.А. Криводубський, С.А. Косилов // Пятнадцята міжнародна науково-технічна конференція «Моделювання, ідентифікація, синтез систем управління», 9 – 16 вересня 2012: Збірник тезисів. – Донецьк: Вид. Інст. ПМіМ НАН України, 2012. – С. 146 – 148.

351. Криводубський, О.А. Ігри Стакельберга і прийняття рішень в двохуровневих системах управління / О.А. Криводубський, А.А. Ігнатів // Науковий журнал «Придніпровський науковий вісник». – Дніпропетровськ, 1998. – № 96(163). – С. 98–106.

352. Криводубський, О.О. Розробка динамічної моделі прогнозу собівартості продукції / О.О. Криводубський, О.Н. Шушура // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця, 2000. – № 1(28). – С. 25–29.

353. Криводубський, О.А. Прийняття інтелектуальних рішень по управлінню собівартістю продукції [Текст] / О.А. Криводубський, В.П. Кулинич // Искусственный интеллект. – Донецьк, 2002. – №1. – С. 28–33.

354. Криводубский, О.А. Современные аспекты принятия решений по управлению предприятиями / О.А. Криводубский, Э.Г. Новаковская // Четырнадцатая международная научно-техническая конференция «Моделирование, идентификация, синтез систем управления», 11–18 сентября 2011: Сборник тезисов. – Донецк: Изд. Инст. ПМиМ НАН Украины, 2011. – С. 130.

355. Криводубский, О.А. Декомпозиция целей управления в многоуровневых системах [Текст] / О.А. Криводубский // Искусственный интеллект. – Донецк, 2004. – №1. – С. 204–208.

356. Криводубский, О.А. Обобщённое представление систем управления / О.А. Криводубский, Э.Г. Новаковская // Тринадцатая международная научно-техническая конференция «Моделирование, идентификация, синтез систем управления», 13–20 сентября 2010: Сборник тезисов. – Донецк: Изд. Инст. ПМиМ НАН Украины, 2010. – С. 124–125.

357. Криводубский, О.А. Синтез динамической системы управления прибылью предприятия / О.А. Криводубский, А.Н. Шушура // XXV ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Тезисы докладов Международной молодёжной научной конференции. Москва, 6–10 апреля 1999 г. – М: Изд-во «ЛАТМЭС», 1999. – Том 2. – С. 643–644. – ISSN 5-230-21205-5.

358. Криводубский, О.А. Принятие решений по управлению себестоимостью продукции при нестационарных портфелях заказов / О.А. Криводубский, А.Н. Шушура // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: Информатика, кибернетика и вычислительная техника. – Донецк: ДонНТУ. – 2002. – Вып. 39. – С. 193–200.

359. Криводубский, О.А. Принятие интеллектуальных решений по управлению себестоимостью продукции / О.А. Криводубский, А.Н. Шушура // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – Донецк, 2003. – №. 2. – С. 20–27.

360. Зори, С.А. Представление и отображение алгоритмов многоуровневых систем уравнения как образов / С.А. Зори, О.А. Криводубский // Международный

рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – Донецк, 2020. – №2(17). – С. 20–27.

361. Зори, С.А. Представление многоуровневых систем управления предприятием в виде активной нейросети / С.А. Зори, О.А. Криводубский // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – Донецк, 2020. – №3(18). – С. 19–26.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ
АКТ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

«ВЕЛДЕ»

Україна, 02099, м Київ вул. Ялтинська, 5Б
ТОВ «ВЕЛДЕ», код ЄДРПОУ 38996188, ІПН 389961826516
Тел.: (097) 075-55-55

Р/р 26008543437 у АТ «Райффайзен Банк Аваль» м.Київ, МФО 380805

АКТ

Опытно –промышленной эксплуатации

« 1^{го} » 04 2022 г.

г. Киев

Разработанная Криводубским Олегом Александровичем информационная система «Планирование мелкосерийного производства» была апробирована на базе вычислительных мощностей стандартных персональных компьютеров Lenovo 2015 года выпуска при формировании производственной программы предприятия в течении трех месяцев.

За время использования информационной системы «Планирование мелкосерийного производства» отмечено значительное улучшение экономических показателей, а также оптимизация процессов снабжения и обеспечения производственных участков.

Оценка экономической эффективности:

По данным наших специалистов оценка экономической фиктивности за 3 месяца работы алгоритма составляет около 18.000 тысяч долларов.

Оценка научной составляющей:

По заключения ведущих технических специалистов и пользователей системы «Планирование мелкосерийного производства» заложенный в алгоритме системы блок идентификации позволяет:

- Адаптировать алгоритм системы к любому аналогичному мелкосерийному производству.
- В результате испытаний подтверждена адекватность математической модели.

Изменения управляющих воздействий в процессе эксплуатации за счет используемого системой критерия оптимальности и заложенного алгоритма поиска оптимальных решений позволяет найти решение с достаточно высокой степенью точности.

В результате испытаний на практике подтверждена корректность представленного алгоритма поиска оптимальных решений информационной системы «Планирование мелкосерийного производства».

Директор



Соответствует оригиналу
Ученый секретарь Д.01.024.04
Т.В. Завадская Т.В. Завадская

Продолжение приложения А АКТ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ



03148, м. Київ, ПРОСПЕКТ ЛЕСЯ КУРБАСА, будинок 2-Б
 тел: +38 044 223 0763 info@oe-security.com
 Р/р UA183226690000026002300596679
 у банку Т86В №10026/0187 АТ "ОЦАДБАНК", МФО 322669
 код за ЄДРПОУ 42429752, ІПН 424297526570

АКТ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ.

«05» 12 2013 г.

Г. Киев

Согласно соглашения о внедрении авторской научной разработки Криводубского Олега Александровича, включающей алгоритм и программное обеспечение (далее ПО) системы управления себестоимостью внедряемых нашим предприятием инженерных решений, в работе предприятия были использованы алгоритм и ПО при прогнозе и в управлении экономическими и производственными циклами предприятия.

По истечении шести месяцев руководством предприятия и автором проведено совместное заседание с привлечением отраслевых специалистов и пользователей алгоритма и ПО.

Результаты совместной работы, опыт внедрения и эксплуатации позволили сделать следующие выводы:

1. Представленная в работе математическая модель позволяет осуществлять прогноз экономических показателей и расчет производственной программы с погрешностью не более 0,5%.

2. Формализованная в виде критерия постановка задачи позволяет получать оптимальные решения производственных заданий, которые могут быть оценены экономическим эффектом в размере около 8.000 тысяч долларов за месяц, что на показателях нашего предприятия составляет прирост экономических показателей на уровне более 10% в месяц.

3. Руководством компании принято решение о продолжении дальнейшего использования и процесса внедрения авторского алгоритма и программного обеспечения, представленного Криводубским О.А. в работе предприятия. Алгоритм и ПО будут использоваться в планировании производственной программы предприятия как задача управления себестоимостью сложных инженерных решений.

Директор

ООО «Оптимум инжиниринг»



С.И. Глуценко



Соответствует оригиналу

Ученый секретарь Д 01.024.04

Т.В. Завадская

Продолжение приложения А
СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС



ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"
283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donmtu.info@mail.ru

25.12.2020 № 29-28/16
На № _____

Диссертационный совет Д 01.024.04
при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Криводубского Олега Александровича на тему: «РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Результаты диссертационных исследований Криводубского О.А., а именно: модели прогноза себестоимости, алгоритм функционирования системы управления, динамические математические модели и численные процедуры их решения в контексте проблематики эффективного управления процессами и производствами предприятий, внедрены в учебный процесс при чтении курсов лекций по дисциплинам «Системный анализ и проектирование компьютерных информационных систем» и «Общая теория системного управления» для студентов направлений подготовки 09.03.04 «Программная инженерия» и 09.03.02 «Системы автоматизированного проектирования», что отражено в учебных программах и конспектах лекций указанных дисциплин.

Проректор по научно-педагогической работе
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
д-р техн. наук, профессор

А.Б. Бирюков

Начальник учебно-методического управления
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
канд. техн. наук, доцент

В.А. Попов

Декан факультета
компьютерных наук и технологий
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
канд. техн. наук, доцент

Д.В. Николаев

Соответствует оригиналу

Ученый секретарь Д 01.024.04

Т.В. Завадская

Продолжение приложения А

СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ В НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ РАБОТУ



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**
283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

25.12.2020 № 89-27/16

На № _____

Диссертационный совет Д 01.024.04
при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Криводубского Олега Александровича на тему: «РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИЙ», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) в научно-исследовательскую работу ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Результаты диссертационных исследований Криводубского О.А., а именно:

1. математическая модель прогноза плановых показателей мелкосерийного производства, отличающаяся функцией учёта расчётных показателей заказов на сырьевые материалы и повышающая эффективность их переработки в производстве,
 2. математические модели прогноза и алгоритм функционирования системы управления себестоимостью прокатного производства в условиях информационной и технологической трансформаций предприятий,
- а также результаты экспериментальных исследований создания и эксплуатации трёхуровневой системы управления процессом биосорбции серебра были использованы при выполнении научно-исследовательской государственной работы кафедры программной инженерии Н-2020-14 «Усовершенствование средств инженерии программного обеспечения для актуальных классов IT-приложений» в 2020 г.

Проректор по научной работе
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
д-р техн. наук, профессор



С.В. Борщевский

Начальник научно-исследовательской части
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
д-р техн. наук, профессор

К.Н. Лабинский

Декан факультета
компьютерных наук и технологий
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
канд. техн. наук, доцент



Д.В. Николаев

Соответствует оригиналу
Ученый секретарь Д 01.024.04
Т.В. Завадская