ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

На правах рукописи

Шайдуллин Ренат Анварович

Модели календарного планирования производств дискретно-непрерывного характера

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой

степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: **Шкодырев Вячеслав Петрович**

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Фролова Елена Александровна**

доктор технических наук, доцент, директор института фундаментальной подготовки и технологических инноваций, заведующий кафедрой инноватики и интегрированных систем качества, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург

Ибряева Ольга Леонидовна

доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и программирования, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский универсистет)», г. Челябинск

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург**

Защита состоится 01 октября 2026 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета ДС №У.2.3.3.52 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 28, ауд. 220а.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29, литера Б и на сайте ФГАОУ ВО «СПбПУ» www.spbstu.ru.

Автореферат разослан 05 августа 2026 года

Ученый секретарь
диссертационного совета У. 2.3.3.52
кандитат технических наук, доцент  Гебель Елена Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Введение

Актуальность. Планирование производства на предприятиях с дискретно-непрерывным характером, таких как нефтеперерабатывающий завод (НПЗ)/ нефтехимический комплекс (НХК), происходит на нескольких уровнях. Уровень текущего планирования, на котором рассчитывается производственная программа на месяц – текущий месячный план, является отправной точкой планирования. После него следует уровень оперативного планирования, когда текущий месячный план уточняют во время его выполнения для реагирования на внешние или внутренние изменения, при этом горизонт оперативного плана - от момента уточнения до конца месяца. Текущий и оперативный план отвечают на вопрос «что производить?». Уровень календарного планирования может в качестве цели выполнения иметь как текущий, так и оперативный план. Календарный план составляется с детализацией от суток до смен на неделю, декаду или месяц. Уровень расписания подразумевает детализацию календарного плана от часов до минут, а горизонт ограничивается 1-3 сутками. Календарный план и расписание отвечают на вопрос «как производить?». Так как задачи автоматизации календарного планирования и построения расписания тесно связаны, в работе мы объединим их в одну задачу автоматизации календарного планирования и расписания (задача КПР).

Эффект от внедрения моделей автоматизации календарного планирования и составления расписания заключается в повышение эффективности производства, но достигается только при высоком уровне автоматизации предприятия:

1. в моделях календарного планирования возникает необходимость учета существенно большего количество производственных параметров, чем в моделях текущего планирования;

2. подготовка данных и составление календарного плана и расписания должны осуществляться не реже одного раза в двое-трое суток, а сам процесс должен занимать не больше часа, что и определяет требования к средствам интеграции информационных систем разного класса (АСУП (MES, APS), ERP), а также моделей, лежащих в их основе.

3. корректность календарного плана выявляется в ходе последующего составления расписания и план-факт анализа, что может потребовать его пересчета на различных этапах реализации процесса.

Несмотря на наличие отдельных методов объемного и календарного планирования (MILP-оптимизация, имитационное моделирование, эвристики), на технологических производствах они применяются фрагментарно, без единой системы интеграции и методологии, а применение нескольких моделей и систем планирования приводит к проблемам их эксплуатации. Это приводит к разрыву между месячными планами и суточными/сменными заданиями, невозможности оперативной коррекции при отклонениях, и как следствие, к экономическим потерям от срыва поставок, демереджа и затоваривания, упущенной выгоды от запаса по качеству продукции, дополнительных затрат на переключение режимов работы установок. Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью создания целостной, практически реализуемой автоматизированной системы календарного планирования, обеспечивающей сквозное управление всей производственной цепочкой.

Степень разработанности научной проблемы. Исследование методов календарного планирования для дискретно-непрерывных производств находится на стыке теории управления, исследования операций и химической технологии. Сложность задачи обусловлена необходимостью одновременно учитывать непрерывные материальные потоки, дискретные переключения оборудования, логистику резервуарных парков и высокую неопределённость внешних условий. До сих пор сохраняется разрыв между академическими разработками и практикой: на реальных предприятиях планирование нередко остаётся полуручным, а тиражируемые комплексные решения отсутствуют.

Значительный вклад в решение смежных проблем внесли отечественные учёные: Э.Л. Ицкович, Ю.Е. Мауэргауз, Е.Е. Дудников, Ю.М. Цодиков, М.Х. Прилуцкий, В.Е. Костюков, Е.Н. Хоботов, А.С. Хохлов, а также зарубежные исследователи — Дж.Д. Келли, Д. Зингер, К.А. Флудас, И.Е. Гроссманн, М.Г. Иерапетриту, Н. Шах. Ими разработаны основы MILP-моделирования, методы

декомпозиции, непрерывно-временные формулировки для краткосрочного планирования.

Тем не менее, такие аспекты как интеграция оптимизационных и имитационных моделей в единый комплекс, оперативная коррекция планов по фактическим данным, учёт логистических ограничений и разработка тиражируемой методологии внедрения - изучены недостаточно. Восполнение этих пробелов составляет научную задачу данной диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является разработка модели автоматизации календарного планирования дискретно-непрерывных производств НПЗ/НХК, которая бы позволила строить календарные планы всей производственной цепочки с учетом необходимых технологических аспектов производства, оперативно выявлять и корректировать отклонения плана от факта, и, как следствие, повышать эффективность производства; разработка методологии создания и внедрения такой модели, а также создание программного продукта, реализующего данную модель.

Объектом исследования является подсистема календарного планирования автоматизированной системы управления производствами дискретно-непрерывного характера. Предметом исследования являются модели, методы и системы автоматизации и управления календарным планированием производства.

Для достижения цели требуется решение следующих задач:

- Разработать структуру модели автоматизации календарного планирования для дискретно-непрерывного технологического производства, предназначенную для автоматизации подготовки оптимальных календарных планов всей производственной цепочки с возможностью проведения план-факт анализа и оперативной коррекции плана для оперативного управления производством.
- Разработать уточненные формализованные математические модели процесса календарного планирования для дискретно-непрерывных технологических производств.
- Разработать методологию создания и внедрения модели автоматизации календарного планирования для дискретно-непрерывного технологического производства.

- Разработать программный продукт, позволяющий осуществлять автоматизированное составление и изменение календарных планов дискретно-непрерывных технологических производств.

Методы исследования. Основные результаты получены с использованием оптимизационных (частично-целочисленное и линейное математическое программирование) и имитационных методов моделирования производственных процессов, исследования операций.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация удовлетворяет п.3, п.4 и п.10 паспорта специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»:

П3. Методология, научные основы, средства и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т.д.

П4. Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами.

П12. Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая управления исполнительными механизмами в реальном времени.

П13. Методы планирования, оптимизации, отладки, сопровождения, модификации и эксплуатации функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включающие задачи управления качеством, финансами и персоналом.

П17. Разработка методов обеспечения совместимости и интеграции АСУ, АСУТП, АСУП, АСТПП и других систем и средств управления.

Научная новизна. Совокупность проведенных в диссертации теоретических и прикладных исследований позволила предложить модели, системы и методологию их внедрения и использования для решения задачи автоматизации процесса

календарного планирования производства дискретно-непрерывного характера. При этом:

- **Разработана новая интегрированная двухуровневая модель** автоматизации календарного планирования для дискретно-непрерывных технологических производств НПЗ/НХК, **отличающаяся** от известных подходов возможностью сквозного моделирования всей производственной цепочки, **за счет** комплексного применения оптимизационного (MILP) и имитационного моделирования с эвристическим методом, **что позволяет** за приемлемое время находить допустимые и оптимальные планы производства, проводить «что-если» анализ, оперативно реагировать на отклонения и корректировать их; **и приводит** к повышению эффективности производства за счет снижения запаса по качеству, остатков на складах, повышению производительности труда (эффект оценивается в 43-174 млн. руб. в год для НПЗ).
- **Разработаны формализованные математические MILP- и имитационные модели** автоматизации календарного планирования для дискретно-непрерывных технологических производств НПЗ/НХК, **отличающиеся** способностью моделировать производство с высокой точностью за счет наличия ограничений для установок с задержкой материала и детальным описанием резервуарного парка и логистики для MILP-части, а также и событийным моделированием с решающими правилами для ручной корректировки в имитационной части, **что позволяет** решать задачи размерностью 43 тыс. ограничений и 20 тыс. переменных (из них 1,8 тыс. целочисленных) за минуты, **что приводит** к сокращению времени построения расписания (оценка – в 4 раза) и повышению точности планирования.
- **Разработана новая методология** создания и внедрения моделей автоматизации календарного планирования, **отличающаяся** учетом наличия нескольких моделей планирования и комплексным подходом к процессу внедрения, **состоящим в** одновременном выполнении требований к уровню агрегирования, способу актуализации, способу адаптации пользователей,

вложенности планов и план-факт анализу, **что позволяет** обеспечить эффективное внедрение **и приводит** к успешному использованию моделей в промышленной эксплуатации.

- **Разработана и применена на практике программная реализация** комплекса моделей автоматизации календарного планирования, ядром которого является система интеграции, **отличающаяся** способностью определять достоверные значения параметров планирования при наличии противоречивых данных разных источников, **за счет** разработанного алгоритма и LP-модели преобразования данных, **что позволяет** осуществлять автоматизированный оперативный обмен данными между моделями планирования и внешними системами, а также автоматизировать процесс подготовки планов, **что приводит** сокращению трудозатрат на подготовку календарных планов (оценка в 4,5 раза).

Защищаемые положения.

- **Существующие методы календарного планирования не обеспечивают моделирования** всей производственной цепочки дискретно-непрерывного технологического процесса НПЗ/НХК, при этом отсутствие учёта логистических ограничений, высокой трудоёмкости настройки и интерпретации решений, высокой трудоемкости по сбору и подготовке данных в жёстких временных рамках, несогласованности моделей разных уровней и сложности оперативного план-факт анализа делает невозможным их эффективную эксплуатацию, **что обосновывает** необходимость разработки интегрированной двухуровневой модели и методологии её внедрения.
- **Предложенная интегрированная двухуровневая модель автоматизации** календарного планирования, базирующаяся на формализованных MILP- и имитационных моделях с учётом установок с задержкой материала, резервуарной логистики и событийного моделирования с решающими правилами **позволяет** строить календарные планы всей производственной цепочки, решать задачи большой размерности за приемлемое время,

проводить «что-если» анализ, оперативно корректировать план при отклонениях, что подтверждено расчетами на реальных данных НПЗ.

- **Разработанная методология** создания и внедрения моделей автоматизации календарного планирования, основанная на комплексном учёте агрегирования, актуализации, адаптации пользователей, вложенности планов и план-факт анализа, **обеспечивает** эффективное внедрение и успешное использование моделей в промышленной эксплуатации.
- **Разработанная и применённая на практике программная реализация** комплекса моделей автоматизации календарного планирования, ядром которой является алгоритм и LP-модель преобразования противоречивых данных, **обеспечивает** автоматизированное составление календарного плана и оперативный обмен данными между моделями и внешними системами, **что приводит** к сокращению трудозатрат на подготовку календарных планов в 4,5 раза.

Практическая ценность. В диссертационной работе:

- Предложен подход к решению задачи автоматизации календарного планирования производства. Данный подход был реализован в подсистеме календарного планирования автоматизированной системы управления производствами дискретно-непрерывного характера НПЗ/НХК в виде Комплекса КПР с разработанными моделями автоматизации календарного планирования, а также программным обеспечением интеграции моделей планирования и источников данных.
- Разработана методология внедрения подсистемы календарного планирования автоматизированной системы управления производствами дискретно-непрерывного характера НПЗ/НХК.

Реализация результатов работы. Работоспособность разработанных моделей, методологий интеграции и внедрения моделей для решения задачи КПР была проверена на тестовых и реальных моделях нефтеперерабатывающих заводов. Результаты проверки показали эффективность использования моделей и предложенных методологий за счет составления оптимальных календарных планов

и расписаний, уменьшения трудоемкости и сокращения времени на подготовку данных для их составления и проведения план-факт анализа.

Результаты исследований, проведенных в диссертации, внедрены в компании-разработчике программного обеспечения АСУП ООО «Индасофт», протестированы на российском нефтеперерабатывающем заводе компанией ООО «Газпромнефть-Автоматизация» для решения задачи автоматизации календарного планирования производства. Внедрение моделей и Комплекса КПР дало возможность повысить эффективность производства.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 52, 53, 54, 55, 56 научных конференциях МФТИ (Москва 2009, 2010, 2011, 2012, 2013); научных международных конференциях «Управление развитием крупномасштабных систем – MLSD 2012 и 2013» (Москва 2012, 2013); всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (Уфа 2013).

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 15 печатных работ, в том числе 6 из них в периодических изданиях, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК. Кроме того, 2 печатные работы находятся на стадии «в печати», одна из которых в журнале из перечня ВАК.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав и заключения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы, выбор цели, объекта и направления исследований, дается общая характеристика диссертационной работы. Приводятся структура и общее содержание работы по главам.

В главе I приводится особенности технологических производств дискретно-непрерывного характера, в частности, нефтепереработки. Рассматривается постановка задачи автоматизации календарного планирования, а также приводятся существующие подходы к ее решению.

Особенность производства дискретно-непрерывного характера

Производство в общем виде можно представить потоковой схемой (Рис. 1).

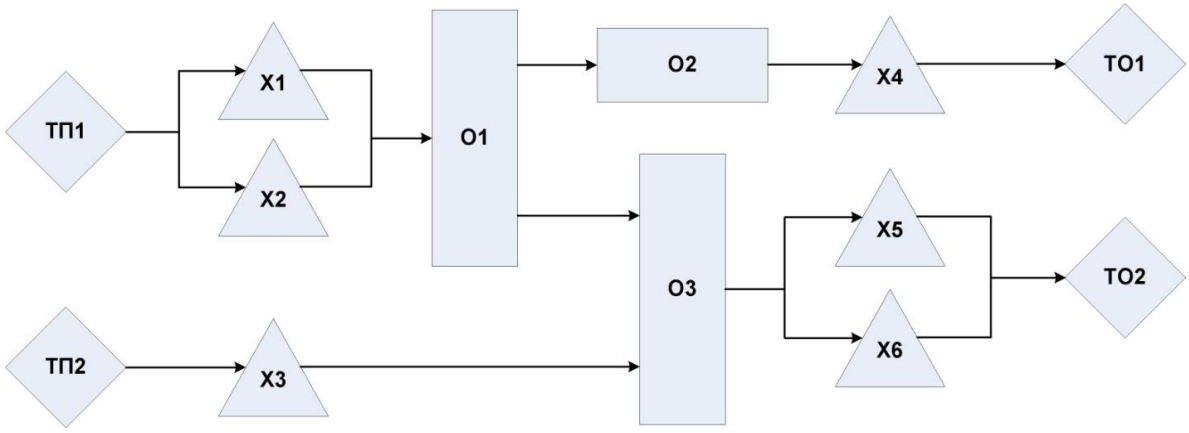


Рис. 1 Потоковая схема технологического производства

На схеме ромбом обозначены точки поступления сырья (ТП1 и ТП2) и точки выхода готовой продукции из рассматриваемого участка производства (ТО1 и ТО2). Сырьем и продукцией может быть как жидкий материал (нефть, нефтепродукты), так и непрерывный поток деталей. Треугольником обозначены места хранения материала (X1 - X6): склады, резервуары или сгруппированные запасы. Прямоугольники – узлы обработки материала (O1 - O3): разделение материала на его составляющие или в определенной пропорции (O1), соединение нескольких видов материалов в определенной пропорции (O3) или преобразование одного типа материала в другой (O2). Стрелками обозначены направления потоков. Материал может проходить как непрерывно, так и задерживаться на определенное время в узлах его хранения и обработки. Например, с момента поступления материала на узел обработки O1 – O2, может потребоваться некоторое время перед выходом его из этого узла. Схема может иметь замкнутые пути, например, когда материал с выхода узла обработки направляется на его же вход (циркуляция), или на вход узла, находящегося перед узлом-источником, например из O3 в O2, из X5 в O2. Дискретно-непрерывным характером обладают следующие производства: металлургические, пищевые, целлюлозно-бумажные, а также производство стройматериалов. Хотя нефтепереработку и нефтехимию традиционно относят к непрерывным производствам, они обладают дискретными процессами, наличие которых усложняет применение для них существующих методов планирования. Поэтому в данной работе сделан фокус именно на эти типы производств.

Постановка задачи автоматизации календарного планирования

Задача автоматизации календарного планирования состоит в следующем (Рис. 2): имея текущий или оперативный объемный план производства на месяц,

построить календарный план работы производства с периодом планирования 1 день или 1 смена. Под календарным планом производства подразумевается объемный план производства и перемещения материала между узлами обработки, его хранения, поступления и отгрузки, разбитый по суткам или сменам. При этом должны учитываться технологические ограничения на возможности переработки и хранения материалов.

Данные, необходимые для календарного планирования, обновляются с разной периодичностью. Структура производства и технологические ограничения учитываются при создании моделей планирования, а в процессе их использования могут корректироваться: добавляться новые элементы или ограничения. Плановые данные обновляются раз в месяц или неделю, а фактические показатели – раз в день, смену или час.

Календарный план производства регулярно пересматривается во время его исполнения, при возникновении изменений исходных данных - плановых и фактических. Подзадачей календарного планирования можно назвать отслеживание изменений производственной ситуации и прогноз ее развития для предотвращения нежелательных и аварийных инцидентов.

Задача автоматизации построения расписания заключается в поиске плана работы производства, с дискретизацией по времени в 1 час или меньше, на основе календарного или объемного плана производства. При этом так же должны учитываться технологические ограничения на возможности переработки и хранения продукции. Такой план называется расписанием.

Подходы к решению задачи автоматизации календарного планирования

Задача автоматизации планирования производства на предприятиях разбивается на части. В настоящее время имеется ряд методов, с разным успехом применяемых для решения задачи автоматизации календарного планирования для отдельных частей производства.

Однако решить задачу в целом для всего производства с требуемой детализацией, для календарного планирования – в разрезе суток/смен, для построения расписаний – в разрезе часов, не представляется возможным.



Рис. 2 Данные для автоматизации календарного планирования

Для методов оптимизации трудность состоит в большой математической размерности. Методы имитационного моделирования требуют большого объема ручного управления для нахождения решения. Эвристические методы не гарантируют достижения оптимального решения. Таким образом существующие методики имеют следующие ограничения:

- LP модели текущего планирования (PIMS, RPMS) не учитывают логистику резервуарных парков, эстакад и дискретные операции;
- MILP модели с непрерывным и дискретным временем: для всего НПЗ размерность становится практически неразрешимой и необходимы сильные упрощающие допущения.
- Имитационное моделирование (Aspen, Princeps…): субоптимальность на всём горизонте, большой объём ручной настройки сценариев.
- Эвристики и метаэвристики (генетические алгоритмы, муравьиные колонии, решающие правила): субоптимальность, слабо приспособлены для учёта нелинейных качественных ограничений смешения.

- Ручное планирование в Excel: высокая трудоёмкость, отсутствие оптимальности, невозможность оперативного пересчёта.

Процесс декомпозиции на подзадачи может производиться не только в разрезе частей производства, но и в разрезе времени (горизонт планирования, дискретизация по времени) и детальности частей производства (учет части технологических ограничений).

При применении отдельных методов или моделей для решения задачи КПР всего производства возникает следующий набор проблем.

1. Методы последовательного линейного программирования (SLP), применяемые в системах моделирования типа PIMS, компании AspenTech, RPMS компании Honeywell, Plan компании ООО «Наука», и СМПР (Система моделирования производства нефтепереработки и нефтехимии) компании ООО «Центр цифровых технологий», отлично решают задачу месячного объемного планирования нефтеперерабатывающего производства с учетом качественных показателей потоков, однако не применимы для задачи КПР, так как модели этих систем не учитывают логистические ограничения (резервуарные парки, эстакады отгрузки). А значит для учета этих ограничений, необходимо использовать другие модели и методы решения.

2. При использовании нескольких моделей для различных частей производства или различной детализации по технологической схеме производства, необходимо учитывать взаимосвязь этих моделей, а значит систем, обеспечивающих их построение, наполнение данными, решение, анализ и вывод результатов. Нарушение взаимосвязи моделей становится причиной ошибочных расчетов: условия работы, а также само производство может изменяться, а значит должны изменяться и модели этого производства. Если изменения моделей происходят не согласованно, решение задачи КПР перестает быть адекватным.

3. Создать и передать календарный план или расписание необходимо в отведенный регламентом планирования срок (несколько часов). А значит время на подготовку и верификацию исходных данных, расчет и анализ полученных результатов ограничено.

4. При использовании нескольких моделей с различной детализацией по времени возникает задача соотнесения получаемых результатов для вложенных отрезков времени. Решение модели месячного планирования, не содержит указания, как, и в какой период реализовать месячные задания. Так же, как и календарный план с суточным периодом планирования не указывает, как должно функционировать производство внутри суток. При этом решение модели месячного планирования содержит исходные данные для моделей автоматизации календарного планирования, а решение моделей автоматизации календарного планирования содержит задания для моделей построения расписаний.

5. Фактическая работа производства должна соответствовать произведенным с помощью моделей планирования расчетам, т.е. план должен быть синхронен факту, что проверяется их сравнением. При использовании нескольких моделей, осуществляющих решение задачи КПР для различных участков производства или различной детализации, сравнение результатов их расчета с фактом остается актуальным, но усложняется большим количеством сравниваемых параметров и ограниченным временем, необходимым для проведения план-факт анализа и принятия решения об изменении плана.

В главе II приводятся разработанные в ходе работы математические формулировки оптимизационных и имитационных моделей автоматизации календарного планирования, а также решающих правил. Также глава содержит постановку близкой задачи выбора оборудования смешения нефтепродуктов – которую можно решить с помощью разработанной оптимизационной модели. Приводится тестовый пример такого расчета.

По своему назначению модели автоматизации календарного планирования должны указывать времена начала и окончания технологических операций, перемещений материалов между узлами производства и хранения. К основным ограничениям моделей можно отнести ограничения производительности точек обработки материала, ограничение на объем точек его хранения и ограничения на выполнения текущего плана производства.

В **оптимизационной модели** вводятся следующие элементы:

- установки непрерывной работы / установки с задержкой материала;

- места хранения (резервуары);
- периметры (точки поступления и отгрузки нефтепродуктов);
- порты элементов модели (точки поступления и выхода материала);
- соединения между элементами (портами) для перемещения материала;

Время в модели дискретно, то есть горизонт планирования разбивается на NT равных периодов планирования (час, смена, день).

Пусть в моделируемом участке NU установок. Каждая установка может работать в одном из NPLu режимов (u = 1..NU). Режиму соответствует набор ограничений установки (производительность, коэффициенты выхода нефтепродуктов, рецептура смешения, количество часов работы и др). В один период времени возможна работа установки только в одном режиме, поэтому вводится следующее ограничение.

$$\sum_{pl=1}^{NPL_u}\sum_{tt=0}^{\tau_{u,pl}-1} yu_{u,pl,t-tt} \le 1, \qquad \forall t-tt \ge 1,\ u=1..NU \text{ и } t=1..NT, \qquad (1)$$

где $yu_{u,pl,t}$ - целочисленная переменная, равная 1, если установка u начинает работать в режиме pl в период времени t, и равная 0 иначе; τu,pl – время работы установки u в режиме pl; tt – вспомогательная переменная.

Следующий набор ограничений определяет переменные, связанные с временем работы установки.

$$y_{u,pl,t} = \sum_{tt=0}^{\tau_{u,pl}-1} yu_{u,pl,t-tt} \qquad \forall t-tt \ge 1,\ pl=1..NPL_u,\ u=1..NU \text{ и } t=1..NT, \qquad (2)$$

$$yw_{u,pl,t} = \sum_{tt=1}^{\tau_{u,pl}-2} yu_{u,pl,t-tt} \qquad \forall t-tt \ge 1,\ pl=1..NPL_u,\ u=1..NU \text{ и } t=1..NT, \qquad (3)$$

$$yd_{u,pl,t} = yu_{u,pl,t-\tau_{pl}+1} \qquad \forall pl=1..NPL_u,\ u=1..NU \text{ и } t=1..NT, \qquad (4)$$

где yu,pl,t – целочисленная переменная, равная 1, если установка u работает в режиме pl в период времени t и 0 иначе; ywu,pl,t – целочисленная переменная, равная 1, если установка u простаивает в режиме pl в период времени t (то есть происходит задержка материала) и 0 иначе; ydu,pl,t – целочисленная переменная, равная 1, если установка u заканчивает работу в режиме pl в период времени t и 0

иначе; так же эта переменная указывает период времени, когда материал покидает установку.

Следующее уравнение обеспечивает, чтобы количество материала, обрабатываемое в любой момент времени t, не было больше, чем производительность установки.

$$XH_{u,pl}^{\min} \cdot y_{u,pl,t} \le xh_{u,pl,t} \le XH_{u,pl}^{\max} \cdot y_{u,pl,t} \qquad \forall pl = 1..NPL_u,\ u = 1..NU \text{ и } t = 1..NT, \quad (5)$$

В приведенном выше уравнении xhu,pl,t – переменная, отвечающая за количество материала, которое содержит установка u, работая в режиме pl, в период времени t, а $XH_{u,pl}^{\min}$ и $XH_{u,pl}^{\max}$ – минимальная и максимальная производительность установки u в режиме pl.

Следующие ограничения обеспечивают соблюдение материального баланса установки.

$$\sum_{tt=0}^{\tau_{u,pl}-1} \sum_{j=1}^{NJ_{u,pl}} xf_{u,j,t+tt} - \sum_{tt=0}^{\tau_{u,pl}-1} \sum_{i=1}^{NI_{u,pl}} xf_{u,i,t+tt} \le (1 - yu_{u,pl,t}) \cdot XVY_{u,pl,t}^{sum,\max} \cdot XH_{pl}^{\max}$$

$$\forall pl = 1..NPL_u, u = 1..NU, \text{ и } t = 1..NT, \quad (6)$$

$$\sum_{tt=0}^{\tau_{u,pl}-1} \sum_{j=1}^{NJ_{u,pl}} xf_{u,j,t+tt} - \sum_{tt=0}^{\tau_{u,pl}-1} \sum_{i=1}^{NI_{u,pl}} xf_{u,i,t+tt} \ge -(1 - yu_{u,pl,t}) \cdot XVY_{u,pl,t}^{sum,\max} \cdot XH_{pl}^{\max}$$

$$\forall pl = 1..NPL_u, u = 1..NU, \text{ и } t = 1..NT, \quad (7)$$

где максимальная сумма коэффициентов $XVY_{u,pl,t}^{sum,\max}$ вычисляется следующим образом.

$$XVY_{u,pl,t}^{sum,\max} = \max\left(\sum_{i=1}^{NI_{u,pl}} XVY_{u,i,t}^{\max}, \sum_{j=1}^{NJ_{u,pl}} XVY_{u,j,t}^{\max} \right),\ \forall pl = 1..NPL_u, u = 1..NU, \text{ и } t = 1..NT, \quad (8)$$

Пусть в моделируемом участке находится NP резервуаров. Следующее уравнение представляет собой материальный баланс для резервуаров.

$$zh_{p,t} = zh_{p,t-1} + zfi_{p,\mathrm{t}} - zfj_{p,t}, \qquad \forall p = 1..NP \text{ и } t = 2..NT, \quad (9)$$

где zhp,t – переменная, отвечающая за количество материала, которое содержит резервуар p, в период времени t, zfi_p – поток, поступающий в резервуар p через входящий порт за период времени t, zfj_p – поток, покидающий резервуар p через исходящий порт за период времени t.

Резервуары, как и установки, могут иметь несколько режимов работы (NPKp). В любой момент времени в резервуаре может храниться только один тип материала, поэтому вводится следующее ограничение на режимы.

$$\sum_{pk=1}^{NPK_p} z_{p,pk,t} = 1, \qquad \forall p = 1..NP \text{ и } t = 1..NT, \qquad (10)$$

где zp,pl,t – целочисленная переменная, равная 1, если резервуар p работает в режиме pk в момент времени t, иначе 0.

Также вводится целочисленная переменная $y^{FD}_{p,pk,t}$, которая равна 0, если резервуар p, находясь в режиме pk, заполняется в момент времени t и 1, если опустошается. Тогда ограничения, описывающие заполнение и опорожнение, выглядят следующим образом.

$$zh_{p,t} + \sum_{pk=1}^{NPK}(-XH^{FTF}_{p,pk} \cdot z_{p,pk,t} + XH^{\max}_{p,pk} \cdot z_{p,pk,t} - XH^{\max}_{p,pk} \cdot (y^{FD}_{p,pk,t} - y^{FD}_{p,pk,t-1})) \geq 0,$$

$$\forall p = 1..NP, \text{ и } t = 2..NT, \qquad (11)$$

$$zh_{p,t} + \sum_{pk=1}^{NPK}(XH^{DTF}_{p,pk} \cdot z_{p,pk,t} + XH^{\max}_{p,pk} \cdot z_{p,pk,t} - XH^{\max}_{p,pk} \cdot (y^{FD}_{p,pk,t-1} - y^{FD}_{p,pk,t})) \geq 0,$$

$$\forall p = 1..NP, \text{ и } t = 2..NT, \qquad (12)$$

Пусть имеется NE периметров входа и NQ периметров выхода материала в модель. Потоки портов периметра обуславливаются заданными заявками на поставку материалов для входного периметра и на отгрузку материалов выходного.

$$ef_{e,j,t} = a_{e,j,t}, \qquad \forall t = 1..NT,\ j = 1..NEJ_e \text{ и } e = 1..NE, \qquad (13)$$

$$qf_{q,i,t} = b_{q,i,t}, \qquad \forall t = 1..NT,\ i = 1..NQI_q \text{ и } q = 1..NQ, \qquad (14)$$

где $ef_{e,j,t}$ - переменная, показывающая количество материала, проходящего через исходящий порт j периметра входа e в момент времени t, $a_{e,j,t}$ - заявка на поставку материала для этого порта, $qf_{q,i,t}$ - переменная, показывающая количество материала, проходящего через входящий порт i периметра выхода q в момент времени t, $b_{q,i,t}$ - заявка на отгрузку.

Элементы модели соединены между собой посредством портов. По этим соединениям материал перемещается, начиная от входного периметра, проходя резервуары и установки, и, удовлетворив заявкам на отгрузку, покидает

моделируемый участок через периметры выхода. Для установок это обеспечивается следующим уравнением.

$$ef_{e,j,t} = xf_{u,i,t}, \qquad \forall t = 1..NT,\ j \in EJ_{e,u},\ e \in E_{xf},\ i \in I_{u,e}\ u \in U_{ef} \tag{15}$$

Уравнения для соединений между остальными элементами модели аналогичны и здесь не приводятся.

Пусть в задаче требуется минимизировать переключение режимов работы установок и резервуаров. Введем переменные, равные общему количеству переключений режимов работы всех установок su и резервуаров sp.

$$su = \sum_{t=1}^{NT}\sum_{u=1}^{NU}\sum_{pl=1}^{NPL_u} y_{u,pl,t}, \quad sp = \sum_{t=1}^{NT}\sum_{p=1}^{Np}\sum_{pk=1}^{NPK_p} z_{p,pk,t} \tag{16}$$

Каждому уравнению модели, отвечающему за определенное ограничение, добавляется штрафная переменная, которая равна нулю в случае, если уравнение выполняется точно, и больше нуля, если ограничение нарушается. Обозначим сумму всех штрафных переменных pn. Тогда целевая функция модели будет выглядеть следующим образом.

$$J = \min(\alpha \cdot su + \beta \cdot sp + \gamma \cdot pn), \tag{17}$$

где $\alpha, \beta\ u\ \gamma$ – весовые коэффициенты при соответствующих переменных. Варьируя эти значения, можно расставить приоритеты оптимизации всех доступных в модели переменных. Стоит отметить, что весовой коэффициент при сумме штрафных переменных должен быть на несколько порядков больше, чем другие коэффициенты для того, чтобы получать адекватные решения.

Расчеты модели (1)-(17) сводятся к решению задачи линейного программирования с частью целочисленных переменных. В результате расчета данной модели определяются потоки между установками, запасы резервуаров, а также значения всех целочисленных переменных, по которым определяется тип выполняемого на данном промежутке времени режима работы установки, тем самым – строится календарный план или расписание.

Имитационная модель, разработанная в ходе данной работы, представляет собой совокупность переменных, параметров и функциональных зависимостей между ними, предназначенных для повторения поведения моделируемой системы. Имитационная модель позволяет по начальным значениям переменных и заданным

параметрам получить состояние переменных в произвольные моменты времени. В общем виде имитационную модель можно описать следующем уравнением:

$$x_{t+1} = f(x_t, u_t, p_t)$$

где x – вычисляемые переменные модели, u – управляющие переменные модели, p – параметры модели, f – функциональные зависимости, t – период времени. Под переменными модели подразумеваются величины, при изменении которых система изменяет свое состояние. Параметры модели – это фиксированные значения или результаты расчета модели верхнего уровня. Например, максимальный объем склада «10 тыс. тонн» - фиксированный параметр, или план отгрузки продукции «50 тыс. тонн в месяц» - вычисляемый параметр, который может быть определен в модели текущего планирования.

Имитационная модель производства характеризуется технологическими особенностями этого производства. Переменными такой имитационной модели обычно являются производственные операции, например, приготовление определенного продукта или налив резервуара, а с помощью параметров задаются ограничения задачи КПР, такие как производительность установок и объем резервуаров. Искомым состоянием модели является набор значений переменных, который в каждый момент времени не нарушает заданные ограничения.

С помощью имитационной модели осуществляется автоматизированный план-факт анализ производственной ситуации, необходимый для принятия решения об изменении плана, в соответствии с принципом асинхронности. На основе фактических данных, имитационная модель автоматизации календарного планирования строит прогноз развития производственной ситуации и указывает на нарушения технологических или коммерческих ограничений в будущем.

Для повышения эффективности применения имитационной модели автоматизации календарного планирования, совместно с ней предлагается использовать разработанный в ходе данной работы **эвристический метод** нахождения календарного плана и расписания, основанный на применении решающих правил. Правила применяются к управляющим переменным модели и зависят от значения ее параметров. Решающие правила позволяют

автоматизировать действия пользователя с моделью, имитируя его управленческие решения, однако они не гарантируют получение допустимого решения.

Представленные оптимизационная и имитационная модели автоматизации календарного планирования составляют **интегрированную двухуровневую модель** автоматизации календарного планирования для дискретно-непрерывного производственного процесса (Рис. 3), и легли в основу разработанных в ходе данной работы коммерческих программных продуктов.

Кроме того, в главе 2 приводятся примеры технологических производств, на которых были апробированы разработанные модели автоматизации календарного планирования, а также описания решения близкой задачи – задачи выбора оборудования производственного цеха, для решения которой также используется разработанная оптимизационная модель.

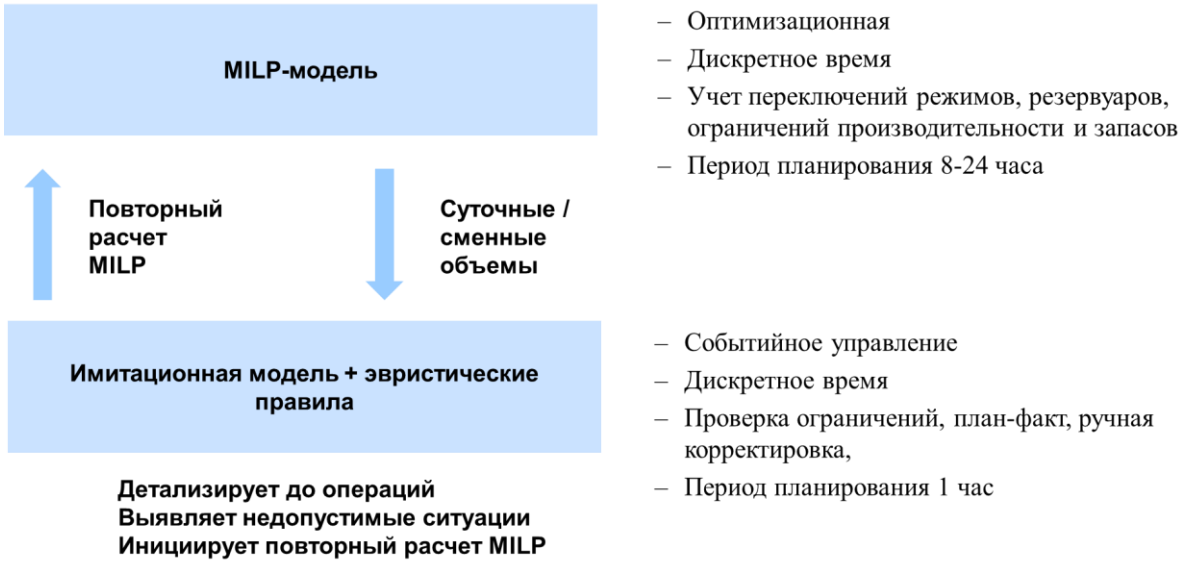


Рис. 3 Интегрированная двухуровневая модель автоматизации календарного планирования

В **главе III** вводятся принципы, которым должны удовлетворять модели автоматизации планирования для успешного их применения в задачах автоматизации календарного планирования:

1. Агрегирование модели. Модель планирования описывает технологический объект через его элементы (установки, резервуары и т.д.) и их параметры. Уровень детализации необходимо выбирать так, чтобы с одной стороны обеспечить адекватность решения, а с другой - возможность расчёта существующими вычислительными методами.

2. Актуализация модели. Это приведение модели в соответствие с текущей производственной обстановкой: элементы и параметры обновляются редко, а исходные данные - часто. Существуют ручной, автоматизированный и автоматический способы актуализации, выбор которых зависит от периодичности расчётов и объёма данных. Отдельной задачей является актуализация параметров нелинейных законов смешения нефтепродуктов, для этого может быть использована методика статистического анализа разностей показаний поточного анализатора и лабораторных измерений.

3. Адаптация пользователя. Успех внедрения системы напрямую зависит от пользователей: формальное обучение даёт базовые навыки, но без углублённой подготовки система воспринимается как «чёрный ящик». Необходимо учитывать деградацию знаний и текучку кадров, а также поддерживать актуальность обучающих материалов.

4. Аддитивность планов. Планирование ведётся на нескольких уровнях, и результаты одних моделей служат входными данными для других с обратной связью. Регламент планирования должен обеспечивать соответствие между планами разных уровней и замкнутый контур управления.

5. Принцип асинхронности. Планирование является корректирующим процессом: система должна автоматически выявлять отклонения факта от плана, анализировать их и выдавать рекомендации. Это требование связывает сбор фактических данных, уровень детализации моделей и способы актуализации.

Методология внедрения моделей автоматизации планирования заключается в одновременном соблюдении всех пяти принципов: агрегирование задаёт разрешающую способность, актуализация - своевременность обновления, адаптация пользователя - приживаемость системы, аддитивность - согласованность уровней, асинхронность - реакцию на отклонения. Только их комплексный учёт позволяет создать работоспособную и эффективную систему календарного планирования для дискретно-непрерывных производств.

В главе IV описывается разработанная в ходе работы подсистема календарного планирования автоматизированной системы управления производствами дискретно-непрерывного характера в виде Комплекса КПР (Рис. 4), ядром которой

является разработанная система интеграции моделей планирования, информационных систем и внешних источников данных. Описываются методы интеграции и анализируются существующие подходы. Предлагается новый подход к интеграции в виде единой структурно-потоковой модели производства, адаптеров источников данных и моделей, и их взаимодействия. Приводится разработанные алгоритм интеграции и математическая формулировка модели преобразования данных внешних источников данных и моделей, входящих в Комплекс КПР.

Для решения задачи автоматизации календарного планирования в работе предлагается использовать Комплекс КПР, в который входят следующие информационные системы:

- Система текущего планирования;
- Модель оперативного планирования производства
- Модель оптимизации смешения нефтепродуктов;
- Оптимизационная модель автоматизации календарного планирования;
- Имитационная модель автоматизации календарного планирования;
- Система интеграции моделей, систем планирования и внешних источников данных.

Под интеграцией подразумевается взаимодействие моделей между собой и с внешними информационными системами, при котором осуществляется обмен данными, перевод данных из терминов одной модели или системы в термины другой модели, а также преобразование масштаба времени данных. В силу того, что решение задачи КПР производится на регулярной основе и требует ввода достаточно большого объёма данных, необходима автоматизация такого взаимодействия.

Для этого необходима актуальная и полная структурная схема предприятия (Рис. 1), достаточная для построения календарного плана и расписания, в то время как в отдельных моделях и системах, описанных выше, хранятся те представления структурной схемы, которые необходимы для целей каждой отдельной модели или системы.

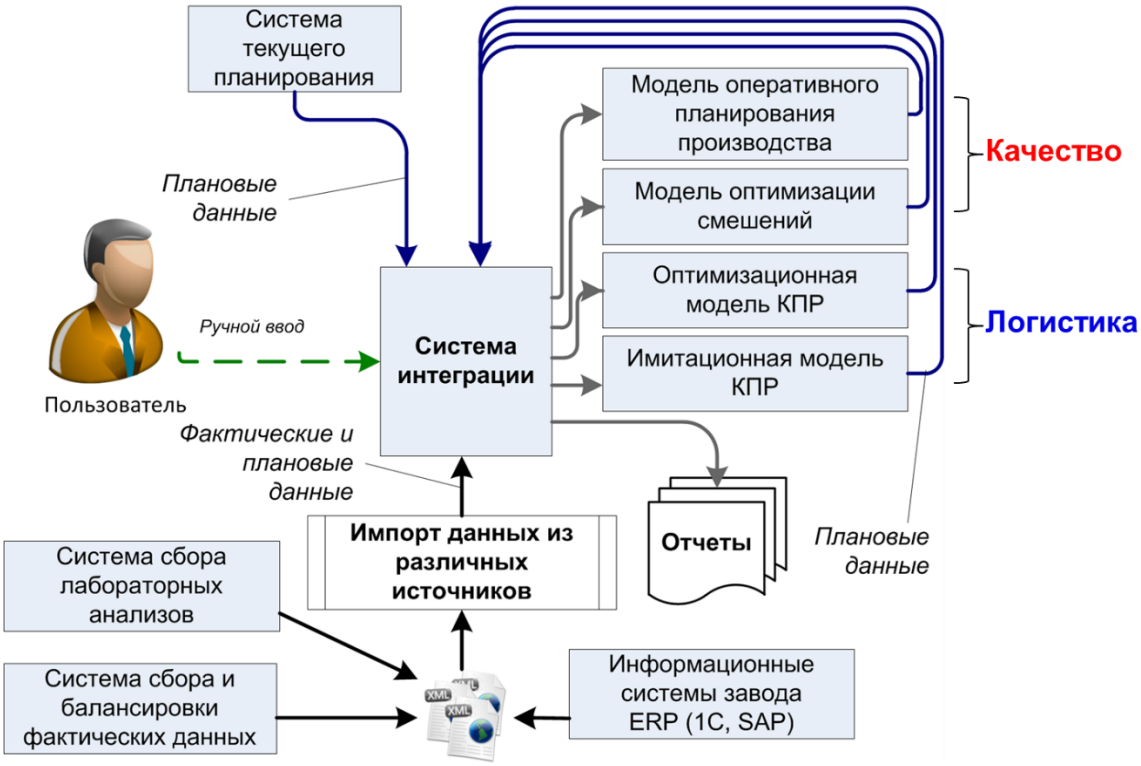


Рис. 4 Состав Комплекса КПР и потоки данных

При этом различные источники данных используют различные структуры, описывающие модель предприятия, и различные уровни детализации интервалов времени. Общее в этих данных то, что они описывают одну и ту же потоковую схему предприятия — набор узлов обработки, которые могут передавать друг другу различные материалы, а также находится в различных состояниях – режимах работы.

Модели отличаются друг от друга различным уровнем агрегирования: так, несколько узлов обработки материала в одной модели может представляться в другой модели в виде одного узла, группа резервуаров в одной модели может рассматриваться совместно, в то время как в другой модели эти резервуары учитываются по отдельности. Кроме того, используются различные уровни агрегирования материальных потоков – продукт одной модели может быть представлен несколькими продуктами в другой. При этом невозможно выделить самую детальную модель – модель может быть более детальной в одной части и менее детальной в другой. Кроме того, нельзя утверждать, что каждая из моделей полна. Допустима ситуация, когда одна из моделей содержит данные, которые не имеют никакого соответствия в другой модели. По принципу аддитивности

необходимо учитывать перечисленные выше особенности моделей при их интеграции.

Система интеграции определяет набор словарей, группировок и структурных схем, с помощью которых возможно осуществлять взаимодействие моделей и систем.

Алгоритм интеграции данных выглядит следующим образом (Рис. 5). На первом шаге в автоматизированном режиме происходит загрузка данных. Каждый источник данных определяется структурно-потоковой схемой, при этом определена глобальная структурно-потоковая схема, соответствующая актуальной и полной структурной схеме всего предприятия. На втором шаге все загруженные данные приводятся в термины глобальной схемы. Это происходит с помощью заданных словарей и группировок. На третьем шаге осуществляется объединение данных и происходит расчет потоков, режимов и остатков в резервуарах.

После объединения данные переводятся в термины той модели, выгрузку данных для которой предполагалось осуществить. Так как определены группировки и словари этой модели, перевод в нее является обратным действием шага 2. На пятом шаге осуществляется выгрузка данных в систему планирования, содержащую модель, для которой необходимы были данные.

Для осуществления расчета объединенных данных на шаге 3 сначала решается задача

$$\{D^{k}_{t_1 t_2 r}\} \rightarrow \{D^{G}_{t_1 t_2 r}\},$$

где, r – ребро многомерного графа структурно-потоковой схемы с узлами {начальный узел схемы, начальный режим работы узла схемы, конечный узел схемы, конечный режим работы узла схемы, материал}, $D^{k}_{t_1 t_2 r}$ – измерение потока по ребру r структурно-потоковой схемы k за период времени с t_1 по t_2. $D^{G}_{t_1 t_2 r}$ – измерение потока по ребру r глобальной структурно-потоковой схемы за период времени с t_1 по t_2.

То есть по набору измерений, заданных на ребрах схем источников данных (на Рис. 5 – схемы 1 - 3), и определенных временных сетках этих источников вычислить измерения, заданные на ребрах глобальной схемы предприятия (на Рис. 5 – схема 0) с самым детальным разбиением по времени.

После этого производится расчет измерений на ребрах схемы модели-назначения (на Рис. 5 – схема 4) с необходимым для нее разбиением по времени:

$$\{D^G_{t_1 t_2 r}\} \rightarrow \{D^k_{t_1 t_2 r}\}$$



Рис. 5 Алгоритм работы системы интеграции при подготовке данных

Для решения задачи объединения данных на шаге 3 используется модель линейного программирования, целевая функция которой минимизирует значения измерений глобальной структурно-потоковой схемы для однозначности получаемого решения при использовании различных противоречивых измерений.

В главе V приводится полученный в ходе данной работы опыт внедрения подсистемы календарного планирования автоматизированной системы управления производствами дискретно-непрерывного характера на российском нефтеперерабатывающем заводе. Приводятся модели и результаты вычислений.

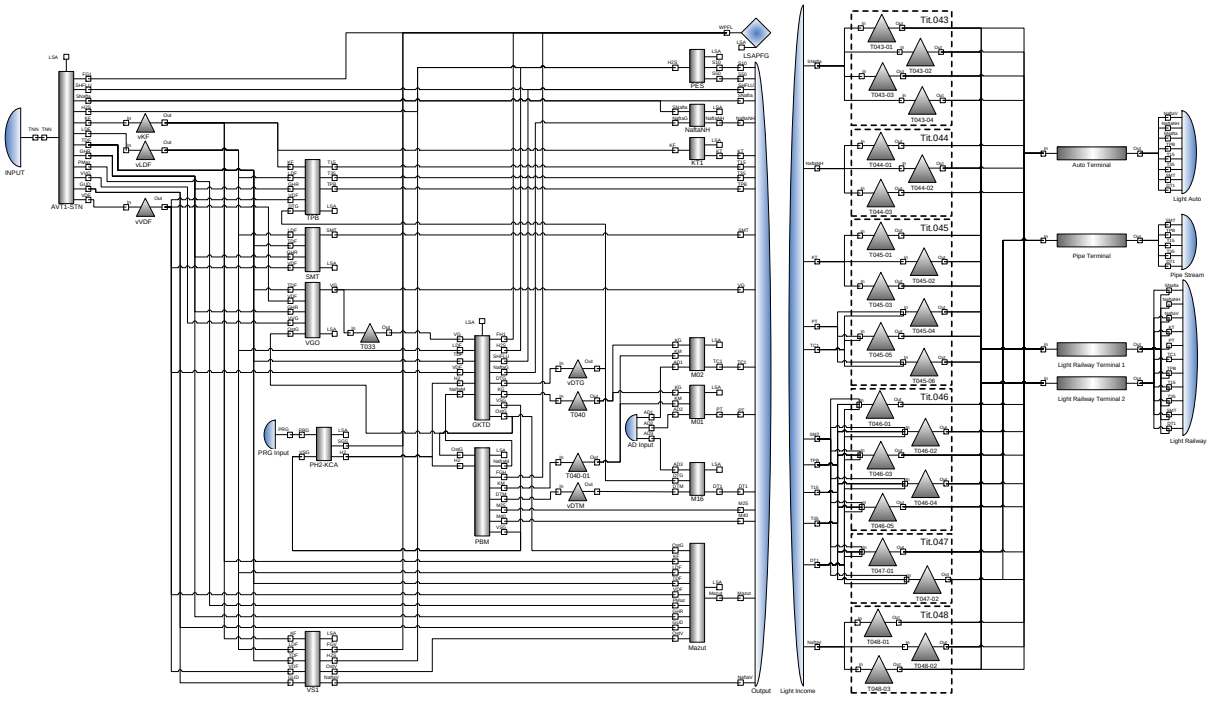


Рис. 6 Структурно-потоковая схема оптимизационной модели светлых и темных нефтепродуктов

Расчет календарного плана работы товарного парка и отгрузки светлых нефтепродуктов (Рис. 6, слева) производился на 10 суток с интервалом планирования, равным 8 часов. Таким образом на горизонте планирования было 30 периодов времени. Для расчета календарного плана использовалась оптимизационная модель, и решалась задача линейного программирования с частью целочисленных переменных, матрица которой имела 43230 ограничений и 20671 переменных, 1795 из которых – целочисленные. Решение осуществлялось на ПК с процессором Intel Core i5 4310U с тактовой частотой 2,8Ггц. Решение без штрафов (Рис. 7-8) было найдено за 16 секунд, после чего поиск был завершен. Матрица модели автоматизации календарного плана работы товарного парка и отгрузки темных нефтепродуктов (Рис. 6, справа) с теми же временными характеристиками имела 12019 ограничений и 6372 переменных, 897 из которых – целочисленные. Решение на том же ПК было найдено за 36 секунд.

Расчет расписания работы товарного парка и отгрузки производился на 10 суток с интервалом планирования, равным 1 час. Таким образом на горизонте планирования было 240 периодов времени. Для расчета расписания использовалась имитационная модель, имеющая 1422 переменных, и алгоритм решающих правил. Решение на том же ПК было найдено за 2 секунды.

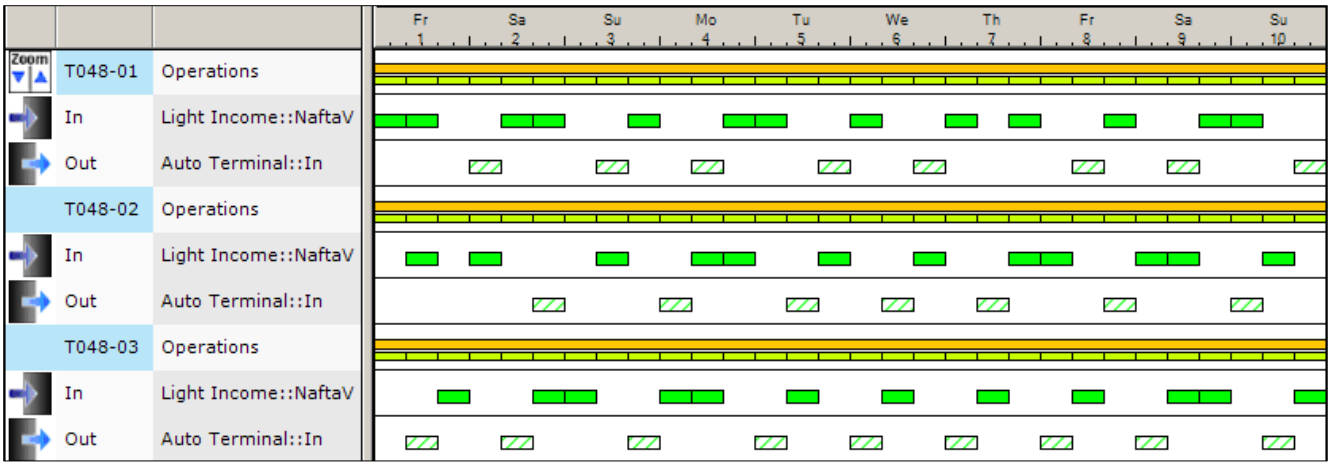


Рис. 7 Диаграмма Ганта работы резервуаров нафты висбрекинга

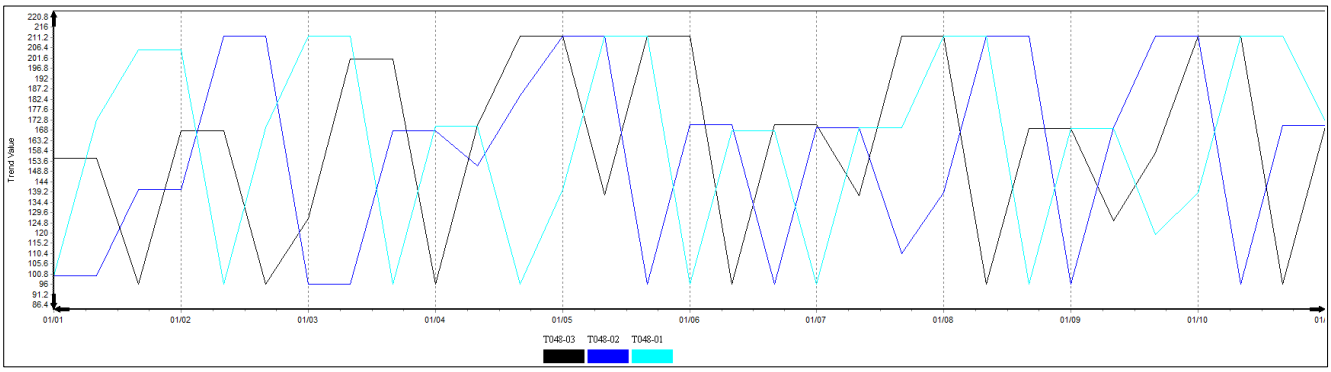


Рис.8 Тренды резервуаров нафты висбрекинга

Экономический эффект от внедрения подсистемы календарного планирования автоматизированной системы управления на российском НПЗ оценивается в 43 – 174 млн. руб. в год за счет снижения запаса по качеству (1-5%) и запасов готовой продукции (2,5-5,0 тонн), увеличению производительности труда (в 4,5 раза) и эффективности производства (оценка 1-5%).

В заключении сформулированы основные выводы и результаты, полученные в диссертационной работе. В **приложении** приведены материалы о внедрении.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации исследованы актуальные в научном и практическом отношении вопросы моделирования процесса календарного планирования технологических производств дискретно-непрерывного характера, методологического обеспечения создания и внедрения таких моделей, а также построения автоматизированных систем календарного планирования производства. В ходе выполнения работы были достигнуты следующие результаты:

1. Рассмотрена задача автоматизации календарного планирования технологических производств дискретно-непрерывного характера на примере НПЗ/НХК. Обоснована необходимость разработки комплексного подхода на основе интегрированной двухуровневой модели и методологии создания и внедрения моделей планирования.
2. Разработана интегрированная двухуровневая модель автоматизации календарного планирования, базирующаяся на формализованных MILP- и имитационных моделях с решающими правилами, которая позволяет строить календарные планы всей производственной цепочки, решать задачи большой размерности за приемлемое время, проводить «что-если» анализ, оперативно корректировать план при отклонениях
3. Разработана методология построения и внедрения моделей автоматизации календарного планирования и подсистемы календарного планирования автоматизированной системы управления производствами дискретно-непрерывного характера НПЗ/НХК для обеспечения успешного внедрения и эффективной эксплуатации моделей планирования.
4. Разработанные модели и алгоритмы легли в основу программной реализации подсистемы календарного планирования автоматизированной системы управления производствами дискретно-непрерывного характера НПЗ/НХК в виде комплекса моделей, который был внедрен на российском нефтеперерабатывающем заводе, что позволило:
   - повысить эффективность планирования в части первичной и вторичной переработки нефти, работы товарно-сырьевого парка и отгрузки готовой продукции за счет:
     - перехода от месячного текущего планирования к реализации ежедневных и посменных производственных заданий;
     - оценки адекватности получаемых текущих планов перед их выполнением, реализации заданных часовых графиков отгрузки продукции с учетом технологических ограничений производства, товарного парка и наливных эстакад;

- определении узких мест и отслеживания ежедневных изменений производственной ситуации;
- прогнозирования развития сценариев для исключения нежелательных и аварийных инцидентов при реализации календарного плана;

- получить экономический эффект от внедрения подсистемы календарного планирования в 43 – 174 млн. руб. в год за счет:
  - снижения запаса по качеству на 1-5%;
  - снижения запасов готовой продукции на 2,5-5,0 тонн;
  - увеличению производительности труда в 4,5 раза;
  - повышению эффективности производства на 1-5%.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

1. Зарифов Б.С., Хоботов Е.Н., Шайдуллин Р.А. Модели выбора оборудования для систем смешения масел // Автоматика и телемеханика, Москва, 2011, №4. – с. 166-180.

2. Шайдуллин Р.А., Хохлов А.С., Проказина М.В. Имитационные модели в комплексе календарного планирования производства // Автоматизация в промышленности, Москва, 2012, №10 – с. 15-21.

3. Шайдуллин Р.А. Аспекты экономической эффективности внедрения автоматизированной системы календарного планирования на предприятиях нефтегазового комплекса // Вестник Самарского государственного экономического университета, Самара, 2013. №102 – с. 143-147.

4. Хохлов А.С., Коннов А.И., Шайдуллин Р.А. Комплексный подход к планированию непрерывного производства // Автоматизация в промышленности, Москва, 2015, №4 – с. 36-40.

5. Аносов А.А., Ефитов Г.Л, Шайдуллин Р.А., Голованов Ю.В., Королев А.В. Влияние погрешности лаборатории на эффективность системы управления компаундированием топлив на НПЗ // Автоматизация в промышленности. Москва, 2017, №3 – с. 3 -11.
6. Аносов А.А., Ефитов Г.Л, Шайдуллин Р.А., Адаптация нелинейных законов смешения нефтяных топлив – дополнительная прибыль НПЗ // Автоматизация в промышленности. Москва, 2018, №3 – с. 16 -25.

Публикации в международных изданиях

7. *Шайдуллин Р.А., Соченко А.А.* Модель календарного планирования смешения и фасовки смазочных масел / Материалы Шестой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD’2012)». Том 1. М.: ИПУ РАН, 2012. – с. 406-408.

8. *Шайдуллин Р.А.* Система выбора оборудования для цехов смешения нефтепродуктов на НПЗ / Материалы Седьмой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD’2013)». Том 1. М.: ИПУ РАН, 2013..

Публикации в других изданиях РФ

9. Зарифов Б.С., Хоботов Е.Н., Шайдуллин Р.А. Модель построения расписаний работ в системах по смешению масел / Труды 52-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Аэрофизика и космические исследования. Том 1. – М.:МФТИ 2009. – с. 78-81.

10. Шайдуллин Р.А., Хоботов Е.Н., Зарифов Б.С. Модель выбора оборудования для систем смешения масел. Постановка задачи выбора оборудования для системы смешения / Труды 52-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Аэрофизика и космические исследования. Том 1. – М.:МФТИ 2009. – с. 93-96.

11. Шайдуллин Р.А. Постановка задачи календарного планирования производства и поставок продукции НПЗ Труды 53-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть III. Аэрофизика и космические исследования. Том 2.– М.:МФТИ, 2010. – с. 153-154.

12. Шайдуллин Р.А. Календарное планирование производства и поставок смазочных масел / Труды 54-й научной конференции МФТИ «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном обществе». Аэрофизика и космические исследования. –М.:МФТИ, 2011. – с. 152-153.

13. Проказина М.В., Шайдуллин Р.А. Применение имитационного моделирования для составления расписаний приготовления смазочных масел на НПЗ / Труды 55-й научной конференции МФТИ «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном обществе». Аэрофизика и космические исследования. – М.:МФТИ, 2012. – с. 101-102.

14. Шайдуллин Р.А.,. Коннов А.И. Задача интеграции информационных систем планирования производства / Труды 56-й научной конференции МФТИ «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном обществе». Аэрофизика и космические исследования. Том 2.–М.:МФТИ, 2013. – с. 64-65.

15. Проказина М.В., Шайдуллин Р.А. Имитационная модель календарного планирования товарно-сырьевого парка НПЗ / Управление большими системами: материалы X Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Том 3/ Уфимск. гос. авиац. тех. ун-т. – Уфа:УГАТУ, 2013. – с. 257-260.

Работы в печати:

1. Шайдуллин Р.А. Метод внедрения систем календарного планирования в дискретно-непрерывных производствах: пример НПЗ // Информатика, телекоммуникации и управление. Т. 19, № 2. (в печати)

2. Шайдуллин Р.А. Стратегии оперативного планирования дискретно-непрерывного производства // Сборник трудов конференции «Системный анализ в проектировании и управлении» 2025 (в печати)