



Министерство образования и науки Российской Федерации

ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет"

КАРПУШКИН С.В., КРАСНЯНСКИЙ М.Н.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

*Учебное пособие для студентов дневного и заочного отделения,
обучающихся по специальности
15.05.01 "Проектирование технологических машин и комплексов"
и направлению 15.03.01 "Машиностроение"*

**Тамбов
2016**

Рецензенты:

*Громов М.С. – к.т.н., технический директор
ООО «СтиртПромПроект», г. Тамбов*

*Борцев В.Я. – д.т.н., профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты
и техносферная безопасность», ТГТУ*

**Утверждено Методическим советом ТГТУ
(протокол № 2 от 17.10.2016 г.)**

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 РАСЧЕТЫ И ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ.....	6
1.1 Исходные данные для расчета оборудования ТС.....	9
1.2 Расчет оборудования ТС непрерывного действия.....	10
1.2.1 Содержание и последовательность расчета.....	10
1.2.2 Постановка задачи расчета оборудования проектируемой ТС.....	14
1.2.3 Расчет оборудования ТС перепрофилируемого производства.....	16
1.3 Расчет оборудования ТС периодического действия и комбинированных...	19
1.3.1 Основные процессы и оборудование многоассортиментных химических производств.....	20
1.3.2 Классификация технологических систем. Варианты структуры.....	23
1.3.3 Взаимодействие основных аппаратов стадий ТС.....	26
1.3.4 Характеристики режима функционирования ТС МХП.....	28
1.3.5 Режим функционирования многопродуктовых ТС МХП.....	32
1.3.6 Расчет оборудования индивидуальной ТС.....	35
1.3.7 Расчет оборудования совмещенных и гибких ТС.....	42
1.3.8 Расчет оборудования ТС действующего производства при организации выпуска новых продуктов.....	48
1.4 Моделирование технологических операций и аппаратов ТС МХП.....	55
1.4.1 Информационно-логические модели.....	55
1.4.2 Регрессионные модели.....	57
1.4.3 Математические модели, основанные на фундаментальных законах....	57
1.4.4 Выбор направлений интенсификации технологических процессов.....	59
1.5 Проектные расчеты основного оборудования стадий ТС МХП.....	60
1.5.1 Проектные расчеты вертикальных емкостных аппаратов.....	60
1.5.2 Проектные расчеты фильтров.....	68
1.5.3 Проектные расчеты сушилок.....	71
1.5.4 Современное оборудование, используемое для АО стадий ТС МХП..	73
2 КАЛЕНДАРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ.....	77
2.1 Основы теории расписаний.....	77
2.1.1 Постановка задачи построения оптимального расписания.....	78
2.1.2 Обозначения задач построения расписаний.....	80
2.1.3 Оптимальные последовательности требований и перестановочный прием.....	82
2.1.4 Применение динамического программирования для построения оптимальных расписаний.....	83
2.1.5 Эвристические решающие правила построения расписаний.....	87
2.1.6 Приближенные алгоритмы с гарантированными оценками точности..	89
2.2 Составление расписаний работы технологических систем.....	91
2.2.1 Задачи оптимизации расписаний работы одностадийных систем.....	91
2.2.2 Задачи оптимизации расписаний работы многостадийных систем.....	98

2.2.3 Построение оптимальных расписаний обслуживания требований группами.....	104
2.3 Календарное планирование работы МХП.....	110
2.3.1 Пример формирования календарного плана ТС МХП с учетом графика ППР ее оборудования.....	111
2.3.2 Математическая модель календарного плана работы МХП.....	116
2.3.3 Математическая модель построения графика ППР.....	119
2.3.4 Постановка задачи оптимального календарного планирования МХП..	128
2.3.5 Алгоритм оптимального календарного планирования работы МХП...	130
2.3.6 Формирование прогноза по ассортименту и объемам выпуска продукции МХП.....	138
3 ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ.....	141
3.1 Лабораторная работа № 1. Построение диаграмм взаимодействия аппаратов ТС МХП.....	141
3.2 Лабораторная работа № 2. Выбор возможных режимов функционирования оборудования ТС МХП.....	143
3.3 Лабораторная работа № 3. Расчет оборудования индивидуальной ТС МХП.....	145
3.4 Лабораторная работа № 4. Расчет оборудования ТС действующего МХП при организации выпуска новых продуктов.....	152
3.5 Лабораторная работа № 5. Применение динамического программирования для построения оптимального расписания.....	158
3.6 Лабораторная работа № 6. Применение эвристических решающих правил для построения расписания работы многостадийных ТС.....	160
3.7 Лабораторная работа № 7. Составление календарного плана работы ТС МХП.....	161
3.8 Лабораторная работа № 8. Составление календарного плана работы ТС МХП с учетом графика ППР.....	167
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	171
ЛИТЕРАТУРА.....	172
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	173
Приложение А. Режимы функционирования и взаимодействия оборудования стадий ТС.....	174
Приложение Б. Определение характеристик режима функционирования индивидуальных ТС.....	178
Приложение В. Определение характеристик режима функционирования совмещенных ТС.....	181
Приложение Г. Определение аппаратного оформления индивидуальных ТС.....	183
Приложение Д. Определение аппаратного оформления совмещенной ТС.....	186
Приложение Е. Размещение новых продуктов на оборудовании действующей ТС.....	188

ВВЕДЕНИЕ

Процесс проектирования технологических комплексов химических производств включает:

- маркетинговые исследования (технико-экономическое обоснование производства);
- технологические расчеты (составление материальных и энергетических балансов);
- расчеты и выбор оборудования;
- компоновка оборудования и технологических трубопроводов в производственном помещении;
- календарное планирование процесса выпуска продукции;
- разработка систем энергоснабжения, вентиляции и утилизации отходов производства;
- разработка рабочей документации на оборудование;
- разработка монтажных чертежей.

В предлагаемом учебном пособии рассматриваются два этапа проектирования: расчет и выбор оборудования, календарное планирование процессов выпуска продукции с учетом планово-предупредительных ремонтов оборудования. Методика расчета и выбора оборудования рассмотрена для технологических систем (ТС) непрерывного и периодического действия, в том числе многопродуктовых. Календарное планирование рассмотрено как раздел теории расписаний и как самостоятельная задача, решаемая при проектировании многоассортиментных химических производств (МХП).

Пособие содержит лабораторный практикум, включающий задания и методические указания по выполнению четырех лабораторных работ по расчетам и выбору основного оборудования ТС МХП, двух лабораторных работ по основам теории расписаний и двух – по календарному планированию работы ТС МХП, в том числе с учетом графика планово-предупредительных ремонтов (ППР) оборудования.

Приложения к пособию содержат примеры выполнения лабораторных работ по расчету и выбору оборудования ТС МХП.

1 РАСЧЕТЫ И ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

В этой части курса изучаются различные виды и методы расчета основного и вспомогательного оборудования технологических систем (ТС). Основное внимание уделяется методам расчета оборудования химико-технологических систем (ХТС) и используемых для их аппаратурного оформления (АО) машин и аппаратов.

Технологическая система (ТС) - это упорядоченная последовательность технологических процессов производства одного или нескольких продуктов и множество аппаратов с системой материальных и энергетических связей между ними, необходимое и достаточное для производства этих продуктов. Технологическая система может выпускать готовую продукцию производства или полупродукты, идущие в дальнейшую обработку на других ТС, обеспечивать аппараты других систем теплоносителями и хладагентами, утилизировать отходы производства.

По режиму функционирования различают ТС *периодического действия*, продукция которых выпускается отдельными партиями, последовательно проходящими все стадии обработки, *непрерывного действия*, предназначенные для обработки потоков сырья и промежуточных продуктов, и *комбинированные*, когда часть аппаратурных стадий системы оснащаются основными аппаратами периодического действия, а остальные - непрерывного. Режим функционирования комбинированных систем в целом периодический, т.е. продукция выпускается партиями. Аппараты непрерывного действия запускаются по мере готовности следующей партии к обработке, а по окончании ее обработки останавливаются.

Аппаратурные стадии технологической системы – это совокупности аппаратов, в которых реализуются отдельные этапы процессов получения продукции. Для оснащения аппаратурных стадий ТС непрерывного действия и большой мощности, ориентированных на выпуск одного вида продукции, например, серной кислоты, минеральных удобрений, нефтепродуктов, используются специализированные аппараты, сконструированные для реализации конкретных технологических процессов (контактный аппарат для окисления сернистого газа, кольцевая суперфосфатная камера, колонна каталитического крекинга нефти). Большинство этапов синтеза продукции ТС периодического действия, особенно многопродуктовых, реализуется в стандартных аппаратах, выпускаемых предприятиями химического машиностроения. Ряды типоразмеров и параметры стандартных аппаратов определяются ГОСТами и содержатся в каталогах.

Оборудование ТС подразделяется на основное, используемое для реализации этапов технологического процесса выпуска продукции (химический синтез, выделение продуктов), и вспомогательное, предназначенное для временного хранения исходных веществ и промежуточных продуктов, транспорта веществ. Основное оборудование – это реакторы, колонны, фильтры и центрифуги, сушилки, грануляторы, кристаллизаторы, измельчители, классификаторы, смесители; вспомогательное - мерники, сборники, промежуточные емкости, теплообменники, насосы, транспортеры. Машины и аппараты для вентиляции и отопления производственного помещения, улавливания и обезвреживания отходов, погрузки и раз-

грузки, обеспечения ТС сырьем и различными видами энергии, относятся к общекорпусному (общецеховому) оборудованию.

Понятие "расчет оборудования" – очень емкое и многозначное. Необходимость в расчетах оборудования ТС возникает при проектировании новых производств и перепрофилирования действующих на выпуск новой продукции. На различных этапах этих работ, см. рис. 1.1, расчеты оборудования проводятся с разной степенью детализации и преследуют разные цели.

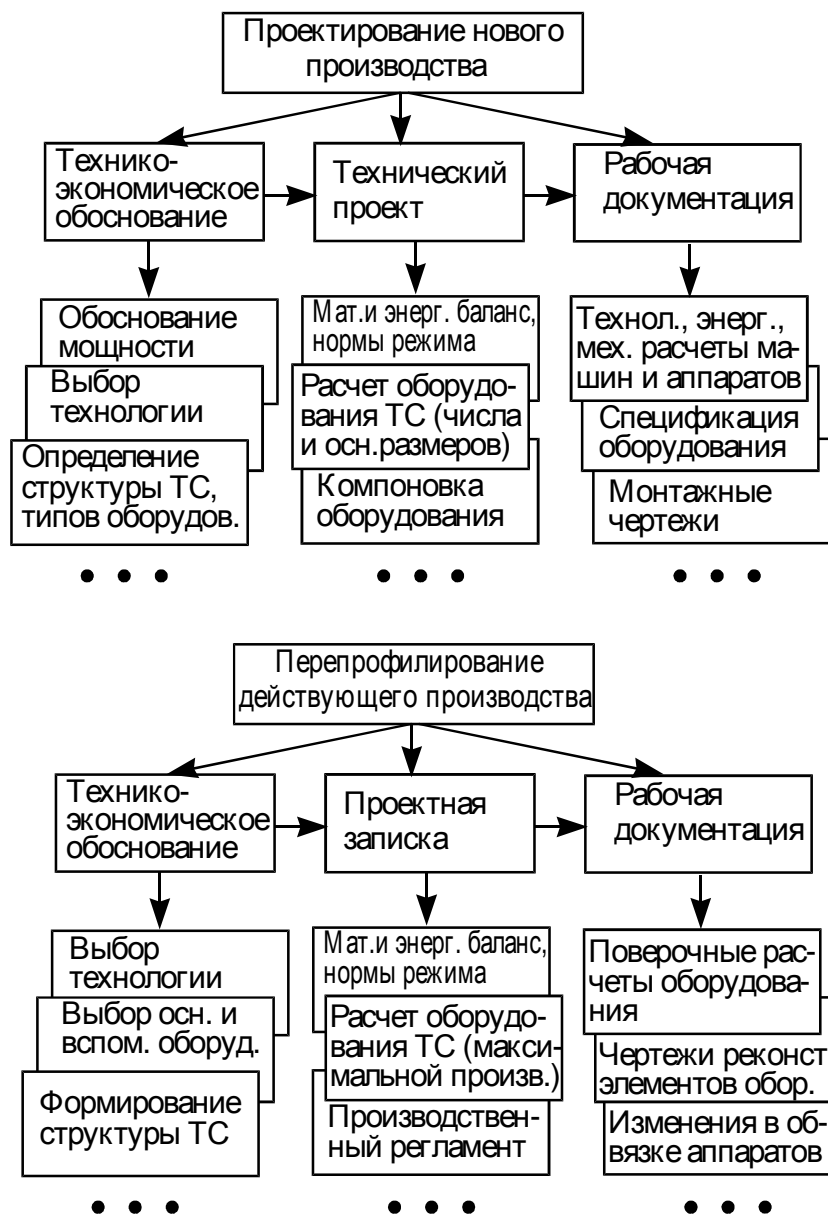


Рис. 1.1 – Место и виды расчетов оборудования ТС

При проектировании нового производства необходимо определить основные размеры (производительности) и число аппаратов указанных типов, которые способны обеспечить заданную производительность системы. Целью этого расчета является ответ на вопрос: сколько и каких аппаратов необходимо установить на аппаратных стадиях ТС для того, чтобы обработать материальные потоки, необходимые для выпуска требуемого количества продукции за отведенное время. Целью расчета при перепрофилировании действующего производства является определение максимальной производительности ТС, аппаратурное оформление которой фиксировано.

На этапе технико-экономического обоснования расчет оборудования – это определение способа реализации выбранной технологии выпуска продукции, т.е. определение числа аппаратурных стадий ТС, типов машин и аппаратов, образующих их АО, и структуры материальных потоков системы. Эту работу выполняют сотрудники научно-исследовательских организаций, разрабатывающих технологии производства продукции различных отраслей промышленности.

Расчет оборудования ТС на этапе разработки технического проекта или проектной записки выполняют работники технологических отделов или групп проектных организаций и предприятий. При проектировании нового производства необходимо определить основные размеры (производи-

На этапе рабочей документации расчеты оборудования проводятся в отделах оборудования проектных организаций или проектно-конструкторских отделах предприятий. Для каждого отдельного аппарата ТС выполняется технологический и механический расчет.

Цель технологического расчета – определить пригодность аппарата выбранной конструкции для осуществления указанных процессов, нормы технологического режима их реализации (температура, давление, продолжительность) и рассчитать его производительность по заданному основному размеру (поверочный расчет) или наоборот – основные размеры по заданной производительности (проектный расчет). Расчет может быть проведен в соответствии с методикой, утвержденной ГОСТ, РД, РТМ и на основе исследования закономерностей протекания реализуемого процесса с использованием модели машины или аппарата – физической или математической. Почти всегда технологический расчет дополняют энергетическим: определением затрат различных видов энергии, необходимых для функционирования единиц оборудования ТС.

По окончании технологического расчета, а иногда и совместно с ним, выполняется механический расчет машин и аппаратов ТС (проектный или поверочный). Для неподвижных элементов оборудования его целью является проверка прочности и устойчивости в условиях, определяемых технологией производства, выбор конструкционных материалов и защитных покрытий. Для подвижных элементов машин и аппаратов, например вращающихся, механический расчет заключается в проверке условий виброустойчивости, жесткости и усталостной прочности. Имеются и другие виды механических расчетов – на малоцикловую нагрузку, на ветровую и сейсмическую нагрузку и т.д. Для этого вида расчета оборудования также существуют различные методики: от утвержденных ГОСТами, РД и РТМ до использования метода конечных элементов. Взаимосвязь различных видов расчета оборудования ТС иллюстрирует рис. 1.2.



Рис. 1.2 – Виды расчета оборудования ТС и их взаимосвязь

Расчет оборудования ТС выполняется на этапе разработки технического проекта нового производства или проектной записки для перепрофилирования действующего. Цель расчета – определить основные конструкционные размеры (рабочий объем, рабочую поверхность, длину рабочей зоны) и число единиц оборудования для всех аппаратурных стадий ТС, характеристики режима их функционирования, обеспечивающие заданную производительность системы. Другими словами, необходимо подобрать для стадий ТС такие машины и аппараты, основные размеры и число которых обеспечат нормальные условия обработки материальных потоков, необходимых для выпуска продукции в заданном объеме и ассортименте за отведенное время.

1.1 Исходные данные для расчета оборудования ТС

Исходными данными для расчета оборудования ТС являются некоторые результаты технико-экономического обоснования производства (ТЭО), а также материальный баланс и нормы технологического режима реализации стадий выпуска продукции.

Из результатов ТЭО необходимы следующие сведения:

- мощность производства и ассортимент продукции;
- технологические регламенты синтеза продуктов выбранного ассортимента;
- число аппаратурных стадий ТС;
- структура потоков при выпуске каждого продукта;
- типы основных аппаратов стадий системы.

Заметим, что при проектировании нового производства обычно выбирается наиболее современная технология выпуска продукции, а при перепрофилировании действующего технология выбирается с учетом номенклатуры и состояния имеющегося оборудования, возможностей его модернизации и обновления.

Расчет материальных балансов стадий, связанных с химическими превращениями, проводят на основании стехиометрических уравнений реакций с учетом соотношения реагирующих веществ, степени превращения и выходов от теоретического, допустимых потерь сырья (для периодических процессов), состава исходных веществ и массы, поступающей с предыдущих стадий. Для стадий, где химические превращения отсутствуют (фильтрация, сушка, упаривание), необходимы данные о составе входящих и выходящих потоков.

Уравнение покомпонентного материального баланса для многостадийного производства имеет вид:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^q \sum_{i=1}^u \sum_{k=1}^p g_{jri} \cdot x_{jrik} = 0,$$

где j – номер стадии производства,

r – номер операции на стадии (для периодических процессов),

i – номер потока,

k – номер чистого компонента,

g_{jri} – массовый расход i -го потока для r -й операции j -й стадии,

x_{jrik} – доля k -го компонента в i -м потоке для r -й операции j -й стадии.

Результатами расчета материального баланса, необходимыми для расчета оборудования ТС, являются объемные v_j или (и) массовые m_j материальные индексы ее стадий. Для ТС периодического действия и комбинированных это объем или масса веществ, которые необходимо обработать на j -й стадии для получения 1т готового продукта, для систем непрерывного действия – часовые производительности оборудования стадий по обрабатываемой массе.

Нормы технологического режима для стадий ТС – это условия реализации этапов производства продукции. Для расчетов оборудования стадий ТС, оснащаемых основными аппаратами различных типов, используются следующие нормы:

- время пребывания массы в аппарате τ_j ,
- скорость течения массы через аппарат w_j ,
- удельные производительности аппаратов выбранного типа по обрабатываемой массе a_j (на единицу рабочего объема или поверхности),
- рекомендуемая степень заполнения объема аппарата обрабатываемой массой ϕ_j или ее граничные значения: ϕ_j^* (максимальное) и ϕ_{*j} (минимальное).

Рассмотрение методики расчета оборудования ТС начнем с систем непрерывного действия.

1.2 Расчет оборудования ТС непрерывного действия

Технологические системы непрерывного действия характерны для производств неорганических веществ и продуктов переработки нефти: кислот, оснований, минеральных удобрений, жидкого топлива. ТС непрерывного действия чаще всего выпускают единственный продукт в большом объеме (десятки и сотни тысяч тонн в год). Стадии, где реализуются основные этапы выпуска продукта, часто оснащаются специализированным оборудованием, предназначенным только для конкретного процесса в конкретном производстве.

1.2.1 Содержание и последовательность расчета

Для определения основных конструкционных размеров и количества аппаратов стадий ТС (реакторов, смесителей, фильтров, сушилок, колонн), способных обеспечить заданную производительность системы, используются следующие соотношения:

1. Если для стадии j ТС заданы значения τ_j или (и) w_j , то рабочий объем каждого из n_j параллельных аппаратов непрерывного действия, установленных на этой стадии,

$$V_j = \frac{v_j \cdot \tau_j}{\phi_j \cdot n_j},$$

площадь поперечного сечения каждого из них

$$F_j = \frac{v_j}{w_j \cdot n_j},$$

а длина рабочей зоны

$$L_j = \frac{V_j}{F_j} = \frac{w_j \cdot \tau_j}{\phi_j}.$$

Если для стадии j задан массовый материальный индекс, то вместо v_j в этих формулах используется отношение m_j/ρ_j , где ρ_j – плотность среды, обрабатываемой в аппаратах стадии.

2. Если для стадии j задано значение a_j , то в зависимости от размерности удельной производительности вычисляется либо объем аппаратов

$$V_j = \frac{g_j}{a_j \cdot n_j \cdot \Phi_j},$$

либо площадь рабочей поверхности

$$F_j = \frac{g_j}{a_j \cdot n_j}.$$

В этих формулах $g_j = v_j$, если значение a_j характеризует объемную удельную производительность и $g_j = m_j$, если массовую.

3. Если аппараты стадии j заполнены катализатором или насадкой, то площадь поперечного сечения аппарата

$$F_j = \frac{v_j}{w_j \cdot b_j \cdot n_j},$$

рабочий объем

$$V_j = \frac{S_j}{\sigma_j \cdot n_j},$$

а длина рабочей зоны

$$L_j = \frac{V_j}{F_j} = \frac{S_j \cdot w_j \cdot b_j}{v_j \cdot \sigma_j}.$$

Здесь S_j – площадь поверхности насадки или катализатора (м^2),

σ_j – удельная поверхность насадки или катализатора ($\text{м}^2/\text{м}^3$),

b_j – отношение их свободного сечения к сечению пустого аппарата.

Из приведенных формул видно, что при расчете оборудования стадии ТС необходимо либо задать число параллельно работающих аппаратов и определить их основные размеры, либо задать размер аппарата (стандартного), и найти необходимое количество таких аппаратов. Заметим, что обычно на всех стадиях ТС устанавливается одинаковое количество основных аппаратов (говорят, что ТС работает "в одну нитку", "в две нитки" и т.д.). В этом случае различные аппараты одной стадии работают независимо друг от друга и связаны только с аппаратами соседних стадий. В принципе возможна и установка на различных стадиях ТС неодинакового числа параллельно работающих основных аппаратов, но это приводит к необходимости разделять стадии буферными емкостями. В такую емкость собирается масса, обработанная всеми аппаратами предыдущей стадии, а из нее масса подается в аппараты следующей стадии.

В состав аппаратного оформления (АО) некоторых стадий ТС непрерывного действия могут входить машины (питатели, дозаторы, измельчители, классификаторы, насосы), к числу основных размеров которых относятся габариты рабочих камер и рабочих органов. Необходимое число машин и их основные размеры определяются в соответствии с известными методиками по заданным мате-

риальным индексам стадий и физико-механическим характеристикам обрабатываемой массы.

Пример. Рассчитать основное оборудование ТС, выпускающей двойной суперфосфат поточным методом, производительностью 100000 т/год (приблизительно 10000 кг/ч). Упрощенная схема ТС представлена на рис. 1.3.

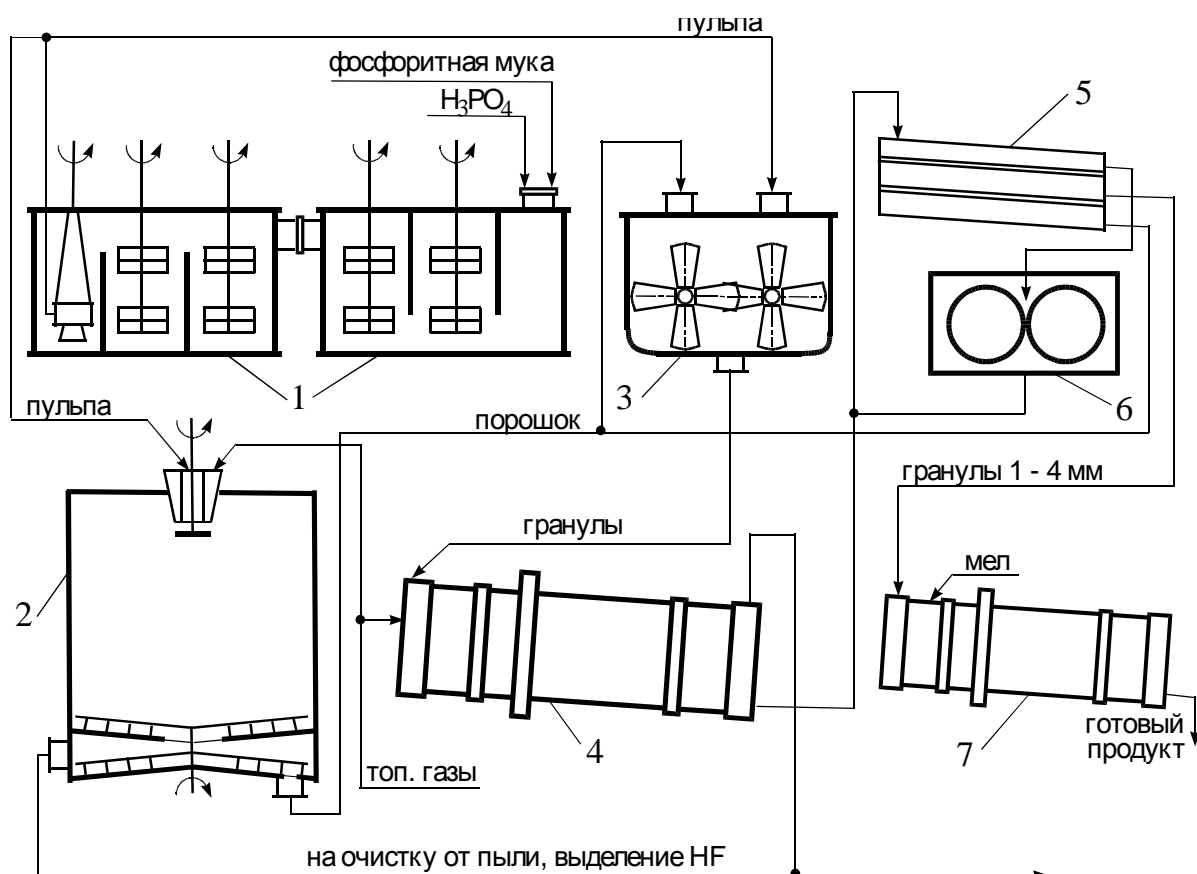
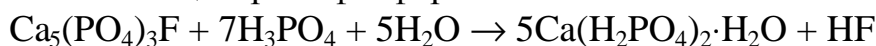


Рис. 1.3 – Схема ТС по производству двойного суперфосфата поточным методом

1 - реакторы-смесители, 2 - сушилка распылительная, 3 - гранулятор двухвальный лопастной, 4 - сушилка барабанная, 5 - грохот двухситовой, 6 - дробилка валковая (ДГ), 7 - нейтрализатор барабанный.

Сырьем для производства двойного суперфосфата поточным методом является фосфоритный концентрат в виде муки и фосфорная кислота, содержащая 29÷34% P_2O_5 . Для нейтрализации свободной кислотности готового продукта используется мел.

Основная химическая реакция получения двойного суперфосфата разложением фосфоритного концентрата фосфорной кислотой



реализуется в реакторном блоке из двух (или трех) реакторов-смесителей, соединенных последовательно. Каждый реактор имеет четыре механических перемешивающих устройства. Из последнего реактора большая часть пульпы погружным насосом подается на сушку в распылительную сушилку. Высушенный порошок двойного суперфосфата подается в двухвальный лопастной смеситель-гранулятор. Сюда же из последнего реактора подается небольшое количество пульпы.

Влажные гранулы поступают из гранулятора в сушильный барабан. Высушенный гранулированный двойной суперфосфат рассеивают на грохоте. Крупная

фракция (> 5 мм) направляется на измельчение и затем на пересев, мелкая фракция (< 1мм) снова подается в гранулятор в качестве ретура ("зародышей" для образования гранул). Средняя фракция гранул (1÷5 мм) направляется в барабан-нейтрализатор (сушильный барабан без насадки), где суперфосфат обрабатывается тонкоизмельченным мелом и в результате реакции



содержание свободной кислоты в нем доводится до 5%. Из нейтрализатора суперфосфат подается на упаковку.

Заметим, что стадии 1 и 2 рассматриваемой ТС оснащаются специализированным нестандартным оборудованием (реакторы-смесители и распылительная сушилка), которое монтируется из составных частей непосредственно на месте установки.

Исходные данные для расчета:

- стадия 1: $n_1=1$ (один блок), $m_1=18650$ кг/ч, $\rho_1=1600$ кг/м³, $\tau_1=3$ ч, $\phi_1=0.6$;
- стадия 2: $n_2=1$, $m_2=7450$ кг/ч (по испаряемой влаге), $a_2=15$ кг/(м³·ч);
- стадия 3: $n_3=1$, $m_3=14000$ кг/ч, $\rho_3=935$ кг/м³, $\tau_3=0.05$ ч, $\phi_3=0.8$;
- стадия 4: $n_4=1$, $m_4=1500$ кг/ч (по испаряемой влаге), $a_4=30$ кг/(м³·ч);
- стадия 7: $n_7=1$, $m_7=10500$ кг/ч, $\rho_7=950$ кг/м³, $\tau_7=0.25$ ч, $\phi_7=0.4$.

Расчет грохота и дробилки может быть произведен по известным методикам и здесь не рассматривается.

$$\text{Расчет: } V_1 = \frac{m_1 \cdot \tau_1}{\phi_1 \cdot \rho_1} = \frac{18650 \cdot 3}{0.6 \cdot 1600} = 58.3 \text{ м}^3 \text{ (поскольку вся масса проходит реак-}$$

торы последовательно, все они должны иметь такой объем),

$$V_2 = \frac{m_2}{a_2} = \frac{7450}{15} = 496.7 \text{ м}^3 \text{ (степень заполнения здесь не учитывает-}$$

ся, т.к. удельная производительность дана по испаряемой влаге),

$$V_3 = \frac{m_3 \cdot \tau_3}{\phi_3 \cdot \rho_3} = \frac{14000 \cdot 0.05}{0.8 \cdot 935} = 0.94 \text{ м}^3,$$

$$V_4 = \frac{m_4}{a_4} = \frac{1500}{30} = 50.0 \text{ м}^3,$$

$$V_7 = \frac{m_7 \cdot \tau_7}{\phi_7 \cdot \rho_7} = \frac{10500 \cdot 0.25}{0.4 \cdot 950} = 6.9 \text{ м}^3.$$

При других значениях n_j будут получены другие значения размеров аппаратов. Если число основных аппаратов на различных стадиях будет неодинаковым, придется предусмотреть установку буферных емкостей между стадиями и определить их размеры по вышеприведенным соотношениям (увеличить число стадий системы).

Как правило, стадии проектируемой ТС оснащаются стандартным оборудованием, поэтому полученные в результате расчета значения V_j , F_j и L_j необходимо округлять до ближайших значений, соответствующих основным размерам стандартных аппаратов. Можно решить и обратную задачу: определить по тем же соотношениям требуемое число параллельно работающих аппаратов, основные размеры которых заданы. Необходимость округления найденных значений V_j , F_j , L_j

до ближайших стандартных, или значений n_j до ближайших целых может привести к тому, что оборудование некоторых стадий ТС будет использоваться не полностью: реальная производительность, степень заполнения рабочего объема обрабатываемой массой будут меньше максимально допустимых. Например, при округлении числа параллельно работающих реакторов с 1.5 до 2, придется смириться с тем, что они будут заполняться реагентами лишь на 75% от возможного, а приняв к установке сушилку объемом 500 м³ при необходимых 450 – с тем, что ее реальная производительность составит 90% от возможной.

1.2.2 Постановка задачи расчета оборудования проектируемой ТС

Поскольку существует множество различных вариантов аппаратного оформления проектируемых технологических систем, встает вопрос об их оценке и выборе наилучшего, т.е. о критерии оптимальности АО ТС. Для оценки эффективности вариантов АО могут быть использованы экономические, технологические показатели, а также такие характеристики ТС, как чувствительность, управляемость и надежность.

Один из наиболее популярных критериев экономической эффективности АО ТС – это приведенные затраты на выпуск продукции (затраты за определенный период, чаще всего за год): амортизация оборудования и производственного помещения, затраты на производство и приобретение всех видов энергии (электричество, тепло, холод), на сырье и материалы, на хранение и отгрузку готовой продукции, на обслуживание и ремонт оборудования (зарплата персонала) и т.д. К числу технологических показателей эффективности АО стадий ТС можно отнести выход целевых продуктов, термодинамический к.п.д. ее аппаратов, коэффициенты скорости реализуемого процесса (теплопередачи, массопередачи, химической реакции).

Чувствительность ТС – это оценка степени изменения характеристик ее функционирования под влиянием малых изменений режимных и конструктивных параметров, а также внешних факторов. При проектировании стремятся выбирать оборудование, малочувствительное к изменению собственных параметров и внешних воздействий. *Управляемость* ТС – это оценка ее способности обеспечивать заданную производительность и требуемое качество продукции в реальных условиях эксплуатации при нестабильности и ограниченности необходимых ресурсов. *Надежность* ТС – это оценка ее возможности сохранять работоспособность в течение определенного периода времени, приспосабливаться к обнаружению и устранению причин, вызывающих отказы. Существует методика количественной оценки чувствительности, управляемости и надежности проектируемой ТС.

При расчете оборудования ТС на этапе разработки технического проекта или проектной записки возможности использования упомянутых показателей эффективности ее АО весьма ограничены. Методика расчета не дает возможности применить технологические показатели, характеристики чувствительности и управляемости, т.к. материальные индексы стадий и нормы режима функционирования их оборудования считаются постоянными. Из экономических показателей можно использовать только затраты на оборудование, если известны зависимости стоимости аппаратов различных типов от их основных размеров.

Надежность АО ТС в данном случае можно оценивать только в том смысле, что при работе системы "в одну нитку" выход из строя основного аппарата любой из ее стадий потребует остановки всех остальных и прекращения выпуска продукции, а при установке на стадии нескольких основных аппаратов, работающих параллельно, ТС может продолжать работать с меньшей производительностью. Учесть это обстоятельство можно путем введения в критерий эффективности АО ТС штрафа за установку на ее стадии единственного основного аппарата.

При использовании для оснащения стадий ТС стандартного оборудования для оценки эффективности ее АО можно также применить количественную оценку степени использования выбранных аппаратов, например разность между числом основных аппаратов, установленных на стадии, и реально необходимым для обеспечения требуемой производительности.

На основании вышесказанного в качестве критерия оптимальности решения задачи расчета оборудования ТС непрерывного действия на этапе разработки технического проекта производства предлагается использовать выражение

$$Z = \sum_{j=1}^J \alpha_j \cdot Y_j^{\beta_j} \cdot [n_j + (n_j - n_{*j}) + \gamma_j], \quad (1.1)$$

где Y_j – основной размер аппарата стадии j (V_j , F_j или L_j);

α_j , β_j - коэффициенты, учитывающие зависимость стоимости аппаратов стадии j от их материала и основного размера;

n_{*j} – реально необходимое число основных аппаратов на стадии j ;

$\gamma_j=1$, если $n_j=1$ и $\gamma_j=0$ в противном случае.

Следовательно, задачу расчета основного оборудования ТС непрерывного действия можно сформулировать следующим образом: найти такие значения J , Y_j , n_j , при которых критерий (1.1) достигает минимума и выполняются условия:

$$\frac{v_j \cdot \tau_j}{\Phi_j^* \cdot n_j} \leq V_j \leq \frac{v_j \cdot \tau_j}{\Phi_j \cdot n_j}, \quad n_{*j} = \frac{v_j \cdot \tau_j}{\Phi_j^* \cdot V_j}, \quad j \in J_\tau, \quad (1.2)$$

$$F_j \geq \frac{v_j}{w_j \cdot n_j}, \quad n_{*j} = \frac{v_j}{w_j \cdot F_j}, \quad j \in J_w, \quad (1.3)$$

$$\frac{g_j}{a_j \cdot n_j \cdot \Phi_j^*} \leq V_j \leq \frac{g_j}{a_j \cdot n_j \cdot \Phi_j}, \quad F_j \geq \frac{g_j}{a_j \cdot n_j}, \quad j \in J_a \quad (1.4)$$

$$n_{*j} = \max \left\{ \frac{g_j}{a_j \cdot V_j \cdot \Phi_j^*}, \frac{g_j}{a_j \cdot F_j} \right\}, \quad j \in J_a \quad (1.5)$$

$$F_j \geq \frac{v_j}{w_j \cdot b_j \cdot n_j}, \quad V_j \geq \frac{S_j}{\sigma_j \cdot n_j}, \quad j \in J_\sigma \quad (1.6)$$

$$n_{*j} = \max \left\{ \frac{v_j}{w_j \cdot b_j \cdot F_j}, \frac{S_j}{\sigma_j \cdot V_j} \right\}, \quad j \in J_\sigma \quad (1.7)$$

$$Y_j \in YS_j, \quad j=1, \dots, J \quad (1.8)$$

$$n_j \in \{1, 2, \dots\}, \quad j=1, \dots, J \quad (1.9)$$

Здесь J_τ – множество номеров стадий ТС, для которых задано время пребывания массы в основном аппарате;

J_w – множество номеров стадий, для которых заданы скорости движения обрабатываемой массы через аппарат;

J_a – множество номеров стадий, для которых заданы удельные производительности аппаратов по одному из обрабатываемых веществ;

$J_\sigma \subset J_w$ – множество номеров стадий, где основными являются аппараты со слоем катализатора или с насадкой;

YS_j – множество стандартных размеров аппаратов, пригодных для установки на стадии j ТС.

Замечания: 1. В случае задания для стадии $j \in J_\tau \cup J_w$ массового материального индекса вместо значения v_j используется отношение m_j/ρ_j .

2. В формулах (1.4), (1.5) g_j соответствует m_j , если a_j – массовая производительность и v_j , если объемная.

3. Если в результате решения задачи число основных аппаратов на соседних стадиях ТС окажется не одинаковым, необходимо ввести между ними стадию, оснащенную буферными емкостями, и определить их число и объем согласно (1.2) или (1.4), (1.5).

4. Основные размеры и необходимое число машин, устанавливаемых на стадиях ТС, определяются по известным методикам.

5. Для определения основных размеров и числа вспомогательных аппаратов стадий ТС (приемные и напорные баки, бункеры) используются соотношения (1.2) – (1.9).

Задача (1.1) – (1.9) относится к классу задач дискретного программирования. Для ее решения можно предложить алгоритм, основанный на стратегии локальной оптимизации:

1) формирование базового варианта АО ТС, соответствующего $n_j = 1$, $j = 1, \dots, J$, и его оценку по критерию (1.1);

2) последовательное увеличение значений n_j на единицу для всех возможных комбинаций номеров стадий ТС (по одной, попарно, тройками и т.д.), формирование соответствующих этим комбинациям вариантов АО, и выбор наиболее предпочтительного из них по критерию (1.1);

3) если выбранному варианту АО ТС соответствует меньшее значение критерия, чем базовому, то он становится базовым и т.д., в противном случае процесс прекращается и оптимальным вариантом считается базовый.

1.2.3 Расчет оборудования ТС перепрофилируемого производства

ТС непрерывного действия, как правило, проектируются под конкретный продукт. Возможности их перепрофилирования на выпуск другого продукта ограничены применением специализированного оборудования, которое проектируется и изготавливается для реализации конкретного процесса, при строго определенных характеристиках сырья и продукта, условиях реализации (температура, давление, скорость течения среды и т.п.). Однако в последние годы, когда новые производства практически не проектируются и не строятся, перед проектно-

конструкторскими отделами предприятий ставятся такие задачи. Одним из главных факторов, принимаемых во внимание при принятии решения о перепрофилировании действующей ТС, является сходство технологии выпуска прежней и новой продукции.

Расчет основной аппаратуры стадий перепрофилируемой ТС ведется с использованием тех же соотношений, что и проектируемой. Отличие состоит в том, что в число исходных данных дополнительно включаются размеры и число аппаратов стадий ТС, а целью расчета является ответ на вопрос: способна ли ТС обеспечить требуемую производительность по новому продукту?

Расчет можно произвести двумя способами. Первый предусматривает определение по соотношениям (1.2) – (1.7) при фиксированных значениях $Y_j, n_j, j=1, \dots, J$ по материальным индексам стадий, пересчитанным на 1т нового продукта, максимально возможной производительности оборудования каждой стадии и выбор из них наименьшей. Если найденное значение производительности ТС по новому продукту окажется меньше запланированного, необходимо либо скорректировать план, либо изменить АО лимитирующих ее стадий. Изменение АО может потребоваться и в случае, когда при найденной производительности ТС оборудование некоторых стадий окажется неработоспособным.

Пример. Определить максимально возможную производительность ТС, перепрофилируемой с выпуска простого суперфосфата на выпуск аммофоса. Технологии выработки этих удобрений сходны. Схема ТС представлена на рис. 1.4.

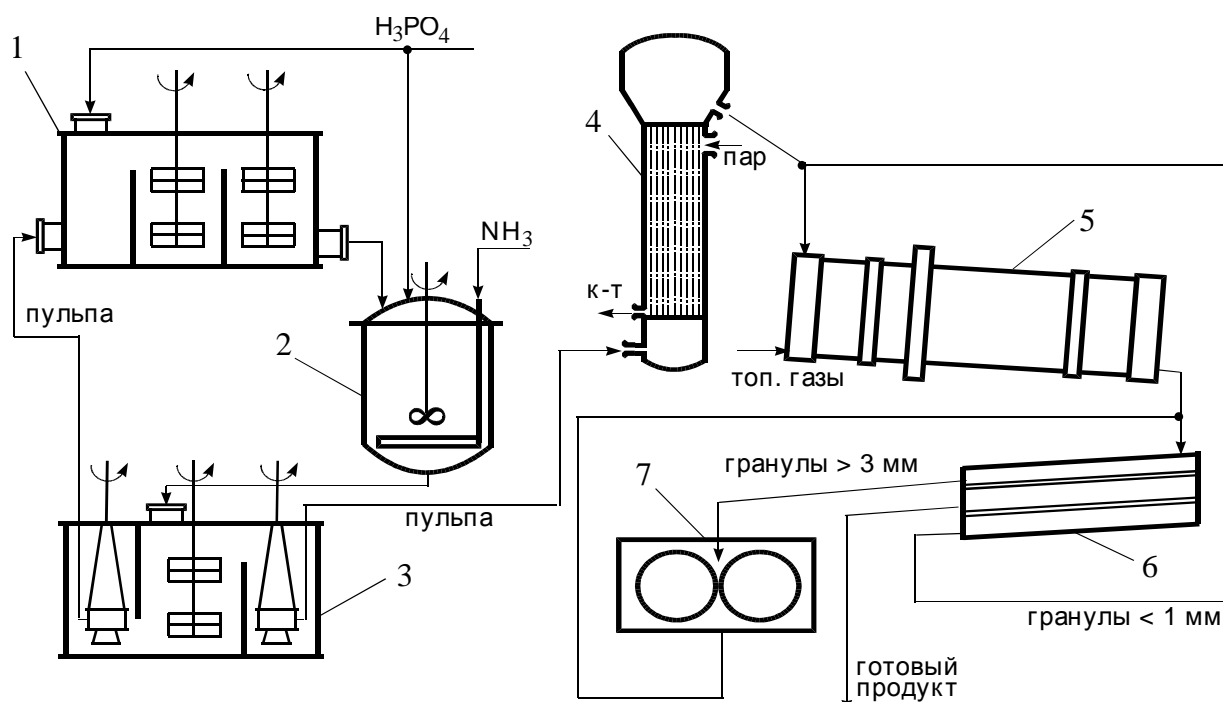
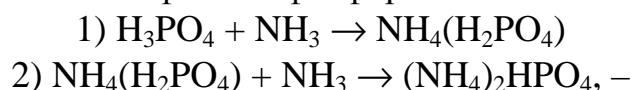


Рис. 1.4 – Схема ТС, перепрофилируемой с выпуска суперфосфата на выпуск аммофоса
 1 – бак слабоаммонизированной пульпы, 2 – сатуратор, 3 – бак неупаренной пульпы,
 4 – выпарной аппарат, 5 – барабанный гранулятор-сушилка, 6 – грохот, 7 – дробилка ДГ.

Реакции получения аммофоса из фосфорной кислоты и аммиака:



реализуются в реакторном блоке, состоящем из двух баков-смесителей, и сатураторе, в который через кольцевой барботер подается газообразный аммиак. Около двух третей пульпы аммофоса из второго бака подается в выпарной аппарат, а оставшаяся возвращается на аммонизацию. Упаренная пульпа подается в барабанный аппарат, выполняющий роль гранулятора и сушилки. Полученные гранулы рассеиваются на двухситовом грохоте: крупная фракция подается на измельчение, мелкая – обратно в гранулятор в качестве ретура, средняя фракция (размер зерен $1 \div 3$ мм) является готовым продуктом.

Исходные данные для расчета (материальные индексы даны на 1т продукта):

- стадия 1: $n_1=1$, $m_1=7074.6$ кг/ч, $\rho_1=1360$ кг/м³, $\tau_1=3.5$ ч, $\varphi_1=0.6$, $V_1=50$ м³;
- стадия 2: $n_2=1$, $m_2=7170.9$ кг/ч, $\rho_2=1330$ кг/м³, $\tau_2=3$ ч, $\varphi_2=0.75$, $V_2=32$ м³;
- стадия 3: $n_3=1$, $m_3=7170.9$ кг/ч, $\rho_3=1330$ кг/м³, $\tau_3=3.5$ ч, $\varphi_3=0.6$, $V_3=50$ м³;
- стадия 4: $n_4=1$, $m_4=851.6$ кг/ч (по испаряемой влаге), $a_4=145$ кг/(м³·ч), $V_4=9$ м³;
- стадия 5: $n_5=1$, $m_5=1923.1$ кг/ч (по сухому), $a_5=67.8$ кг/(м³·ч), $\varphi_5=0.25$,

$V_5=177$ м³.

Грохот и дробилку рассчитывать не будем.

$$\begin{aligned} \text{Расчет: } \frac{V_1 \cdot \varphi_1 \cdot \rho_1}{m_1 \cdot \tau_1} &= \frac{50 \cdot 0.6 \cdot 1360}{7074.6 \cdot 3.5} = 1.65 \text{ т/ч,} \\ \frac{V_2 \cdot \varphi_2 \cdot \rho_2}{m_2 \cdot \tau_2} &= \frac{32 \cdot 0.75 \cdot 1330}{7170.9 \cdot 3} = 1.483 \text{ т/ч,} \\ \frac{V_3 \cdot \varphi_3 \cdot \rho_3}{m_3 \cdot \tau_3} &= \frac{50 \cdot 0.6 \cdot 1330}{7170.9 \cdot 3.5} = 1.59 \text{ т/ч,} \\ \frac{V_4 \cdot a_4}{m_4} &= \frac{9 \cdot 145}{851.6} = 1.53 \text{ т/ч,} \\ \frac{V_5 \cdot \varphi_5 \cdot a_5}{m_4} &= \frac{177 \cdot 0.25 \cdot 67.8}{1923.1} = 1.56 \text{ т/ч.} \end{aligned}$$

Как видно, максимальная производительность ТС по аммофосу может составить 1483 кг/ч, т.е. около 12000 т/год и лимитирует ее рабочий объем сатуратора. При такой производительности системы аппараты остальных ее стадий будут работоспособны.

Второй способ сводится к определению по соотношениям (1.2)-(1.7) при фиксированных значениях $n_j, j=1, \dots, J$ граничных значений размеров основных аппаратов стадий ТС и выбору среди оборудования перепрофилируемого производства (не обязательно рассматриваемой ТС) подходящих аппаратов. Предполагается, что оборудование других ТС может быть включено в состав АО рассматриваемой системы путем его демонтажа и монтажа на новом месте или путем его обвязки дополнительными трубопроводами.

Более общим и перспективным является второй способ, который предусматривает возможность формирования АО стадий перепрофилируемой ТС из парка оборудования действующего производства в целом. В этом случае задача расчета основного оборудования аналогична задаче (1.1) – (1.9), в постановку которой необходимо внести следующие изменения:

- в первой составляющей критерия (1.1) учитывать только аппараты, привлекаемые из других ТС, т.е.

$$Z = \sum_{j=1}^J \alpha_j \cdot Y_j^{\beta_j} \cdot \left[(n_j - \underline{n}_j) + (n_j - n_{*j}) + \gamma_j \right],$$

где \underline{n}_j – число основных аппаратов на стадии j до перепрофилирования;

- ввести дополнительное ограничение

$$n_j \leq n_{*j}, \quad j=1, \dots, J, \quad (1.10)$$

где n_{*j} , число имеющихся аппаратов требуемого типа, которые могут быть использованы на стадии j перепрофилируемой ТС;

- символом YS_j обозначить множество основных размеров имеющихся аппаратов требуемого типа, которые могут быть использованы на стадии j .

Другими словами, при перепрофилировании ТС действующего производства решается точно такая же задача, что и при проектировании нового, с учетом ограничений на использование для оснащения стадий ТС только имеющегося оборудования.

Такая постановка задачи учитывает и возможность отсутствия среди имеющегося оборудования аппаратов, подходящих по типу для оснащения некоторых стадий выпуска нового продукта. В ходе решения задачи эти стадии не рассматриваются, а по окончании решения для них рассчитываются граничные значения основных размеров аппаратов при различных значениях n_j . В результате становится известно, сколько и каких аппаратов надо приобретать, изготавливать своими силами или передавать из других производств для оснащения этих стадий. Так же решается вопрос о рабочих объемах и необходимом количестве буферных емкостей, вводимых в ТС между стадиями, число основных аппаратов которых неодинаково.

Перейдем к описанию методики расчета оборудования ТС периодического действия и комбинированных, для которых характерен выпуск продукции отдельными партиями, последовательно проходящими все стадии обработки.

1.3 Расчет оборудования ТС периодического действия и комбинированных

Периодическому способу организации технологических процессов свойственны такие недостатки, как большое число вспомогательных операций, низкий коэффициент использования основного оборудования, обусловленный несогласованностью функционирования взаимодействующих аппаратурных стадий ТС. Однако периодические процессы имеют и преимущества перед непрерывными:

- относительная независимость отдельных технологических стадий, их пространственная и временная обособленность;
- возможность промежуточной, постадийной корректировки технологических параметров, и, следовательно, – управления качеством промежуточных продуктов;
- инвариантность технологических стадий относительно аппаратурного оформления, т.е. возможность реализации данной стадии в аппаратах раз-

ных типов, различающихся конструктивно, и использования одного и того же аппарата для разных стадий процесса;

- отсутствие "жестких" материальных и энергетических связей между отдельными аппаратурными стадиями;

Замена периодических процессов непрерывными не всегда оказывается целесообразной, а иногда настолько трудно реализуется практически, что от нее приходится отказаться. К причинам устойчивой тенденции к сохранению периодического способа организации технологических процессов следует отнести: непостоянство ассортимента продукции, видов сырья и реализуемых технологических процессов, отсутствие качественных технологических регламентов, экономические соображения.

В отличие от ТС непрерывного действия, оборудование любой стадии которых функционирует постоянно и реализует единственную операцию, разные аппаратурные стадии систем периодического действия и комбинированных в каждый момент времени могут быть заняты выполнением различных операций или простаивать в ожидании подачи следующей партии продукта. Такие ТС более характерны для так называемых многоассортиментных химических производств (МХП), примерами которых могут служить производства синтетических красителей и полупродуктов, добавок к полимерным материалам, химических реактивов, фармацевтических препаратов. Технологические системы МХП обычно являются многопродуктовыми, т.е. ориентированы на выпуск нескольких марок продукции в небольших объемах (до 1000 т/год). Расчет оборудования в данном случае невозможен без определения характеристик режима работы системы в целом, показателей способа обработки партий продуктов основными аппаратами ее стадий, а также способа взаимодействия аппаратов различных стадий, поэтому вначале остановимся на особенностях функционирования ТС МХП.

1.3.1 Основные процессы и оборудование многоассортиментных химических производств

Типовая технологическая схема периодического производства химических продуктов состоит из стадий подготовки сырья, химического синтеза, выделения и очистки продуктов. Примерами стадий подготовки сырья многоассортиментных химических производств (МХП) могут служить растворение, очистное фильтрование; химического синтеза – сульфирование, нитрование, diazotирование, азосочетание; выделения и очистки продуктов – кристаллизация, суспензирование, фильтрование, сушка. Практически все стадии представляют собой совокупность разнообразных технологических процессов: механических, гидромеханических, тепловых, диффузионных, химических.

Механические процессы (измельчение, классификация, смешение твердых материалов) характерны для стадий подготовки выпускных форм продуктов. Измельчение проводится с целью увеличения удельной поверхности продуктов, классификация – для обеспечения их требуемого гранулометрического состава, смешение – для приведения активности продукта в соответствие со стандартами (т.н. «установка на тип»).

Такие *гидромеханические процессы* как перемешивание, движение потоков газов и жидкостей в трубах являются составной частью большинства стадий производств малотоннажной химии. Фильтрование, как правило, образует отдельную стадию процесса выпуска продукта. или выделения продукта. Обычно фильтрованием называют выделение твердой фазы суспензии в качестве продукта. Если же речь идет об очистке жидкости (раствора) от механических примесей, то фильтрование называют *очистным*.

Тепловые процессы организуют для обеспечения температурного режима, при котором технологический процесс протекает с требуемой скоростью или достигается наибольший выход продукта. Это может быть как самостоятельная технологическая операция (нагревание или охлаждение реакционной массы до заданной температуры), так и вспомогательная, протекающая одновременно с другими процессами (отвод тепла экзотермической реакции в изотермическом процессе).

Диффузионные процессы – это процессы передачи вещества. Их движущей силой является разность концентраций в разных точках объема аппарата, а количественной характеристикой интенсивности – коэффициент диффузии. В малотоннажной химии широко распространены процессы ректификации и дистилляции, экстракции, кристаллизации, сушки.

Химические процессы – это процессы непосредственного образования целевых продуктов в результате химических реакций.

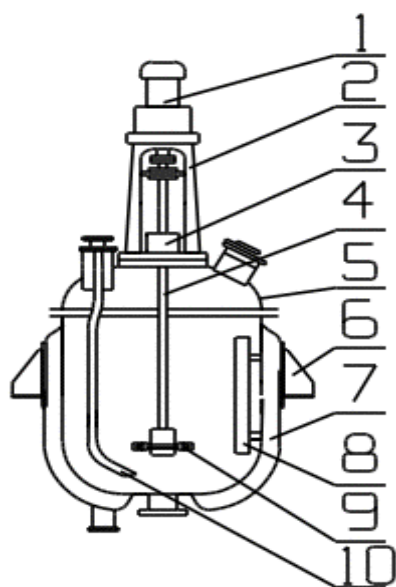


Рис. 1.5 – Емкостной аппарат
1- привод, 2 - стойка привода, 3 -уплотнение вала, 4 - вал мешалки, 5 - корпус, 6 - опора (лапа), 7 - гладкая рубашка, 8 - отражательная перегородка, 9 - мешалка, 10 - труба перекачки

Наиболее распространенный основной аппарат МХП – емкостной аппарат с механическим перемешивающим устройством и системой теплообмена (рис. 1.5). В аппаратах такого типа осуществляется 90% химических процессов, значительная доля процессов подготовки сырья и выделения продуктов. Они различаются по рабочему объему, конструкционному материалу, способам перемешивания и теплообмена, наличию или отсутствию внутренних устройств.

Конструкционный материал химического реактора в многопродуктовых системах выбирают на основе коррозионных свойств реакционных сред всех процессов, которые предполагается осуществлять в реакторе. В качестве конструкционных материалов наиболее часто применяют: углеродистую сталь; нержавеющую сталь Х18Н10Т; сталь с эмалевым покрытием; сталь, футерованную кислото- и щелочестойкой керамической плиткой; титан; Для производства продуктов, в которых лимитируется содержание примесей и требуется высокая степень очистки (химические реактивы, фармацевтические аппараты), распространены также аппараты из химически и термически стойкого стекла.

В реакторах, функционирующих в составе многоассортиментных ТС, обычно предусматривают возможность установки механических мешалок любого типа

из имеющегося стандартного набора: лопастные, якорные, рамные, пропеллерные, турбинные, – подачу сырья нескольких видов в различных агрегатных состояниях и выгрузку реакционной массы самотеком, насосом или выдавливанием сжатым воздухом, паром, инертным газом.

Для нагревания реакционной массы реакторы снабжают греющей рубашкой или (и) встроенным змеевиком, в которые подают горячую воду, насыщенный пар давлением до 0.6 МПа или высокотемпературный органический теплоноситель (ВОТ).

Охлаждение реакционной массы и отвод тепла экзотермических реакций осуществляется хладагентами, подаваемыми в рубашку и змеевик. Наиболее известными хладагентами являются артезианская или обратная вода, охлаждающие рассолы. Определяющий размер (объем) реактора устанавливают на основании материального баланса реакции, а необходимую поверхность теплообмена – по уравнениям теплового баланса. Выполнив расчет, выбирают реактор из каталога стандартного оборудования.

Например, для осуществления стадии химического синтеза в агрессивных средах при температурах от -20 до 200 °С и давлении до 1.6 МПа можно использовать эмалированный емкостный аппарат, выбираемый из следующего ряда размеров: $V = 0.01; 0.025; 0.04; 0.063; 0.1; 0.16; 0.4; 0.63; 1.0; 1.6; 2.5; 3.2; 4.0; 6.3; 10.0; 16.0; 20.0; 25.0; 40.0 \text{ м}^3$, – или емкостной аппарат из стали Х18Н10Т, для которого определен следующий ряд размеров: $V = 0.01; 0.025; 0.04; 0.063; 0.1; 0.16; 0.25; 0.4; 0.63; 1.0; 2.0; 3.2; 5.0; 6.3; 10.0; 16.0; 25.0; 32.0; 50.0 \text{ м}^3$.

В 80-х–90-х годах XX века большое внимание уделялось разработке конструкций комбинированных аппаратов многофункционального назначения, в которых можно одновременно или последовательно проводить различные процессы (химический синтез и выделение продукта, фильтрование и сушку). Целью совмещения технологических процессов в одном аппарате было сокращение числа аппаратурных стадий получения продукта и, как следствие, – снижение материалоемкости аппаратурного оформления (АО) ТС и энергетических затрат, уменьшение количества транспортных операций и потерь промежуточных продуктов.

В МХП преобладают технологические аппараты периодического действия (в периодическом режиме работает до 90-95% оборудования). Функционирование аппарата периодического действия представляет собой циклический процесс: заполнение, обработка массы, опорожнение, простой в ожидании заполнения и т.д. Процесс функционирования аппаратов периодического действия изображают в виде графиков, называемых диаграммами Ганта (рис. 1.6).

Упорядоченная последовательность технологических и организационных мероприятий, имеющих конечную продолжительность, образует технологический цикл аппарата, продолжительность которого равна сумме длительностей операций:

$$t_{ij} = o_{ij} + e_{ij} + p_{i,j-1} + \tau_{ij} + p_{ij} + x_{ij}, \quad (1.11)$$

где i – номер продукта, выпускаемого многопродуктовой ТС,

j – номер аппаратурной стадии ТС.

Технологические операции в аппарате периодического действия подразделяются на основные, в результате которых образуется новое вещество или изменяется состав и агрегатное состояние системы, и вспомогательные (загрузка, вы-

грузка, простой). Основные и вспомогательные операции разделены во времени, т.е. основной технологический процесс в аппарате периодического действия прерывается вспомогательными операциями.

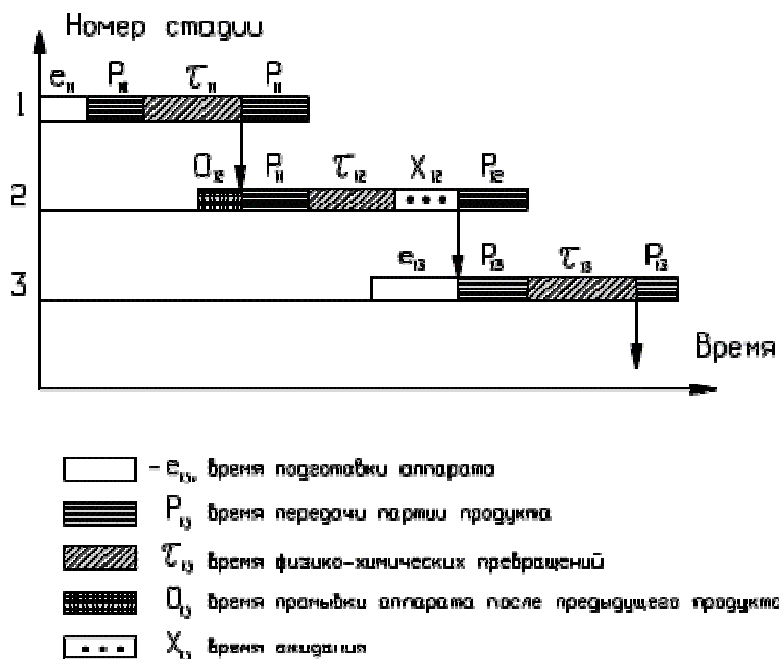


Рис. 1.6 – Диаграммы Гантта для стадий ТС периодического действия

1.3.2 Классификация технологических систем. Варианты структуры.

По числу выпускаемых продуктов ТС периодического действия подразделяют на однопродуктовые, называемые также индивидуальными, и многопродуктовые, а по числу стадий – на одностадийные и многостадийные. Многопродуктовые системы, в свою очередь, делятся на совмещенные и гибкие.

Однопродуктовым (индивидуальным) ТС соответствует единственный многостадийный технологический процесс, в результате которого может быть получен один целевой продукт. Многопродуктовые системы предназначены для выпуска множества последовательно или одновременно производимых продуктов.

Понятие «структура ТС» обозначает систему связей между основными аппаратами ее аппаратурных стадий по материальным потокам. Жесткая структура характеризуется неизменными связями между аппаратурными стадиями, в том числе и при переходе на производство другого продукта. Частично гибкая структура характеризуется жесткими связями между аппаратурными стадиями, которые могут меняться при переходе на производство другого продукта. В случае гибкой структуры коммутация аппаратов может меняться как по окончании, так и во время выпуска каждого из продуктов.

Гибкая технологическая система (ГТС) имеет переменную (перестраиваемую) технологическую структуру. При переходе с выпуска одного продукта на другой происходит изменение ее структуры, т.е. для нового продукта технологический маршрут, в общем случае, изменяется. Свойство ГТС изменять структуру в процессе функционирования носит название структурной гибкости. Технологической гибкостью ГТС называется возможность изменения параметров режима

работы оборудования (температуры, давления, интенсивности перемешивания) при производстве разных продуктов ассортимента на одинаковом оборудовании. Свойством конструктивной гибкости обладают ТС, имеющие в своем составе аппараты, конструкцию которых можно быстро изменять без значительных затрат труда. Таким образом, ГТС – это система, обладающая в большей или меньшей степени свойствами структурной, технологической и конструктивной гибкости.

Различают следующие типы технологической структуры: последовательная, параллельная, последовательно-параллельная, параллельно-последовательная, комбинированная, содержащая байпасы и рециклы (рис. 1.7).

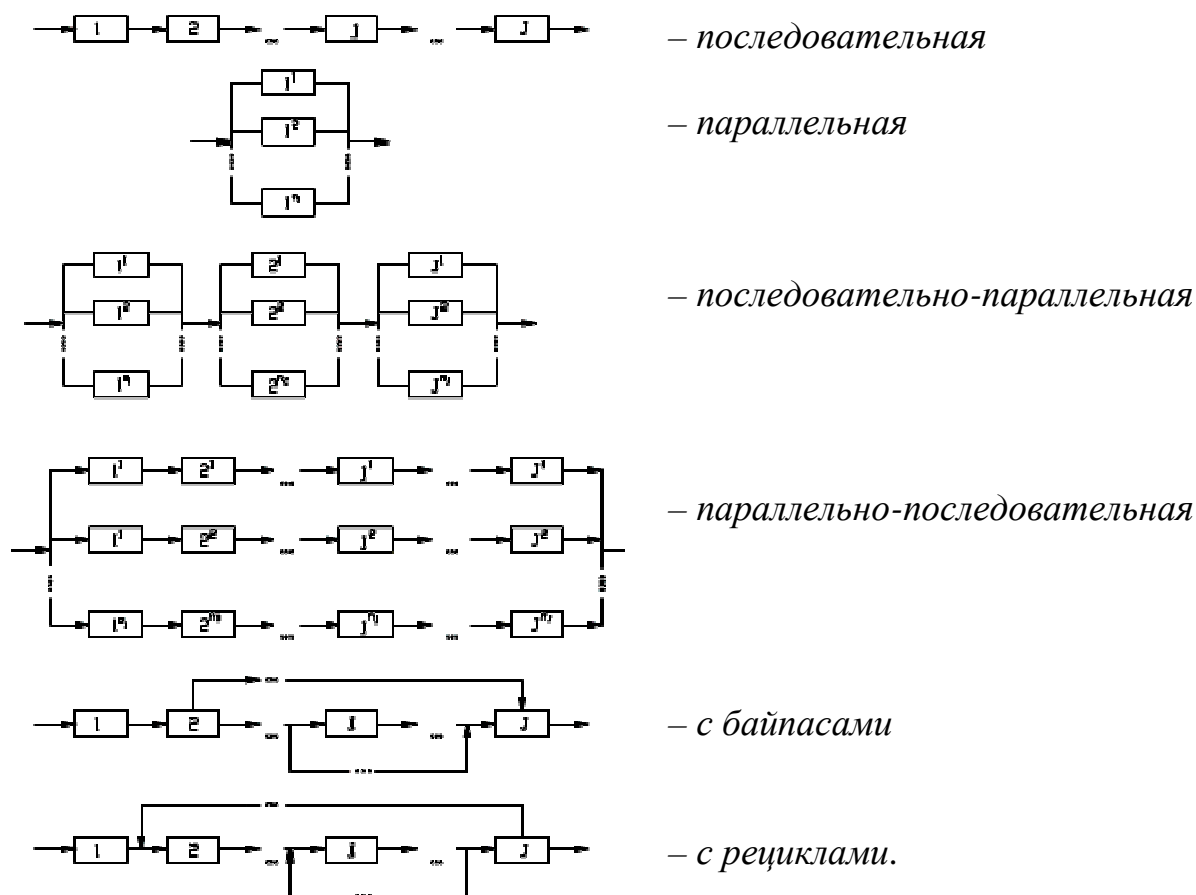


Рис. 1.7 – Варианты структуры ТС периодического действия

n_j – число основных аппаратов стадии j

На рис. 1.8 представлены диаграммы Гантта, характеризующие возможные режимы функционирования многопродуктовых систем в координатах "время-номер продукта". Отрезки прямых на графиках соответствуют времени, затрачиваемому на производство продуктов, а их взаимное расположение – режиму выпуска продуктов.

Наибольшее распространение в МХП получили последовательная и параллельно-последовательная структуры. В системе с последовательной структурой каждая аппаратная стадия системы образована единственным аппаратом, а аппараты соединены последовательно. В параллельно-последовательной структуре последовательно соединенные аппаратные стадии представлены набором параллельно соединенных аппаратов. Аппаратурные стадии взаимодействуют либо

непосредственно, либо через промежуточные емкости, обеспечивающие согласование режимов работы их основных аппаратов.

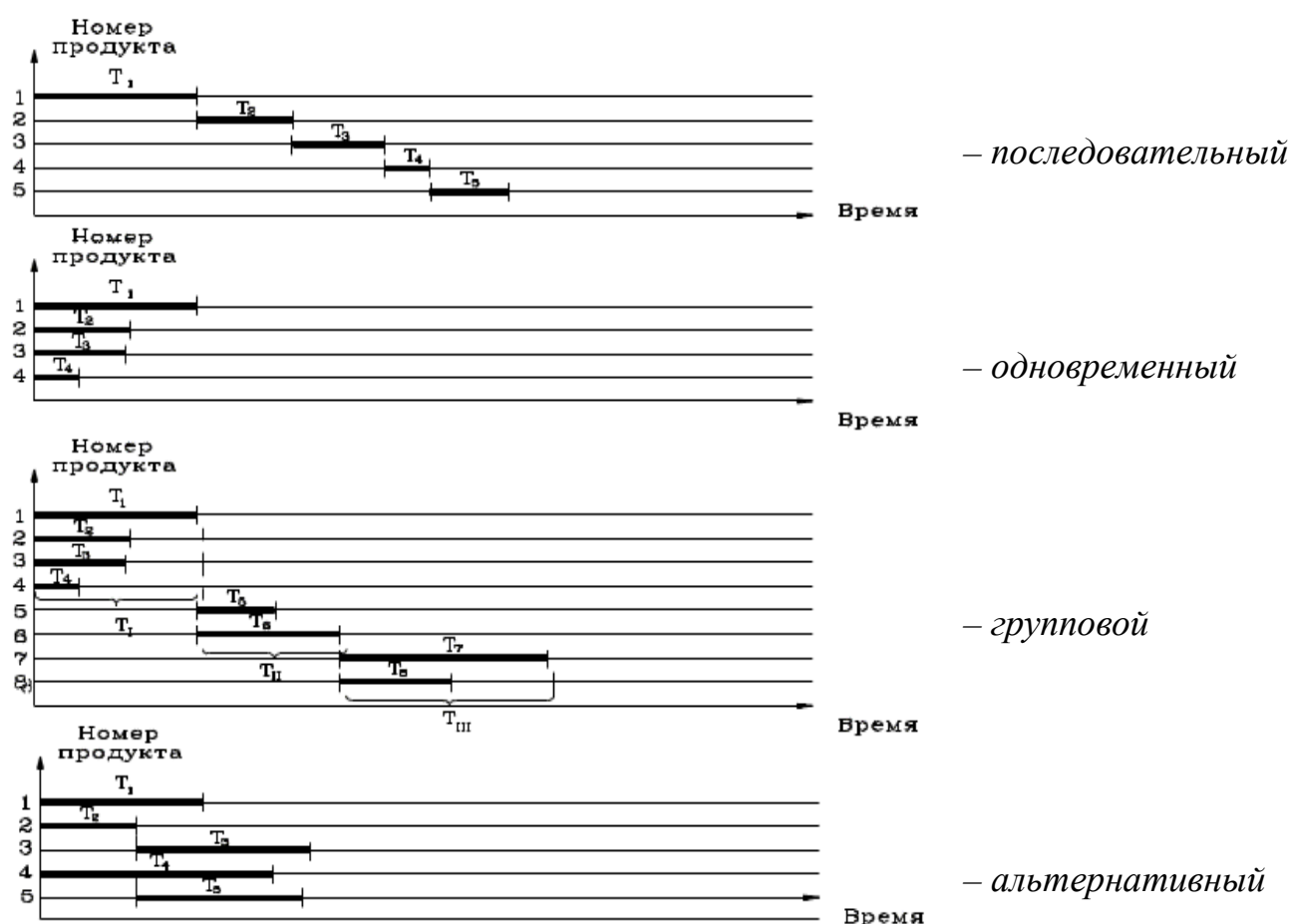


Рис. 1.8 – Способы организации выпуска продуктов

При полном совпадении технологических маршрутов и последовательной структуре ТС практически единственным способом организации является последовательный выпуск продуктов ассортимента.

Одновременный выпуск всех видов продукции производства обычно соответствует независимой работе нескольких индивидуальных ТС.

Неполная совмещенность технологических маршрутов позволяет организовать выпуск продуктов последовательно сменяющимися группами. Одновременно могут производиться продукты, для которых либо не используется одинаковое оборудование, либо на аппаратурных стадиях установлены несколько основных аппаратов. Совместимые группы продуктов могут формироваться заранее, и выпуск следующей группы продуктов начинается только после окончания выпуска всех продуктов предыдущей группы.

Альтернативный режим предполагает формирование совместимых групп в момент окончания выпуска одного из продуктов предыдущей группы. Такой режим обеспечивает наиболее полную загрузку оборудования гибких систем.

1.3.3 Взаимодействие основных аппаратов стадий ТС

АО ТС периодического действия во многом определяется режимом ее функционирования, поэтому процесс выбора АО ТС МХП начинается с построения диаграммы Гантта, характеризующей режим работы основного оборудования ее стадий. Вначале рассмотрим режимы функционирования индивидуальной ТС, состоящей из двух аппаратурных стадий.

Предположим, что обе рассматриваемые стадии оснащены аппаратами периодического действия. Диаграмма их взаимодействия для случая, когда на каждой стадии установлен один основной аппарат (рис. 1.9а), представлена на рис. 1.9б.

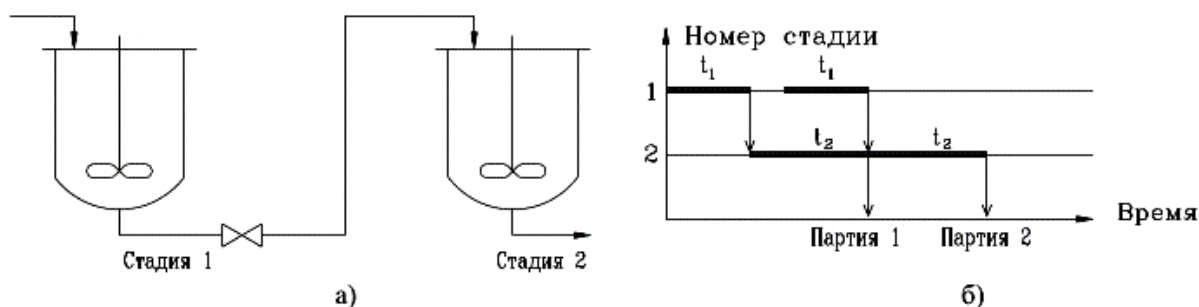


Рис. 1.9 – Диаграмма взаимодействия стадий ТС с одним аппаратом периодического действия

Если на одной из стадий установлены два или более идентичных основных аппарата (рис. 1.10а), то они могут работать либо синхронно, обрабатывая равные доли поступающей на стадию партии материалов (рис. 1.10б), либо со сдвигом по времени, принимая и обрабатывая партии целиком (рис. 1.10в).

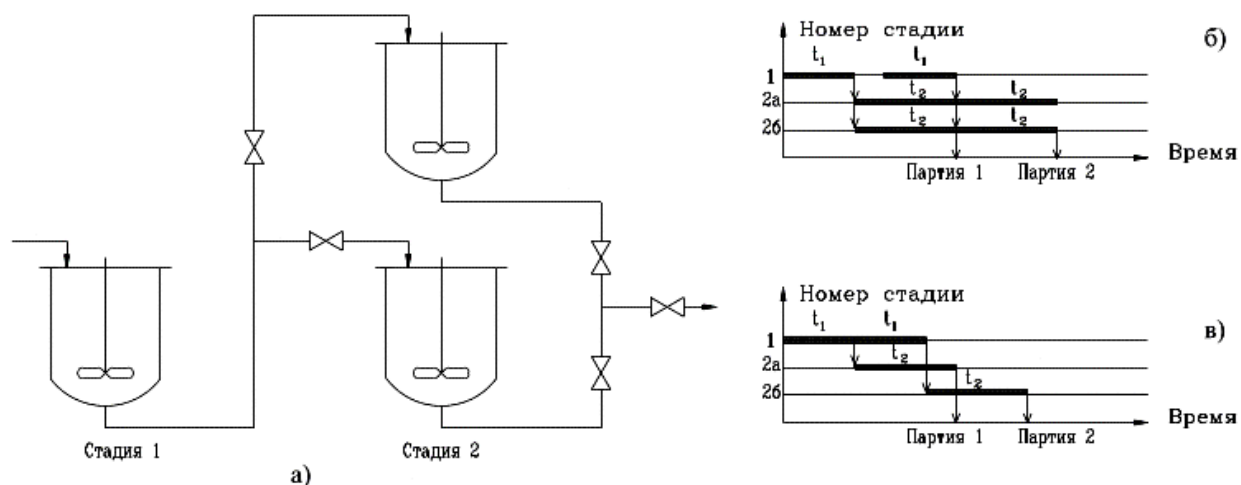


Рис. 1.10 – Диаграммы взаимодействия стадий ТС при двух аппаратах на одной из них

Из рис. 1.10б,в видно, что при синхронной работе аппаратов стадии 2 на обработку двух партий продукта требуется большее время, но в этом случае можно установить аппараты меньшего размера, т.к. они обрабатывают только половину партии. Второй режим (рис. 1.10в) более популярен на практике, т.к. отдельная обработка долей одной и той же партии с их последующим объединением допускается в малотоннажных производствах сравнительно редко.

Пусть на одной из стадий (рис. 1.11) установлен аппарат непрерывного действия (барабанный вакуум-фильтр). В этой ситуации аппарат стадии 1 будет использоваться как по основному назначению, так и в качестве емкости, подающей суспензию на фильтр, т.е. аппарат стадии 1 опорожняется только по окончании фильтрования и длительность пребывания партии массы в нем составит $t_1 + t_2$.

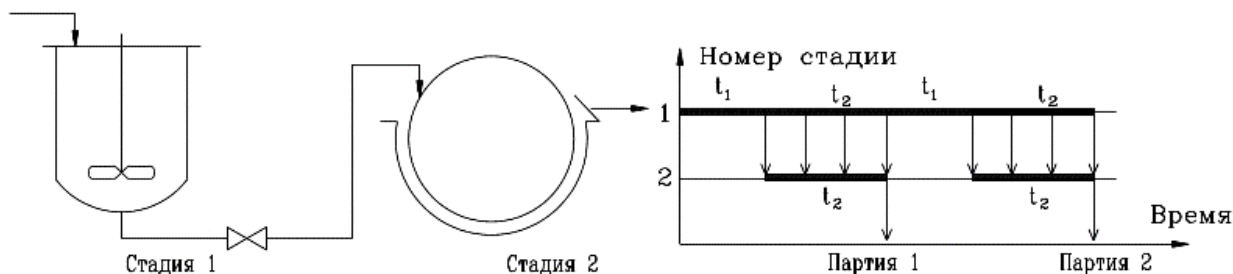


Рис. 1.11 – Одна из взаимодействующих стадий ТС оснащена аппаратом непрерывного действия

Такой способ взаимодействия стадий с основными аппаратами периодического и непрерывного действия не всегда рационален, т.к. увеличение продолжительности пребывания партии массы на стадии 1 может потребовать установки дополнительного аппарата. В этих случаях между стадиями вводят промежуточные емкости, используемые в качестве буфера между аппаратами периодического и непрерывного действия (рис. 1.12).

При установке на стадии двух или более аппаратов непрерывного действия режим синхронной обработки равных долей партии используется гораздо чаще, чем для аппаратов периодического действия. При этом длительность обработки партии уменьшается пропорционально числу аппаратов.

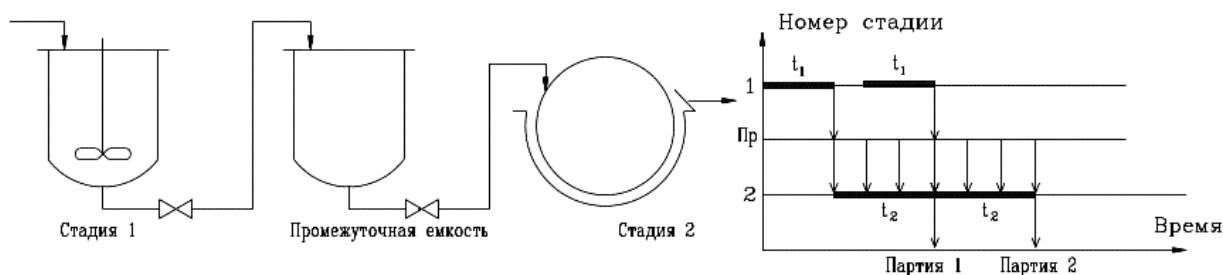
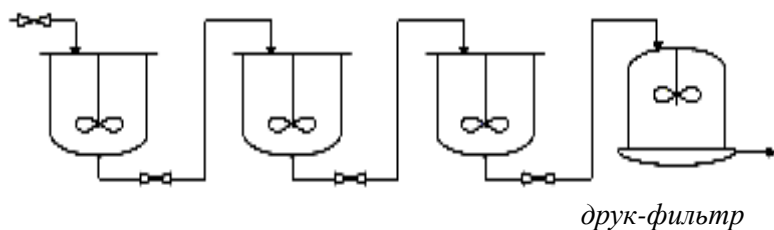


Рис. 1.12 – Введение между стадиями промежуточной емкости

Взаимодействие двух стадий с основными аппаратами непрерывного действия в большинстве случаев осуществляется через буферные емкости, т.к. их производительности по обрабатываемой массе редко бывают одинаковыми: либо аппараты предыдущей стадии не успевают подавать массу, либо аппараты следующей не успевают обрабатывать поступающую массу. Примеры взаимодействия различных основных аппаратов стадий ТС периодического действия приведены в приложении А.

1.3.4 Характеристики режима функционирования ТС МХП

Технологическая структура и аппаратный состав ТС МХП зависят от режима работы аппаратов ее стадий. Рассмотрим характеристики режима функционирования ТС на примере индивидуальной системы, состоящей из 4-х аппаратных стадий с единственным основным аппаратом (рис. 1.13). Цикл работы системы может быть организован двумя способами:



Ст. 1: $t_1=5$ ч. Ст. 2: $t_2=3$ ч. Ст. 3: $t_3=7$ ч. Ст. 4: $t_4=4$ ч.

Рис. 1.13 – Пример индивидуальной ТС

1) без перекрытия технологических циклов переработки партий на стадиях (процесс выпуска следующей партии продукта начинается по окончании выпуска предыдущей, см. рис. 1.14);



Рис. 1.14 – Режим без перекрытия циклов работы ТС

2) с перекрытием технологических циклов обработки партий на стадиях (процесс выпуска следующей партии начинается еще до окончания выпуска предыдущей, см. рис. 1.15).

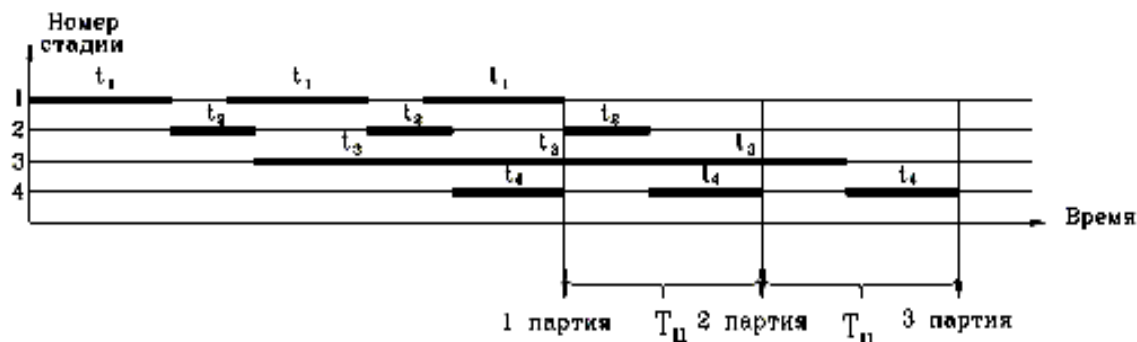


Рис. 1.15 – Режим с перекрытием циклов работы ТС

В первом случае продолжительность периода между выпуском двух последовательных партий продукта, называемая длительностью цикла ТС, равна сумме длительностей переработки партии на каждой из стадий:

$$T_{\text{ц}} = \sum_{j=1}^4 t_j = 5 + 3 + 7 + 4 = 19 \text{ ч.}$$

Как видно из рис. 1.14, оборудование ТС используется неэффективно и этот способ организации рабочего цикла системы, как правило, является вынужденным (токсичные, взрывоопасные производства). При работе ТС в режиме перекрытия технологических циклов первая партия продукта также будет выпущена через 19 часов, а каждая следующая – с промежутком, равным максимальной длительности обработки партии массы на стадии т.е. $T_{\text{ц}} = t_3 = 7$ часов.

В случаях, когда на некоторых стадиях ТС установлены несколько основных аппаратов, длительность цикла зависит от выбранного режима их функционирования и взаимодействия. Для каждой стадии системы вводится понятие минимального периода между выпуском двух последовательных партий продукта p_j , значение которого определяется следующим образом:

- 1) на стадии j установлен один основной аппарат $p_j = t_j$;
- 2) на стадии j установлены n_j идентичных аппаратов и они синхронно обрабатывают равные доли партии: а) для емкостных аппаратов периодического действия $p_j = t_j$ без учета времени транспорта перерабатываемой массы и $p_j = t_j + (n_j - 1) \cdot t_{\text{Т}}$ с его учетом, где $t_{\text{Т}}$ - время транспорта $1/n_j$ доли партии; б) для фильтровального, сушильного оборудования как периодического, так и непрерывного действия (кроме фильтр-прессов, выделяющих твердую фазу суспензии) $p_j = t_j/n_j$; в) для фильтр-прессов, выделяющих твердую фазу суспензии, $p_j = t_j$ (каждый следующий фильтр включается после заполнения предыдущего);
- 3) на стадии j установлены n_j аппаратов и они последовательно принимают партии продукта целиком с равномерным запаздыванием $p_j = t_j/n_j$ см. рис. 1.16 (при $n_2=3$ третья партия будет выпущена через $2 \cdot p_2 + t_2$, четвертая – через $3 \cdot p_2 + t_2 = 2 \cdot t_2$, т.е. $p_2 = t_2/n_2$);

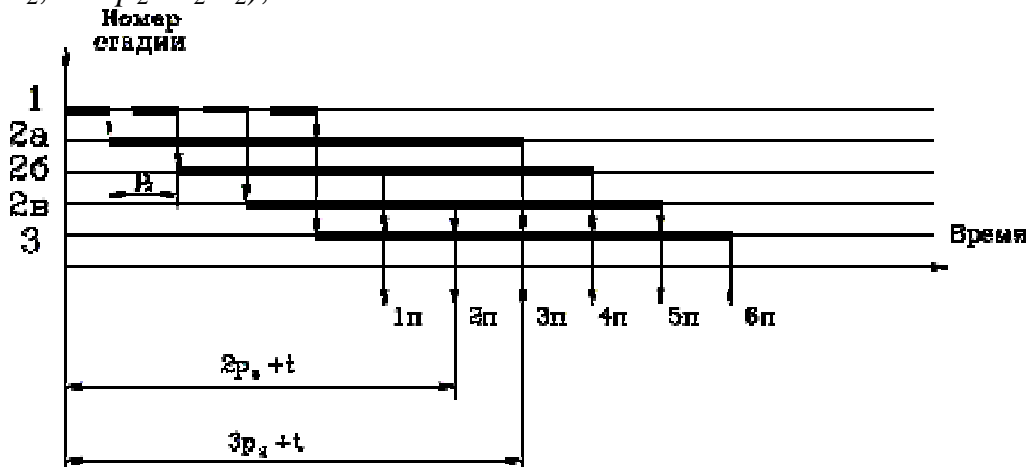


Рис. 1.16 – Диаграмма последовательной работы аппаратов стадии 2

При непосредственном соединении стадий с основными аппаратами непрерывного и периодического действия величины t_j для последних увеличиваются на время подачи или приема массы из непрерывнодействующих аппаратов:

$t_j = t_j + h_{j\pm 1} \cdot t_{j\pm 1}$, где ($h_{j\pm 1}$ – доля основных операций в общей продолжительности переработки партии на стадии $j\pm 1$). Для промежуточных емкостей, устанавливаем

мых между такими стадиями, $t_{п} = h_{j\pm 1} \cdot t_{j\pm 1}$, а величины $p_{п}$ вычисляются согласно п.п.1)-3) в зависимости от количества емкостей и режима их работы.

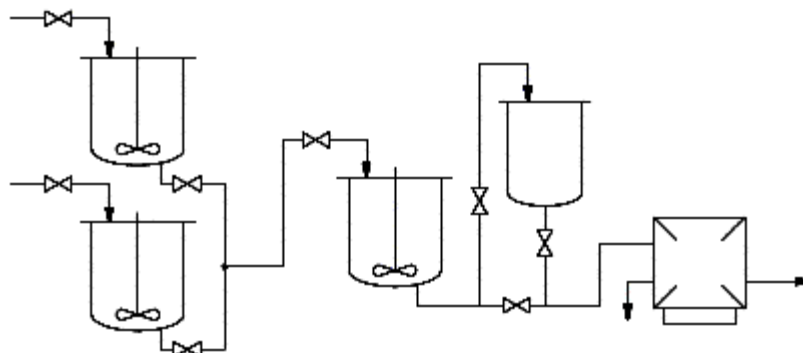
Длительность цикла ТС определяется как

$$T_{ц} = \max_{j=1, \dots, J} \{p_j\}, \quad (1.12)$$

где J – число стадий системы.

Стадия, для которой выполняется равенство $p_j = T_{ц}$ называется лимитирующей по времени.

Пример: диаграмма функционирования фрагмента индивидуальной ТС, схема которого представлена на рис. 1.17



Ст. 1: $t_1=8$ ч. $n_1=2$ Ст. 2: $t_2=2$ ч. $n_2=1$ промеж. емк. $n_{п}=1$ Ст. 3: $t_3=5$ ч. $n_3=1, h_3=0.8$

Рис. 1.17 – Фрагмент индивидуальной ТС

а) без промежуточной емкости, аппараты стадии 1 работают синхронно (рис. 1.18): $p_1 = 8$ ч., $p_2 = 2 + 5 \cdot 0.8 = 6$ ч., $p_3 = 5$ ч., т.е. $T_{ц} = p_1 = 8$ ч.;

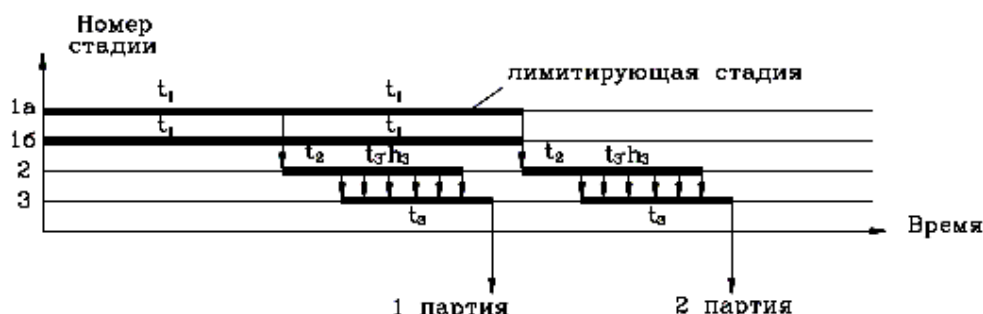


Рис. 1.18 – Синхронная работа аппаратов ст. 1, промежуточная емкость отключена

б) с промежуточной емкостью, аппараты стадии 1 работают последовательно (рис. 1.19): $p_1 = 4$ ч., $p_2 = 2$ ч., $p_3 = 5$ ч., т.е. $T_{ц} = p_3 = 5$ ч.

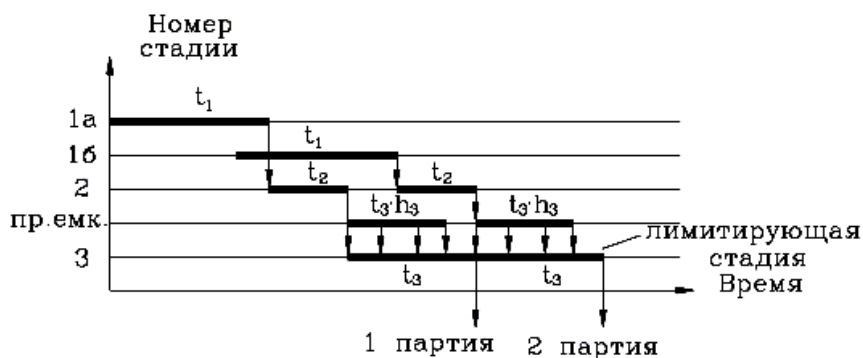


Рис. 1.19 – Последовательная работа аппаратов ст. 1, промежуточная емкость включена

Рекомендуемая последовательность построения диаграммы Гантта функционирования индивидуальной ТС:

1) выбрать режим функционирования основных аппаратов всех стадий системы и способы их взаимодействия, определить для каждой из них минимальный период между выпуском двух последовательных партий продукта p_j ;

2) определить лимитирующую по времени стадию ТС и длительность цикла обработки партий продукта $T_{ц}$;

3) изобразить на графике процесс переработки первой партии продукта аппаратами всех стадий системы;

4) изображение процесса переработки всех последующих партий начинать с лимитирующей стадии (графики работы всех ее аппаратов должны представлять собой сплошные линии).

Длительность цикла ТС является важной характеристикой режима ее функционирования, во многом определяющей необходимые размеры основных аппаратов стадий системы. При запланированном объеме выпуска продукта Q и продолжительности его выпуска T , величина $T_{ц}$, соответствующая выбранному режиму функционирования и взаимодействия оборудования стадий ТС, определяет число выпускаемых партий продукта:

$$b = \frac{T - \sum_{j=1}^J t_j}{T_{ц}} + 1 \quad (1.13)$$

и размер каждой из них $w = Q/b$. Очевидно, что основные размеры аппаратов стадий системы должны обеспечивать прием и переработку партий выбранного размера. Если же при заданных значениях Q и T , найденном значении $T_{ц}$ размер партии оказывается слишком велик для аппаратов каких либо стадий, то необходимо уменьшить величину $T_{ц}$, увеличив таким образом число партий и уменьшив их размер. Например, если для фрагмента ТС, изображенного на рис. 1.17, задано: $T=4000$ ч., $Q=80$ т, – то в случае а) $b = (4000 - 15)/8 + 1 = 499$, $w = 80000/499 \approx 160$ кг, а в случае б) $b = (4000 - 15)/5 + 1 = 798$, $w = 80000/798 \approx 100$ кг.

Чем меньше величина $T_{ц}$, тем меньше простой оборудования системы, однако и тем больше основных аппаратов все более малого размера приходится устанавливать на ее стадиях, тем сложнее ее обслуживание. На практике чаще всего стремятся устанавливать на стадиях ТС минимум основных аппаратов, который позволяет выпустить требуемое количество продукта в установленный срок.

С длительностью цикла тесно связана еще одна характеристика режима ее функционирования – эффективность использования оборудования. Для стадии j : $e_j = p_j/T_{ц}$, а для системы в целом

$$E = \frac{\sum_{j=1}^J e_j}{J} \quad (1.14)$$

Для фрагмента ТС из рассмотренного примера в случае а) $e_1 = 1$, $e_2 = 0.75$, $e_3 = 0.63$, $E = 2.38/3 \approx 0.79$, а в случае б) – $e_1 = 0.8$, $e_2 = 0.4$, $e_{п} = 0.8$, $e_3 = 1$, $E = 3/4 = 0.75$. Примеры определения характеристик режимов функционирования

индивидуальных ТС и построения соответствующих диаграмм Гантта приведены в приложении Б.

Перейдем к рассмотрению особенностей функционирования многопродуктовых ХТС и способов определения основных характеристик режима их работы.

1.3.5 Режим функционирования многопродуктовых ТС МХП

В качестве примера многопродуктовой ТС рассмотрим систему с неполным совмещением аппаратных стадий производства двух продуктов (рис. 1.20). В процессе переработки партий первого продукта участвуют аппараты стадий 1, 2, 4, 5, второго - стадий 2, 3, 5).

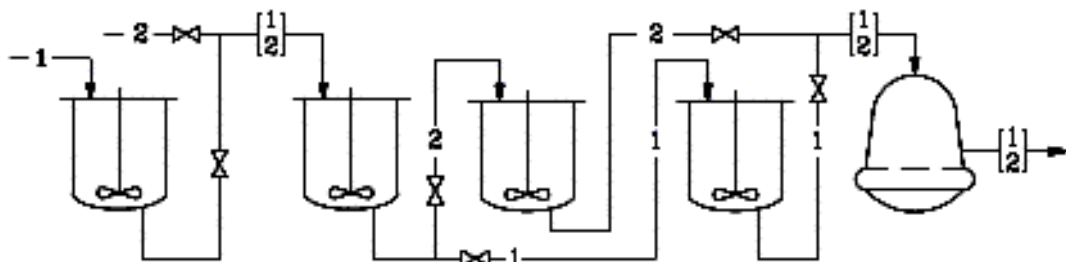


Рис. 1.20 – Пример ТС, выпускающей два продукта

См. 1: $t_{11}=3$ ч. $t_{21}=0$ См. 2: $t_{12}=4$ ч. $t_{22}=4$ ч. См. 3: $t_{13}=0$ См. 4: $t_{14}=7$ ч. $t_{24}=0$ См. 5: $t_{15}=6$ ч. $t_{25}=5$ ч.

Ограничимся рассмотрением режима работы системы с перекрытием технологических циклов обработки партий продуктов на стадиях, реализуемого во всех случаях, когда это позволяет технология производства продуктов.

Длительность цикла ТС определяется по каждому из продуктов:

$$T_{ци} = \max_{j=1, \dots, J} \{p_{ij}\}, i = 1, \dots, I, \quad (1.15)$$

где I – число продуктов, выпускаемых ТС;

p_{ij} – минимальный период между выпуском двух последовательных партий i -го продукта на j -й стадии, определяемый в соответствии с выбранным режимом работы ее аппаратов и их взаимодействия с аппаратами соседних стадий.

Для рассматриваемого примера значения p_{ij} совпадают с t_{ij} , следовательно $T_{ци1}=t_{14}=7$ ч., $T_{ци2}=t_{23}=6$ ч. Диаграмма Гантта функционирования оборудования системы при выпуске каждого продукта строится по тем же правилам, что и для индивидуальной ТС (рис. 1.21).

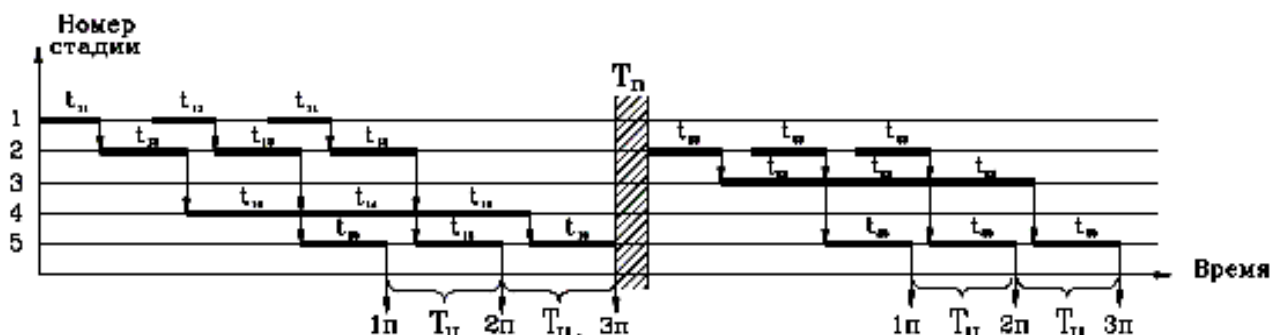


Рис. 1.21 – Диаграмма последовательного выпуска двух продуктов

Промежуток времени $T_{\text{п}}$ на рисунке - это время, необходимое для промывки и переналадки оборудования системы на выпуск очередного продукта.

Эффективность функционирования основной аппаратуры каждой из стадий многопродуктовой ТС $e_{ij} = p_{ij}/T_{\text{ци}}$ (если j -я стадия не участвует в производстве i -го продукта, то $e_{ij}=0$). Для системы в целом за период выпуска i -го продукта $E_i = \sum_{j=1}^J e_{ij} / J$, а за период выпуска всех продуктов фиксированного ассортимента

$$E = \frac{\sum_{i=1}^I E_i \cdot T_i}{T}, \quad (1.16)$$

где T_i – продолжительность выпуска i -го продукта в плановом объеме Q_i ,

T – время, отведенное для выпуска всех продуктов заданного ассортимента в плановых объемах (без учета продолжительностей перехода с выпуска одного продукта на другой).

Для ТС, схема которой изображена на рис. 1.20:

$$e_{11} = 0.43, e_{12} = 0.57, e_{13} = 0, e_{14} = 1, e_{15} = 0.86, E_1 = 2.86/5 = 0.57;$$

$$e_{21} = 0, e_{22} = 0.67, e_{23} = 1, e_{24} = 0, e_{25} = 0.83, E_2 = 2.5/5 = 0.5.$$

Продолжительность производства i -го продукта в количестве Q_i на многопродуктовой ТС зависит от числа партий b_i :

$$T_i = \sum_{j=1}^J t_{ij} + (b_i - 1) \cdot T_{\text{ци}} \quad (1.17)$$

Число партий определяется выбранным размером w_i каждой из них:

$$b_i = \frac{Q_i}{w_i}. \quad (1.18)$$

Размеры партий продуктов выпускаемого ассортимента необходимо подбирать так, чтобы их можно было перерабатывать в одних и тех же основных аппаратах стадий, участвующих в выпуске нескольких продуктов (ст. 2, ст. 5 на рис. 1.20).

Кроме того, необходимо обеспечить выполнение условия выпуска всех продуктов в заданных объемах за отведенное время:

$$\sum_{i=1}^I T_i \leq T. \quad (1.19)$$

Так, если в рассматриваемом примере принять

$$Q_1 = 70 \text{ т}, Q_2 = 60 \text{ т}, T = 6500 \text{ ч.}, w_1 = 100 \text{ кг}, w_2 = 150 \text{ кг},$$

$$\text{то получим: } b_1 = 70000/100 = 700, b_2 = 60000/150 = 400, T_1 = 20 + 699 \cdot 7 = 4913 \text{ ч.},$$

$$T_2 = 15 + 399 \cdot 6 = 2409 \text{ ч.}, T = 4913 + 2409 = 7322 \text{ ч.} > 6500 \text{ ч.}$$

Следовательно, надо либо увеличить размеры партий продуктов (если позволят размеры основных аппаратов стадий ТС), либо уменьшить длительности циклов выпуска партий продуктов.

Определение характеристик функционирования многопродуктовой ТС – значительно более сложная задача, чем индивидуальной. С одной стороны, необходимо обеспечить условия переработки партий всех продуктов в одних и тех же аппаратах, с другой – не превысить заданный срок выпуска продуктов в требу-

мых объемах. Еще один пример определения характеристик режима функционирования многопродуктовой ТС приведен в приложении В.

В случае гибкой ТС ситуация усложняется еще больше. Рассмотрим в качестве примера ТС, состоящую из пяти стадий и выпускающую 3 продукта, причем партии 1-го могут обрабатываться в аппаратах ст. 1, ст. 2, ст. 3 или ст. 1 ст. 4, ст. 5, 2-го – ст. 4 и ст. 5, а для производства 3-го продукта необходимы аппараты ст. 2 и ст. 3 (рис. 1.22).

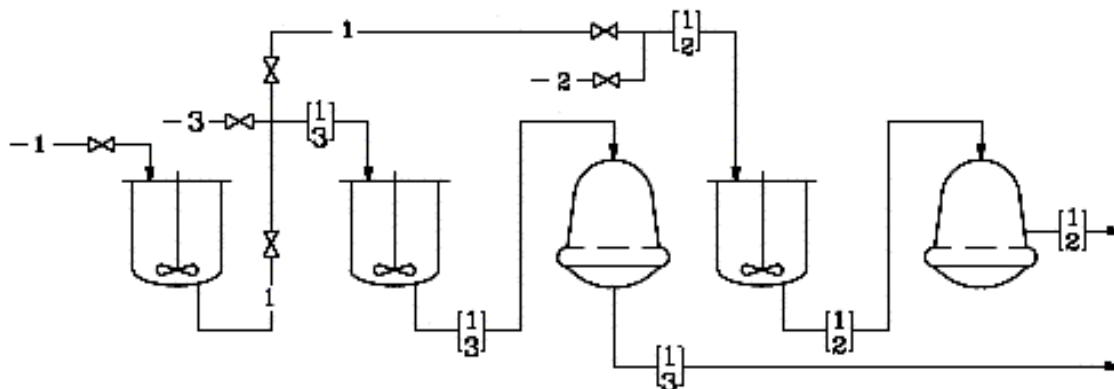


Рис. 1.22 – Пример гибкой ТС

Ст. 1: $t_{11}=3$ ч. Ст. 2: $t_{12}=7$ ч. Ст. 3: $t_{13}=5$ ч. Ст. 4: $t_{14}=7$ ч. Ст. 5: $t_{15}=5$ ч.
 $t_{21}=0$ $t_{22}=0$ $t_{23}=0$ $t_{24}=6$ ч. $t_{25}=3$ ч.
 $t_{31}=0$ $t_{32}=4$ ч. $t_{33}=6$ ч. $t_{34}=0$ $t_{35}=0$

В этом случае продукты 1 и 2, 1 и 3, 2 и 3 могут выпускаться одновременно. Число и состав групп одновременно выпускаемых продуктов ГТС зависит от плановых объемов их выпуска и возможностей варьирования характеристик режима функционирования системы. Пусть для рассматриваемой ТС задано: $Q_1=100$ т, $Q_2=40$ т, $Q_3=70$ т и продукты разделены на две группы: первую образуют продукты 1 и 2, вторую - продукты 1 и 3. После окончания выпуска 2-го продукта схема переналаживается: партии 1-го продукта обходят стадии 2, 3 и перерабатываются на стадиях 1, 4, 5. Для продуктов 1-й группы $T_{ц1} = t_{12} = 7$ ч., $T_{ц2} = t_{24} = 6$ ч. Для продуктов 2-й группы $T_{ц1} = t_{14} = 7$ ч., $T_{ц2} = t_{33} = 6$ ч.

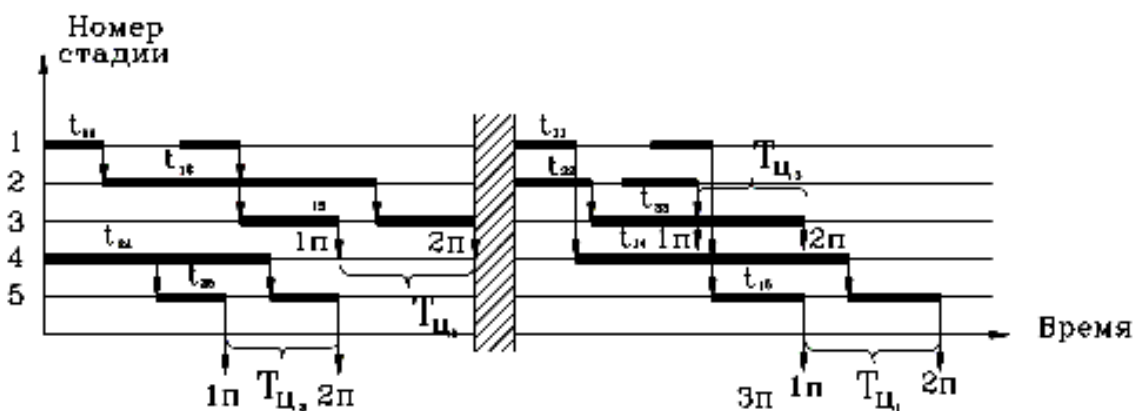


Рис. 1.23 – Диаграмма функционирования гибкой ТС

Режим переработки партий 1-го продукта после переналадки системы в данном случае не изменится, но в ТС с несколькими аппаратами на стадиях и

промежуточными емкостями изменение режимов переработки партий одного и того же продукта в различных группах возможно, а иногда и необходимо. Диаграмма Ганта функционирования оборудования системы в данном случае имеет следующий вид (рис. 1.23). В течение промежутка T_n производится изменение структуры системы, промывка аппаратов стадий 2, 3, 4, 5.

Пусть плановая продолжительность выпуска продуктов $T = 3620$ ч., а размеры партий продуктов равны $w_1=200$ кг, $w_2=150$ кг, $w_3=210$ кг. Выбранный способ выпуска продукции должен обеспечивать выполнение неравенств $T_1 \leq T$ и $T_2+T_3 \leq T$. Проверим, выполняются ли они.

Число партий 2-го продукта $b_2 = 40000/150 = 267$, а продолжительность их выпуска составит $T_2 = 9 + 266 \cdot 6 = 1605$ ч. За это время будет выпущено $b_1' = (1605 - 15)/7 = 288$ партий продукта 1 размером 200 кг, т.е. совокупный выпуск этого продукта составит $0.2 \cdot 288 = 45.6$ т.

Число партий 3-го продукта $b_3 = 70000/210 = 333$ будет выпущено за $T_3 = 10 + 332 \cdot 6 = 2007$ ч., а $b_1'' = (100000 - 45600)/200 = 273$ оставшихся партии 1-го продукта – за $T_1'' = 15 + 272 \cdot 7 = 1929$ ч. Таким образом, продолжительность выпуска 1-го продукта составит $T_2 + T_1'' = 3534$ ч., а суммарная продолжительность 2-го и 3-го $T_2 + T_3 = 3612$ ч., т.е. оба неравенства выполняются.

Для гибкой ТС вводится понятие средней эффективности функционирования оборудования стадий системы: вначале для каждой из них вычисляются значения $e_{ij} = p_{ij}/T_{ци}$, а затем полученные значения усредняются с учетом продолжительности выпуска продуктов. Например, для стадии 5 $e_{15} = 0.7$, $e_{25} = 0.5$, $E_5 = (0.7 \cdot 1929 + 0.5 \cdot 1605)/3534 = 0.6$. Эффективность функционирования оборудования системы в целом вычисляется как среднее арифметическое значений $E_j, j = 1, \dots, J$.

1.3.6 Расчет оборудования индивидуальной ТС

Задача расчета оборудования индивидуальной ТС – это определение числа и основных размеров серийных аппаратов выбранных типов и конструкции, необходимых для выпуска единственного продукта в требуемом объеме за отведенное время.

Исходные данные для расчета оборудования индивидуальной ТС:

- J – число аппаратурных стадий в системе;
- $x_j, j=1,2,\dots,J$ – тип основного аппарата каждой стадии, например, 0 – емкостной аппарат; 1 – фильтр-пресс, выделяющий твердую фазу суспензии (ФПТ); 2 – роторная вакуумная сушилка (РВС); 3 – фильтры и сушилки других типов;
- $VS_j = \{V_j^1, V_j^2, \dots, V_j^{k_j}\}$ – совокупность типоразмеров серийных аппаратов, пригодных для оснащения каждой стадии;
- Q (т) – плановый объем выпуска продукта ;
- T (ч.) – фонд рабочего времени, отведенный на выпуск продукта ;
- $g_j, j=1,2,\dots,J$ (кг/т, м³/т) – материальные индексы стадий (для ФПТ и РВС два индекса: объемный – v_j и массовый – m_j);
- a_j , если $x_j > 0$ (кг/м²ч., м³/м²ч., кг/м³ч., м³/м³ч.) – удельные производительности фильтров и сушилок;

- δ_j , если $x_j=1$ (м) – толщина слоя осадка для ФПТ;
- t_j , если $x_j=0$ (ч.) – длительность процесса переработки партий продукта в емкостных аппаратах;
- h_j , если $x_j>0$ (доли единицы) – доля основных операций в общем времени занятости фильтров и сушилок обработкой одной партии продукта;
- $\varphi_{*j}, \varphi_j^*$, если $x_j=0$ или 2 – допустимые пределы изменения коэффициентов заполнения емкостных аппаратов и РВС.

Вначале рассмотрим порядок расчета оборудования ТС, включающей единственную аппаратную стадию. Пусть основным аппаратом этой стадии является *емкость с механической мешалкой*. Задача может быть решена двумя способами: 1) зафиксировать число аппаратов n и определить необходимый рабочий объем V ; 2) определить необходимое число аппаратов заданного объема.

В первом случае число партий, перерабатываемых на стадии за время T , составит

$$b = n \cdot \frac{T}{t},$$

а размер каждой из них

$$w = \frac{Q}{b} \text{ т.}$$

Тогда необходимый рабочий объем емкости

$$V = \frac{g \cdot Q}{b \cdot \varphi} \text{ м}^3,$$

а поскольку $\varphi_* \leq \varphi \leq \varphi^*$, то

$$\frac{g \cdot Q}{b \cdot \varphi^*} \leq V \leq \frac{g \cdot Q}{b \cdot \varphi_*}.$$

В качестве значения V фиксируется минимальный стандартный объем, удовлетворяющий этому неравенству. Если требуется обеспечить выпуск целого числа партий в сутки, то

$$b = n \cdot \left[\frac{T}{\theta} \right] \cdot \left[\frac{\theta}{t} \right],$$

где θ – суточный фонд рабочего времени (ч.), $[x]$ – целая часть числа x .

Пример. Рассчитать оборудование ТС, если $Q = 50$ т, $T = 1000$ ч., $g = 3 \text{ м}^3/\text{т}$, $t = 5$ ч., $\varphi_* = 0.4$, $\varphi^* = 0.8$, $\theta = 24$ ч., $VS = \{0.01; 0.025; 0.04; 0.063; 0.1; 0.16; 0.25; 0.4; 0.63; 1; 2; 3.2; 5; 6.3; 10; 16; 25; 32; 50\} \text{ м}^3$.

$$1) n = 1 \rightarrow b = n \cdot \left[\frac{1000}{24} \right] \cdot \left[\frac{24}{5} \right] = 41 \cdot 4 = 164;$$

$$\frac{g \cdot Q}{b} = \frac{3 \cdot 50}{164} = 0.915 \rightarrow 1.144 = \frac{0.915}{0.8} \leq V \leq \frac{0.915}{0.4} = 2.288 \rightarrow V = 2 \text{ м}^3.$$

$$2) V = 0.63 \text{ м}^3, \text{ т.е. } \frac{g \cdot Q}{b \cdot \varphi_*} = 0.63 \rightarrow b = (3 \cdot 50) / (0.63 \cdot 0.8) = 297;$$

$$n = b / \left[\frac{T}{\theta} \right] \cdot \left[\frac{\theta}{t} \right] = 297 / 164 \approx 1.8 \rightarrow n = 2.$$

Если основным аппаратом единственной стадии ТС является *фильтр или сушилка (кроме ФПТ и РВС)*, то расчет оборудования дополнительно включает определение продолжительности переработки партии продукта t . Расчет начинается с определения объемной или массовой загрузки аппарата при переработке одной партии продукта

$$g \cdot w = \frac{g \cdot Q}{b} \text{ м}^3 \text{ или кг.}$$

Это количество массы будет обработано за

$$t = \frac{g \cdot Q}{b \cdot a \cdot V} \text{ ч.}$$

С другой стороны

$$b = n \cdot \frac{T}{t},$$

следовательно

$$t = \frac{g \cdot Q \cdot t}{n \cdot T \cdot a \cdot V} \Rightarrow V = \frac{g \cdot Q}{n \cdot T \cdot a} \text{ м}^2 \text{ или м}^3.$$

Таким образом, можно задать n , определить V и округлить до большего стандартного или наоборот: задать стандартное V , определить n и округлить до большего целого. Для определения t необходимо знать число перерабатываемых партий продукта:

$$t \geq \frac{g \cdot Q}{b \cdot a \cdot V} \text{ (} V \text{ – стандартное)} \text{ и } t \leq n \cdot \frac{T}{b} \text{ (} n \text{ – целое), т.е. } \frac{g \cdot Q}{b \cdot a \cdot V} \leq t \leq n \cdot \frac{T}{b}.$$

Обычно по заданному b определяется минимально возможное значение t . Для найденного t значение b может быть пересчитано на целое число партий в сутки:

$$b = n \cdot \left[\frac{T}{\theta} \right] \cdot \left[\frac{\theta}{t} \right] \Rightarrow V = \frac{g \cdot Q}{a \cdot t \cdot n \cdot [T/\theta] \cdot [\theta/t]}.$$

Пример. Рассчитать оборудование ТС, если основным аппаратом стадии является друк-фильтр: $VS = \{0.2; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6\} \text{ м}^2$. Материальный индекс $g=2000$ кг/т; удельная производительность $a=3$ кг/м²час; $T=1000$ ч.; $Q=3$ т, $\theta=24$ ч.

$V \geq \frac{2000 \cdot 3}{1000 \cdot 3 \cdot n} = \frac{2}{n}$, т.е. при $n=1$ установка на стадии стандартного фильтра невозможна, а при $n=2$ $V=1.2 \text{ м}^2$.

Если $b=1500$, то $\frac{2000 \cdot 3}{1000 \cdot 3 \cdot 1.2} \leq t \leq \frac{2 \cdot 1000}{1500}$, т.е. $\frac{20}{18} \leq t \leq \frac{20}{15}$, т.е. $t=20/18 \approx 1.1$.

Если необходимо целое число партий в сутки, то $V = \frac{2000 \cdot 3}{3 \cdot 1.1 \cdot n \cdot 41 \cdot 21} = \frac{2.08}{n}$, например, при $n=3$; $V=0.8 \text{ м}^2$.

В случае, если основным аппаратом стадии ТС является *ФПТ – фильтр-пресс рамный или камерный, предназначенный для выделения твердой фазы суспензии*, его необходимая рабочая поверхность

$$V \geq \frac{v \cdot w}{\delta} \text{ м}^2,$$

а продолжительность переработки партии продукта не зависит от размера партии:

$$t = \frac{m \cdot w}{a \cdot V} = \frac{m \cdot \delta}{v \cdot a} \text{ ч.}$$

Следовательно, $b = n \cdot \frac{T}{t} \rightarrow V = \frac{v \cdot Q}{b \cdot \delta} \text{ м}^2$.

Пример. Рассчитать оборудование ТС, если стадия оснащается рамным фильтрпрессом: $VS = \{12, 16, 24, 36, 54\} \text{ м}^2$. Материальные индексы: $v = 3 \text{ м}^3/\text{т}$; $m = 1500 \text{ кг/т}$; толщина слоя осадка (половина толщины рамы) $\delta = 0.02 \text{ м}$; удельная производительность $a = 3 \text{ кг/м}^2\text{ч}$; $Q = 30 \text{ т}$; $T = 1000 \text{ ч.}$, $\theta = 24 \text{ ч.}$

$$t = \frac{1500 \cdot 0.02}{3 \cdot 3} = \frac{30}{9} \approx 3.3 \text{ ч.} \rightarrow \text{при } n = 1 \text{ } b = 1 \cdot \frac{1000}{3.3} = 300 \rightarrow V \geq \frac{3 \cdot 30}{300 \cdot 0.02} = 15 \text{ м}^2,$$

$$\text{т.е. } V = 16 \text{ м}^2. \text{ Если } b = 1 \cdot \left[\frac{1000}{24} \right] \cdot \left[\frac{24}{3.3} \right] = 287 \Rightarrow V = \frac{3 \cdot 30}{287 \cdot 0.02} = 15.69 \text{ м}^2, \text{ т.е. } V = 16 \text{ м}^2.$$

Заметим, что в данном случае представляет интерес и точное значение необходимой поверхности фильтрования (число задействованных рам или камер).

В отличие от всех других основных аппаратов стадий ТС, *PBC – роторная вакуумная сушилка*, имеет два основных размера: рабочий объем сушильного барабана V и площадь поверхности теплообмена F (площадь внешней поверхности барабана, покрытой теплообменной рубашкой). Рабочий объем PBC зависит от объема получаемого сухого продукта и коэффициента ее заполнения, который не может быть больше максимально допустимого:

$$V = \frac{v \cdot w}{\phi} \geq \frac{v \cdot w}{\phi^*}.$$

Рабочая поверхность сушилки определяется массой испаренной влаги на 1 т продукта, ее удельной производительностью a по испаряемой из продукта влаге ($\text{кг/м}^2\text{·час}$) и продолжительностью t переработки одной партии продукта:

$$F = \frac{m \cdot w}{t \cdot a},$$

а необходимое число аппаратов определяется значением t , числом партий продукта и величиной периода его выпуска T :

$$n = b \cdot \frac{t}{T} = \frac{Q}{w} \cdot \frac{t}{T}.$$

Расчет оборудования ТС в данном случае сводится к выбору стандартной сушилки (значений V и F), определению максимально возможного значения размера партии продукта

$$w^* = \frac{V \cdot \phi^*}{v},$$

расчету минимально возможного значения t

$$t_* = \frac{m \cdot w^*}{F \cdot a}$$

и расчету необходимого числа выбранных стандартных сушилок.

Пример. Рассчитать оборудование ТС, если стадия оснащается роторной вакуумной сушилкой: $VS = \left\{ \begin{matrix} 1.6, 4, 10 \\ 2.4, 20, 35.5 \end{matrix} \right\} \left(\begin{matrix} \text{м}^3 \\ \text{м}^2 \end{matrix} \right)$. Материальные индексы: $v = 0.9 \text{ м}^3/\text{т}$;

$m = 450$ кг/т; максимальный коэффициент заполнения $\varphi^* = 0.5$; удельная производительность $a = 5$ кг/м²ч; $Q = 70$ т; $T = 500$ ч., $\theta = 24$ ч.

Для сушки с размерами $V = 4$ м³ и $F = 20$ м² получим: $w^* = \frac{4 \cdot 0.5}{0.9} = \frac{20}{9} \approx 2.2$ т,

$t_* = \frac{450 \cdot 2.2}{20 \cdot 5} = \frac{990}{100} = 9.9$ ч., тогда $n = \frac{70 \cdot 9.9}{2.2 \cdot 500} = \frac{693}{1100} \approx 0.63$, т.е. $n = 1$.

Если $b = 1 \cdot \left[\frac{500}{24} \right] \cdot \left[\frac{24}{9.9} \right] = 40 \Rightarrow n = 40 \cdot \frac{9.9}{500} = 0.792$, т.е. $n = 1$.

Порядок расчета оборудования ТС, включающей несколько стадий:

1. Выбор значений числа аппаратов на стадиях, обычно $n_j = 1, j = 1, 2, \dots, J$. Если на какой-либо стадии зафиксировано $n_j > 1$, то выбирается режим функционирования ее аппаратов (синхронно или с равномерным запаздыванием).

2. Предварительное определение длительности цикла обработки партий продукта

$$T_{ц} = \max_{j=1, \dots, J} \{p_j\}, x_j < 2.$$

Поскольку для большинства типов фильтров и сушилок длительность обработки партий заранее не известны, значения p_j (минимального периода между выпуском двух последовательных партий) вычисляются только для стадий, оснащаемых емкостными аппаратами (значения t_j заданы) и фильтрпрессами, выделяющими твердую фазу суспензии, для которых

$$t_j = \frac{m_j \cdot \delta_j}{v_j \cdot a_j}.$$

3. Расчет числа выпускаемых партий продукта и их размера:

$$b = \frac{T - \sum_{j=1}^J t_j}{T_{ц}} + 1,$$

$$w = \frac{Q}{b}.$$

4. Выбор размеров аппаратов стадий ТС. Объемы емкостных аппаратов должны удовлетворять ограничениям:

$$\frac{g_j \cdot w}{\varphi_j^*} \leq V_j \leq \frac{g_j \cdot w}{\varphi_j^*}, V_j \in VS_j, x_j = 0. \quad (1.20)$$

Поверхности фильтр-прессов, выделяющих твердую фазу суспензии, – ограничениям

$$V_j \geq \frac{v_j \cdot w}{\delta_j}, V_j \in VS_j, x_j = 1. \quad (1.21)$$

Объемы роторных вакуумных сушилок выбираются из условий

$$V_j \geq \frac{v_j \cdot w}{\varphi_j^*}, V_j \in VS_j, x_j = 2. \quad (1.22)$$

Поверхности F_j сушилок однозначно определяются выбранными значениями V_j , а значения t_j определяются по формуле

$$t_j = \frac{m_j \cdot w}{F_j \cdot a_j}, x_j = 2. \quad (1.23)$$

Для определения основных размеров фильтров и сушилок других типов, используется зависимость длительности обработки партии от основного размера аппарата, аналогичная (1.23)

$$t_j = \frac{g_j \cdot w}{V_j \cdot a_j}, x_j > 2. \quad (1.24)$$

При фиксированном числе аппаратов величина t_j не может превышать $T_{ц} \cdot n_j$, следовательно:

$$V_j \geq \frac{g_j \cdot w}{n_j \cdot T_{ц} \cdot a_j}, V_j \in VS_j, x_j > 2. \quad (1.25)$$

Первоначально промежуточные емкости между стадиями ТС не вводятся, поэтому максимально возможные значения $t_j, x_j > 2$ следует определять с учетом продолжительности одновременной работы фильтров (сушилок) и непосредственно связанных с ними емкостных аппаратов: $t_j \leq T_{ц} \cdot n_j - \frac{\max \{t_j\}}{h_j}$, где j_-, j_+ – номера стадий ТС, предшествующей и следующей за стадией j , т.е. вместо соотношения (1.25) можно использовать:

$$V_j \geq \frac{g_j \cdot w}{a_j \cdot \left(n_j \cdot T_{ц} - \frac{\max \{t_j\}}{h_j} \right)}, V_j \in VS_j, x_j > 2. \quad (1.26)$$

Может сложиться ситуация, когда даже максимальный допустимый стандартный размер аппарата окажется слишком мал. Чаще всего в таких случаях увеличивают число аппаратов на лимитирующей стадии, выбирая для ее аппаратов режим обработки партий с равномерным запаздыванием, и уменьшают таким образом величину $T_{ц}$. В результате увеличивается число партий и уменьшается их размер. Возможны и другие выходы из этой ситуации. Если это стадия с $x_j > 1$, то можно принять решение о введении в ТС до или (и) после нее промежуточных емкостей и использовать для определения размера аппаратов соотношение (1.25). Можно также принять решение об установке на стадии одного из допустимых аппаратов и рассчитать необходимую продолжительность обработки партии по соотношению (1.24). Если эта стадия оснащается емкостными аппаратами и возможна синхронная обработка равных долей партии в разных аппаратах, то можно увеличить число аппаратов и использовать для выбора их рабочего объема соотношение:

$$\frac{g_j \cdot w}{n_j \cdot \Phi_j^*} \leq V_j \leq \frac{g_j \cdot w}{n_j \cdot \Phi_{j*}}, V_j \in VS_j, x_j = 0. \quad (1.27)$$

5. Вычисление по (1.23), (1.24) значений t_j для стадий с $x_j > 1$, корректировка значений t_j , $x_j = 0$ с учетом выбранного режима совместной работы стадий с емкостным оборудованием и стадий, оснащенных фильтрами и сушилками, определение значения $T_{ц}$. Если это значение совпадает с предварительным, то расчет закончен, в противном случае необходимо повторить его сначала с новым предварительным значением $T_{ц}$.

Эффективность того или иного варианта АО ТС рекомендуется оценивать по приведенным затратам на производство продукции, т.е. сумме капитальных затрат на оборудование и расходов, связанных с его эксплуатацией. Оценить с достаточной точностью эксплуатационные расходы на этапе определения АО ТС практически невозможно, т.к. для проведения тепловых расчетов аппаратов, расчетов затрат на транспортировку веществ между аппаратами, на обслуживание оборудования недостаточно информации. Известно, что при изменении вариантов АО эксплуатационные расходы меняются незначительно, поэтому чаще всего в качестве критерия эффективности АО ТС используют капитальные затраты на основное оборудование.

Капитальные затраты рассчитываются на основе преysкурантных цен стандартных аппаратов. Для упрощения расчетов формируют функциональные зависимости стоимости аппаратов различных типов и исполнений от их основных размеров (методами приближения табличных зависимостей). Наиболее популярный вид этой зависимости: $\alpha_j \cdot V_j^{\beta_j}$, например, для стальных эмалированных емкостных аппаратов с цилиндрическими рубашками, сальниковыми уплотнениями и механическими перемешивающими устройствами, включая мотор-редукторы, – $94.643 \cdot V_j^{0.368}$, для рамных фильтр-прессов из нержавеющей стали с закрытым отводом фильтрата и механизированным зажимом (РЗМ), выпускаемых Бердичевским заводом "Прогресс" – $55.099 \cdot V_j^{0.696}$ (в тыс. руб. по состоянию на середину III квартала 2005 г.).

Пример. Рассчитать оборудование ТС, состоящей из 3-х стадий, $Q = 300$ т, $T = 500$ ч. (рис. 1.24).

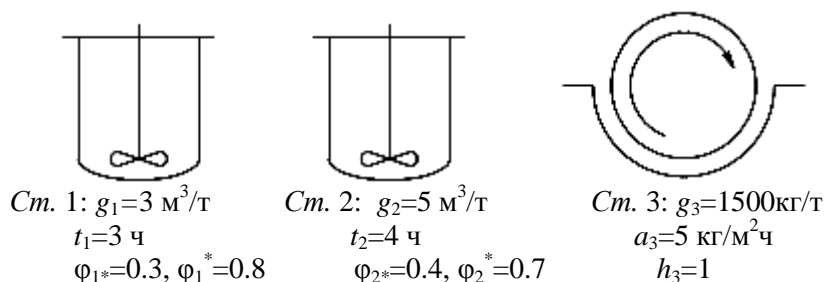


Рис. 1.24 – Пример индивидуальной ТС и данные для расчета оборудования

Стандартные объемы емкостных аппаратов: 0.1, 0.25, 0.4, 0.63, 1, 1.6, 2.5, 3.2, 5, 6.3, 10 м³. Стандартные поверхности барабанных вакуум-фильтров (БВФ): 1, 3, 5, 10, 20, 40 м².

Пусть: $n_1=n_2=n_3=1$, тогда $T_{ц} = t_2 = 4$ ч., следовательно

$$b = \frac{500 - 7}{4} + 1 = 124 \Rightarrow w = \frac{30}{124} = 0.25 \text{ т.}$$

Реальные загрузки аппаратов: $g_1 \cdot w = 0.75$ м³, $g_2 \cdot w = 1.25$ м³, $g_3 \cdot w = 375$ кг,

следовательно: $0.9375 \text{ м}^3 \leq V_1 \leq 2.5 \text{ м}^3$, $1.786 \text{ м}^3 \leq V_2 \leq 3.125 \text{ м}^3$, $V_3 \geq 375/(5 \cdot 4) = 18.75 \text{ м}^2$.
Выбираем аппараты стандартных размеров: $V_1 = 1 \text{ м}^3$, $V_2 = 2.5 \text{ м}^3$, $V_3 = 20 \text{ м}^2$, т.е.
 $t_3 = 375/(5 \cdot 20) = 3.75 \text{ ч.}$ и $p_2 = t_2 + t_3 \cdot h_3 = 7.75 \text{ ч.}$, следовательно $T_{\text{ц}} = 7.75 \text{ ч.}$

Необходим повторный расчет или введение между стадиями 2 и 3 промежуточной емкости. При введении емкости, если $\varphi_{\text{п}^*} = 0.2$, $\varphi_{\text{п}}^* = 0.9$, получим: $t_{\text{п}} = 3.75 \text{ ч.}$,
 $g_{\text{п}} \cdot w = 1.25 \text{ м}^3$, $1.389 \text{ м}^3 \leq V_{\text{п}} \leq 6.250 \text{ м}^3$, т.е. $V_{\text{п}} = 1.6 \text{ м}^3$.

Пересчет оборудования ТС для $T_{\text{ц}} = 7.75 \text{ ч.}$: $b = \frac{500 - 10.75}{7.75} + 1 = 64 \Rightarrow w = \frac{30}{64} = 0.47 \text{ т.}$

Реальные загрузки аппаратов: $g_1 \cdot w = 1.41 \text{ м}^3$, $g_2 \cdot w = 2.35 \text{ м}^3$, $g_3 \cdot w = 705 \text{ кг}$,
следовательно: $1.7625 \text{ м}^3 \leq V_1 \leq 4.7 \text{ м}^3$, $3.386 \text{ м}^3 \leq V_2 \leq 5.875 \text{ м}^3$, $V_3 \geq 705/(5 \cdot 4) = 35.25 \text{ м}^2$.
Выбираем аппараты стандартных размеров: $V_1 = 2.5 \text{ м}^3$, $V_2 = 5 \text{ м}^3$, $V_3 = 40 \text{ м}^2$, т.е.
 $t_3 = 705/(5 \cdot 40) = 3.525 \text{ ч.}$ и $p_2 = t_2 + t_3 \cdot h_3 = 7.525 \text{ ч.}$, практически совпадает с предварительно рассчитанным $T_{\text{ц}} = 7.75 \text{ ч.}$

Получены два различных варианта АО ТС, каждый из которых позволит организовать выпуск 30 т продукта за 500 часов. Изменяя начальное число аппаратов на стадиях системы, можно получить и другие варианты АО. Капитальные затраты на первый вариант АО рассмотренной в примере ТС составят 55.6 тыс.руб, на второй – 70.6 тыс.руб. Другие примеры расчета оборудования индивидуальных ТС см. в Приложении Г.

1.3.7 Расчет оборудования совмещенных и гибких ТС

Для расчета оборудования совмещенной ТС, последовательно выпускающей продукты заданного ассортимента I , используются практически те же соотношения, что и для индивидуальной. Различия вызваны следующими обстоятельствами:

- величины, характеризующие процессы переработки партий продуктов на стадиях ТС, должны получить дополнительный индекс i принадлежности к одному из продуктов заданного ассортимента;

- число аппаратурных стадий J совмещенной системы практически всегда превосходит число технологических стадий синтеза любого продукта, поэтому каждая аппаратурная стадия ТС дополнительно характеризуется множеством R_j номеров продуктов, партии которых перерабатываются в аппаратах этой стадии;

- основные размеры аппаратов каждой стадии j системы должны позволять обрабатывать партии всех продуктов из множества R_j ;

- сумма продолжительностей выпуска всех продуктов заданного ассортимента T_i не должна превосходить заданный фонд рабочего времени T .

Наибольшие затруднения вызывает последнее требование: в отличие от индивидуальных ТС, где продолжительность выпуска продукта фиксирована, для совмещенной значения T_i могут свободно варьироваться в пределах заданной суммы T .

Задачу расчета оборудования совмещенной ТС можно сформулировать следующим образом: определить основные размеры V_j и число n_j аппаратов стадий совмещенной ТС, при которых капитальные затраты на оборудование

$$Z = \sum_{j=1}^J n_j \cdot \alpha_j \cdot V_j^{\beta_j} \quad (1.28)$$

достигают минимума и выполняются условия:

$$\frac{g_{ij} \cdot w_i}{\phi_j^*} \leq V_j \leq \frac{g_{ij} \cdot w_i}{\phi_{j^*}}, i \in R_j, V_j \in VS_j, x_j = 0. \quad (1.29)$$

$$V_j \geq \frac{v_{ij} \cdot w_i}{\delta_{ij}}, i \in R_j, V_j \in VS_j, x_j = 1. \quad (1.30)$$

$$V_j \geq \frac{v_{ij} \cdot w_i}{\phi_j^*}, i \in R_j, V_j \in VS_j, x_j = 2. \quad (1.31)$$

$$V_j \geq \frac{g_{ij} \cdot w_i}{t_{ij}^* \cdot a_{ij}}, V_j \in VS_j, x_j > 2. \quad (1.32)$$

$$t_{ij}^* = n_j \cdot T_{wi} - \begin{cases} \frac{\max_{j=j^-, j^+} \{t_{ij}\}}{h_{ij}}, n_j \cdot T_{wi} > \frac{\max_{j=j^-, j^+} \{t_{ij}\}}{h_{ij}} \\ 0, n_j \cdot T_{wi} \leq \frac{\max_{j=j^-, j^+} \{t_{ij}\}}{h_{ij}} \end{cases} \quad (1.33)$$

$$\sum_{i=1}^I T_i \leq T \quad (1.34)$$

$$w_i = \frac{Q_i}{b_i}, i = 1, \dots, I \quad (1.35)$$

$$b_i = \begin{cases} \frac{T_i - \sum_{j=1}^J t_{ij}}{T_{wi}} + 1, \theta_j = 24 \text{ ч.} \\ \left[\frac{T_i - \sum_{j=1}^J t_{ij}}{\theta_j} \right] \cdot \left[\frac{\theta_j}{T_{wi}} \right] + 1, \theta_j < 24 \text{ ч.} \end{cases} \quad (1.36)$$

$$t_{ij} = \begin{cases} t_{ij}, x_j = 0 \\ \frac{m_{ij} \cdot \delta_{ij}}{v_{ij} \cdot a_{ij}}, x_j = 1 \\ \frac{m_{ij} \cdot w_i}{F_j \cdot a_{ij}}, x_j = 2 \\ \frac{g_{ij} \cdot w_i}{V_j \cdot a_{ij}}, x_j > 2 \end{cases} \quad (1.37)$$

$$T_{ui} = \max_{j=1, \dots, J} \{p_{ij}\}, i = 1, \dots, I \quad (1.38)$$

$$p_{ij} = \begin{cases} t_{ij}^0, & x_j = 0 \ \& \ x_{j_-} = 0 \ \& \ x_{j_+} = 0 \\ t_{ij}^0 + h_{ij_{\pm}} \cdot t_{j_{\pm}}^i, & x_j = 0 \ \& \ (x_{j_-} > 0 \ \& \ x_{j_+} > 0) \\ t_{ij}, & x_j = 1 \\ \frac{t_{ij}}{n_j}, & x_j > 1 \end{cases} \quad (1.39)$$

$$t_{ij}^0 = \begin{cases} t_{ij}, & n_j = 1 \ \& \ (n_j > 1 \ \& \ r_j = 1) \\ \frac{t_{ij}}{n_j}, & n_j > 1 \ \& \ r_j = 0 \end{cases}, \quad x_j = 0, \quad (1.40)$$

где r_j – указатель способа переработки партий продукта емкостными аппаратами стадии j при $n_j > 1$: $r_j = 0$ - синхронно равными долями, $r_j = 1$ - целыми партиями со сдвигом по времени.

Решение задачи предусматривает предварительную разбивку заданного фонда рабочего времени T на I частей с последующей коррекцией, если не удастся обеспечить выполнение какого-либо из ограничений (1.29)-(1.34). Обычно рекомендуется производить начальную разбивку пропорционально объемам выпуска продуктов

$$T_i = \frac{Q_i \cdot T}{\sum_{i=1}^I Q_i}. \quad (1.41)$$

Пример: рассчитать оборудование ТС, выпускающей 2 продукта: $Q_1 = 20$ т, $Q_2 = 30$ т, если $T = 500$ ч. (рис. 1.25).

Доступные емкостные аппараты: 0.1; 0.25; 0.4; 0.63; 1; 1.6; 2.5; 3.2; 5; 6.3; 10 м³.

Доступные барабанные вакуум-фильтры (БВФ): 1; 3; 5; 10; 20; 40 м².

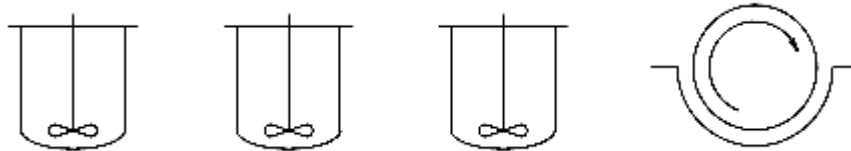
Предварительное определение T_1 и T_2 : $T_1 = 20 \cdot 500 / 50 = 200$ ч.,

$$T_2 = 30 \cdot 500 / 50 = 300 \text{ ч.}$$

Пусть: $n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 1$, тогда предварительные значения $T_{ц}$ для продуктов:

$$T_{ц1} = t_{12} = 4 \text{ ч.}, \quad T_{ц2} = t_{22} = 5 \text{ ч.}, \quad \text{следовательно } b_1 = (200 - 7) / 4 + 1 = 49,$$

$$b_2 = (300 - 8) / 5 + 1 = 59.$$



<i>См. 1:</i> $g_{11} = 2.5 \text{ м}^3/\text{т}$ $t_{11} = 3 \text{ ч.}$ $\varphi_{1*} = 0.35, \varphi_1^* = 0.75$ $g_{21} = 0$ $t_{21} = 0$	<i>См. 2:</i> $g_{12} = 6 \text{ м}^3/\text{т}$ $t_{12} = 4 \text{ ч.}$ $\varphi_{2*} = 0.4, \varphi_2^* = 0.7$ $g_{22} = 4 \text{ м}^3/\text{т}$ $t_{22} = 5 \text{ ч.}$	<i>См. 3:</i> $g_{13} = 0$ $t_{13} = 0$ $\varphi_{3*} = 0.3, \varphi_3^* = 0.8$ $g_{23} = 7 \text{ м}^3/\text{т}$ $t_{23} = 3 \text{ ч.}$	<i>См. 4:</i> $g_{14} = 1500 \text{ кг/т}$ $a_{14} = 4.5 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $h_{14} = 1$ $g_{24} = 2000 \text{ кг/т}$ $a_{24} = 5.5 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $h_{24} = 1$
---	---	---	--

Рис. 1.25 – Пример совмещенной ТС и данные для расчета оборудования

Размеры партий продуктов $w_1 = 20/49 = 0.41$ т., $w_2 = 30/59 = 0.51$ т.

Загрузки аппаратов: $g_{11} \cdot w_1 = 1.03 \text{ м}^3$, $g_{12} \cdot w_1 = 2.46 \text{ м}^3$, $g_{13} \cdot w_1 = 0$, $g_{14} \cdot w_1 = 615 \text{ кг}$,

Следовательно: $g_{21} \cdot w_2 = 0, g_{22} \cdot w_2 = 2.04 \text{ м}^3, g_{23} \cdot w_2 = 3.57 \text{ м}^3, g_{24} \cdot w_2 = 1020 \text{ кг}$.
 $1.367 \text{ м}^3 \leq V_1 \leq 2.929 \text{ м}^3$, тогда $V_1 = 1.6 \text{ м}^3$;
 $\max\{3.514 \text{ м}^3, 2.914 \text{ м}^3\} \leq V_2 \leq \min\{6.15 \text{ м}^3, 5.1 \text{ м}^3\}$, тогда $V_2 = 5 \text{ м}^3$;
 $4.463 \text{ м}^3 \leq V_3 \leq 11.9 \text{ м}^3$ тогда $V_3 = 5 \text{ м}^3$;

Поскольку $t_{14}^* = T_{ц1} = 4 \text{ ч.}$, при вычислении поверхности БВФ, необходимой для обработки партий 1-го продукта, предполагается наличие промежуточной емкости между стадиями 3 и 4. При выпуске 2-го продукта емкость можно не использовать: $t_{24}^* = 5 - 3 = 2 \text{ ч.} < T_{ц2}$, – однако она уже введена, поэтому $V_4 \geq \max\{615/(4.5 \cdot 4), 1020/(5.5 \cdot 5)\} = \max\{34.17, 37.1\}$, следовательно $V_4 = 40 \text{ м}^2$.

Тогда: $t_{14} = t_{1п} = 615/(4.5 \cdot 40) = 3.42 \text{ ч.}$, $t_{24} = t_{2п} = 1020/(5.5 \cdot 40) = 4.64 \text{ ч.}$

Загрузки емкости составят 2.46 м^3 для 1-го продукта и 3.57 м^3 – для 2-го. Если $\varphi_{п*} = 0.2, \varphi_{п} = 0.9$, то $\max\{2.733 \text{ м}^3, 3.967 \text{ м}^3\} \leq V_{п} \leq \min\{12.3 \text{ м}^3, 17.85 \text{ м}^3\}$, т.е. $V_{п} = 5 \text{ м}^3$.

Полученный вариант аппаратного оформления ТС:

$$n_1 = 1, \quad n_2 = 1, \quad n_3 = 1, \quad n_{п} = 1, \quad n_4 = 1$$

$$V_1 = 1.6 \text{ м}^3, V_2 = 5 \text{ м}^3, V_3 = 5 \text{ м}^3, V_{п} = 5 \text{ м}^3, V_4 = 40 \text{ м}^2$$

Еще один пример см. в Приложении Д.

Главной проблемой решения задачи (1.28)-(1.40) является разделение заданного периода выпуска продукции T на части $T_i, i=1, \dots, I$ – продолжительности производства продуктов ассортимента I в требуемых объемах, причем необходимо выбрать такой вариант разделения, который обеспечивал бы возможность переработки партий всех продуктов в аппаратах одного и того же размера на всех стадиях ТС. На разных стадиях системы соотношение материальных индексов продуктов может быть неодинаковым (и даже противоположным), поэтому выполнить эту операцию успешно удастся далеко не всегда. При большом ассортименте выпускаемых продуктов некоторые одноименные стадии обработки их партий иногда приходится разделять: для разных групп продуктов подбирать стандартные аппараты разных размеров.

Предлагается следующий способ решения этой проблемы: сформировать и решить вспомогательную задачу поиска значений размеров партий продуктов, которые минимизируют разброс значений операционных индексов продуктов, проходящих каждую стадию ТС. Операционный индекс стадии j при выпуске i -го продукта – это объем или масса материалов, одновременно находящихся в одном аппарате. Задача формулируется следующим образом: необходимо найти значения $w_i, i=1, \dots, I$, доставляющие минимум функции

$$f(w_1, w_2, \dots, w_I) = \sum_{j=1}^J \left[\frac{\max_{i \in R_j} (y_{ij} \cdot w_i \cdot c_{ij}) - \min_{i \in R_j} (y_{ij} \cdot w_i \cdot c_{ij})}{\max_{i \in R_j} (y_{ij} \cdot w_i \cdot c_{ij})} \right]^2, \quad (1.42)$$

при выполнении ограничений:

$$K_T \cdot T \leq \sum_{i=1}^I \left[T_{цi} \cdot \left(\frac{Q_i}{w_i} - 1 \right) + \sum_{j=1}^J t_{ij} \right] \leq T, \quad (1.43)$$

$$\frac{Q_i}{w_i} \geq 1, \quad i = 1, \dots, I. \quad (1.44)$$

$$\text{Здесь } y_{ij} = \begin{cases} v_{ij}, & x_j \leq 1 \\ g_{ij}, & x_j > 1 \end{cases}, \quad c_{ij} = \begin{cases} [r_{ij} + (1 - r_{ij}) \cdot n_j] / n_j, & x_j \leq 1 \\ 1/a_{ij}, & x_j > 1 \end{cases}, \quad i \in R_j, \quad j=1, \dots, J.$$

Ограничение (1.43) образовано из условий (1.34)-(1.36). Значение K_T следует принимать близким к единице (0.95 – 0.99). Ограничение (1.44) показывает, что должна быть выпущена хотя бы одна партия каждого продукта. Задача (1.42)-(1.44) является задачей нелинейного программирования. Для ее решения можно применить известные методы поиска экстремума функции многих переменных при наличии ограничений, например, метод прямого поиска с возвратом.

Если принимается решение об организации проектируемого производства по принципу гибкой ТС, то по окончании процесса формирования ее структуры должны быть выделены группы одновременно выпускаемых продуктов и определены изменения коммутации аппаратурных стадий при замене одной группы другой. Число аппаратурных стадий гибкой ТС и маршруты выпуска продуктов заданного ассортимента фиксированы, т.е. известны множества R_j номеров продуктов, партии которых перерабатываются в аппаратах каждой стадии j системы.

Формулировка задачи определения АО гибкой ТС включает ту же целевую функцию и те же ограничения, что и для совмещенной ТС, за исключением неравенств, отражающих возможные последовательности выпуска продуктов из различных групп.

Синтез оптимальной структуры ТС включает два этапа. Первый заключается в классификации продукта по признаку совпадения технологического оборудования. Существует несколько вариантов объединения продуктов, не использующих одно и то же оборудование, в группы. Лучшим считается вариант, с минимальным числом групп (более эффективно используется оборудование).

Пример. Рассмотрим ТС, состоящую из девяти аппаратурных стадий и выпускающую 7 продуктов. Таблица использования оборудования стадий при выпуске продуктов имеет вид:

№ пр. \ № ст.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	+	+	+	+					
II					+	+	+		
III		+					+		
IV						+		+	+
V						+		+	
VI							+		+
VII		+	+						+

Процедуру разбиения ассортимента на группы можно производить случайным образом, используя генератор случайных чисел с квазиравномерным законом распределения. Случайным образом выбирается i -й продукт, вероятность которого быть выбранным равна $1/I$. Пусть, например, первым выбран продукт III. Тогда он образует первую группу, а вероятность его повторного выбора становится равной нулю. Затем выбирается следующий продукт, вероятность выбора которого уже равна $1/(I - 1)$. Этот продукт проверяется на условие совпадения технологического

оборудования. Например, следующий продукт – это продукт I. При выпуске продуктов I и III используется оборудование стадии 2, поэтому продукт I отнесем к новой, второй группе. Процедура классификации продолжается до тех пор, пока не будут выбраны все продукты заданного ассортимента. В данном случае найдено минимальное число групп: три. Первую группу образуют продукты III и IV, вторую – I, V и VI, третью – II и VII. Продукты отнесенные к одной группе, производятся одновременно, а группы продуктов – последовательно, см. рис. 1.26.

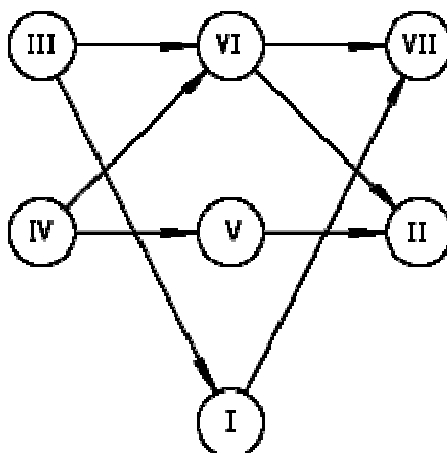


Рис 1.26 – Сетевая модель производства продуктов в гибкой технологической схеме

Второй этап оптимизации структуры ТС – это формирование системы ограничений по производительности. В каждом неравенстве этой системы должны содержаться длительности циклов выпуска только тех продуктов при производстве которых используются общее оборудование. При выполнении этого условия вершины графа, изображающие соответствующие продукты, см. рис. 1.26, соединяются дугами. Стрелками отмечена последовательность выпуска продуктов. Длительности выпуска продуктов суммируются вдоль каждого из путей, в результате получается система ограничений на длительности выпуска продукции:

$$\begin{cases} T_{цIII} + T_{цVI} + T_{цVII} \leq T \\ T_{цIII} + T_{цVI} + T_{цII} \leq T \\ T_{цIII} + T_{цI} + T_{цVII} \leq T \\ T_{цIV} + T_{цVI} + T_{цVII} \leq T \\ T_{цIV} + T_{цVI} + T_{цII} \leq T \\ T_{цIV} + T_{цV} + T_{цII} \leq T \end{cases}$$

Система этих линейных неравенств играет в данном случае роль неравенства (1.34) и если удастся найти такое ее решение, которое обеспечит выполнение всех остальных ограничений, то будет возможна любая рассмотренная последовательность наработки продуктов.

Очевидно, что в случае гибкой ТС проблема предварительного определения значений T_i значительно сложнее, чем в случае совмещенной. Кроме того, решение задачи расчета оборудования гибкой ТС включает перебор возможных способов группировки продуктов.

1.3.8 Расчет оборудования ТС действующего производства при организации выпуска новых продуктов

Одной из особенностей многоассортиментных химических производств является быстрая смена ассортимента выпускаемой продукции при минимальных изменениях аппаратного оформления. Даже в период планового хозяйства задачи перепрофилирования действующих МХП на выпуск новой продукции ставились перед проектными организациями значительно чаще, чем задачи проектирования новых производств. В последние годы выпуск новой продукции производств этого класса, в частности – производств химических красителей и полупродуктов, реализуется только на действующих предприятиях, причем ассортимент их продукции существенно расширяется. Проектно-конструкторские отделы МХП постоянно занимаются вопросами организации выпуска новой продукции на имеющемся оборудовании, в частности, решением задач расчета оборудования ТС.

Заметим, что задачи расчета оборудования при перепрофилировании действующего МХП обычно решаются *отдельно для каждого нового продукта*, в том числе и в ситуации, когда несколько новых продуктов предполагается выпускать с помощью оборудования одной и той же существующей ТС.

Предлагаемый подход к выявлению возможности и целесообразности выпуска нового продукта на оборудовании действующего многоассортиментного производства, предусматривает последовательное решение следующих задач расчета технологического оборудования:

- определение возможных вариантов АО стадий синтеза продукта, т.е. размеров и числа основных аппаратов заданных типов, позволяющих выпустить его в заданном объеме за указанный срок (задача 1);
- определение максимальной производительности фиксированного АО стадий синтеза продукта (задача 2).

В результате решения задачи 1 выявляются возможности реализации стадий выпуска нового продукта с использованием аппаратов действующего производства, задачи 2 – условия работы и производительность конкретной технологической системы выпуска нового продукта.

Задача 1 формулируется аналогично задаче расчета оборудования индивидуальной ТС проектируемого МХП, см. п. 1.3.6. Отличия; 1) множество доступных размеров аппаратов ограничено парком работающего и резервного оборудования действующего производства; 2) критерий оптимальности решения задачи включает штраф за привлечение дополнительного оборудования, т.е.

$$Z = \sum_{j=1}^J \alpha_j \cdot Y_j^{\beta_j} \cdot [n_j + (\underline{n}_j - n_j)],$$

где \underline{n}_j – число основных аппаратов на стадии j до перепрофилирования.

Алгоритм решения задачи 1 включает следующие операции:

1. Предварительное определение числа аппаратных стадий ТС, необходимого для реализации стадий выпуска нового продукта (на основе регламента его синтеза), и выбор способа взаимодействия основных аппаратов различных стадий.

2. Формирование множеств $VS_j, j = 1, \dots, J$ с учетом соответствия требований регламента к оборудованию стадий синтеза продукта и характеристик аппаратов рассматриваемого производства: тип и исполнение аппарата, материал частей, соприкасающихся с обрабатываемой массой, и ее агрессивность, вид мешалки и частота ее вращения, наличие теплообменного устройства и т.д.

3. Задание начальных значений $n_j, r_j, j = 1, \dots, J$. Обычно задают $n_j = 1$ (и, следовательно, $r_j = 0$), $j = 1, \dots, J$.

4. Расчет значений $t_j, x_j = 1$ и определение значений $p_j, x_j \leq 1$, определение длительности цикла обработки партий продукта $T_{ц}$ и размера партии продукта w .

5. Выбор минимальных значений $V_j, j=1, \dots, J$, удовлетворяющих условиям (1.20)-(1.22), (1.25).

6. Если для какой-либо стадии выпуска нового продукта не подойдет ни один из доступных размеров основных аппаратов, то предпринимаются попытки изменить число аппаратурных стадий системы, условия формирования множеств $VS_j, j = 1, \dots, J$ или заданные значения $n_j, r_j, j = 1, \dots, J$. Например, если для стадии $j, x_j = 0$ аппарат максимального доступного размера оказывается слишком мал, можно попытаться уменьшить значение w за счет уменьшения значения $T_{ц}$ следующими способами: а) увеличить число аппаратов на стадии i , для которой выполняется условие $t_i = \max_{j=1, \dots, J} \{t_j\}$, если $r_i = 0$; б) предусмотреть, если $x_{i-1} > 0$ или $x_{i+1} > 0$, подачу и прием массы из аппаратов стадий $i \pm 1$ с использованием буферных емкостей, т.е. ввести в ТС одну или две новые стадии.

Заметим, что решение об изменении числа аппаратурных стадий ТС, способа взаимодействия их основных аппаратов, условий формирования множеств $VS_j, j = 1, \dots, J$ может быть принято только экспертом (технологом). Перебор вариантов изменения значений $n_j, r_j, j = 1, \dots, J$, обеспечивающих пригодность хотя бы одного основного аппарата рассматриваемого производства для реализации каждой из стадий выработки нового продукта, и выбор того из них, которому соответствует минимальная стоимость основной аппаратуры ТС можно организовать автоматически.

Опыт показывает, что при учете всех показателей пригодности аппаратов для осуществления стадий выработки нового продукта задача 1 редко решается успешно: для каких-то стадий не удастся подобрать полностью подходящие аппараты. В этой ситуации может быть принято решение о реконструкции имеющихся аппаратов, например, замене перемешивающего устройства или установке дополнительного теплообменника, о передаче подходящих аппаратов из другого производства или о приобретении нового оборудования.

Если задача 1 решена успешно, т.е., так или иначе, удалось найти основные аппараты, подходящие для реализации всех стадий выпуска нового продукта, то для полученного варианта АО ТС необходимо решить задачу 2. Цель ее решения – определение характеристик режима функционирования ТС, т.е. значений $w, T_{ц}; t_j, x_j > 1; \phi_j, x_j = 0$ или 2, обеспечивающих ее максимальную производительность. Задача 2 может иметь и самостоятельное значение, когда аппаратурное оформление ТС не выбирается в результате решения задачи 1, а задается, например, при

проверке возможности выпуска нового продукта с помощью взаимосвязанных аппаратов конкретной существующей ТС.

Постановка задачи 2 предусматривает поиск таких значений $w, r_j, j = 1, \dots, J$, которые при фиксированном АО стадий системы и способе взаимодействия их основных аппаратов обеспечивают максимальный объем выпуска нового продукта $Q = T \cdot w / T_{ц}$ за заданный срок или минимальный срок $T = Q \cdot T_{ц} / w$ выпуска продукта в заданном объеме.

Главной проблемой при решении задачи 2 является проверка и обеспечение выполнения условия пригодности фиксированного АО ТС для реализации всех стадий выпуска продукта с точки зрения заполнения емкостных аппаратов и производительности фильтров и сушилок. Математическая формулировка этого условия имеет вид:

$$w^* > w_*, \quad (1.45)$$

$$\text{где } w^* = \min \left\{ \min_{x_j=0 \text{ или } 2} \left\{ \frac{V_j \cdot \varphi_j^*}{v_j} \right\}, \min_{x_j=1} \left\{ \frac{V_j \cdot \delta_j}{v_j} \right\}, \min_{x_j>1} \left\{ \frac{V_j \cdot a_j \cdot t_j}{g_j} \right\} \right\}, \quad (1.46)$$

$$w_* = \max_{x_j=0} \left\{ \frac{V_j \cdot \varphi_{*j}}{v_j} \right\}, \quad (1.47)$$

а для определения значений $t_j, x_j > 1$, и коррекции значений длительностей обработки партий материалов на соседних с ними стадиях используются соотношения (1.23), (1.24). Заметим, что соотношение (1.46) предусматривает использование двух элементов множества для стадий с $x_j = 2$ (основной аппарат – роторная вакуумная сушилка): с применением объема аппарата и объемного материального индекса, а также поверхности теплообмена и массового материального индекса.

Кроме того, при решении задачи 2 используется соотношение для определения эффективности использования основного оборудования стадий ТС

$$e_j = \frac{P_j}{T_{ц}} \cdot (n_j - n_j \cdot r_j + r_j), \quad j = 1, \dots, J, \quad (1.48)$$

и соотношение для расчета значений коэффициентов заполнения емкостных аппаратов и сушилок периодического действия

$$\varphi_j = \frac{v_j \cdot w \cdot (r_j / n_j + 1 - r_j)}{V_j}, \quad x_j = 0 \text{ или } 2. \quad (1.49)$$

Значения φ_j , в комплексе с значениями e_j , позволяют судить об эффективности использования оборудования стадий ТС.

Алгоритм решения задачи 2 предусматривает следующие действия:

1. Задание начальных значений $r_j, j = 1, \dots, J$ (обычно $r_j = 0$), если они не определены при решении задачи 1.

2. Проверку выполнения условия (1.45) при фиксированных значениях $n_j, V_j, j = 1, \dots, J$ и способе взаимодействия основных аппаратов различных стадий системы. Проверка включает определение значений $t_j, x_j = 1$ по формуле (1.23), вычисление по (1.46), (1.47) значений w^*, w_* с учетом стадий $x_j \leq 1$, и, при $w^* > w_*$, выбор значения $w = w^*$.

3. Обеспечение выполнения условия (1.45) при $w^* < w_*$, т.е. уменьшение значения w_* или (и) увеличение значения w^* . Уменьшить w_* можно путем принятия решения, что в аппаратах этой стадии будут обрабатываться равные доли партии (при $n_j > 1$ и $r_j = 0$, – изменить значение r_j на 1). Для увеличения w^* можно попытаться увеличить основной размер аппарата соответствующей стадии j до следующего допустимого, а при $x_j \leq 2$ – принять решение, что аппараты этой стадии будут принимать и обрабатывать партии материалов целиком (если $n_j > 1$ и $r_j = 1$ – изменить значение r_j на 0).

4. Расчет значений t_j , $x_j > 1$, p_j , $j = 1, \dots, J$, определение длительности цикла обработки партии продукта и продолжительности выпуска продукта в требуемом объеме или объема его выпуска за указанный срок. Расчет значений ϕ_j , $x_j = 0$ или 2 по соотношению (1.49) и значений e_j , $j = 1, \dots, J$ по формуле (1.48).

При решении задачи 2 без предварительного решения задачи 1 АО некоторых стадий системы может быть не задано (для определения значения w достаточно, чтобы было зафиксировано АО хотя бы одной стадии с $x_j \leq 1$). Тогда задача решается с учетом только тех стадий, где заданы значения V_j , $j \in (1, \dots, J)$, а для остальных производится поиск подходящего оборудования среди аппаратов действующего производства. По окончании решения задачи 2 с неполным комплектом оборудования и определения АО всех стадий выпуска продукта вновь необходимо решить задачу 2 для окончательной проверки условий заполнения аппаратов стадий с $x_j = 0$ или 2 и определения значений w , t_j , $x_j > 1, T_{ц}$.

Пример. Сформировать структуру и произвести расчет основной аппаратуры ТС для выпуска 1,3 фенилендиамина технического на базе оборудования цеха №33 Тамбовского ОАО "Пигмент". Требуемая производительность ТС – 170 т продукта за 110 сут. при круглосуточной работе. Данные технологического регламента процесса выработки 1,3 фенилендиамина технического (стадии, типы основных аппаратов, материальные индексы, нормы режима) представлены на рис. 1.26.

По решению технолога перед и после стадии очистного фильтрования в ТС введены дополнительные стадии, оснащаемые буферными емкостями: для подачи суспензии на фильтр – вертикальными с перемешивающими устройствами, для приема фильтрата – горизонтальными без перемешивающих устройств. В результате стадия №3 получает номер 4, стадия №4 – номер 6, стадия №5 – номер 7.

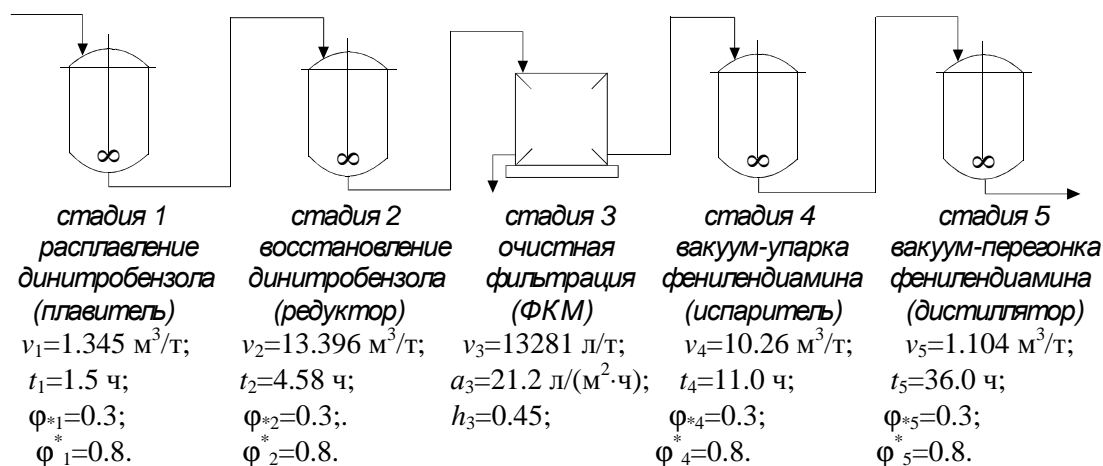


Рис. 1.26 – Данные для расчета оборудования ТС по выпуску 1,3 фенилендиамина

Дополнительные исходные данные:

- стадия №1: основной аппарат - емкостной реактор, стальной, эмалированный, с рамной или якорной мешалкой и рубашкой;
- стадия №2: основной аппарат - емкостной реактор, чугунный, с рамной или якорной мешалкой и рубашкой;
- стадия №3: основной аппарат - вертикальная емкость, стальная, эмалированная, с рамной или якорной мешалкой; $v_3=13.396 \text{ м}^3/\text{т}$, $\tau_3^0=1.0 \text{ ч}$, $\phi_3=0.25$, $\phi_3^*=0.85$;
- стадия №4: основной аппарат - фильтр-пресс камерный механизированный (рамный), чугунный, материал перегородки - полипропилен;
- стадия №5: основной аппарат – горизонтальная емкость, стальная, без перемешивающего устройства; $v_5=13.281 \text{ м}^3/\text{т}$; $\tau_5^0=1.0 \text{ ч}$, $\phi_5=0.2$, $\phi_5^*=0.9$;
- стадия №6: основной аппарат - емкостной реактор, стальной, с трехлопастной мешалкой, рубашкой и выносным теплообменником;
- стадия №7: основной аппарат - емкостной реактор, стальной, с лопастной мешалкой, рубашкой и выносным теплообменником.

Для оснащения стадий выработки 1,3 фенилендиамина подходят следующие аппараты цеха №33 Тамбовского ОАО "Пигмент":

- стадия №1: R2301 (рабочий объем 2.166 м^3);
- стадия №2: R2801(A) и R2801(B) (6.2 м^3), R2906 (6.3 м^3);
- стадия №3: D2860(B), D2860(C), D2404(A) и D2461 (6.3 м^3);
- стадия №4: PF2404 и PF2404(A) (рабочая поверхность 57.8 м^2);
- стадия №5: D2952(A) и D2952(B) (5.1 м^3), D2405 и D2411 (10 м^3);
- стадия №6: R2401(A) и R2401(B) (5.1 м^3), R2406(A) и R2406(B) (6.3 м^3);
- стадия №7: R2904 (3.7 м^3), R2402 (5.145 м^3).

Согласно алгоритму решения задачи 1, принимаем: $n_j=1$, $r_j=0$, $j=1, \dots, 7$.

Фильтрация очистная, т.е. $x_4 > 2$ и $p_j = t_j$, $j=1, 2, 3, 5, 6, 7$.

Определяем длительность цикла обработки партий продукта и размер партии: $T_{\text{ц}} = \max\{1.5, 4.58, 1.0, 1.0, 11.0, 36.0\} = 36.0 \text{ ч}$,

$$w = Q \cdot T_{\text{ц}} / T = 170 \cdot 36 / (110 \cdot 24) = 2.32 \text{ т.}$$

Максимально допустимая длительность обработки партии продукта на стадии фильтрации $t_4^* = T_{\text{ц}} = 36.0 \text{ ч}$.

Минимальные и максимальные допустимые размеры аппаратов стадий ТС:

- стадия №1: $V_{1*} = 1 \cdot \frac{1.345 \cdot 2.32}{0.8} = 3.9 \text{ м}^3$, $V_1^* = 1 \cdot \frac{1.345 \cdot 2.32}{0.2} = 15.6 \text{ м}^3$;
- стадия №2: $V_{2*} = 1 \cdot \frac{13.396 \cdot 2.32}{0.8} = 38.85 \text{ м}^3$, $V_2^* = 1 \cdot \frac{13.396 \cdot 2.32}{0.3} = 103.6 \text{ м}^3$;
- стадия №3: $V_{3*} = 1 \cdot \frac{13.396 \cdot 2.32}{0.85} = 36.56 \text{ м}^3$, $V_3^* = 1 \cdot \frac{13.396 \cdot 2.32}{0.25} = 124.3 \text{ м}^3$;
- стадия №4: $F_{4*} = \frac{13281 \cdot 2.32}{21.2 \cdot 36.0} = 40.37 \text{ м}^2$, $F_4^* = 57.8 \text{ м}^2$;
- стадия №5: $V_{5*} = 1 \cdot \frac{13.281 \cdot 2.32}{0.9} = 34.24 \text{ м}^3$, $V_5^* = 1 \cdot \frac{13.281 \cdot 2.32}{0.2} = 154.1 \text{ м}^3$;

$$\begin{aligned}
 - \text{ стадия №6: } & V_{6*} = 1 \cdot \frac{10.26 \cdot 2.32}{0.8} = 29.75 \text{ м}^3, & V_6^* &= 1 \cdot \frac{10.26 \cdot 2.32}{0.3} = 79.34 \text{ м}^3; \\
 - \text{ стадия №7: } & V_{7*} = 1 \cdot \frac{1.104 \cdot 2.32}{0.8} = 3.2 \text{ м}^3, & V_7^* &= 1 \cdot \frac{1.104 \cdot 2.32}{0.3} = 8.54 \text{ м}^3.
 \end{aligned}$$

Таким образом, при выбранных значениях n_j и r_j , $j=1, \dots, 7$ удастся оснастить подходящими основными аппаратами только стадии №4 и №7.

Задача решалась в интерактивном режиме. По рекомендациям технолога были реализованы следующие этапы подхода к допустимому решению:

1) установить на стадиях №№2, 3, 4, 5, 6 по два основных аппарата и организовать на стадиях №№2, 3, 4, 5 синхронную обработку равных долей партий материалов (работа "в две нитки"), а на стадии №6 – обработку каждым из аппаратов целых партий со сдвигом по времени;

2) ввести перед стадией №7 стадию, оснащенную емкостью без перемешивающего устройства и объединить в ней 6 партий упаренного продукта.

Изменения в исходных данных:

- стадия №7 получает номер 8;
- данные по стадии №7: основной аппарат – вертикальная емкость, стальная, без перемешивающего устройства; $v_7=1.104 \text{ м}^3/\text{г}$; $t_7=1.0 \text{ ч}$; $\varphi_{*7}=0.2$; $\varphi_7^*=0.9$;
- подходящие аппараты для стадии №7: D2402 (6.3 м^3), D2803(A) (10 м^3);
- $n_j=2$, $r_j=1$, $j=2,3,4,5$; $n_6=2$.

Повторяем решение задачи 1 с новыми исходными данными.

Минимальные периоды между выходом со стадий двух последовательных партий продукта: $p_j = t_j$, $j=1, \dots, 5$; $p_6 = t_6/n_6 = 5.5 \text{ ч}$; $p_7 = (1/6) \cdot \{1.0 + [(6-1) \cdot 5.5]\} = 4.75 \text{ ч}$ (необходимо ждать, пока в емкости соберутся шесть партий, но значение p_7 определять для одной); $p_8 = t_8/6 = 6 \text{ ч}$ (из расчета на одну партию продукта).

Длительность цикла обработки партий продукта $T_y = \max\{1.5, 4.58, 1.0, 1.0, 5.5, 4.75, 6.0\} = 6.0 \text{ ч}$. Размер партии продукта $w = Q \cdot T_y / T = 170 \cdot 6 / (110 \cdot 24) = 0.386 \text{ т}$. Максимально допустимая длительность фильтрации партии продукта $t_4^* = T_{ц} = 6.0 \text{ ч}$.

Граничные значения размеров основных аппаратов стадий ТС:

$$\begin{aligned}
 - \text{ стадия №1} & - V_{1*} = \frac{1.345 \cdot 0.386}{0.8} = 0.65 \text{ м}^3, & V_1^* &= \frac{1.345 \cdot 0.386}{0.2} = 2.6 \text{ м}^3; \\
 - \text{ стадия №2} & - V_{2*} = \frac{13.396 \cdot 0.386}{0.8 \cdot 2} = 3.23 \text{ м}^3, & V_2^* &= \frac{13.396 \cdot 0.386}{0.3 \cdot 2} = 8.63 \text{ м}^3; \\
 - \text{ стадия №3} & - V_{3*} = \frac{13.396 \cdot 0.386}{0.85 \cdot 2} = 3.04 \text{ м}^3, & V_3^* &= \frac{13.396 \cdot 0.386}{0.25 \cdot 2} = 10.34 \text{ м}^3; \\
 - \text{ стадия №4} & - F_{4*} = \frac{13281 \cdot 0.386}{21.2 \cdot 6.0} = 40.3 \text{ м}^2, & F_4^* &= 57.8 \text{ м}^2; \\
 - \text{ стадия №5} & - V_{5*} = \frac{13.281 \cdot 0.386}{0.9 \cdot 2} = 2.85 \text{ м}^3, & V_5^* &= \frac{13.281 \cdot 0.386}{0.2 \cdot 2} = 12.82 \text{ м}^3; \\
 - \text{ стадия №6} & - V_{6*} = \frac{10.26 \cdot 0.386}{0.8} = 4.96 \text{ м}^3, & V_6^* &= \frac{10.26 \cdot 0.386}{0.3} = 13.22 \text{ м}^3; \\
 - \text{ стадия №7} & - V_{7*} = 6 \cdot \frac{1.104 \cdot 0.386}{0.9} = 2.85 \text{ м}^3, & V_7^* &= 6 \cdot \frac{1.104 \cdot 0.386}{0.2} = 12.8 \text{ м}^3;
 \end{aligned}$$

$$\text{- стадия №8 - } V_{8*} = 6 \cdot \frac{1.104 \cdot 0.386}{0.8} = 3.2 \text{ м}^3, \quad V_8^* = 6 \cdot \frac{1.104 \cdot 0.386}{0.3} = 8.54 \text{ м}^3.$$

Результат решения задачи 1 (вариант АО ТС и способ обработки партий продукта на ее стадиях):

- стадия №1: $n_1 = 1, V_1 = 2.166 \text{ м}^3$ (R2301);
- стадия №2: $n_2 = 2, V_2 = 6.2 \text{ м}^3$ (R2801(A,B)), $r_2=1$;
- стадия №3: $n_3 = 2, V_3 = 6.3 \text{ м}^3$ (D2860(B,C)), $r_3=1$;
- стадия №4: $n_4 = 2, F_4 = 57.8 \text{ м}^2$ (PF2404, PF2404(A)), $r_4=1$;
- стадия №5: $n_5 = 2, V_5 = 5.1 \text{ м}^3$ (D2952(A,B)), $r_5=1$;
- стадия №6: $n_6 = 2, V_6 = 5.1 \text{ м}^3$ (R2401(A,B)), $r_6=0$;
- стадия №7: $n_7 = 1, V_7 = 6.3 \text{ м}^3$ (D2402), объединение шести партий;
- стадия №8: $n_8 = 1, V_8 = 3.7 \text{ м}^3$ (R2904), объединение шести партий.

Решение задачи 2: определение минимального срока выпуска 1,3 фенилендиамина в количестве 170 т на ТС с выбранным АО. Поскольку задача 2 решается по окончании решения задачи 1, проверять выполнение условия (1.45) нет необходимости, можно сразу определять размер партии продукта

$$w = w^* = \min_{j=1, \dots, 3, 5, \dots, 8} \left\{ \frac{V_j \cdot \varphi_j^*}{v_j \cdot (r_j/n_j + 1 - r_j)} \right\} =$$

$$\min \left\{ \frac{2.166 \cdot 0.8}{1 \cdot 1.345}, \frac{6.2 \cdot 0.8}{0.5 \cdot 13.396}, \frac{6.3 \cdot 0.85}{0.5 \cdot 13.396}, \frac{5.1 \cdot 0.9}{0.5 \cdot 13.281}, \frac{5.1 \cdot 0.8}{1 \cdot 10.26}, \frac{6.3 \cdot 0.9}{6 \cdot 1.104}, \frac{3.7 \cdot 0.8}{6 \cdot 1.104} \right\} =$$

$$= \min \{1.288, 0.74, 0.8, 0.691, 0.397, 0.856, 0.447\} = 0.397.$$

Расчет длительности фильтрования партии продукта и коррекция длительностей пребывания партии в аппаратах соседних стадий:

$$t_4 = \frac{v_4 \cdot w}{F_4 \cdot a_4} = \frac{13396 \cdot 0.397}{57.8 \cdot 21.2} = 4.34 \text{ ч}, \quad p_4 = t_4, \quad t_j = t_j + h_4 \cdot t_4, \quad j = 3, 5, \text{ т.е.}$$

$$t_3 = t_5 = 1.0 + 0.45 \cdot 4.34 = 2.95 \text{ ч}, \quad p_3 = t_3, \quad p_5 = t_5.$$

Длительность цикла обработки партий продукта $T_{ц} = \max\{1.5, 4.58, 2.95, 4.34, 2.95, 5.5, 4.75, 6.0\} = 6.0 \text{ ч}$. Минимальная продолжительность выпуска заданного количества продукта $T = Q \cdot T_{ц} / w = 170 \cdot 6 / (0.397) = 2570 \text{ ч} = 107 \text{ сут}$.

Степени заполнения аппаратов стадий №№1, 2, 3, 5, 6, 7, 8:

$$\varphi_1 = \frac{1.345 \cdot 0.397}{2.166} = 0.247; \quad \varphi_2 = \frac{13.396 \cdot 0.397}{6.2 \cdot 2} = 0.43; \quad \varphi_3 = \frac{13.396 \cdot 0.397}{6.3 \cdot 2} = 0.42;$$

$$\varphi_5 = \frac{13.281 \cdot 0.397}{5.1 \cdot 2} = 0.517; \quad \varphi_6 = \frac{10.26 \cdot 0.397}{5.1} = 0.798; \quad \varphi_7 = 6 \cdot \frac{1.104 \cdot 0.397}{6.3} = 0.417;$$

$$\varphi_8 = 6 \cdot \frac{1.104 \cdot 0.397}{3.7} = 0.71.$$

Эффективность работы аппаратов на стадиях ТС:

$$e_1 = \frac{1.5}{6} \cdot 1 = 0.25; \quad e_2 = \frac{4.58}{6} \cdot 1 = 0.763; \quad e_3 = e_5 = \frac{2.95}{6} \cdot 1 = 0.492;$$

$$e_4 = \frac{4.34}{6} \cdot 1 = 0.723; \quad e_6 = \frac{5.5}{6} \cdot 2 = 1.83; \quad n_{7*} = \frac{4.75}{6} \cdot 1 = 0.792; \quad e_8 = \frac{6}{6} \cdot 1 = 1.0.$$

Еще один пример см. в Приложении Е.

1.4 Моделирование технологических операций и аппаратов ТС МХП

Модели технологических операций служат основой для выбора типа и конструкции, расчета их определяющих размеров, числа единиц оборудования и согласования временных режимов работы, определения законов регулирования режимных параметров процесса. Способ моделирования в значительной мере определяется наличием информации об изучаемом процессе.

1.4.1 Информационно-логические модели

Для решения многих практических задач (например, выбора типа и конструкции аппарата, конструкционного материала) часто бывает достаточно иметь минимальную информацию о технологическом процессе и аппарате для его реализации. В этом случае модели технологического процесса и аппарата представляются в виде простейших структур, формализующих словесное описание моделируемого объекта. Например, из практики известно, что некоторый технологический процесс целесообразно проводить при интенсивном перемешивании и заданных значениях или диапазонах температуры, давления и рН. Описание технологического аппарата – это простое перечисление его конструкционных элементов и возможных значений или диапазонов режимных параметров, на которые он рассчитан. Тогда формальное описание технологического процесса или аппарата имеет вид информационно-логических моделей.

С целью определения степени пригодности аппарата для реализации того или иного технологического процесса сначала каждый из принципиально подходящих аппаратов описывается средствами информационной логики. Вводится понятие функционально-конструкционного элемента аппарата: это любой признак, который может иметь аппарат конкретного типа (емкость, фильтр, сушилка и т.д.). Так, например, в качестве такого признака может выступать конкретный конструкционный элемент: перемешивающее устройство, змеевик и т.п. Поскольку различные элементы присутствуют в аппарате одновременно, то модель аппарата имеет вид конъюнкции признаков, т.е. информационное описание аппарата имеет вид формально-логической модели:

$$\varphi(z_k) = \prod_{k=1}^K z_k, \quad (1.50)$$

где $z_k = 1$, если элемент k имеется у аппарата, и $z_k = 0$, если этот элемент отсутствует; K – размерность пространства признаков.

Можно ввести любое число уровней градации признаков, например, на верхнем уровне оперировать признаком «механическая мешалка», а на нижнем – конкретизировать тип установленной в аппарате мешалки (рамная, якорная, пропеллерная и т.п.). Например, информационно-логическое описание емкостного реактора может иметь вид:

<i>Информационный признак</i>	<i>Значение информационного признака</i>
Наименование аппарата	Реактор
Материал конструкционный	Сталь 40ХН
Тип мешалки	Якорная
Скорость вращения, об/мин	48
Тип обогрева	Рубашка
Давление в аппарате, МПа	0.3
Давление в рубашке, МПа	0.3
Диаметр люков, мм	400
Число штуцеров	7
Тип крышки	несъемная

Поскольку стадия технологического процесса может протекать при различных режимных параметрах и в аппаратах с разными конструктивными элементами, описание этой стадии в отличие от описания аппарата имеет вид конъюнкции конечного числа дизъюнкций:

$$\psi(z_k) = \mathbf{I} \left(\mathbf{U} z_n \right)_k, \quad (1.51)$$

где m_k – число возможных альтернатив k -го признака. Например, некоторая технологическая стадия может иметь следующее информационное описание согласно технологическому регламенту:

<i>Информационный признак</i>	<i>Значение информационного признака</i>
Наименование аппарата	Реактор
Конструкционный материал	Сталь/эмаль, сталь 40ХН или биметалл
Дополнительное оборудование	Теплообменник кожухотрубчатый
Тип мешалки	Якорная или рамная
Частота вращения мешалки, 1/мин	40–60
Тип обогрева	Рубашка
Рабочее давление в аппарате, МПа	0.3–0.4
Рабочее давление в рубашке, МПа	0.3
Хладагент	Вода артезианская или 25% раствор CaCl_2
Способ загрузки реагента	Через мерник
Способ выгрузки продукта	Сжатым воздухом

Как видно, в отличие от аппарата, некоторые признаки стадии могут быть заданы неоднозначно (конструкционный материал, тип мешалки и частота ее вращения, вид хладагента). Степень пригодности аппарата k для реализации технологической стадии j можно оценить коэффициентом:

$$C_{kj} = \frac{S_{kj}}{S_{kj} + U_{kj}}, \quad (1.52)$$

где S_{kj} – число совпадающих ненулевых признаков стадии j и аппарата k ,
 U_{kj} – число несовпадающих ненулевых признаков.

В рассмотренном примере $C = 7/(7 + 7) = 0.5$.

1.4.2 Регрессионные модели

При недостаточной априорной информации о технологическом процессе, например, при неизвестной кинетике химической реакции, но при наличии необходимых экспериментальных данных в качестве моделей технологических операций, осуществляемых в аппаратах периодического действия, можно использовать уравнения регрессии вида:

$$Y = f(X, A) + E \quad (1.53)$$

где $f(X, A)$ – функция оцениваемых параметров (известного вида, чаще всего алгебраический полином);

A – вектор неизвестных коэффициентов регрессии;

X – матрица значений независимых переменных (таблица экспериментальных данных);

Y – вектор зависимых переменных (выходы объекта);

E – вектор ошибок наблюдений.

В регрессионном анализе предполагается, что независимые переменные X измеряются точно, а зависимые Y определяются с некоторой погрешностью. Например, в качестве независимых переменных технологических процессов могут использоваться температура и давление в реакторе, а также продолжительность технологического процесса, а роль зависимой переменной может играть выход целевого продукта реакции или степень превращения исходного реагента. При фиксированных значениях температуры и давления в аппарате степень превращения реагента является функцией продолжительности технологической операции: $C_A = f(\tau, A) + E$. Если имеется набор экспериментальных данных по зависимости степени превращения реагента от продолжительности технологической операции, то можно выбрать вид функции f и идентифицировать значения неизвестных коэффициентов A , являющихся параметрами модели.

Регрессионные уравнения должны быть подвергнуты статистическому анализу: проверке значимости коэффициентов регрессии и адекватности уравнения данным эксперимента.

1.4.3 Математические модели, основанные на фундаментальных законах

Основными соотношениями таких математических моделей являются кинетические закономерности реализуемых в аппарате гидромеханических, тепловых, массообменных и химических процессов, которые могут быть сформулированы в виде общего закона: скорость процесса прямо пропорциональна движущей силе и обратно пропорциональна сопротивлению.

Для движения потоков материалов (жидкости или газа) через аппарат:

$$\frac{dV}{f \cdot d\tau} = \frac{\Delta P}{R_1} = K_1 \cdot \Delta P, \quad (1.54)$$

где V – объем протекающей жидкости,

f – площадь сечения аппарата,

τ – время,

R_1 – гидравлическое сопротивление,

ΔP – перепад давления в аппарате,
 $K_1=1/R_1$ – коэффициент скорости процесса.

Для переноса тепла:

$$\frac{dQ}{f \cdot d\tau} = \frac{\Delta t}{R_2} = K_2 \cdot \Delta t, \quad (1.55)$$

где Q – количество переданного тепла,

f – поверхность теплообмена,

R_2 – термическое сопротивление,

Δt – средняя разность температур между средой в аппарате и теплохладагентом,

$K_2=1/R_2$ – коэффициент теплопередачи.

Для переноса вещества из одной фазы в другую:

$$\frac{dM}{f \cdot d\tau} = \frac{\Delta C}{R_3} = K_3 \cdot \Delta C, \quad (1.56)$$

где M – количество вещества, перенесенного из одной фазы в другую,

f – поверхность контакта фаз,

R_3 – диффузионное сопротивление,

ΔC – разность между рабочей и равновесной концентрациями вещества в фазах,

$K_3=1/R_3$ – коэффициент массопередачи.

Для химических превращений:

$$\frac{dM}{v_p \cdot d\tau} = K_4 \cdot \varphi(C), \quad (1.57)$$

где M – количество вещества, образовавшегося или израсходованного в ходе реакции,

v_p – рабочий объем аппарата,

$\varphi(C)$ – движущая сила химического превращения,

C – концентрации реагирующих веществ,

K_4 – коэффициент скорости реакции.

В общем случае технологический расчет аппарата включает следующие этапы:

- с учетом закономерностей процессов, реализуемых в аппарате, выявляются условия их равновесия и направления течения;

- по величинам, характеризующим рабочие и равновесные параметры, определяют движущую силу процесса (ΔD);

- на основании законов кинетики процесса находят коэффициент его скорости (K);

- по полученным данным рассчитывают необходимое значение основного конструкционного размера аппарата $A = S/(\Delta D \cdot K \cdot n)$, где S – количество вещества, перерабатываемое в единицу времени, n – число параллельно работающих аппаратов;

- если значение A сильно отличается от размера, полученного в результате расчета оборудования ТС, следует уточнить материальный индекс или (и) нормы режима реализации соответствующей стадии и вновь решить задачу определения АО ТС;

- расчеты аппаратов стадий многопродуктовых ТС проводят для каждого продукта, в выпуске которого участвует оборудование соответствующей стадии.

Самой сложной частью расчета конкретного аппарата является нахождение численных значений движущей силы и коэффициента скорости процесса. При этом необходимо обоснованно решать вопросы масштабного перехода – распространения данных лабораторных исследований на промышленные объекты.

1.4.4 Выбор направлений интенсификации технологических процессов

Интенсификация технологических процессов дает возможность увеличить производительность аппарата при уменьшении его габаритов, металлоемкости, стоимости, соответствующем сокращении необходимых производственных площадей и уменьшении эксплуатационных расходов.

Под интенсивностью I любого аппарата понимают отношение его производительности к основному геометрическому размеру, например для теплообменника

$$I = \frac{Q}{f \cdot \tau} = \frac{K_2 \cdot f \cdot \tau \cdot \Delta t}{f \cdot \tau} = K_2 \cdot \Delta t = K_2 \cdot \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_j \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}},$$

где $\Delta t_{\text{б}}$, $\Delta t_{\text{м}}$ – большая и меньшая разности температур теплоносителей на входе и выходе из аппарата,

α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи,

δ_j, λ_j – толщина и теплопроводность разделяющей теплоносители стенки, слоев загрязнений.

Это соотношение можно использовать для составления наглядной схемы действий конструктора по интенсификации конкретного теплообменного аппарата:

$$I \uparrow = (\Delta t_{\text{б}} \uparrow, \Delta t_{\text{м}} \downarrow, \alpha_1 \uparrow, \delta_j \downarrow, \lambda_j \uparrow, \alpha_2 \uparrow),$$

где символ \uparrow означает необходимость увеличения, а символ \downarrow - уменьшения соответствующего параметра. Для конкретизации направления интенсификации можно обратиться к уравнениям теплопереноса, например к критериальному уравнению теплоотдачи при вынужденном движении теплоносителя в трубах и каналах

$$\alpha = \frac{\lambda}{l} \cdot A \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.33} \cdot (Pr/Pr_{\text{ст}})^{0.25},$$

где λ – теплопроводность теплоносителя,

l – определяющий линейный размер,

A – постоянный множитель,

$Re = w \cdot l \cdot \rho / \mu$ - критерий Рейнольдса,

$Pr = \mu \cdot c / \lambda$ - критерий Прандтля.

Пренебрегая множителем $(Pr/Pr_{\text{ст}})^{0.25}$, получим

$$\alpha = A \cdot \frac{\lambda^{0.67} \cdot w^{0.8} \cdot \rho^{0.8} \cdot c^{0.33}}{l^{0.2} \cdot \mu^{0.47}},$$

следовательно:

$I \uparrow = (\Delta t_{\text{б}} \uparrow, \Delta t_{\text{м}} \downarrow, \delta_{\text{ст}} \downarrow, \lambda_{\text{ст}} \uparrow, \delta_{\text{загр}} \downarrow, \lambda_{\text{загр}} \uparrow, \lambda_1 \uparrow, w_1 \uparrow, \rho_1 \uparrow, c_1 \uparrow, l_1 \downarrow, \mu_1 \downarrow, \lambda_2 \uparrow, w_2 \uparrow, \rho_2 \uparrow, c_2 \uparrow, l_2 \downarrow, \mu_2 \downarrow)$,
где индексы 1 и 2 относятся к характеристикам потоков двух теплоносителей.

Для наиболее распространенных тарельчатых массообменных аппаратов фактор интенсивности можно рассчитать по формуле

$$I = M/V = K_3 \cdot f \cdot \Delta C / V,$$

где $V = n \cdot (V_6 + V_c) = n \cdot f \cdot (H_6 + H_c)$ – объем тарельчатого аппарата,

n – число секций аппарата (тарелок),

V_6, V_c – объем рабочей (барботажной) и сепарационной зон одной секции,

f – поверхность полотна тарелки,

H_6, H_c – высота барботажной и сепарационной зон секции,

K_3 – коэффициент массопередачи, отнесенный к 1 м^2 полотна тарелки.

Для противоточного аппарата, считая, что коэффициент массопередачи не зависит от концентрации, запишем

$$I = \eta \cdot K_3 \cdot \Delta C / [n_T \cdot (H_6 + H_c)],$$

где η – эффективность ступени контакта фаз,

n_T – теоретически необходимое число ступеней контакта.

Следовательно, схема интенсификации этого аппарата имеет вид:

$$I \uparrow = (\eta \uparrow, K_3 \uparrow, \Delta C \uparrow, n_T \downarrow, H_6 \downarrow, H_c \downarrow).$$

Используя одну из эмпирических формул для определения коэффициента массопередачи в колонных тарельчатых аппаратах, можно получить более конкретную схему интенсификации.

Аналогичные схемы рекомендуется разрабатывать в процессе проектирования любой машины или аппарата.

1.5 Проектные расчеты основного оборудования стадий ТС МХП

Большинство стадий ТС МХП оснащаются емкостными аппаратами с механическими перемешивающими устройствами (~ 70%). Практически каждая ТС содержит аппаратные стадии, оснащаемые фильтрами (~ 20%) и сушилками (~10%) периодического или непрерывного действия.

1.5.1 Проектные расчеты вертикальных емкостных аппаратов

При проектировании и перепроектировании конкретной ТС МХП для всех вертикальных емкостных аппаратов с механическими перемешивающими устройствами (МПУ) проводятся расчеты, подтверждающие возможность их использования для реализации конкретных процессов: технологические и механические. Технологические расчеты вертикальной емкости с МПУ – это гидродинамический, тепловой расчет и расчет продолжительностей заполнения и опорожнения аппарата.

Гидродинамический расчет аппарата с внутренним диаметром D и высотой заполнения перемешиваемой средой H включает:

1) расчет суммарного гидравлического сопротивления устройств, находящихся внутри рабочего объема аппарата $R_{\text{вн}}$ (трубы, пластины, отражательные перегородки, змеевики и барботеры);

2) решение уравнения равенства моментов сил, действующих на перемешиваемую среду и определение параметра профиля ее окружной скорости ψ_1 (при

$R_{\text{вн}} \leq 0.1 \cdot D \cdot H$) или ее относительной осредненной окружной скорости $V_{\text{ср}}$ (при $R_{\text{вн}} > 0.1 \cdot D \cdot H$);

3) определение глубины центральной воронки $h_{\text{в}}$, образующейся при перемешивании и проверка условия $H - h_{\text{м}} > h_{\text{в}}$, где $h_{\text{м}}$ - высота расположения верхней мешалки над днищем аппарата (актуально только при $R_{\text{вн}} \leq 0.1 \cdot D \cdot H$);

4) расчет мощности, необходимой для осуществления перемешивания N ;

5) определение значений параметров качества перемешивания среды в заданных условиях и сравнение их с требуемыми.

Методика расчетов, соответствующих п.п. 1) - 4), подробно рассмотрена в курсе "Оборудование технологических комплексов", поэтому обратимся сразу к п. 5). Документ РД 26-01-90-85 рекомендует методику расчета параметров качества реализации следующих процессов в вертикальном емкостном аппарате с МПУ:

- перемешивание взаимнорастворимых и несмешиваемых жидкостей;
- перемешивание жидкости и газа, подаваемого через барботер;
- получение малоцентрированной (объемная доля твердой фазы не превышает 0.1, массовая - 0.2) и высокоцентрированной суспензии;
- растворение твердого полидисперсного материала.

При получении малоцентрированной суспензии качество перемешивания оценивается с помощью относительной разности массовой доли взвешенных частиц по высоте аппарата

$$\Delta X_{\text{max}} = \max_{h \in [0; H]} \left[\frac{X(h) - X_{\text{ср}}}{X_{\text{ср}}} \right] \quad (1.58)$$

и отношением средней массовой доли твердой фазы к максимальной по радиусу аппарата в периферийной зоне

$$X_{\text{срR}} = \frac{X_{\text{ср}}}{\max_{r \in [r_m \cdot 0.5 \cdot d_m; 0.5 \cdot D]} [X(r)]}, \quad (1.59)$$

причем распределение частиц твердой фазы в объеме перемешиваемой жидкости тем равномернее, чем меньше ΔX_{max} и больше $X_{\text{срR}}$. Здесь $X(h)$, $X(r)$ – массовая доля твердой фазы на расстоянии h от днища аппарата и расстоянии r от его вертикальной оси, r_m – относительный (отнесенный к радиусу мешалки) радиус границы центральной и периферийной зон перемешивания, d_m – диаметр мешалки.

Замечание. При $R_{\text{вн}} \leq 0.1 \cdot D \cdot H$ в объеме перемешиваемой среды выделяются две концентрические зоны - центральная и периферийная. Для мешалок с горизонтальными лопастями (лопастных, пропеллерных, турбинных) определяющей является периферийная зона, а для мешалок с вертикальными лопастями (якорных, рамных) - центральная. Перемешивание в каждой из зон осуществляется за счет турбулентной диффузии, а обмен между ними – за счет циркуляции. При $R_{\text{вн}} > 0.1 \cdot D \cdot H$, разделение объема аппарата на центральную и периферийную зоны не учитывается. Не учитывается также градиент концентраций компонентов среды по радиусу аппарата.

С использованием параметров ΔX_{max} и $X_{\text{срR}}$ можно оперативно сравнивать эффективность перемешивания малоцентрированных суспензий перемешивающими устройствами различных конструкций. Например, при расчетах процесса получения суспензии с массовой долей твердой фазы $X_{\text{ср}} = 0.05$ в аппарате с

внутренним диаметром $D = 5$ м, высотой заполнения $H = 3.5$ м, оснащенный трубой перекачки диаметром 0.133 м и турбинной либо трехлопастной мешалкой диаметром $d_m = 1.2$ м при частоте вращения вала МПУ $n = 1.25$ 1/с получены следующие результаты:

Тип мешалки	Параметр профиля окр. скорости ψ_1	Отн. радиус границы зон r_m	Глубина воронки h_b , м	Значение ΔX_{max}	Значение $X_{срR}$	Мощность перемешивания N (кВт)
Трехлопастная	1.238	1.06	0.53	0.066	0.788	1.5
Турбинная	0.022	0.49	1.22	0.054	0.842	6.3

Графическая интерпретация этих результатов представлена на рис. 1.27

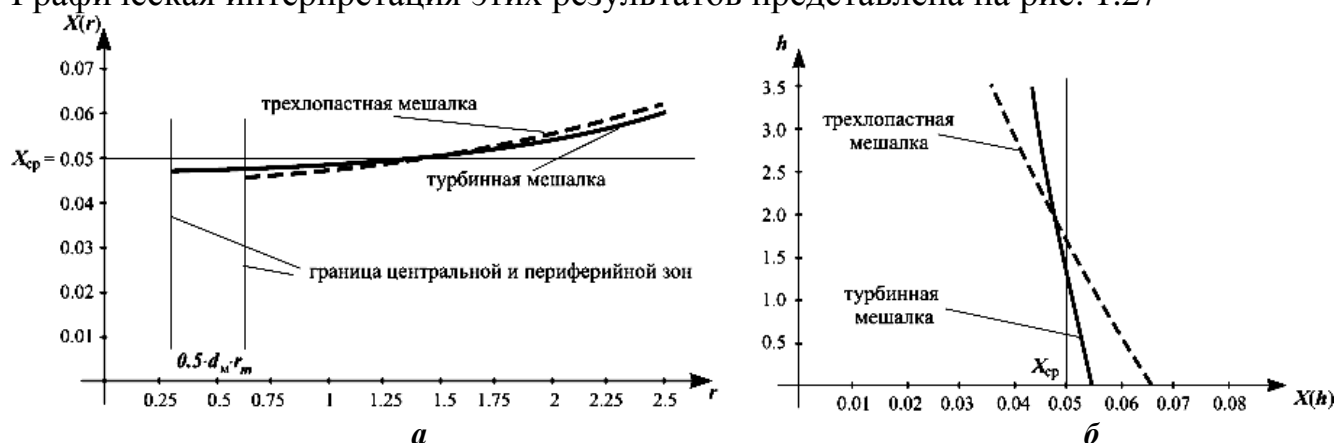


Рис. 1.27 – Функции распределения концентрации взвешенных частиц
a – по радиусу аппарата *б* – по высоте аппарата

Очевидно, что с точки зрения эффективности перемешивания более оправданно применение турбинной мешалки, однако это повлечет за собой необходимость использования более мощного (и более дорогого) привода, увеличение удельных энергозатрат на выпуск продукции.

Параметрами качества перемешивания других сред служат:

- для взаимнорастворимых жидкостей – время достижения заданной степени неоднородности среды (время гомогенизации) τ_r ;
- для высококонцентрированных суспензий – степень неоднородности распределения взвешенных частиц по высоте аппарата $\Delta\phi$ и отсутствие осадка на его днище;
- для несмешиваемых жидкостей – средний диаметр капель дисперсной фазы d_k и относительная разность концентраций дисперсной фазы в объеме аппарата ΔC ;
- для газожидкостных систем – средний диаметр пузырей газа d_n и объемная доля газовой фазы в аппарате ϕ ;
- для растворения частиц твердого полидисперсного материала – коэффициент массоотдачи β и длительности растворения частиц фракций материала $\tau_k, k = 1, \dots, K$.

Значения всех этих параметров, включая ΔX_{\max} и $X_{\text{срR}}$, зависят от типа, числа мешалок на валу МПУ z_m , их диаметра d_m и частоты вращения n . Расчетной характеристикой типа мешалки является коэффициент ее гидравлического сопротивления ζ .

Оценить эффективность той или иной конструкции перемешивающего устройства с помощью графиков, аналогичных рис. 1.27, и данных, аналогичных представленным в таблице результатов, затруднительно, поэтому сформулирована задача выбора оптимальной конструкции МПУ вертикальных емкостных аппаратов: выбрать тип и число механических мешалок, диаметр мешалок и частоту вращения вала привода из стандартного ряда их значений, которые обеспечивают приемлемую гидродинамическую обстановку в аппарате и требуемое качество перемешивания при минимальных приведенных затратах на МПУ. Приведенные затраты складываются из стоимости устройства с мотор-редуктором и затрат на потребляемую электроэнергию.

Для оценки стоимости МПУ предлагается использовать амортизацию затрат на мешалки и мотор-редуктор

$$Z_1(\zeta, z_m, d_m, n, N, M_{\text{кр}}),$$

где $N = C \cdot z_m \cdot \zeta \cdot K_1 \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_m^5$ – мощность, необходимая для осуществления перемешивания,

C – константа,

$K_1 = K_1(\zeta)$ – коэффициент мощности,

ρ – плотность перемешиваемой среды,

$M_{\text{кр}} = M_{\text{кр}}(\zeta, z_m, d_m, n)$ – крутящий момент, приложенный к перемешиваемой среде при вращении лопастей мешалки.

Выбор стандартного мотор-редуктора осуществляется по найденным в результате решения задачи значениям n , $M_{\text{кр}}$ и N .

Затраты на электроэнергию

$$Z_2(T, N)$$

предлагается оценивать по затратам мощности, необходимой для осуществления перемешивания, и времени работы перемешивающего устройства в течение года T , которое определяется нормами режима реализации конкретного процесса, режимом и календарным планом работы оборудования конкретной аппаратурной стадии ТС.

Таким образом, в качестве критерия эффективности МПУ вертикального емкостного аппарата предлагается использовать функцию

$$Z = Z_1(\zeta, z_m, d_m, n, N, M_{\text{кр}}) + Z_2(T, N). \quad (1.60)$$

Гидродинамическая обстановка в аппарате характеризуется:

- ограничением на значение отношения диаметров аппарата и мешалки

$$G_D = D/d_m$$

$$G_{D*} \leq G_D \leq G_{D*}^*, \quad (1.61)$$

где G_{D*} , G_{D*}^* – граничные значения G_D для мешалки выбранного типа, например, для лопастной $G_{D*} = 1.5$, $G_{D*}^* = 2.5$;

- уравнением моментов сил, приложенных к перемешиваемой среде в установившемся режиме

$$M_{\text{кр}} + M_{\text{ап}} + \sum_{i=1}^{z_b} M_{\text{вн}i} = 0, \quad (1.62)$$

где $M_{\text{ап}} = M_{\text{ап}}(\zeta, d_m, n)$ – момент сил сопротивления вращению, возникающих на стенках корпуса аппарата,

$z_{\text{в}}$ – число внутренних устройств в аппарате,

$M_{\text{вн}i} = M_{\text{вн}i}(\zeta, d_m, n, R_i, r_i)$ – момент сил сопротивления вращению, возникающих на i -м внутреннем устройстве,

R_i, r_i – гидравлическое сопротивление и радиус установки i -го внутреннего устройства;

- ограничением на глубину воронки $h_{\text{в}} = h_{\text{в}}(\zeta, d_m, n)$ (при $R_{\text{вн}} \leq 0.1 \cdot D \cdot H$)

$$H - h_m(\zeta, z_m, d_m) > h_{\text{в}}. \quad (1.63)$$

К числу ограничений на значения параметров качества перемешивания для процесса получения малоцентрированной суспензии относятся:

- ограничение на распределение концентрации твердой фазы по высоте аппарата

$$\Delta X_{\text{max}} \leq \Delta X_3, \quad (1.64)$$

где ΔX_3 – максимально допустимое значение ΔX_{max} ;

- ограничение на распределение концентрации взвешенных частиц по радиусу аппарата (при $R_{\text{вн}} \leq 0.1 \cdot D \cdot H$)

$$X_{\text{ср}R} \geq X_{R3}, \quad (1.65)$$

где X_{R3} – минимально допустимое значение $X_{\text{ср}R}$.

Таким образом, в случае перемешивания малоцентрированной суспензии задача сводится к выбору типа мешалки и определению значений z_m, d_m и n , при которых функция (1.60) достигает минимума и выполняются условия (1.61)-(1.65). Значения $X(h), X(r), K_1, h_{\text{в}}, h_m, M_{\text{кр}}, M_{\text{ап}}, M_{\text{вн}i}, i=1, \dots, z_{\text{в}}$ определяются в ходе решения задачи в соответствии с указаниями РД 26-01-90-85.

При решении подобных задач для случаев перемешивания других сред вместо (1.64), (1.65) используются следующие ограничения.

При перемешивании взаимнорастворимых жидкостей – на время гомогенизации

$$\tau_{\text{г}}(\zeta, z_m, d_m, n, \eta) \leq \tau_{\text{зад}},$$

где η – заданная степень неоднородности распределения концентрации указанного вещества или температуры в объеме перемешиваемой среды.

При перемешивании высококонцентрированных суспензий – на степень неоднородности распределения взвешенных частиц по высоте аппарата

$$\Delta \varphi(\zeta, z_m, d_m, n) \leq \Delta \varphi_{\text{max}}$$

и отсутствие осадка на днище аппарата

$$f \geq f_{\text{кр}},$$

где $f = f(\zeta, z_m, d_m, n)$ – частота пульсаций скорости жидкости у поверхности осадка,

$f_{\text{кр}} = f_{\text{кр}}(\zeta, z_m, d_m, n)$ – критическая частота пульсаций, обеспечивающая подъем частиц осадка.

При перемешивании несмешиваемых жидкостей – на размеры капель дисперсной фазы

$$d_{\text{к}}(\zeta, z_m, d_m, n) \leq d_{\text{кmax}}$$

и равномерное распределение дисперсной фазы в рабочем объеме аппарата

$$\Delta C(\zeta, z_m, d_m, n) \leq \Delta C_{\text{max}};$$

При перемешивании газожидкостных систем – на размеры пузырей газа в жидкости

$$d_{п}(\zeta, z_{м}, d_{м}, n) \leq d_{пmax}$$

и на величину газосодержания в объеме аппарата

$$\varphi(\zeta, z_{м}, d_{м}, n) \geq \varphi_{ср},$$

где $\varphi_{ср}$ – средняя (заданная) объемная доля газовой фазы в аппарате.

При растворении частиц полидисперсной твердой фазы – ограничение на продолжительность растворения

$$\beta(\zeta, z_{м}, d_{м}, n) \geq \beta_{п},$$

где $\beta_{п} = \beta_{п}(\tau_{зад}, c_{нас}, d_{0k}, c_{0k}), k=1, \dots, K$ – значение коэффициента массоотдачи, обеспечивающее заданное время растворения $\tau_{зад}$,

d_{0k}, c_{0k} – начальный размер частиц и начальная массовая концентрация (кг/м^3) k -й фракции твердой фазы,

$c_{нас}$ – массовая концентрация насыщения раствора для рабочих условий.

Алгоритм решения задачи (1.60)-(1.65) и аналогичных задач для других сред предусматривает перебор возможных комбинаций стандартных значений параметров конструкции МПУ, для каждой из которых осуществляется проверка выполнения ограничений. При положительном результате проверки осуществляется подбор наиболее пригодных серийно выпускаемых мотор-редукторов. Оптимальная конструкция МПУ определяется по минимуму критерия (1.60). Например, при выборе конструкции МПУ для аппарата с размерами $D = 2$ м, $H = 3.5$ м, в котором перемешивается суспензия с массовой долей твердой фазы $X_{ср} = 0.05$, средним размером ее частиц $d_{ср} = 0.0001$ м при допустимых значениях параметров качества перемешивания $X_{R3} = 0.8, \Delta X_3 = 0.075$, получены следующие результаты:

Тип мешалки, ζ	Кол-во доп. конструкций МПУ	Оптимальная конструкция МПУ: $z_{м}, d_{м}$ (м), n (1/мин)	Затраты мощности на перемешивание N , Вт
турбинная, $\zeta = 8.4$	31	$z_{м} = 1, d_{м} = 0.4, n = 160$	505
пропеллерная, $\zeta = 0.56$	50	$z_{м} = 1, d_{м} = 0.45, n = 250$	529
зубчатая, $\zeta = 1.5$	52	$z_{м} = 1, d_{м} = 0.5, n = 160$	462
рамная, $\zeta = 1.28$	21	$z_{м} = 1, d_{м} = 1.6, n = 20$	227

Для лопастной и шестилопастной мешалок допустимые варианты конструкции МПУ не найдены. Согласно критерию (1.60), абсолютно лучшей является конструкция МПУ с турбинной мешалкой.

Тип мотор-редуктора	МР-1-315	МР-1-500	ПЭМ-40	ПЭМ-50
Число подходящих	4	5	3	4
Типоразмер самого подходящего	МР-1-315У-14-160	МР-1-500-12-160	ПЭМ-40-1,5/160	ПЭМ-50-1,5/160
Стоимость, руб.	29 430	63 990	44 460	51 510

Выбор мотор-редуктора осуществлен для оптимальной конструкции перемешивающего устройства. Характеристики стандартных мотор-редукторов, спо-

собных обеспечить частоту вращения турбинной мешалки $n = 160$ об/мин, расчетное значения крутящего момента $M_{кр} = 130$ Н·м и расчетное значения мощности, необходимой для осуществления перемешивания $N = 505$ Вт. Привод МПУ рассматриваемого аппарата рекомендовано укомплектовать мотор-редуктором МР-1-315У-14-160.

Тепловой расчет аппарата включает:

- 1) определение коэффициента теплоотдачи от перемешиваемой среды α ;
- 2) определение коэффициента теплоотдачи от теплоносителя α_T ;
- 3) определение значения теплового потока, который может быть обеспечен с помощью конкретного теплообменного устройства в заданных условиях Φ_p и проверку выполнения условия $\Phi_p \geq \Phi$ (значения теплового потока, необходимого для реализации технологического процесса в аппарате).

Значение Φ определяется по объему перемешиваемой среды

$$V \approx 0.25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot H,$$

где D – внутренний диаметр аппарата,

H – высота его заполнения аппарата, –

а также данным технологического регламента процесса, реализуемого в аппарате (начальная t_1 и конечная t_2 температуры среды, требуемое время нагревания или охлаждения τ , плотность ρ среды и ее теплоемкость c при средней температуре t среды):

$$\Phi = \frac{V \cdot \rho \cdot c}{\tau} \cdot (t_2 - t_1) \quad (1.66)$$

Согласно РД 26-01-90-85, коэффициент теплоотдачи от перемешиваемой среды для мешалок любого типа определяется ее теплофизическими свойствами и влиянием на интенсивность теплообмена условий ее течения. Совокупной характеристикой этих условий являются затраты мощности на перемешивание N :

$$\alpha = 0.267 \cdot \frac{c \cdot \rho^{0.5}}{Pr^{0.75}} \cdot \left(\frac{N \cdot \mu}{V} \right)^{0.25}, \quad (1.67)$$

где $Pr = \mu \cdot c / \lambda$ – число Прандтля для перемешиваемой среды,

μ , λ – динамическая вязкость и теплопроводность среды при температуре t .

Методика расчета значения α_T зависит от типа теплообменного устройства (цилиндрическая рубашка, рубашка из полутруб, встроенный змеевик) и вида теплоносителя (жидкость, пар). Например, при нагревании среды путем подачи жидкости в цилиндрическую рубашку

$$\alpha_T = A \cdot \frac{\lambda_T}{H_T} \cdot \left(H_T^3 \cdot \frac{t_T - t}{2} \cdot \frac{g \cdot \beta_T \cdot \rho_T^2 \cdot c_T}{\mu_T \cdot \lambda_T} \right)^f, \quad (1.68)$$

где H_T – высота рубашки,

t_T – средняя температура теплоносителя,

g – ускорение свободного падения,

β_T , ρ_T , c_T , μ_T , λ_T – коэффициент объемного расширения, плотность, удельная теплоемкость, динамическая вязкость и теплопроводность теплоносителя при температуре t_T ,

A , f – константы, значения которых зависят от значения выражения в скобках, например, если это значение превосходит $2 \cdot 10^7$, то $A = 0.135$, $f = 0.33$.

Значение Φ_p определяется из основного уравнения теплопередачи

$$\Phi_p = \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_t} \right)^{-1} \cdot F \cdot (t_t - t), \quad (1.69)$$

где F – площадь поверхности теплообмена (поверхности корпуса аппарата, покрытой рубашкой),

$\delta_{ст}, \lambda_{ст}$ – толщина стенки аппарата и теплопроводность ее материала.

Продолжительность загрузки и выгрузки емкостных аппаратов зависит от объема перерабатываемой массы. Жидкие реагенты подаются в емкости насосами-дозаторами. Твердые реагенты загружаются из бункеров и загрузочных воронок шлюзовыми, тарельчатыми, шнековыми питателями, объемными или весовыми дозаторами. Выгрузка жидких продуктов или суспензий, эмульсий из емкостных аппаратов осуществляется либо через штуцеры в днище аппарата самотеком или насосом (аппараты с нижним спуском), либо через трубу передавливания и штуцер в крышке аппарата сжатым воздухом или инертным газом.

Математической моделью операции загрузки или выгрузки жидких реагентов или продуктов является соответствующий вариант уравнения Бернулли, в результате решения которого определяется продолжительность операции:

1) продолжительность загрузки емкостного аппарата с нижним спуском (из мерника) и разгрузки (в следующий аппарат) определяется как время истечения жидкости из вертикального цилиндрического сосуда с постоянным по высоте сечением:

$$\tau = \frac{2 \cdot F}{\mu \cdot f} \cdot \sqrt{\frac{h_n}{2 \cdot g}}, \quad (1.70)$$

где F – площадь сечения мерника или аппарата (м^2),

h_n – начальная высота слоя жидкости в мернике или аппарате (м),

f – площадь сечения штуцера, через который производится загрузка или разгрузка (м^2),

g – ускорение свободного падения ($\text{м}/\text{с}^2$),

μ – коэффициент расхода;

2) продолжительность выгрузки жидкости из аппарата насосом через нижний спуск:

$$\tau = \frac{V}{f} \cdot \sqrt{\frac{\xi}{2 \cdot g \cdot H}}, \quad (1.71)$$

где V – первоначальный объем жидкости в аппарате (м^3),

$H = H_n - \sum_i \xi_i$ – гидродинамический напор (м),

H_n – напор используемого насоса (м),

$\xi = \lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum_i \xi_i$ – гидродинамические потери,

λ – коэффициент трения;

l, d – общая длина и внутренний диаметр трубы, соединяющей разгружаемый и загружаемый аппараты (м),

ξ_i – коэффициенты местных сопротивлений: входные и выходные отверстия штуцеров, изгибы, колена и т.п. (по справочникам или экспериментально)

3) продолжительность выгрузки жидкости из аппарата через трубу передавливания сжатым воздухом или инертным газом также определяется по формуле (1.71),

где f – площадь сечения трубы передавливания (м^2),

$H = h + (p_1 - p_2)/(\rho \cdot g)$ – гидродинамический напор (м),

h – высота трубы передавливания (м),

p_1, p_2 – давление газа в разгружаемом и загружаемом аппаратах (Па),

ρ – плотность массы ($\text{кг}/\text{м}^3$),

l, d – общая длина и внутренний диаметр трубы передавливания (м).

1.5.2 Проектные расчеты фильтров

В МХП наиболее распространены фильтры периодического действия: рамные и камерные фильтр-прессы, друк-фильтры, ФПАКМы, нутч-фильтры. Из фильтров непрерывного действия чаще всего используются барабанные и ленточные вакуум-фильтры.

Технологический расчет фильтра предусматривает:

1) определение удельного сопротивления осадка конкретной суспензии (объемного r_o в $1/\text{м}^2$ или массового r_t в $\text{м}/\text{кг}$) и сопротивления фильтрующей перегородки R_n ;

2) расчет длительностей фильтрования τ , промывки осадка τ_n , его осушки τ_c и длительности цикла обработки суспензии $\tau_{ц} = \tau + \tau_n + \tau_c + \tau_b$ (τ_b – продолжительность вспомогательных операций);

3) определение средней скорости фильтрования за цикл $w_{ц}$ и площади поверхности фильтрования F , необходимой для обеспечения заданной производительности (по фильтрату $V_{ф}$, суспензии G_c или осадку G_o), либо наоборот – производительности конкретного фильтра с фиксированным значением F ;

4) для фильтра непрерывного действия дополнительно определяется необходимая скорость перемещения рабочего органа (частота вращения барабана n или скорость движения фильтрующей ленты v), а также размеры зон фильтрования, промывки и осушки осадка, разгрузки и регенерации фильтровальной перегородки.

Порядок экспериментального определения значений r_o и R_n при фильтровании конкретной суспензии через перегородку из указанного материала регламентирован документом РТМ 26-01-10-65. "Методика определения параметров процесса фильтрования с образованием осадка". Методика расчетов, соответствующих п.п. 2)-4) достаточно полно представлена в курсе "Оборудование технологических комплексов".

Рассмотрим более подробно проблему выбора типа фильтра, его конструкции и исполнения, вида фильтровальной перегородки, наиболее подходящих для разделения суспензии с заданными характеристиками при выполнении требований к чистоте фильтрата и влажности осадка.

Основой для формирования множеств типов фильтров Φ_B и видов фильтровальных перегородок $\Phi_{Пв}$, характеристики которых наиболее полно отвечают физико-химическим и фильтрационным свойствам разделяемой суспензии при заданных требованиях к качеству продуктов и процессу разделения, являются условия работоспособности фильтра и фильтровальной перегородки при разделении конкретной суспензии:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P \in [\Delta P_{\min}, \Delta P_{\max}] \\ \Delta P_{np} \leq \Delta P \\ T \in [T_{\min}, T_{\max}] \\ C \in [C_{\min}, C_{\max}] \\ d \in [d_{\min}, d_{\max}] \end{array} \right\}, \quad (1.72)$$

где ΔP , ΔP_{np} – перепад давлений при фильтровании и промывке осадка (Па);

T – температура суспензии ($^{\circ}\text{C}$);

C – концентрация твердой фазы в суспензии ($\text{кг}/\text{м}^3$);

d – минимальный диаметр частиц, подлежащих выделению из суспензии (м);

$[\Delta P_{\min}, \Delta P_{\max}]$, $[T_{\min}, T_{\max}]$, $[C_{\min}, C_{\max}]$, $[d_{\min}, d_{\max}]$ – интервалы допустимых для данного типа фильтра и вида фильтровальной перегородки значений перепада давления, температуры суспензии, концентрации твердой фазы и диаметра выделяемых частиц.

Кроме количественных характеристик процесса разделения суспензии, учитываемых условиями (1.72), при выборе типа фильтра и вида фильтровальной перегородки принимаются во внимание и качественные:

- характер твердой фазы суспензии (кристаллическая, аморфная, волокнистая, коллоидная);
- характер образующегося осадка (зернистый, рассыпчатый, прочный и др.);
- химическая активность жидкой фазы суспензии (значение pH);
- токсичность суспензии;
- возможность подогрева суспензии;
- категория (класс) производственного помещения (В1, В1а, и др.);
- категория и группа взрывопожароопасности продукта (некатегорийный, пожароопасный, и др.);
- требования к герметизации фильтра;
- возможные способы съема осадка (ножом, сходящим полотном и др.);
- рекомендуемые способы отвода фильтрата (открытый, закрытый);
- способ создания перепада давления (вакуум, избыточное давление, гидростатическое давление);
- требования к промывке осадка (тип и удельный расход промывной жидкости);
- основной конструкционный материал (углеродистая или нержавеющая сталь, титан, полипропилен и др.).

Пример формирования множеств Φ_B $\Phi_{Пв}$ для процесса разделения конкретной суспензии. Исходные данные для выбора типа фильтра и перегородки:

- наименование суспензии – пигмент голубой фталоцианиновый;
- процесс образования суспензии – разварка пасты пигмента;
- режим реализации процесса – периодический;
- требуемая производительность по суспензии $G_c = 7 \text{ кг}/\text{с}$;

- рекомендуемый перепад давления при фильтровании $\Delta P = 5000000$ Па;
- температура суспензии $T = 25$ °С;
- концентрация твердой фазы в суспензии $C = 59.2$ кг/м³ (0.05 масс. доли);
- размер частиц твердой фазы $d = 8 \cdot 10^{-6}$ м;
- характер твердой фазы суспензии – кристаллическая;
- характер образующегося осадка – прочный, ломающийся;
- вид удаляемого осадка – отжатый;
- промывка осадка необходима? – да;
- наименование жидкой фазы суспензии – раствор H₂SO₄;
- рН жидкой фазы – 1;
- концентрация раствора жидкой фазы – малоцентрированный;
- летучесть жидкой фазы – нелетучая;
- агрессивность суспензии – агрессивная;
- токсичность суспензии – нетоксичная;
- огне- и взрывоопасность – невзрывоопасная;
- химическая стабильность суспензии во времени – стабильна;
- обогрев фильтра необходим? – нет;
- рекомендуемый материал частей, соприкасающихся с суспензией – полипропилен;
- категория (класс) производственного помещения – VIа.

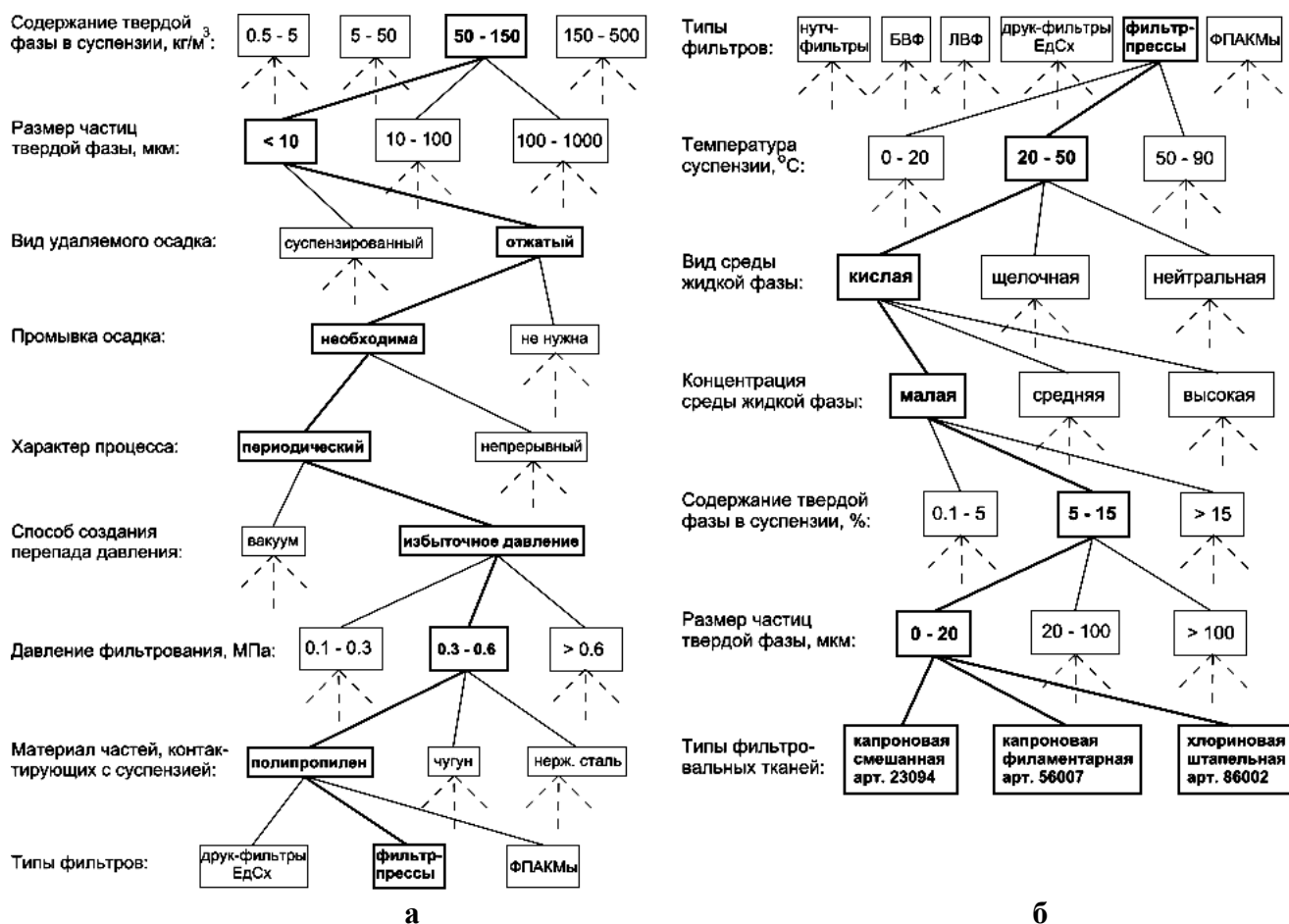


Рис.1.28 – Формирование множеств подходящих фильтров (а) и фильтровальных тканей (б)

Формирование множеств Φ_B и $\Phi_{П_B}$ иллюстрирует рис. 1.28. Как видно, единственным фильтром, пригодным для разделения рассматриваемой суспензии является фильтр-пресс (рамный или камерный), а тип фильтровальной ткани следует выбрать из трех возможных. По мнению эксперта (технолога) наиболее подходящей в данном случае является ткань фильтровальная хлориновая штапельная арт. 86002. Для более обоснованного выбора фильтровальной перегородки необходимы эксперименты.

Очевидно, что для автоматизированного формирования множеств Φ_B и $\Phi_{П_B}$ необходимо создать базу соответствующих характеристик фильтров и фильтровальных перегородок, реализовать алгоритмы сравнения введенных данных о свойствах суспензии и осадка, рекомендациях по режиму разделения с информацией из базы данных.

1.5.3 Проектные расчеты сушилок

Чаще всего в МХП применяются распылительные, ленточные, вальцеленточные, роторные вакуумные сушилки, а также сушилки с кипящим слоем инертного носителя (СИН).

Технологический расчет наиболее распространенных конвективных сушилок непрерывного действия (распылительные, ленточные, СИН) включает:

1) Определение расхода влаги, удаляемой из высушиваемого материала

$$W = G_k \cdot \frac{u_n - u_k}{1 - u_n}, \quad (1.73)$$

где G_k – производительность сушилки по высушиваемому материалу (кг/с),
 u_n, u_k – его влажность до и после сушки (кг влаги/кг общей массы).

2) Определение удельных затрат тепла на сушку

$$\Delta = q_m + q_T + q_p - c_B \cdot \theta_n = \frac{I_1 - I_2}{x_2 - x_1}, \quad (1.74)$$

где $q_m = \frac{G_k \cdot c_m \cdot (\theta_k - \theta_n)}{W}$ – затраты тепла на нагрев материала;

c_m – теплоемкость материала (Дж/кг/К);

θ_n, θ_k – температура материала, поступающего на сушку и выходящего из сушилки;

$q_T = \frac{G_T \cdot c_T \cdot (t_{ТК} - t_{ТН})}{W}$ – затраты тепла на нагрев устройства транспорта (конвейер);

G_T – массовый расход материала транспортного приспособления (кг/с);

c_T – его теплоемкость (Дж/кг/К);

$t_{ТН}, t_{ТК}$ – его начальная и конечная температура;

$q_p = Q_p/W$ – удельные потери тепла;

Q_p – потери тепла в окружающую среду (Вт);

c_B – теплоемкость влаги (Дж/кг/К);

I_1, I_2 – энтальпия сушильного агента на входе в сушильную камеру и на выходе из нее (Дж/кг сухого газа);

x_1, x_2 – влагосодержание сушильного агента на входе в сушилку и на выходе из нее (кг влаги/кг сухого газа).

3) Построение графика процесса сушки на I - x диаграмме по заданной начальной t_0 и принятой конечной t_2 температуре сушильного агента, а также его начальной влажности ϕ_0 . Определение значений:

x_0 – влагосодержание сушильного агента на входе в калорифер,

$x_1 = x_0, x_2, x_{\text{нас}}$ – влагосодержание насыщенного воздуха и температура мокрого термометра t_M , см. рис. 1.29.

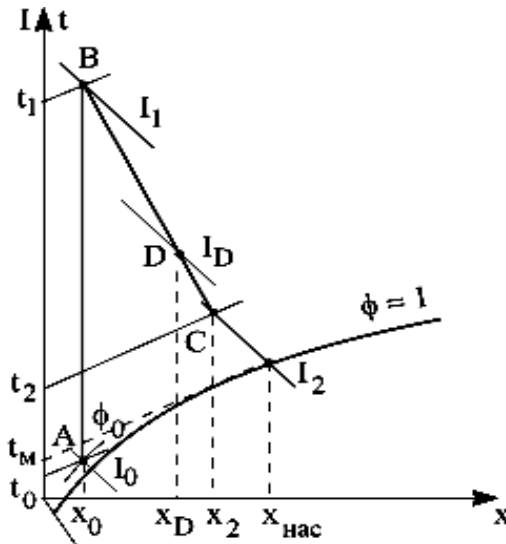


Рис. 1.29 – Изображение процесса сушки на I - x диаграмме

4) Определение необходимого расхода сушильного агента

$$L = \frac{W}{x_2 - x_1}. \quad (1.75)$$

5) Расчет длительности сушки $\tau = \tau_1 + \tau_2$, где длительность первого периода

$$\tau_1 = \frac{U_n - U_{\text{кр}}}{N}, \quad (1.76)$$

а длительность второго

$$\tau_2 = \frac{U_{\text{кр}} - U_p}{N} \cdot \ln \frac{U_{\text{кр}} - U_p}{U_k - U_p}. \quad (1.77)$$

Здесь U_n, U_k – начальное и конечное влагосодержание материала (кг влаги/кг сухого), определяемые по заданным значениям влажностей u_n и u_k : $U = u / (1 - u)$;

$U_{\text{кр}}, U_p$ – критическое (переход от испарения влаги с поверхности материала к испарению в порах) и равновесное влагосодержание материала (определяются экспериментально);

$N = \beta \cdot \Delta x_{\text{ср}} \cdot f$ – скорость сушки;

f – удельная поверхность абсолютно сухого материала ($\text{м}^2/\text{кг}$);

$\Delta x_{\text{ср}} = (x_2 - x_1) / \ln \frac{x_{\text{нас}} - x_1}{x_{\text{нас}} - x_2}$ – средняя движущая сила процесса сушки в пределах первого периода;

β – коэффициент массоотдачи, значение которого можно определить из критериального уравнения

$$Nu' = B \cdot Re^n \cdot (Pr')^{0.333} \cdot Gu^{0.135}. \quad (1.78)$$

В этом уравнении $Nu' = \beta \cdot l/D$ – массообменный критерий Нуссельта,

$Re = w \cdot l/\nu$ – критерий Рейнольдса,

$Pr' = \nu/D$ – диффузионный критерий Прандтля,

$Gu = (T_1 - T_m)/T_1$ – критерий Гухмана.

Значения коэффициентов B и n зависят от значения критерия Рейнольдса, например при $Re > 6000$ $B = 0.35$, $n = 0.65$. В выражения для вычисления критериев входят следующие величины:

l – определяющий размер (длина поверхности испарения в направлении движения сушильного агента),

D – коэффициент диффузии паров воды в среде сушильного агента (m^2/c),

w – скорость движения сушильного агента,

ν – его кинематическая вязкость,

T_1, T_m – абсолютные температуры сушильного агента на входе в сушилку и мокрого термометра.

Замечания: Формула (1.77) получена в результате решения дифференциального уравнения, характеризующего процесс изменения влагосодержания внутри частицы материала при следующих допущениях:

- частицы материала имеют форму шара;
- поры в частице и влага в них распределены равномерно;
- все сопротивление массопереносу сосредоточено внутри частицы, т.е. подводимая к ее поверхности влага отводится моментально.

Значения критического $U_{кр}$ и равновесного U_p влагосодержания материала определяются экспериментально, с помощью кривой сушки и изотерм сорбции, а его конечное влагосодержание U_k определяется требованиями стандартов или технических условий на продукт. Обычно $U_p < U_k < U_{кр}$, причем соответствующая U_k скорость сушки

б) Определяются необходимые геометрические размеры элементов сушильной камеры с учетом объема материала в сушилке $V = G_k \cdot \tau / \rho_n$ (ρ_n – насыпная плотность материала) и рекомендуемого коэффициента ее заполнения, необходимой скорости движения сушильного агента w .

7) Если сушилка предназначена к использованию для сушки нескольких продуктов, действия п.п. 1)-б) повторяются для всех этих продуктов.

8) В каталоге серийно выпускаемых сушилок выбранного типа или среди имеющегося на производстве оборудования выбирается наиболее подходящая сушилка.

1.5.4 Современное оборудование, используемое для АО стадий ТС МХП

Наиболее современный способ организации многоассортиментных химических производств – гибкая автоматизированная технологическая система (ГАТС). Добавка слова "автоматизированная" означает, что система оснащается средствами автоматического изменения структуры связей между стадиями, средствами

контроля параметров состояния обрабатываемой массы (плотность, вязкость, рН) и регулирования условий ее обработки (температура, давление).

Теория и практика создания ГАТС опираются на использование серийных аппаратов, предназначенных для реализации одной технологической стадии: емкостной реактор, фильтр, сушилка. Это иногда приводит к появлению весьма громоздких производств с чрезвычайно сложной технологической структурой и низким коэффициентом использования оборудования. Очевидно, что многократное перемещение перерабатываемой массы из аппарата в аппарат, необходимость промывки большого числа аппаратов, клапанов и трубопроводов при переходе с выпуска одного продукта на другой неизбежно приводят к снижению производительности и ухудшению условий труда.

Начиная с 80-х годов XX века с целью упрощения технологической структуры и сокращения числа аппаратурных стадий ГАТС ведутся работы по созданию многофункциональных аппаратов, предназначенных для осуществления нескольких различных физико-химических процессов. Конструкции этих аппаратов обеспечивают возможность последовательной или одновременной реализации нескольких технологических стадий синтеза продуктов. Применение многофункциональных аппаратов позволяет сократить долю ручного труда, снизить капиталовложения в аппаратурное оформление технологических процессов, надежно изолировать обслуживающий персонал от обрабатываемых сред, легче автоматизировать процесс.

Наиболее популярные виды технологических процессов в МХП – растворение твердого полидисперсного сырья, химические реакции, суспензирование, фильтрование и сушка, поэтому естественны попытки создать аппараты, в которых можно последовательно проводить все эти процессы. Остановимся на конструкции аппарата типа «реактор-фильтр-сушилка», разработанного фирмой "Nutrex" (Бельгия), см. рис. 1.30. Это аппарат периодического действия, обеспечивающий эффективное проведение реакционных процессов, кристаллизации, экстракции, фильтрования, промывки и сушки фильтровальных осадков.

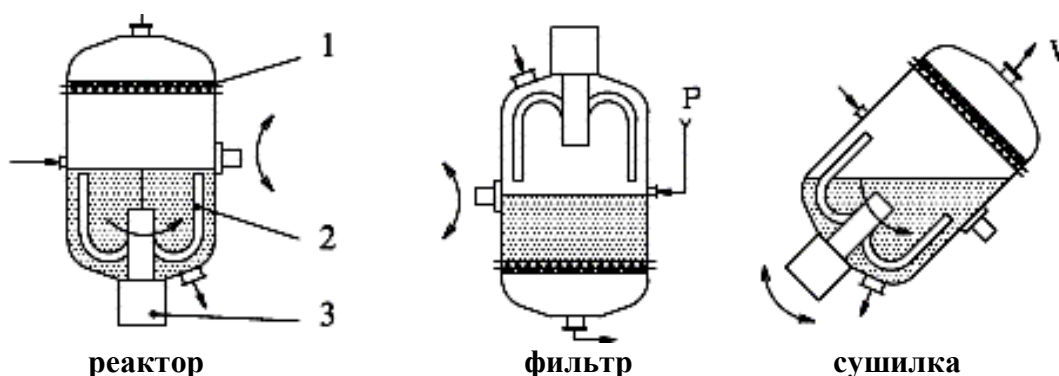


Рис. 1.30 – Многофункциональный аппарат фирмы "Nutrex"

1 - фильтровальная перегородка; 2 - перемешивающее устройство;
3 - привод перемешивающего устройства.

Конструкция аппарата предусматривает возможность закрепления его в любой фазе поворота на 360° относительно горизонтальной оси. Указанные выше технологические процессы проводятся в следующих положениях аппарата: исходное положение – загрузка, реакция, экстракция и кристаллизация; поворот ап-

парата на 180° относительно исходного состояния – фильтрование и промывка. Сушка осуществляется в наклонном положении аппарата (если необходимо – с покачиванием) при работающем перемешивающем устройстве в условиях создания вакуума или подачи очищенного газа. Выгрузку продукта производят из открытого разгрузочного люка аппарата, находящегося в наклонном положении, при работающем перемешивающем устройстве.

Аппарат может быть изготовлен из различных конструкционных материалов: титан, нержавеющая сталь, различные сплавы с покрытиями. Объем рабочей камеры аппарата – от 0.22 до 7.3 м³, поверхность фильтрования – от 0.1 до 6 м². Цена аппарата – не менее 15000 долларов. По данным разработчиков, "Nutrex" на 50% экономичнее, чем отдельно взятые реактор, фильтр и сушилка.

Однако, многофункциональные аппараты имеют существенный недостаток – наличие потенциальных источников загрязнений: перемешивающие устройства, уплотнения, клапаны и т.п. Для оснащения современных ГАТС необходимы аппараты, отвечающие следующим требованиям:

- рабочий объем лишен каких бы то ни было перемешивающих устройств и уплотнений;
- кондуктивный нагрев и охлаждение рабочего объема;
- технологический процесс синтеза продукции реализуется от начала до конца;
- простейшая геометрическая форма (сферическая или близкая к ней);
- герметичность, легкость разборки и промывки;
- поверхности, соприкасающиеся с перерабатываемым продуктом, изготовлены из материала, обеспечивающего долговечность и не дающего примесей.

Реальной платформой для создания аппаратов такого типа является вибрационная техника, обладающая следующими преимуществами: значительное ускорение протекания технологических процессов; повышение их качественных показателей; более полное использование взаимодействующих веществ; уменьшение размеров, металло- и энергоемкости оборудования.

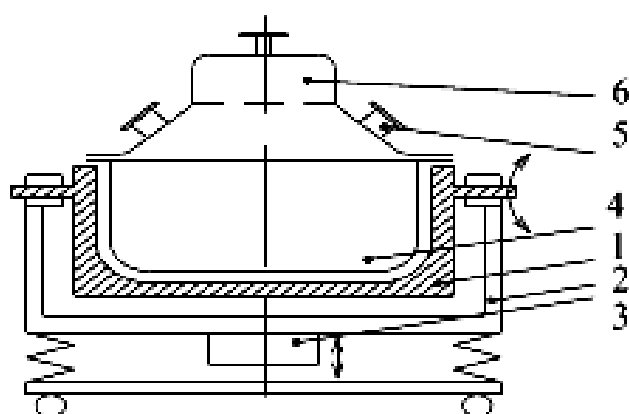


Рис. 1.31 – Аппарат конструкции ФГУП «ИРЕА»

*1 – обогреваемый корпус, 2 – подвижная рама, 3 – вибропривод,
4 – съемная рабочая камера, 5 – технологический патрубок, 6 – блок фильтрования.*

Применение вибрации позволяет исключить из рабочего объема аппарата мешалки, интенсифицировать процессы массо- и теплообмена и, при необходимости, обеспечить транспорт продукта как в горизонтальной, так и в вертикаль-

ной плоскостях. Ввиду отсутствия перемешивающих устройств, простоты геометрических форм и рабочих органов их внутренние поверхности могут быть выполнены практически из любого материала, включая фторопласт и стекло, а сами рабочие органы могут рассматриваться как быстросъемные, взаимозаменяемые, или разового использования. Примером такого аппарата может служить разработанный во ФГУП "ИРЕА" многофункциональный вибрационный аппарат, состоящий из несущего обогреваемого корпуса, установленного на подвижной раме, вибропривода с регулируемой частотой и амплитудой, съемной рабочей камеры, технологических патрубков и блока фильтрации. В аппарате такой конструкции можно проводить процессы растворения, химического синтеза, выпарки, кристаллизации, фильтрации (корпус аппарата поворачивается на 180^0), сушки.

2 КАЛЕНДАРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Главной проблемой эксплуатации химических производств является обеспечение выпуска продукции в запланированных объемах к указанным срокам. Оптимизация режимов функционирования действующего производства представляет собой задачу календарного планирования и оптимального управления, в основе которых лежит теория расписаний. Задачи и алгоритмы календарного планирования будем рассматривать для многоассортиментных химических производств (МХП), где необходимо обеспечить выпуск продукции заданного объема и ассортимента на каждой из технологических систем (ТС) в установленные сроки.

В ходе эксплуатации МХП ассортимент и объемы выпуска продукции могут существенно изменяться, т.е. задачи календарного планирования решаются многократно – для каждого планируемого периода работы производства. При этом необходимо учитывать наличие возмущений, вызванных аварийными выходами из строя технологического оборудования (ТО), т.е. формировать календарный план выпуска продукции совместно с графиком планово-предупредительных ремонтов (ППР) ТО: последовательность и объемы выпуска продуктов определяют величину наработки каждой единицы оборудования, и следовательно, нормативные сроки проведения планово-предупредительных ремонтов. Нормативы проведения ППР допускают перенос их сроков, т.е. имеется возможность совмещения плановых ремонтов с технологическими простоями оборудования – оптимального распределения ремонтных работ в условиях существующего календарного плана выпуска продукции, в том числе, в условиях ограниченности ремонтного персонала производства.

Прежде, чем рассматривать постановки и методы решения задач календарного планирования работы ТС МХП, остановимся на основных положениях теории расписаний.

2.1 Основы теории расписаний

Рассматриваемые в теории расписаний задачи формулируются в терминах обслуживания требований в системе, состоящей из обслуживающих приборов. Под термином "требования" подразумеваются обрабатываемые детали, выпускаемые продукты, участки дорог и т.п. Под термином "приборы" подразумеваются станки, аппаратурные стадии ТС, транспортные средства и т.п. Требованию сопоставляется некоторое множество приборов, каждый из которых может или должен обслуживать данное требование. Процесс обслуживания требования прибором называется операцией.

Если каждое требование может быть полностью обслужено любым из этих приборов, то обслуживающая система называется одностадийной (с одним или несколькими параллельными приборами). Если требование должно быть обслужено последовательно несколькими приборами, то говорят о многостадийных системах обслуживания, причем предполагается:

- а) после окончания обслуживания требование немедленно освобождает прибор;
- б) время перехода требования с одного прибора на другой мало и им можно пренебречь;
- в) момент завершения обслуживания требования соответствует моменту завершения выполнения последней операции этого требования.

Многостадийные системы подразделяются на три основных типа:

- 1) система "flow-shop" – каждое требование должно быть обслужено каждым из приборов в строго определенном порядке, т.е. до начала обслуживания прибором $j+1$ обслуживание этого требования должно завершиться на приборе j ;
- 2) система "open-shop" – каждое требование должно быть обслужено каждым из приборов, проходя их в произвольном порядке, причем маршруты прохождения приборов требованиями являются частью принимаемого решения;
- 3) система "job-shop" – требования имеют заданные, не обязательно одинаковые, маршруты прохождения приборов, причем приборы в маршрутах могут повторяться.

Таким образом, в ТС МХП "требования" – это партии выпускаемых продуктов, "приборы" – это аппаратурные стадии, ТС может быть отнесена к типу "job-shop" при отсутствии возможности повторения приборов в маршрутах, причем требования обслуживаются группами и при переходе от обслуживания требований одной группы (партий одного продукта) к обслуживанию требований другой группы (партий другого продукта) необходима переналадка приборов.

Построить расписание означает тем или иным способом указать для каждой пары "требование-прибор" интервал времени, в течение которого этот прибор обслуживает данное требование. При этом должен быть соблюден ряд ограничений, например, на множестве требований может быть задано отношение порядка, которое нельзя нарушать. Интерес обычно представляет построение не любых расписаний, а оптимальных относительно того или иного критерия. Критерием может быть минимизация момента завершения обслуживания всех требований, среднего времени пребывания требований в системе, суммарных затрат, суммарного либо максимального отклонения моментов завершения обслуживания требований от заданных директивных сроков и т.п.

Будем считать, что все параметры обслуживающей системы приборов и требований являются детерминированными, т.е. заранее определенными.

2.1.1 Постановка задачи построения оптимального расписания

Одна из наиболее общих постановок задачи построения оптимального расписания предусматривает, что имеется множество, состоящее из I требований, которые должны быть обслужены J приборами, обслуживание требования прибором может происходить с прерываниями или без прерываний, каждый прибор может обслуживать не более одного требования в каждый момент времени, каждое требование может обслуживаться не более чем одним прибором в каждый момент времени. Поскольку с точки зрения построения оптимального расписания приро-

да требований безразлична, сопоставим им числа $i = 1, \dots, I$, а приборам – числа $j = 1, \dots, J$.

Для каждого требования i задана длительность его обслуживания прибором j : τ_{ij} , $i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J$. Кроме того, могут быть заданы другие характеристики:

- момент поступления r_i , ранее которого обслуживание i -го требования не может быть начато;
- директивный срок d_i , к которому необходимо (желательно) завершить обслуживание i -го требования;
- весовой коэффициент ω_i , характеризующий относительную важность i -го требования;
- неубывающая функция $f_i(t)$, определяющая стоимость обслуживания i -го требования при условии, что его обслуживание завершается в момент времени t ;
- на множестве требований может быть определено отношение предшествования (порядка обслуживания требований).

Расписание – это функция, которая каждому прибору j и моменту времени t сопоставляет номер обслуживаемого требования, либо указывает, что прибор j в данный момент времени простаивает. Существуют различные формы представления расписаний: формулы, таблицы, графики и т.п. Наиболее известной графической формой представления расписания является диаграмма Гантта.

Пример 1. Два терминала аэропорта должны в течении дня принять и отправить 12 самолетов. Расписание работы терминалов представлено диаграммой Гантта типа (время-приборы), см. рисунок 2.1. Определить, является ли это расписание допустимым, если заданы желательные моменты начала (r_i) и завершения (d_i) обслуживания самолетов, длительности их обслуживания терминалами (τ_{ij}), а также допустимые отклонения от желательных моментов окончания обслуживания самолетов 2, 6 и 11 (0.5 часа).

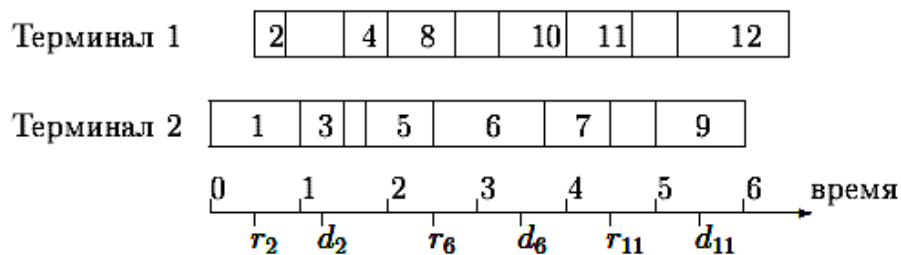


Рисунок 2.1 – Диаграмма Гантта для примера 1

Ответ: расписание недопустимо, т.к., отклонение d_{11} превышает 0.5 часа.

Пример 2. Цех, состоящий из пяти специализированных приборов, должен изготовить три изделия. Для каждого изделия задана последовательность прохождения приборов и длительности соответствующих операций. Диаграмма Гантта типа (время-требования) задает некоторое расписание, см. рисунок 2.2. Определить, является ли это расписание допустимым, если каждый прибор может обрабатывать не более одного изделия в каждый момент времени.

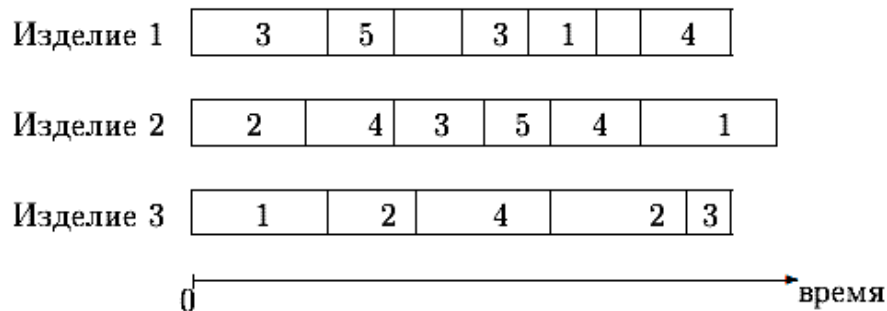


Рисунок 2.2 – Диаграмма Гантта для примера 2

Ответ: расписание недопустимо, так прибор 3 обслуживает одновременно два требования.

Критерием оптимальности расписания является соблюдение требованиями заданных директивных сроков, либо минимизация некоторой функции стоимости, зависящей от моментов завершения обслуживания требований.

2.1.2 Обозначения задач построения расписаний

Для представления задач построения оптимальных расписаний используется обозначение, состоящее из трех полей: $\alpha/\beta/\gamma$.

Первое поле $\alpha = \alpha_1\alpha_2$ описывает обслуживающую систему. Предполагается, что $\alpha_1 \in \{ \cdot, P, Q, R, O, F, J \}$, где \cdot обозначает пустой символ. Первые четыре символа служат для обозначения одностадийной системы обслуживания:

$\alpha_1 = \cdot$ – один прибор; $\tau_{i1} = \tau_i$;

$\alpha_1 = P$ – параллельные идентичные приборы: $\tau_{ij} = \tau_i$ для всех приборов;

$\alpha_1 = Q$ – параллельные приборы разной производительности: $\tau_{ij} = \tau_i / v_j$, где v_j – производительность j -го прибора;

$\alpha_1 = R$ – параллельные различные приборы: τ_{ij} являются произвольными целыми неотрицательными числами;

$\alpha_1 = O$ – "open-shop";

$\alpha_1 = F$ – "flow-shop";

$\alpha_1 = J$ – "job-shop".

Если $\alpha_1 \in \{ O, F, J \}$, то τ_{ij} являются произвольными целыми неотрицательными числами.

Символ α_2 служит для описания количества приборов, В случае $\alpha_2 = J$ имеется в виду, что количество приборов фиксировано и равно J . В случае $\alpha_2 = \cdot$ количество приборов – переменная величина, значение которой является элементом входных данных задачи. Заметим, что обозначение $\alpha_1 = \cdot$ применяется лишь в сочетании с $\alpha_2 = 1$.

Второе поле β описывает характеристики требований. Предполагается, что $\beta \subset \{ \beta_1, \dots, \beta_5 \}$, где β_1, \dots, β_5 определены следующим образом:

$\beta_1 \in \{ \cdot, pmtn \}$, где \cdot – прерывания обслуживания любого требования запрещены, $pmtn$ – прерывания разрешены;

$\beta_2 \in \{ \cdot, \tau_i = \tau, \tau_{ij} = \tau \}$, где \cdot – длительности обслуживания τ_i либо τ_{ij} произвольны,

$(\tau_i = \tau, \tau_{ij} = \tau)$ – τ_i либо τ_{ij} одинаковы и равны τ для всех требований и приборов;

$\beta_3 \in \{\cdot, d_i = d\}$, где \cdot – директивные сроки произвольны,

$d_i = d - d_i$ одинаковы и равны d для всех требований;

$\beta_4 \in \{\cdot, r_i\}$, где \cdot – моменты поступления равны нулю для всех требований,

r_i – моменты поступления требований произвольны;

$\beta_5 \in \{\cdot, prec, tree, in-tree, out-tree, s-p, chain\}$,

где \cdot – отношения предшествования на множестве требований не заданы,

prec – на множестве требований заданы отношения предшествования в виде произвольного ациклического ориентированного графа,

tree, in-tree, out-tree, s-p, chain – граф отношений предшествования является деревом, входящим деревом, выходящим деревом, последовательно-параллельным графом и набором цепей соответственно.

Третье поле γ указывает критерий задачи: отыскание расписания, допустимого относительно директивных сроков либо минимизирующего некоторую целевую функцию. Значение целевой функции зависит от следующих величин, которые могут быть вычислены для каждого требования i при заданном расписании:

- момент завершения обслуживания C_i ;

- временное смещение $L_i = C_i - d_i$;

- запаздывание $T_i = \max\{0, L_i\}$;

- единичный штраф U_i , где $U_i = 1$, если $L_i > 0$, т.е. требование i является запаздывающим, и $U_i = 0$ если $L_i \leq 0$, т.е. требование i не является запаздывающим (не запаздывающие требования называются *ранними*).

Расписание допустимо относительно директивных сроков, если $\forall i L_i \leq 0$.

Наиболее популярные целевые функции задач построения расписаний:

- максимальная стоимость $\max_i \{f_i(C_i)\}$;

- общий момент завершения обслуживания $\max_i \{C_i\}$;

- максимальное временное смещение $\max_i \{L_i\}$;

- максимальное запаздывание $\max_i \{T_i\}$;

- суммарная стоимость $\sum_i f_i(C_i)$;

- сумма моментов завершения (взвешенная) $\sum_i \omega_i \cdot C_i$;

- число запаздывающих требований (взвешенное) $\sum_i \omega_i \cdot U_i$;

- суммарное запаздывание (взвешенное) $\sum_i \omega_i \cdot T_i$.

Предполагается, что все вышеприведенные целевые функции являются регулярированными, т.е. неубывающими. Поле γ содержит обозначение одного го перечисленных критериев, т.е. $\gamma \in \{L_i \leq 0, \max_i \{f_i(C_i)\}, \dots, \sum_i \omega_i \cdot T_i\}$.

Пример 1. $\sum_i \omega_i \cdot C_i$ – имеется один прибор, на множестве требований

определены произвольные отношения предшествования, критерием является минимум взвешенной суммы моментов завершения. Кроме того, запрещены прерывания и все требования готовы к обслуживанию в момент времени ноль.

Пример 2. $QJ/\tau_i = \tau$, $d_i = d/L_i \leq 0$ – имеется J параллельных приборов разной производительности, все значения τ_i и все значения d_i одинаковы, критерием является поиск расписания, допустимого относительно заданных директивных сроков. Запрещены прерывания. Все требования готовы к обслуживанию в момент времени ноль.

2.1.3 Оптимальные последовательности требований и перестановочный прием

Во многих задачах расписания однозначно определяются указанием последовательностей обслуживания требований каждым из приборов. В ряде случаев удается установить, что существуют оптимальные последовательности, в которых требования упорядочены по неубыванию либо невозрастанию значений некоторого параметра, сопоставленного требованию.

Наиболее распространенные последовательности:

1) последовательность *EDD* (Earliest Due Date) – требования упорядочены по неубыванию директивных сроков d_i : $d_1 < \dots < d_j$;

2) последовательность *ERT* (Earliest Release Time) – требования упорядочены по неубыванию моментов поступления r_i : $r_1 < \dots < r_j$;

3) последовательность *SPT* (Shortest Processing Time) – требования упорядочены по неубыванию длительностей обслуживания τ_i : $\tau_1 < \dots < \tau_j$;

4) последовательность *SWPT* (Shortest Weighted Processing Time) – требования упорядочены по неубыванию отношений τ_i/ω_i : $\tau_1/\omega_1 < \dots < \tau_j/\omega_j$;

5) последовательность *LPT* (Longest Processing Time) – требования упорядочены по невозрастанию длительностей обслуживания τ_i : $\tau_1 > \dots > \tau_j$.

При доказательстве того, что существует оптимальная последовательность требований, удовлетворяющая определенным условиям, зачастую используется так называемый *перестановочный прием*, который состоит в следующем. Предполагается, что существует оптимальная последовательность обслуживания требований, в которой расположение некоторых требований i_1 и i_2 не удовлетворяет имеющимся ограничениям. Например, предполагается, что в оптимальной последовательности требование i_1 предшествует требованию i_2 , в то время как с точки зрения ограничений они должны быть расположены в обратном порядке. Затем рассматривается последовательность, полученная из исходной путем перестановки требований i_1 и i_2 местами. Если удастся доказать, что в результате значение целевой функции не увеличится, то оптимальна и новая последовательность. Применение этой процедуры конечное число раз приводит к оптимальной последовательности, удовлетворяющей ограничениям. Зачастую используется обобщен-

ние описанной техники, при котором переставляются не отдельные требования, а целые сегменты их последовательности,

Замечание. Если при доказательстве некоторого утверждения техника применения перестановочного приема не вызывает затруднений, отмечается лишь возможность использования этого приема, а само доказательство не приводится.

2.1.4 Применение динамического программирования для построения оптимальных расписаний

Динамическое программирование (ДП) является универсальным методом решения экстремальных задач. Рассмотрим ДП как процесс построения множеств частичных решений исходной задачи и выбора из этих множеств *доминирующих решений* – таких, что хотя бы одно из них может быть "достроено" до оптимального.

Рассмотрим задачу минимизации $f(x) \rightarrow \min, x \in X$, процесс решения которой может быть организован следующим образом. Формируются множества X_0, X_1, \dots, X_n частичных решений, где множество X_{k+1} получается из множества X_k путем "достраивания" каждого решения из X_k . Оптимальное решение x^* выбирается из множества X_n . С каждым частичным решением $x \in X_k$ связывается *состояние* – некоторый набор параметров $B(x) = (k, b_1, \dots, b_m)$, называемых переменными состояния, а $X_k(B)$ обозначает множество частичных решений $x \in X_k$ в состоянии B .

В методе ДП с каждым состоянием B связывается функция доминирования $F(B)$, такая, что частичное решение, находящееся в состоянии B и соответствующее $\text{ext}(F(B))$, *доминирует* все остальные частичные решения в состоянии B , т.е. оно может быть достроено до полного допустимого решения с наилучшим значением целевой функции среди всех полных допустимых решений, достроенных из любого частичного решения в состоянии B . Из определения функции $F(B)$ следует, что в каждом множестве $X_k(B)$ следует выбирать для "достройки" доминирующее решение. Обозначим через S множество всех возможных состояний, называемое *пространством состояний*. Применение метода ДП предусматривает рекуррентное вычисление значений $F(B)$ и определение состояния, соответствующего оптимальному решению, для которого формируется следующее множество частичных решений и т.д. до определения оптимального решения.

Для применения метода ДП необходимо корректно определить:

- 1) пространство состояний S ,
- 2) функцию доминирования $F(B), B \in S$,
- 3) способ построения частичных решений $x' \in X_{k+1}$ из решений $x \in X_k$,
- 4) метод вычисления состояния $B(x')$ с учетом состояния $B(x)$,
- 5) рекуррентную формулу для вычисления значений $F(B)$.

Пример. Станочник должен обработать I деталей к заданному сроку d , начиная с момента времени ноль. Для каждой i -й детали задана трудоемкость обработки τ_i и штраф ω_i , выплачиваемый в случае завершения обработки i -й детали позже d . Все параметры являются неотрицательными целыми числами. Требуется

найти последовательность обработки деталей, обеспечивающую минимум суммарного штрафа.

При выбранной последовательности обработки деталей (i_1, \dots, i_l) момент завершения обработки каждой детали i_m : $C_{i_m} = \sum_{k=1}^m \tau_{i_k}$. Введем в рассмотрение переменные U_i : $U_i = 1$, если i -я деталь обработана с опозданием ($C_i > d$), и $U_i = 0$, если вовремя ($C_i < d$). Требуется найти такую последовательность обработки деталей, что значение $\sum_{i=1}^I \omega_i \cdot U_i$ минимально.

Заметим, что на значение целевой функции влияет лишь информация о том, какие детали обработаны с опозданием, а какие вовремя. Поэтому существует оптимальная последовательность обработки, в которой сначала в произвольном порядке расположены все детали, обработанные вовремя, а затем все запаздывающие детали, упорядоченные произвольно. Тогда задача может быть сформулирована следующим образом:

$$\sum_{i=1}^I \omega_i \cdot U_i \rightarrow \min$$

при условиях:

$$\sum_{i=1}^I \tau_i \cdot (1 - U_i) \leq d,$$

$$U_i \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, I.$$

Пусть $U^* = (U^*_1, \dots, U^*_I)$ - оптимальный вектор для этой задачи и Ω^* - соответствующее значение целевой функции. В терминах ДП эта задача может быть интерпретирована следующим образом. Частичные решения формируются в результате определения переменных $U_i, i \in (1, \dots, I)$: $U_i = 0$, либо $U_i = 1$. Решение (U_1, \dots, U_k) находится в состоянии (k, a) , если определены значения переменных U_1, \dots, U_k и значение ограничения $\sum_{i=1}^k \tau_i \cdot (1 - U_i) = a$. Переменные состояния могут принимать значения: $k = 0, 1, \dots, I$; $a = 0, 1, \dots, d$.

Из начального состояния $(0, 0)$ можно перейти в состояние $(1, 0)$, при котором $U_1 = 1$, либо в состояние $(0, \tau_1)$ где $U_1 = 0$, если $\tau_1 < d$. В состоянии (k, a) , $k \in \{2, \dots, I\}$ можно перейти только из состояния $(k - 1, a)$, если $U_k = 1$, либо из состояния $(k - 1, a - \tau_k)$, если $U_k = 0$. В качестве функции доминирования $F(k, a)$ будем использовать часть целевой функции $\sum_{i=1}^k \omega_i \cdot U_i$, вычисленной для состояния (k, a) . Из этого следует:

$$\Omega^* = \min\{F(I, a) | a = 0, \dots, d\}. \quad (2.1)$$

Значения функции $F(k, a)$ могут быть вычислены рекуррентно, если вначале положить $F(0, 0) = 0$ и $F(k, a) = \infty$ для всех $(k, a) \neq (0, 0)$:

$$F(k, a) = \min\{F(k - 1, a) + \omega_k, F(k - 1, a - \tau_k)\}, k = 1, \dots, I, a = 0, \dots, d, \quad (2.2)$$

причем, если $F(k,a) = F(k-1,a) + \omega_k$, то в частичном решении, соответствующем состоянию (k,a) , переменная $U_k = 1$, а если же $F(k,a) = F(k-1,a - \tau_k)$, то в этом решении $U_k = 0$.

Пусть $I = 8$, $d = 40$ мин., трудоемкости обработки деталей и штрафы за просрочку следующие:

Номер детали							
1	2	3	4	5	6	7	8
Трудоемкость операции (τ_i), мин							
6	7	3	5	10	7	6	5
Штраф за просрочку (ω_i), руб							
80	50	20	60	90	70	40	30

$k = 1$: $U = (1, \times, \times, \times, \times, \times, \times, \times) \rightarrow F(1,0) = 80$; $U = (0, \times, \times, \times, \times, \times, \times, \times) \rightarrow a = 6$, $F(1,6) = 0$.
 $k = 2$: $U = (1, 1, \times, \times, \times, \times, \times, \times) \rightarrow F(2,0) = 130$; $U = (1, 0, \times, \times, \times, \times, \times, \times) \rightarrow a = 7$, $F(2,7) = 80$;
 $U = (0, 1, \times, \times, \times, \times, \times, \times) \rightarrow F(2,6) = 50$; $U = (0, 0, \times, \times, \times, \times, \times, \times) \rightarrow a = 13$, $F(2,13) = 0$.
Решения $U = (1, \times, \times, \times, \times, \times, \times, \times)$ доминируются решениями $U = (0, \times, \times, \times, \times, \times, \times, \times)$.
 $k = 3$: $U = (0, 1, 1, \times, \times, \times, \times, \times) \rightarrow F(3,6) = 70$; $U = (0, 1, 0, \times, \times, \times, \times, \times) \rightarrow a = 9$, $F(3,9) = 50$;
 $U = (0, 0, 1, \times, \times, \times, \times, \times) \rightarrow F(3,13) = 20$; $U = (0, 0, 0, \times, \times, \times, \times, \times) \rightarrow a = 16$, $F(3,16) = 0$.
Решения $U = (0, 1, \times, \times, \times, \times, \times, \times)$ доминируются решениями $U = (0, 0, \times, \times, \times, \times, \times, \times)$.
 $k = 4$: $U = (0, 0, 1, 1, \times, \times, \times, \times) \rightarrow F(4,13) = 80$; $U = (0, 0, 1, 0, \times, \times, \times, \times) \rightarrow a = 18$, $F(4,18) = 20$;
 $U = (0, 0, 0, 1, \times, \times, \times, \times) \rightarrow F(4,5) = 60$; $U = (0, 0, 0, 0, \times, \times, \times, \times) \rightarrow a = 21$, $F(4,21) = 0$.
Решения $U = (0, 0, \times, 1, \times, \times, \times, \times)$ доминируются решениями $U = (0, 0, \times, 0, \times, \times, \times, \times)$.
 $k = 5$: $U = (0, 0, 1, 0, 1, \times, \times, \times) \rightarrow F(5,18) = 110$; $U = (0, 0, 1, 0, 0, \times, \times, \times) \rightarrow a = 28$, $F(5,28) = 20$;
 $U = (0, 0, 0, 0, 1, \times, \times, \times) \rightarrow F(5,10) = 90$; $U = (0, 0, 0, 0, 0, \times, \times, \times) \rightarrow a = 31$, $F(5,31) = 0$.
Решения $U = (0, 0, \times, 0, 1, \times, \times, \times)$ доминируются решениями $U = (0, 0, \times, 0, 0, \times, \times, \times)$.
 $k = 6$: $U = (0, 0, 1, 0, 0, 1, \times, \times) \rightarrow F(5,28) = 90$; $U = (0, 0, 1, 0, 0, 0, \times, \times) \rightarrow a = 35$, $F(5,35) = 20$;
 $U = (0, 0, 0, 0, 0, 1, \times, \times) \rightarrow F(5,7) = 70$; $U = (0, 0, 0, 0, 0, 0, \times, \times) \rightarrow a = 38$, $F(5,38) = 0$.
Решения $U = (0, 0, \times, 0, 0, 1, \times, \times)$ доминируются решениями $U = (0, 0, \times, 0, 0, 0, \times, \times)$.
 $k = 7$: $U = (0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, \times) \rightarrow F(7,35) = 60$; $U = (0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, \times) \rightarrow a = 41 > d$;
 $U = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, \times) \rightarrow F(7,38) = 40$; $U = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \times) \rightarrow a = 44 > d$.
Решения $U = (0, 0, \times, 0, 0, 0, 0, \times)$ не допустимы.
 $k = 8$: $U = (0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1) \rightarrow F(8,35) = 90$; $U = (0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0) \rightarrow a = 40$, $F(8,40) = 60$;
 $U = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1) \rightarrow F(8,38) = 70$; $U = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0) \rightarrow a = 43 > d$.
Решение $U = (0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0)$ оптимально: детали следует обрабатывать в последовательности: 1,2,4,5,6,8,3,7.

Алгоритмы ДП, в которых частичные решения формируются от начала к концу (как в рассмотренном примере), называются прямыми. Обратные алгоритмы формируют частичные решения от конца к началу. Например, рассматриваемая задача может быть решена в пространстве состояний (k,a) следующим образом. Полагаем $F(I+1,0) = 0$, все остальные начальные значения $F(k,a)$ равными бесконечности и вычисляем

$$F(k,a) = \min\{F(k+1, a - \tau_k), F(k+1,a) + \omega_k\}, k = I, I-1, \dots, 1, a = 0, \dots, d$$

Оптимальное значение целевой функции равно $\Omega^* = \min\{F(1,a) | a = 0, \dots, d\}$.

Как правило, существует несколько вариантов выбора пространства состояний. Например, можно переформулировать задачу предыдущего примера и ввести состояния (k, ω) такие, что определены значения переменных U_1, \dots, U_k и $\sum_{i=1}^k \omega_i \cdot U_i = \omega \leq \Omega$. В этом случае функция $F(k, \omega)$ определяется как наименьшая продолжительность обработки деталей без опозданий $\sum_{i=1}^k \tau_i \cdot (1 - U_i)$, причем ограничение $\sum_{i=1}^I \tau_i \cdot (1 - U_i) \leq d$ сохраняется. Рекуррентное соотношение записывается в

виде:

$$F(k, \omega) = \min\{F(k-1, \omega) + \tau_k F(k-1, \omega - \omega_k)\}, k = 1, \dots, I, \omega = 0, \dots, \Omega$$

Решение предыдущей задачи на пространстве состояний (k, ω) с применением обратного алгоритма при $\Omega = 100$ руб.:

$$k = 8: U = (\times, \times, \times, \times, \times, \times, \times, 0) \rightarrow F(8, 0) = 5; U = (\times, \times, \times, \times, \times, \times, \times, 1) \rightarrow \omega = 30, F(8, 30) = 0.$$

$$k = 7: U = (\times, \times, \times, \times, \times, \times, 0, 0) \rightarrow F(7, 0) = 11; U = (\times, \times, \times, \times, \times, \times, 1, 0) \rightarrow \omega = 40, F(7, 40) = 5;$$

$$U = (\times, \times, \times, \times, \times, \times, 0, 1) \rightarrow F(7, 30) = 6; U = (\times, \times, \times, \times, \times, \times, 1, 1) \rightarrow \omega = 70, F(7, 70) = 0.$$

Решения $U = (\times, \times, \times, \times, \times, \times, 0, \times)$ доминируются решениями $U = (\times, \times, \times, \times, \times, \times, 1, \times)$.

$$k = 6: U = (\times, \times, \times, \times, \times, 0, 1, 0) \rightarrow F(6, 40) = 12; U = (\times, \times, \times, \times, \times, 1, 1, 0) \rightarrow \omega = 110 > \Omega;$$

$$U = (\times, \times, \times, \times, \times, 0, 1, 1) \rightarrow F(6, 70) = 7; U = (\times, \times, \times, \times, \times, 1, 1, 1) \rightarrow \omega = 140 > \Omega.$$

Решения $U = (\times, \times, \times, \times, \times, 1, 1, \times)$ не допустимы.

$$k = 5: U = (\times, \times, \times, \times, 0, 0, 1, 0) \rightarrow F(5, 40) = 22; U = (\times, \times, \times, \times, 1, 0, 1, 0) \rightarrow \omega = 130 > \Omega;$$

$$U = (\times, \times, \times, \times, 0, 0, 1, 1) \rightarrow F(5, 70) = 17; U = (\times, \times, \times, \times, 1, 0, 1, 1) \rightarrow \omega = 160 > \Omega.$$

Решения $U = (\times, \times, \times, \times, 1, 0, 1, \times)$ не допустимы.

$$k = 4: U = (\times, \times, \times, 0, 0, 0, 1, 0) \rightarrow F(4, 40) = 27; U = (\times, \times, \times, 1, 0, 0, 1, 0) \rightarrow \omega = 100, F(4, 100) = 22;$$

$$U = (\times, \times, \times, 0, 0, 0, 1, 1) \rightarrow F(4, 70) = 22; U = (\times, \times, \times, 1, 0, 0, 1, 1) \rightarrow \omega = 130 > \Omega.$$

Решение $U = (\times, \times, \times, 1, 0, 0, 1, 1)$ не допустимо, решение $U = (\times, \times, \times, 0, 0, 0, 1, 0)$ доминируется.

$$k = 3: U = (\times, \times, 0, 0, 0, 0, 1, 1) \rightarrow F(3, 70) = 25; U = (\times, \times, 1, 0, 0, 0, 1, 1) \rightarrow \omega = 90, F(3, 90) = 22;$$

$$U = (\times, \times, 0, 1, 0, 0, 1, 0) \rightarrow F(3, 100) = 25; U = (\times, \times, 1, 1, 0, 0, 1, 0) \rightarrow \omega = 120 > \Omega.$$

Решение $U = (\times, \times, 1, 1, 0, 0, 1, 0)$ не допустимо, решение $U = (\times, \times, 0, 1, 0, 0, 1, 0)$ доминируется ($\omega = 100 = \Omega$).

$$k = 2: U = (\times, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1) \rightarrow F(2, 70) = 32; U = (\times, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1) \rightarrow \omega = 120 > \Omega;$$

$$U = (\times, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1) \rightarrow F(2, 90) = 29; U = (\times, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1) \rightarrow \omega = 140 > \Omega.$$

Решения $U = (\times, 1, \times, 0, 0, 0, 1, 1)$ не допустимы.

$$k = 1: U = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1) \rightarrow F(1, 70) = 38; U = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1) \rightarrow \omega = 150 > \Omega;$$

$$U = (0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1) \rightarrow F(1, 90) = 35; U = (1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1) \rightarrow \omega = 170 > \Omega.$$

Решения $U = (1, 0, \times, 0, 0, \times, 1, 1)$ не допустимы.

В качестве оптимального выберем решение $U = (0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1)$, которому соответствует меньшее суммарное время обработки деталей: детали следует обрабатывать в последовательности: 1, 2, 4, 5, 6, 3, 7, 8. Заметим, что этому решению соответствует большее значение штрафа, чем найденному ранее.

2.1.5 Эвристические решающие правила построения расписаний

На практике для составления расписаний нередко используют так называемые эвристические алгоритмы (решающие правила), которые позволяют построить расписание без перебора вариантов. Расписания подбираются и уточняются по опыту эксплуатации производственных систем. Эти правила не претендуют на поиск оптимального решения, но формализуют практический опыт.

Основные решающие правила:

- правило "*кратчайшей операции*",
- правило "*максимальной остаточной трудоемкости*",
- правило "*минимальной остаточной трудоемкости*".

Правило *кратчайшей операции*: из текущего портфеля требований, подготовленных к выполнению с помощью данного прибора, выбирают требования с минимальным временем выполнения. В расписание работы второго и последующих приборов необходимо включить требования, операции обработки которых предыдущими приборами уже закончены, причем требования ранжируются в порядке увеличения продолжительностей операций. Это правило применяют в тех случаях, когда необходимо как можно быстрее загрузить работой следующие по технологическому маршруту приборы.

Правило *максимальной остаточной трудоемкости*: из текущего портфеля требований, подготовленных к выполнению с помощью данного прибора, выбирают требования с максимальной суммой времени обработки всеми еще не пройденными приборами, включая рассматриваемый. Это правило целесообразно использовать для определения последовательности обработки внутри одной группы требований, если требования существенно различаются по продолжительности обработки.

Правило *минимальной остаточной трудоемкости*: из текущего портфеля требований, подготовленных к выполнению с помощью данного прибора, выбирают требования с минимальной суммарной продолжительностью обработки на всех еще не пройденных приборах, включая рассматриваемый. Это правило противоположно предыдущему и используется, если необходимо по возможности быстрее разгрузить ТС, сократив количество одновременно обрабатываемых требований.

Существуют и другие решающие правила, в том числе построенные на основе комбинирования рассмотренных. Заметим, что для формирования реального расписания работы ТС необходимо оперировать достоверными данными о требованиях, на основе анализа которых выбирается решающее правило, позволяющее получить одно из лучших расписаний. Окончательный вариант расписания выбирают после построения диаграммы Ганта, стремясь при этом к сокращению общей продолжительности обработки всех требований.

Пример. Решить задачу о загрузке четырех станков обработкой заготовок восьми деталей (задача $F // \max_i \{C_i\}$) Трудоемкости обработки деталей на станках следующие:

	Номер детали							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Трудоемкость операции, мин							
1-й станок	7	3	4	5	8	5	2	3
2-й станок	5	4	3	6	8	9	7	2
3-й станок	3	2	6	4	4	8	5	2
4-й станок	5	2	3	7	2	6	4	3

Правило кратчайшей операции.

Ранжирование деталей по возрастанию трудоемкости. 1-й станок: 7,2,8,3,4,6,1,5.

2-й станок: 8,3,2,1,4,7,5,6.

3-й станок: 2,8,1,4,5,7,3,6.

4-й станок: 2,5,3,8,7,1,6,4.

1-й станок обрабатывает детали в порядке возрастания трудоемкости, остальные – детали, обработанные предыдущим станком, в порядке возрастания трудоемкости:



Правило максимальной остаточной трудоемкости.

Ранжирование деталей по максимальной сумме времени обработки всеми еще не пройденными станками. Перед обработкой 1-м станком: 6,4,5,1,7,3,2,8.

2-м станком: 6,4,7,5,1,3,2,8.

3-м станком: 6,4,7,3,1,5,8,2.

4-м станком: 4,6,1,7,3,8,5,2.

1-й станок обрабатывает детали в порядке возрастания суммы времени обработки всеми станками, остальные – детали, уже обработанные предыдущим станком, в порядке возрастания суммы времени обработки еще не пройденными станками:



Правило минимальной остаточной трудоемкости.

Ранжирование деталей по минимальной сумме времени обработки всеми еще не пройденными станками. Перед обработкой 1-м станком: 8,2,3,7,1,5,4,6.

2-м станком: 8,2,3,1,5,7,4,6.

3-м станком: 2,8,5,1,3,7,4,6.

4-м станком: 2,5,8,3,7,1,6,4.

1-й станок обрабатывает детали в порядке убывания суммы времени обработки всеми станками, остальные – детали, уже обработанные предыдущим станком, в порядке убывания суммы времени обработки еще не пройденными станками:



Как видно, лучшим является расписание, построенное по правилу кратчайшей операции: суммарное время обработки деталей $T = 53$ мин. Применение правила максимальной остаточной трудоемкости дает расписание с $T = 59$ мин., минимальной остаточной трудоемкости – расписание с $T = 64$ мин.

2.1.6 Приближенные алгоритмы с гарантированными оценками точности

В этом разделе рассматриваются алгоритмы решения некоторых задач поиска оптимального расписания, которые гарантированно приводят к решению, близкому к оптимальному.

Рассмотрим задачу $P // \sum_i \omega_i \cdot C_i$ (параллельные идентичные приборы и $\tau_i = \tau_{ij}$,

$i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J$; критерий – взвешенная сумма моментов завершения обслуживания требований). Прерывания запрещены, все требования готовы к обслуживанию в момент времени ноль.

В этой задаче расписание однозначно определяется разбиением множества требований на подмножества N_1, \dots, N_J требований, обслуживаемых каждым прибором, и указанием порядка их обслуживания в каждом подмножестве. При помощи перестановочного приема доказано, что для решения этой задачи можно ограничиться рассмотрением расписаний, в которых требования каждого подмножества N_j упорядочены по правилу *SWPT*, т.е. по неубыванию значений τ_i/ω_i . Таким образом, расписание однозначно определяется разбиением множества требований на J подмножеств.

Приближенный алгоритм решения рассматриваемой задачи состоит в следующем. Необходимо перенумеровать требования так, что $\tau_1/\omega_1 < \dots < \tau_I/\omega_I$. Затем последовательно, начиная с первого, назначаются требования $1, \dots, I$ на приборы. Пусть требования $0, \dots, k, k < I$, назначены (0 – фиктивное требование, соответствующее начальной ситуации $\tau_0 = 0$). Требование $k + 1$ назначается следующим образом: обозначим через T_j сумму длительностей обслуживания требований, назначенных на j -й прибор, $j = 1, \dots, J$. Находим такой прибор j , что $T_j = \min_{l=1, \dots, J} T_l$. Назначаем

требование $k + 1$ на прибор j и, если $k + 1 \neq I$, переходим к назначению требования $k + 2$.

Пример. Найти оптимальное расписание обработки $I = 8$ деталей на $J = 3$ станках, если трудоемкости обработки деталей (одинаковые для любого станка) и пожелания по срокам окончания их обработки (в баллах) следующие:

Номер детали							
1	2	3	4	5	6	7	8
Трудоемкость операции (τ_i), мин							
6	7	3	5	10	7	6	5
Баллы за срочность (ω_i)							
8	5	2	6	9	7	4	3

Рассчитаем значения τ_i/ω_i , $1, \dots, I$: 0.75, 1.4, 1.5, 0.83, 1.11, 1.0, 1.5, 1.67. Перенумеруем детали в порядке увеличения этих значений:

Номер детали							
1	2	3	4	5	6	7	8
Трудоемкость операции (τ_i), мин							
6	5	7	10	7	3	6	5
Баллы за срочность (ω_i)							
8	6	7	9	5	2	4	3

$k = 1$: $T_j = 0, j = 1, 2, 3 \rightarrow$ (1-я деталь назначается на 1-й станок) $N_1 = \{1\}$, $T_1 = 6$ мин.

$k = 2$: $T_j = 0, j = 2, 3 \rightarrow$ (2-я деталь назначается на 2-й станок) $N_2 = \{2\}$, $T_2 = 5$ мин.

$k = 3$: $T_3 = 0 \rightarrow$ (3-я деталь назначается на 3-й станок) $N_3 = \{3\}$, $T_3 = 7$ мин.

$k = 4$: $\min_{l=1,2,3} T_l = 5$ мин. \rightarrow (4-я деталь назначается на 2-й станок) $N_2 = \{2, 4\}$, $T_2 = 15$ мин.

$k = 5$: $\min_{l=1,2,3} T_l = 6$ мин. \rightarrow (5-я деталь назначается на 1-й станок) $N_1 = \{1, 5\}$, $T_1 = 13$ мин.

$k = 6$: $\min_{l=1,2,3} T_l = 7$ мин. \rightarrow (6-я деталь назначается на 3-й станок) $N_3 = \{3, 6\}$, $T_3 = 10$ мин.

$k = 7$: $\min_{l=1,2,3} T_l = 10$ мин. \rightarrow (7-я деталь назначается на 3-й станок) $N_3 = \{3, 6, 7\}$, $T_3 = 16$ мин.

$k = 8$: $\min_{l=1,2,3} T_l = 13$ мин. \rightarrow (8-я деталь назначается на 1-й станок) $N_1 = \{1, 5, 8\}$, $T_1 = 18$ мин.

Моменты окончания обработки деталей C_i : 6, 5, 7, 15, 13, 10, 16, 18 мин.

Значение критерия: $6 \cdot 8 + 5 \cdot 6 + 7 \cdot 7 + 15 \cdot 9 + 13 \cdot 5 + 10 \cdot 2 + 16 \cdot 4 + 18 \cdot 3 = 465$.

Задача об упаковке в контейнеры. В терминах теории расписаний эта задача формулируется следующим образом: $P/d_i = d/C_i < d_i$ (параллельные идентичные приборы и $\tau_i = \tau_{ij}$, $i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J$; директивные сроки одинаковы и равны d для всех требований; критерий – все требования должны быть обслужены к директивному сроку d). Прерывания запрещены, все требования готовы к обслуживанию в момент времени ноль.

Предполагается, что $d > \max_i \tau_i$ и требуется отыскать минимальное число приборов и соответствующее расписание, при котором все требования будут обслужены к заданному директивному сроку d .

Алгоритм решения этой задачи рассматривает перестановку требований, расположенных в порядке LPT (упорядочены по невозрастанию длительностей обслуживания τ_i : $\tau_1 > \dots > \tau_I$). Резервом времени прибора j , обозначаемым R_j , назы-

вается разность между d и суммарной длительностью обслуживания требований (T_j), назначенных на прибор j .

На шаге k алгоритма выбирается требование, расположенное на месте k в перестановке, и назначается на прибор с наименьшим номером среди приборов с достаточным резервом времени для завершения этого требования с срок, либо, на прибор с наименьшим достаточным резервом времени.

Пример. Найти минимальное количество контейнеров для упаковки $I = 12$ деталей, если емкость каждого из контейнеров $d = 2.5$ л, а объемы, занимаемые деталями в контейнере следующие:

Номер детали											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Занимаемый объем (τ_j), л											
0.6	0.7	0.3	0.5	1	0.75	0.8	0.4	0.2	0.15	0.9	0.1

Перенумеруем детали в порядке уменьшения значений τ_j :

Номер детали											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Занимаемый объем (τ_j), л											
1	0.9	0.8	0.75	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1

$k = 1: j = 1, N_1 = \{1\}, R_1 = 2.5 - 1 = 1.5.$

$k = 2: j = 1, N_1 = \{1,2\}, R_1 = 1.5 - 0.9 = 0.6.$

$k = 3: j = 2, N_2 = \{3\}, R_2 = 2.5 - 0.8 = 1.7.$

$k = 4: j = 2, N_2 = \{3,4\}, R_2 = 1.7 - 0.75 = 0.95.$

$k = 5: j = 2, N_2 = \{3,4,5\}, R_2 = 0.95 - 0.7 = 0.25.$

$k = 6: j = 1, N_1 = \{1,2,6\}, R_1 = 0.6 - 0.6 = 0.$

$k = 7: j = 3, N_3 = \{7\}, R_3 = 2.5 - 0.5 = 2.$

$k = 8: j = 3, N_3 = \{7,8\}, R_3 = 2 - 0.4 = 1.6.$

$k = 9: j = 3, N_3 = \{7,8,9\}, R_3 = 1.6 - 0.3 = 1.3.$

$k = 10: j = 2, N_2 = \{3,4,5,10\}, R_2 = 0.25 - 0.2 = 0.05.$

$k = 11: j = 3, N_3 = \{7,8,9,11\}, R_3 = 1.3 - 0.15 = 1.15.$

$k = 12: j = 3, N_3 = \{7,8,9,11,12\}, R_3 = 1.15 - 0.1 = 1.05.$

Ответ: необходимо три контейнера: в первый загружаются детали 1,2,6, во второй – 3,4,5,10, в третий – 7,8,9,11,12.

2.2 Составление расписаний работы технологических систем

В этом разделе рассматриваются постановки и алгоритмы решения некоторых задач составления расписаний одностадийных и многостадийных технологических систем.

2.2.1 Задачи оптимизации расписаний работы одностадийных систем

Остановимся на системах, состоящих из одного или нескольких параллельных приборов, причем каждое требование может быть полностью обслужено лю-

бым прибором. Поскольку функции стоимости неубывающие, составление расписания для случая $r_i = 0$ и $J \geq I$ очевидно – каждое требование назначается на отдельный прибор.

Один прибор. Максимальный штраф. Рассмотрим задачу $1/prec/f_{\max}$ (один прибор; на множестве требований заданы отношения предшествования; критерий – максимальная стоимость; запрещены прерывания; все требования готовы к обслуживанию в момент времени ноль). Поскольку моменты поступления требований равны нулю и прерывания процесса обслуживания запрещены, расписание однозначно определяется последовательностью требований.

Обозначим через I^L множество требований, которые не являются предшествующими (не упоминаются в постановке задачи как предшествующие какому-либо из требований). Тогда момент завершения обслуживания всех требований $C_I = \sum_{i=1}^I \tau_i$ совпадет с моментом завершения обслуживания одного из требований множества I^L (пусть это будет i -е требование). Тогда момент завершения обслуживания всех других требований равен $C_{I-1} = C_I - \tau_i$. Стоимость обслуживания i -го требования равна $f_i(C_I)$. Поскольку функции стоимости являются неубывающими, требованию $i \in I^L$, которое обслуживается последним, должно соответствовать минимальное значение $f_i(C_I)$.

Из оставшихся требований вновь формируется множество I^L , из вошедших в него требований выбирается то, которое следует обслужить последним и т.д., пока не будет построена последовательность (i_1, \dots, i_I) , являющаяся оптимальным решением задачи.

Пример. Решить задачу $1/prec/L_{\max}$ (критерий – максимальное временное смещение) для $I = 10$ деталей, последовательно обрабатываемых одним станком, причем деталь 3 необходимо обработать ранее детали 4, которая должна быть обработана ранее деталей 1, 7 и 9. Длительности обслуживания и директивные сроки следующие:

Номер детали									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Продолжительности обработки (τ_i), мин									
4	2	3	5	7	4	1	2	9	4
Директивные сроки (d_i), мин									
14	23	17	25	17	14	10	7	9	24

$$C_I = 4 + 2 + 3 + 5 + 7 + 4 + 1 + 2 + 9 + 4 = 41 \text{ мин.}$$

1. Множество $I^L = \{1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$, соответствующие временные смещения ($L_i = C_I - d_i$): $\{27, 18, 24, 27, 31, 34, 32, 17\} \rightarrow$ последней следует обработать деталь 10, $C_{I-1} = 41 - 4 = 37$ мин.
2. Множество $I^L = \{1, 2, 5, 6, 7, 8, 9\}$, $L_i = C_{I-1} - d_i$: $\{23, 14, 20, 23, 27, 30, 28\} \rightarrow$ последней следует обработать деталь 2, $C_{I-2} = 37 - 2 = 35$ мин.
3. Множество $I^L = \{1, 5, 6, 7, 8, 9\}$, $L_i = C_{I-2} - d_i$: $\{21, 18, 21, 25, 28, 26\} \rightarrow$ последней следует обработать деталь 5, $C_{I-3} = 35 - 7 = 28$ мин.
4. Множество $I^L = \{1, 6, 7, 8, 9\}$, $L_i = C_{I-3} - d_i$: $\{14, 14, 18, 21, 19\} \rightarrow$

- последней следует обработать деталь 1 или деталь 6, $C_{I-5} = 28 - 4 - 4 = 20$ мин.
5. Множество $I^L = \{7,8,9\}$, $L_i = C_{I-5} - d_i: \{10,13,11\} \rightarrow$
 последней следует обработать деталь 7, $C_{I-6} = 20 - 1 = 19$ мин.
6. Множество $I^L = \{8,9\}$, $L_i = C_{I-6} - d_i: \{12,10\} \rightarrow$
 последней следует обработать деталь 9.
7. Детали 1, 7, и 9 обработаны \rightarrow перед деталью 9 обрабатывается деталь 4, а перед ней – деталь 3. Перед деталью 3 – оставшаяся деталь 8.
- Оптимальное расписание: $\{8,3,4,9,7,1,6,5,2,10\}$ или $\{8,3,4,9,7,6,1,5,2,10\}$

Один прибор. Суммарный штраф. Рассмотрим задачу $1// \sum_i \omega_i \cdot U_i$ (один

прибор; отношения предшествования на множестве требований не заданы; критерий – взвешенное число запаздывающих требований; запрещены прерывания; все требования готовы к обслуживанию в момент времени ноль).

Упорядочим требования в порядке *EDD* (по неубыванию директивных сроков $d_i: d_1 < \dots < d_l$). Будем назначать требования на обслуживание в порядке $1, 2, \dots (U_1 = 0, U_2 = 0)$, пока не будет нарушен директивный срок очередного требования d_i . Среди требований $1, \dots, i$ отыскиваем требование с наибольшей длительностью обслуживания, например, требование k и удаляем его из последовательности $(1, \dots, i)$, т.е. считаем требование k запаздывающим ($U_k = 1$). Если после этого обслуживание требования i завершается до директивного срока d_i , то переходим к назначению требования $i + 1$. Если директивный срок d_i все еще нарушается, удаляем очередное требование с наибольшей длительностью обслуживания. Удаление продолжается до тех пор, пока директивный срок d_i не будет выполнен, либо будет удалено требование i . Процедура продолжается до тех пор, пока не будет построена оптимальная последовательность ранних требований. Все запаздывающие требования обслуживаются в произвольном порядке после последнего раннего требования.

Пример. Решить задачу предыдущего примера в постановке $1// \sum_i U_i$.

Упорядочение требований в порядке *EDD*:

Номер детали									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Продолжительности обработки (τ_i), мин									
2	9	1	4	4	3	7	2	4	5
Директивные сроки (d_i), мин									
7	9	10	14	14	17	17	23	24	25

$U_1 = 0 \rightarrow C_1 = 2 < d_1 = 7$ мин. $U_2 = 0 \rightarrow C_2 = 11 > d_2 = 9$ мин. $\rightarrow U_2 = 1$.

$U_3 = 0 \rightarrow C_3 = 3 < d_3 = 10$ мин. $U_4 = 0 \rightarrow C_4 = 7 < d_4 = 14$ мин.

$U_5 = 0 \rightarrow C_5 = 11 < d_5 = 14$ мин. $U_6 = 0 \rightarrow C_6 = 14 < d_6 = 17$ мин.

$U_7 = 0 \rightarrow C_7 = 21 > d_7 = 17$ мин. $\rightarrow U_7 = 1$. $U_8 = 0 \rightarrow C_8 = 16 < d_8 = 23$ мин.

$U_9 = 0 \rightarrow C_9 = 20 < d_9 = 24$ мин. $U_{10} = 0 \rightarrow C_{10} = 25 = d_{10} = 25$ мин.

Оптимальная последовательность ранних требований: $\{1,3,4,5,6,8,9,10\}$, запаздывающие требования: $\{2,7\}$. $\sum_i U_i = 2$.

Параллельные приборы. Максимальный штраф. Рассмотрим задачи $P//f_{\max}$ (параллельные идентичные приборы, $\tau_{ij} = \tau_i$; прерывания запрещены; критерий – максимальная стоимость; все требования готовы к обслуживанию в момент времени ноль) и $P/pmtn/f_{\max}$ (то же при разрешенных прерываниях) и их частные случаи.

Задача $P/pmtn/C_{\max}$. Вычислим значение $LB = \max \left\{ \max_i \{\tau_i\}, \frac{1}{J} \cdot \sum_{i=1}^I \tau_i \right\}$. Очевидно, что $LB < C_{\max}^*$, где C_{\max}^* – оптимальное значение общего момента завершения обслуживания.

Оптимальное расписание формируется следующим образом: требования назначаются на обслуживание в произвольной последовательности, например $1, 2, \dots, I$ на приборы $1, 2, \dots, J$ в интервале времени $[0, LB]$, начиная с момента времени ноль. Если на приборе j достигнут момент времени LB , и текущее требование i полностью не обслужено, его обслуживание прерывается и возобновляется на приборе $j + 1$, начиная с момента времени ноль.

Очевидно, что построенное с помощью этого алгоритма расписание является допустимым (ни одно требование не обслуживается двумя приборами одновременно) и для этого расписания $C_{\max} = LB$.

Пример. Найти оптимальное расписание обработки $I = 8$ деталей на $J = 3$ станках, если прерывания разрешены, критерием оптимальности является общий момент завершения обслуживания $\max_i \{C_i\}$, трудоемкости обработки деталей (одинаковые для любого станка) следующие:

Номер детали							
1	2	3	4	5	6	7	8
Трудоемкость операции (τ_i), мин							
6	7	3	5	10	7	6	5

$LB = \max \{ 10, (6+7+3+5+10+7+6+5)/3 = 16.33 \} = 16.33$ мин.

Назначение деталей на станки: $N_1 = \{1\}$, $T_1 = 6$ мин. $< LB$;

$N_2 = \{2\}$, $T_2 = 7$ мин. $< LB$;

$N_3 = \{3\}$, $T_3 = 3$ мин. $< LB$;

$N_1 = \{1,4\}$, $T_1 = 11$ мин. $< LB$;

$N_2 = \{2,5\}$, $T_2 = 15$ мин. $< LB$;

$N_3 = \{3,6\}$, $T_3 = 10$ мин. $< LB$;

$N_1 = \{1,4,7\}$, $T_1 = 17$ мин. $> LB \rightarrow$ прерывание:

$N_1 = \{1,4\}$, $T_1 = 11$ мин.;

$N_2 = \{2,5,7\}$, $T_2 = 21$ мин. $> LB \rightarrow$ прерывание:

$N_2 = \{2,5\}$, $T_2 = 15$ мин.;

$N_3 = \{3,6,7\}$, $T_3 = 16$ мин. $< LB$;

$N_1 = \{1,4,8\}$, $T_1 = 16$ мин. $< LB$.

Все детали распределены: $N_1 = \{1,4,8\}$, $T_1 = 16$ мин., $N_2 = \{2,5\}$, $T_2 = 15$ мин.,

$N_3 = \{3,6,7\}$, $T_3 = 16$ мин., $\max_i \{C_i\} = 16$ мин.

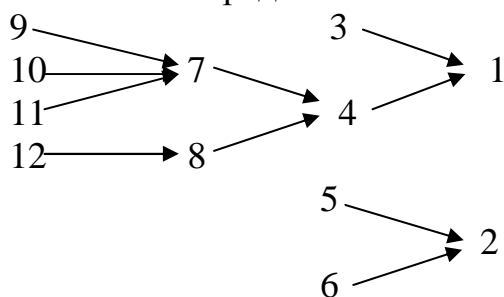
Задача $P/in-tree, \tau_i = 1/C_{\max}$ (отношения предшествования на множестве требований заданы в виде входящего дерева, продолжительности обработки одина-

ковы и равны 1 для всех требований и приборов; прерывания запрещены, все требования готовы к обслуживанию в момент времени ноль; критерий – общий момент завершения обслуживания). Обозначим через N множество требований, через N^+ – множество требований, которые не имеют предшественников, и через $h(i)$ – высоту требования i , т.е. количество требований, следующих за i -м. Алгоритм решения этой задачи предусматривает пометку некоторых требований, вначале все требования являются непомеченными.

Интервалы времени единичной длины нумеруются: $t = 1, 2, \dots$. На итерации t алгоритма осуществляется поиск прибора j , не задействованного в интервале времени t . Среди непомеченных требований множества N^+ выбираем требование i с наибольшей высотой $h(i)$, назначаем его на обслуживание в интервале t прибором j и помечаем требование i . Процесс назначения требований и их пометки прекращается, когда в интервале времени t все требования множества N^+ помечены или все приборы заняты. В последнем случае из множества N исключаются помеченные требования и, если $N \neq \emptyset$, осуществляется переход к назначению требований в интервале $t+1$. Если $N = \emptyset$, то оптимальное расписание построено.

Пример. Решить задачу $P/in-tree, \tau_i = 1/C_{\max}$, в которой $J = 3, I = 12$, требования 9,10,11 предшествуют 7, требование 12 предшествует 8, требования 7 и 8 предшествуют 4, требования 3 и 4 предшествуют 1, требования 5 и 6 предшествуют 2.

Отношения предшествования на множестве требований:



$N = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}, N^+ = \{3, 5, 6, 9, 10, 11, 12\}, h(i): 0, 0, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 3, 3, 3, 3.$

$t = 1$: требование 12 \rightarrow прибору 1,

требование 11 \rightarrow прибору 2,

требование 10 \rightarrow прибору 3, $N = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}, N^+ = \{3, 5, 6, 8, 9\}.$

$t = 2$: требование 9 \rightarrow прибору 1,

требование 8 \rightarrow прибору 2,

требование 6 \rightarrow прибору 3, $N = \{1, 2, 3, 4, 5, 7\}, N^+ = \{3, 5, 7\}.$

$t = 3$: требование 7 \rightarrow прибору 1,

требование 5 \rightarrow прибору 2,

требование 3 \rightarrow прибору 3, $N = \{1, 2, 4\}, N^+ = \{2, 4\}.$

$t = 4$: требование 4 \rightarrow прибору 1,

требование 2 \rightarrow прибору 2, $N = \{1\}, N^+ = \{1\}.$

$t = 5$: требование 1 \rightarrow прибору 1.

На прибор 1 в интервалах времени 1,2,3,4,5 назначены требования 12,9,7,4,1.

На прибор 2 в интервалах времени 1,2,3,4 назначены требования 11,8,3,2.

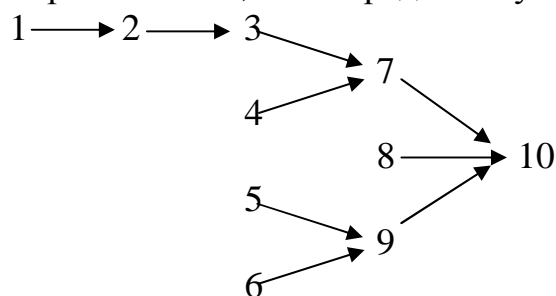
На прибор 3 в интервалах времени 1,2,3 назначены требования 10,6,3.

Задача $P/in-tree, \tau_i = 1/C_i < d_i$ (критерий – все требования являются ранними). Здесь также формируется множество N^+ требований, которые не имеют предшественников. Алгоритм решения этой задачи использует понятие λ -расписания: $\lambda = \{i_1, \dots, i_I\}$, в котором требования упорядочиваются по неубыванию модифицированных директивных сроков $d'_i, i = 1, \dots, I$, которые получаются из заданных значений $d_i, i = 1, \dots, I$ по правилу: если требование i не имеет потомков, то $d'_i = d_i$, в противном случае $d'_i = \min\{d_i, d'_k - 1\}$, где требование k – прямой потомок требования i .

Алгоритм решения этой задачи отличается от алгоритма решения предшествующей тем, что в первую очередь из множества N^+ выбираются требования с наименьшим номером в λ -расписании.

Пример. Решить задачу $P/in-tree, \tau_i = 1/C_i < d_i$, в которой $J = 3, I = 10$. $(d_1, \dots, d_{10}) = (6, 5, 6, 4, 9, 8, 7, 3, 2, 8)$. Отношения предшествования на множестве требований:

- требование 1 предшествует 2;
- требование 2 предшествует 3;
- требования 3 и 4 предшествуют 7;
- требования 5 и 6 предшествуют 9;
- требования 7, 8 и 9 предшествуют 10.



$N = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}, N^+ = \{1, 4, 5, 6, 8\}$.

Модифицированные директивные сроки:

$d'_{10} = d_{10} = 8, d'_9 = \min\{d_9, d'_{10} - 1\} = \min\{2, 7\} = 2,$
 $d'_8 = \min\{d_8, d'_{10} - 1\} = \min\{3, 7\} = 3, d'_7 = \min\{d_7, d'_{10} - 1\} = \min\{7, 7\} = 7,$
 $d'_6 = \min\{d_6, d'_9 - 1\} = \min\{8, 1\} = 1, d'_5 = \min\{d_5, d'_9 - 1\} = \min\{9, 1\} = 1,$
 $d'_4 = \min\{d_4, d'_7 - 1\} = \min\{4, 6\} = 4, d'_3 = \min\{d_3, d'_7 - 1\} = \min\{6, 6\} = 6,$
 $d'_2 = \min\{d_2, d'_3 - 1\} = \min\{5, 5\} = 5, d'_1 = \min\{d_1, d'_2 - 1\} = \min\{6, 4\} = 4,$
 следовательно $(d'_1, \dots, d'_{10}) = (4, 5, 6, 4, 1, 1, 7, 3, 2, 8)$, т.е. $\lambda = \{5, 6, 9, 8, 1, 4, 2, 3, 7, 10\}$.

$t = 1$: требование 5 → прибору 1,

требование 6 → прибору 2,

требование 8 → прибору 3, $N = \{1, 2, 3, 4, 7, 9, 10\}, N^+ = \{1, 4, 9\}$.

$t = 2$: требование 9 → прибору 1,

требование 1 → прибору 2,

требование 4 → прибору 3, $N = \{2, 3, 7, 10\}, N^+ = \{2\}$.

$t = 3$: требование 2 → прибору 1, $N = \{3, 7, 10\}, N^+ = \{3\}$.

$t = 4$: требование 3 → прибору 1, $N = \{7, 10\}, N^+ = \{7\}$.

$t = 5$: требование 7 → прибору 1, $N = \{10\}, N^+ = \{10\}$.

$t = 6$: требование 10 → прибору 1.

На прибор 1 в интервалах времени 1,2,3,4,5,6 назначены требования 5,9,2,3,7,10

На прибор 2 в интервалах времени 1,2 назначены требования 6,1.

На прибор 3 в интервалах времени 1,2 назначены требования 8,4.

Параллельные приборы. Суммарный штраф. Рассмотрим задачу $R // \sum_i C_i$ (параллельные различные приборы, τ_{ij} являются произвольными целыми

неотрицательными числами; прерывания запрещены; отношения предшествования на множестве требований не заданы; критерий – сумма моментов завершения обслуживания требований). В этой задаче длительность обслуживания i -го требования j -м прибором равна τ_{ij} . Если i -е требование назначено на j -й прибор и обслуживается этим прибором k -м с конца, то вклад этого требования в целевую функцию равен $k \cdot \tau_{ij}$ (для этого прибора и требований 1,2,3 $\sum_i C_i = \tau_{1j} + (\tau_{1j} + \tau_{2j}) + (\tau_{1j} + \tau_{2j} + \tau_{3j}) = 3 \cdot \tau_{1j} + 2 \cdot \tau_{2j} + \tau_{3j}$).

Введем переменные x_{ijk} , такие, что $x_{ijk} = 1$, если i -е требование обслуживается j -м прибором k -м с конца, и $x_{ijk} = 0$, в противном случае. Тогда задача $R // \sum_i C_i$

сводится к одной из известных задач линейного программирования – задаче о назначениях:

найти значения x_{ijk} , $i = 1, \dots, I$, $j = 1, \dots, J$, $k = 1, \dots, I$, при которых

$$\sum_i \sum_j \sum_k k \cdot \tau_{ij} \cdot x_{ijk} \rightarrow \min$$

и выполняются условия:

$$\sum_i x_{ijk} \leq 1, \quad j = 1, \dots, J, \quad k = 1, \dots, I \quad (\text{какой-то прибор может остаться без обслуживания требований});$$

$$\sum_j \sum_k x_{ijk} = 1, \quad i = 1, \dots, I \quad (\text{каждое требование должно быть обслужено});$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J, \quad k = 1, \dots, I.$$

Решение этой задачи с помощью симплекс-метода потребует поиска значений $I \times J \times I$ неизвестных x_{ijk} , например, при 10-ти требованиях и 3-х приборах потребуются найти значения 300 неизвестных.

Для решения задачи $Q // \sum_i C_i$ (параллельные приборы разной производительности (v_j), $\tau_{ij} = \tau_i / v_j$) существует более эффективный алгоритм. В этой задаче, если i -е требование обслуживается j -м прибором k -м с конца, то его вклад в целевую функцию равен $k \cdot \tau_i / v_j$. Задача сводится к выбору I значений k/v_j и назначению каждому из них требования i таким образом, что сумма произведений $k \cdot \tau_i / v_j$ минимальна. Доказано, что для этого достаточно выбрать I наименьших чисел k/v_j и назначать наибольшему из них наименьшее значение τ_i , следующему наибольшему из выбранных чисел k/v_j – следующее наименьшее значение τ_i и т. д. Если значение τ_i назначено значению k/v_j , то i -е требование обслуживается j -м прибором k -м с конца.

Пример. Решить задачу $Q // \sum_i C_i$, в которой $J = 3$, $v_1 = 1, v_2 = 2, v_3 = 3$, количество требований и длительности их обслуживания следующие:

Номер требования									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Продолжительности обслуживания (τ_i), мин									
6	18	24	12	6	12	12	24	6	18

Упорядочим 10 наименьших значений k/v_j по неубыванию: $(1/3, 1/2, 2/3, 3/3, 2/2, 1/1, 4/3, 3/2, 5/3, 2/1)$.

Упорядочим значения τ_i по невозрастанию: $(\tau_3, \tau_8, \tau_2, \tau_{10}, \tau_4, \tau_6, \tau_7, \tau_1, \tau_5, \tau_9)$.

Оптимальное расписание: требование 3 обслуживается прибором 3 первым с конца, требование 8 обслуживается прибором 2 первым с конца и т.д. Последовательность на приборе 1: (9,6), на приборе 2: (1,4,8), на приборе 3: (5,7,10,2,3)

Оптимальное расписание для задачи $P // \sum_i C_i$ (идентичные параллельные

приборы, $\tau_{ij} = \tau_i$) может быть построено при помощи следующего алгоритма:

1) упорядочение требований по правилу *SPT*: $\tau_1 < \dots < \tau_i$;

2) назначение требований на приборы в порядке $1, \dots, I$, причем каждое i -е требование назначается на тот прибор, где его обслуживание завершится раньше.

Задачи $Q/\tau_i = \tau / \sum_i f_i$ и $Q/\tau_i = \tau / f_{\max}$ сводятся к задачам о назначениях анало-

гично задаче $R // \sum_i C_i$: поскольку длительности обслуживания требований всеми

приборами одинаковы, при обслуживании i -го требования j -м прибором k -м с

конца его вклад в целевую функцию будет равен $k \cdot \tau / v_j$, при этом $f_i(C_i) = f_i(k \cdot \tau / v_j)$.

При введении в рассмотрение переменных x_{ijk} , таких, что $x_{ijk} = 1$, если i -е требова-

ние обслуживается j -м прибором k -м с конца, и $x_{ijk} = 0$, в противном случае целе-

вая функция задачи $Q/\tau_i = \tau / \sum_i f_i$ запишется следующим образом:

$\sum_i \sum_j \sum_k f_i(k \cdot \tau / v_j) \cdot x_{ijk} \rightarrow \min$, а задачи $Q/\tau_i = \tau / f_{\max}$ – следующим:

$\max\{f_i(k \cdot \tau / v_j) \cdot x_{ijk}\} \rightarrow \min$. В качестве ограничений в обеих задачах используются

ограничения задачи $R // \sum_i C_i$.

Появление весов требований значительно усложняет задачи построения

расписаний работы параллельных приборов, однако для некоторых из них существуют приближенные алгоритмы с гарантированными оценками точности. Такой

алгоритм решения задачи $P // \sum_i \omega_i \cdot C_i$ приведен в п. 2.1.6.

2.2.2 Задачи оптимизации расписаний работы многостадийных систем

Система flow-shop. В этой системе каждое требование обслуживается приборами в заданной последовательности: обслуживание требования прибором $j + 1$ может быть начато не ранее завершения его обслуживания прибором j .

Рассмотрим задачу $F2//C_{\max}$ (Система flow-shop состоит из двух приборов, τ_{ij} являются произвольными целыми неотрицательными числами, прерывания обслуживания любого требования запрещены, моменты поступления равны нулю для всех требований, отношения предшествования на множестве требований не заданы, критерий – момент завершения обслуживания). Обозначим $a_i = \tau_{i1}$ и $b_i = \tau_{i2}$.

Алгоритм решения этой задачи предусматривает формирование двух множеств: $N_1 = \{i \mid a_i \leq b_i\}$ и $N_2 = \{i \mid a_i > b_i\}$. В оптимальном расписании вначале обслуживаются требования множества N_1 в порядке неубывания значений a_i , а затем – требования множества N_2 в порядке невозрастания значений b_i .

Пример. Решить задачу $F2//C_{\max}$ для 10 требований. Построить диаграмму Гантта для оптимального расписания. Длительности обслуживания a_i и b_i заданы в таблице:

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a_i , мин	4	2	3	5	10	20	10	12	9	4
b_i , мин	4	3	8	12	7	10	10	7	9	14

$N_1 = \{1,2,3,4,7,9,10\}$, $N_2 = \{5,6,8\}$.

Оптимальное расписание: $\{2,3,1,10,4,9,7,6,8,5\}$ (требования 1 и 10, 5 и 8 можно поменять местами), $C_{\max} = 85$ мин.

Диаграмма Гантта:



Для задачи $F//C_{\max}$ (произвольное число приборов) доказано, что при $J \leq 3$ оптимальное расписание можно найти в классе расписаний, которые предусматривают обслуживание требований всеми приборами в одной и той же последовательности. При $J \geq 4$ это утверждение не справедливо, т.е. для обслуживания прибором $j + 1$ можно выбирать любое из требований, уже обслуженных прибором j .

Система open-shop. В этой системе требования обслуживаются приборами в произвольной последовательности. Напомним, что в любой момент времени каждое требование обслуживается не более чем одним прибором и любой прибор обслуживает не более одного требования. Задачи для системы open-shop обладают симметрией: приборы и требования можно поменять ролями без изменения существа задачи.

Рассмотрим задачу $O2//C_{\max}$ (аналогична задаче $F2//C_{\max}$, порядок обслуживания требований приборами не задан). Снова обозначим $a_i = \tau_{i1}$ и $b_i = \tau_{i2}$. Для оптимального расписания справедлива следующая оценка значения C_{\max} :

$$C_{\max} \geq \max \left\{ \sum_i a_i, \sum_i b_i, \max_i \{a_i + b_i\} \right\}.$$

Алгоритм построения оптимального расписания: на первый освободившийся прибор назначаем требование с максимальной длительностью обслуживания на другом приборе. Требования, завершившие обслуживание на другом приборе, обслуживаются данным прибором последними в том же порядке.

Пример. Каждое из 6 транспортных средств должно выполнить задания A и B в любом порядке. Построить расписание, минимизирующее момент завершения последнего задания. Длительности a_i и b_i для заданий A и B приведены в таблице:

i	1	2	3	4	5	6
a_i , мин	4	12	4	6	6	12
b_i , мин	8	6	2	10	8	8

Обозначим через T_1 и T_2 суммарные длительности выполнения заданий A и B соответственно а через π_1 и π_2 – последовательности их выполнения транспортными средствами.

- 1) $\pi_1 = \{4\}$, $T_1 = 6$ мин., $\pi_2 = \{2\}$, $T_2 = 6$ мин.
- 2) $\pi_1 = \{4,1\}$, $T_1 = 6 + 4 = 10$ мин., $\pi_2 = \{2,6\}$, $T_2 = 6 + 8 = 14$ мин.
- 3) $\pi_1 = \{4,1,5\}$, $T_1 = 10 + 6 = 16$ мин., $\pi_2 = \{2,6,3\}$, $T_2 = 14 + 2 = 16$ мин.
- 4) $\pi_1 = \{4,1,5,6\}$, $T_1 = 16 + 12 = 28$ мин., $\pi_2 = \{2,6,3,4\}$, $T_2 = 16 + 10 = 26$ мин.
- 5) $\pi_1 = \{4,1,5,6,2\}$, $T_1 = 28 + 12 = 40$ мин., $\pi_2 = \{2,6,3,4,5\}$, $T_2 = 26 + 8 = 34$ мин.
- 6) $\pi_1 = \{4,1,5,6,2,3\}$, $T_1 = 40 + 4 = 44$ мин., $\pi_2 = \{2,6,3,4,5,1\}$, $T_2 = 34 + 8 = 42$ мин.

Диаграмма Гантта:



Рассмотрим задачу $O3/\tau_{ij} = \tau / \sum_i C_i$ (Система open-shop состоит из трех при-

боров, τ_{ij} одинаковы и равны τ для всех требований и приборов, прерывания обслуживания любого требования запрещены, моменты поступления равны нулю для всех требований, отношения предшествования на множестве требований не заданы, критерий – сумма моментов завершения обслуживания). Для ее решение необходимо ввести понятие латинского прямоугольника – это прямоугольная матрица, построенная на множестве целых положительных чисел, такая, что каждая ее строка является перестановкой этих чисел, причем каждое число встречается в каждом столбце матрицы не более одного раза. Например, матрица

$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 7 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 6 & 7 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{pmatrix}$ является латинским прямоугольником.

Предположим, что число требований $I = k \cdot J + r$, $k > 0$, $0 < r < J$. Алгоритм построения оптимального расписания в этом случае предусматривает:

- дополнение множества требований фиктивными требованиями $I+1, \dots, (k+1) \cdot J$;
- разбиение нового множества требований на $k + 1$ наборов по J требований, начиная с первого (набор N_i включает требования $(i - 1) \cdot J + 1, \dots, i \cdot J$);
- перемещение $J - r$ наибольших элементов набора N_k в набор N_{k+1} , а $J - r$ фиктивных элементов набора N_{k+1} – в набор N_k ;
- построение для каждого набора N_i латинского квадрата Λ_i , в котором элементы первой строки расположены по возрастанию;
- построение матрицы Λ путем "склеивания" латинских квадратов N_i в порядке возрастания номеров;

- обмен местами в матрице Λ каждого фиктивного требования i с требованием, расположенным в той же строке и в столбце i (все фиктивные требования окажутся в последних столбцах).

Полученная матрица Λ (без последнего столбца) соответствует оптимальному расписанию для задачи $O3/\tau_{ij} = \tau / \sum_i C_i$.

Пример. Каждый из 8 студентов должен пройти медицинский осмотр в поликлинике у трех врачей в любом порядке. Все студенты пришли в поликлинику одновременно (в момент времени ноль) и каждый студент покидает поликлинику сразу после завершения осмотра. Длительность осмотра любого студента любым врачом равна 15 минутам. Построить расписание, минимизирующее среднее время пребывания студентов в поликлинике.

$$I = 8, J = 3 \rightarrow k = 2, r = 2 (8 = 2 \cdot 3 + 2).$$

Добавляем одно фиктивное требование: $I + 1 = (k + 1) \cdot J = 9$.

Наборы: $N_1 = \{1,2,3\}$, $N_2 = \{4,5,6\}$, $N_3 = \{7,8,9\}$; перемещение одного наибольшего элемента набора N_2 ($J - r = 1$) в набор N_3 , а фиктивного элемента набора N_3 – в набор N_2 : $N_2 = \{4,5,9\}$, $N_3 = \{7,8,6\}$.

Латинские квадраты: $\Lambda_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}$, $\Lambda_2 = \begin{pmatrix} 4 & 5 & 9 \\ 9 & 4 & 5 \\ 5 & 9 & 4 \end{pmatrix}$, $\Lambda_3 = \begin{pmatrix} 6 & 7 & 8 \\ 8 & 6 & 7 \\ 7 & 8 & 6 \end{pmatrix}$; матрица

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 9 & 6 & 7 & 8 \\ 3 & 1 & 2 & 9 & 4 & 5 & 8 & 6 & 7 \\ 2 & 3 & 1 & 5 & 9 & 4 & 7 & 8 & 6 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 8 & 6 & 7 & 9 \\ 3 & 1 & 2 & 7 & 4 & 5 & 8 & 6 & 9 \\ 2 & 3 & 1 & 5 & 6 & 4 & 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$$

Оптимальное расписание: $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 8 & 6 & 7 \\ 3 & 1 & 2 & 7 & 4 & 5 & 8 & 6 \\ 2 & 3 & 1 & 5 & 6 & 4 & 7 & 8 \end{pmatrix}$, $\sum_i C_i = 3 \cdot 45 + 2 \cdot (45 + 45) +$

$+ 3 \cdot (75 + 45) = 675$ мин. (студенты №№ 1,2,3 осматриваются без ожидания, студенты №№ 4,5 вынуждены ждать 45 мин. студенты №№ 6,7,8 – 75 мин.), среднее время пребывания студентов в поликлинике $\sum_i C_i / 8 = 84,375$ мин.

Незначительная модификация этого алгоритма позволяет решать задачу $O3/\tau_{ij} = \tau / \sum_i \omega_i C_i$ (критерий – взвешенная сумма моментов завершения обслужи-

вания требований). Единственное отличие заключается в том, что перед применением алгоритма требования необходимо перенумеровать так, чтобы $\omega_1 > \dots > \omega_I$.

Система job-shop. В этой системе задана последовательность приборов $J_i = 1, \dots, p_i$, обслуживающих каждое требование i , причем номера приборов в этой последовательности могут повторяться. Процесс обслуживания требования i прибором j_i называется j -й стадией обслуживания этого требования. Длительность j -й стадии обслуживания требования i обозначается как τ_{ij} .

Рассмотрим задачу $J/pmtn/f$ (τ_{ij} являются произвольными целыми неотрицательными числами, прерывания обслуживания требований разрешены, моменты поступления равны нулю для всех требований, отношения предшествования на множестве требований не заданы, критерий – некоторая функция моментов завершения об-

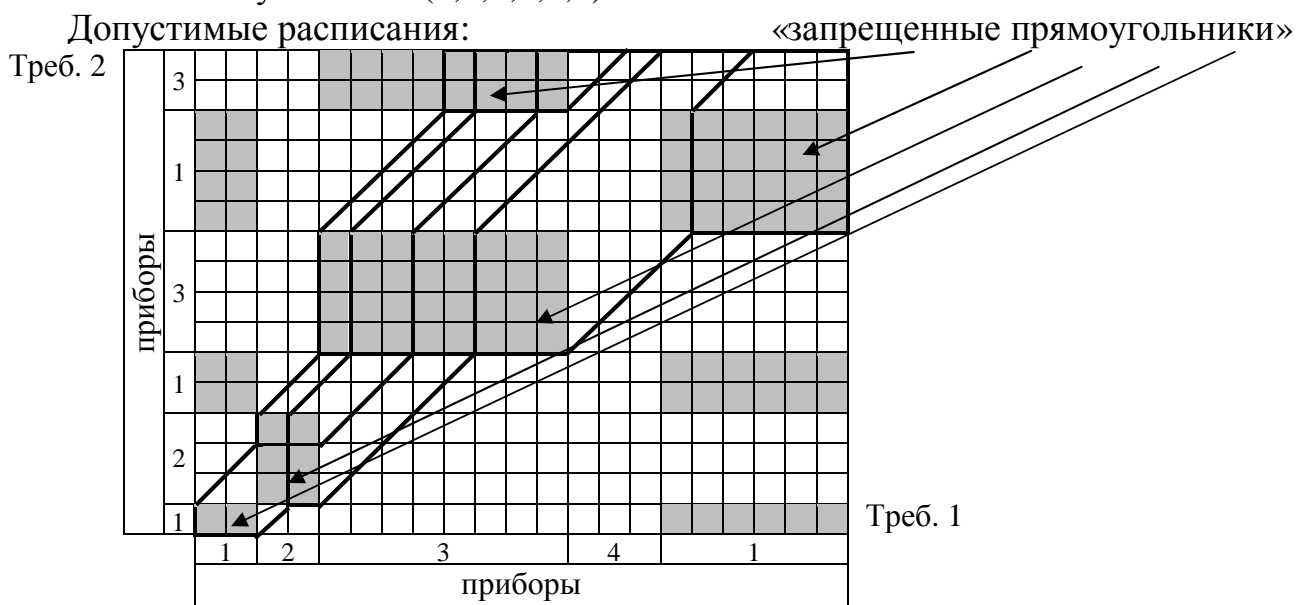
служивания требований) для двух требований ($I = 2$) и регулярной целевой функции $f(C_1, C_2)$, т.е. неубывающей ни от C_1 , ни от C_2 . В этом случае допустимое расписание может быть представлено графически.

Введем в рассмотрение прямоугольную систему координат. Отметим на оси $(0, x)$ точку $X = \sum_{j=1}^{p_1} \tau_{1j}$, а на оси $(0, y)$ точку $Y = \sum_{j=1}^{p_2} \tau_{2j}$. Для каждой точки (x, y) полу-

ченного прямоугольника, включая граничные, значение x соответствует суммарному времени работы приборов по обслуживанию требования 1, а y – требования 2, начиная с момента времени ноль. Расписание будем представлять в виде непрерывной ломаной линии, соединяющей точки $(0,0)$ и (X,Y) . Ее составляющими могут быть отрезки трех типов: горизонтальные (обслуживается только требование 1), вертикальные (обслуживается только требование 2) и наклонные под углом 45° (обслуживаются оба требования).

Внутри полученного прямоугольника имеются так называемые «запрещенные прямоугольники», внутренние точки которых соответствуют одновременному обслуживанию требований 1 и 2 одним и тем же прибором. Поскольку любой прибор в каждый момент времени может обслуживать не более одного требования, то наклонные отрезки допустимого расписания не могут находиться внутри «запрещенных прямоугольников», а в случае запрета прерываний – не должны находиться никакие отрезки.

Пример. Решить задачу $J/pmtn/(30 \cdot C_1 + C_2^2)$ для случая, когда требование 1 должно быть обслужено приборами (1,2,3,4,1), длительности обслуживания равны (2,2,8,3,6) мин. соответственно, а требование 2 – приборами (1,2,1,3,1,3) с длительностями обслуживания (1,3,2,4,4,2) мин. соответственно.



Алгоритм решения задачи:

1) Построение допустимых расписаний: из точки $(0,0)$ проводим прямую под углом 45° до ее пересечения с границей запрещенного прямоугольника или с границей области расписаний. Если такую линию провести невозможно, проводим две прямые – вертикальную и горизонтальную (если точка лежит на границе

области – одну из них), до точек, откуда возможно провести прямую под углом 45° , и т.д. до точки (X,Y) .

2) Выделение всех точек вида (X,y) и (x,Y) и определение длины кратчайшего пути $C(x,y)$ от точки $(0,0)$ до каждой из них, причем длина отрезка, соединяющего точки (x_1,y_1) и (x_2,y_2) принимается равной $\max\{|x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|\}$:

точка $(21,10) - C(21,10) = 2 + 1 + 1 + 5 + 3 + 4 + 5 = 21$

точка $(8,16) - C(8,16) = 1 + 2 + 1 + 2 + 4 + 4 + 2 = 16$

точка $(9,16) - C(9,16) = 2 + 1 + 3 + 2 + 4 + 4 + 2 = 18$

точка $(11,16) - C(11,16) = 1 + 2 + 2 + 3 + 4 + 4 + 2 = 18$

точка $(14,16) - C(14,16) = 1 + 2 + 2 + 3 + 4 + 4 + 1 + 2 = 19$

точка $(15,16) - C(15,16) = 2 + 1 + 1 + 5 + 4 + 6 = 19$

точка $(18,16) - C(18,16) = 2 + 1 + 1 + 5 + 3 + 4 + 4 + 2 = 22$

3) Расчет значений C_1, C_2 и $f(C_1, C_2)$ для расписаний, которые соответствуют выделенным точкам, с добавлением отрезков, соединяющих эти точки с точкой $(X,Y) - C_1 = C(x,y), C_2 = C(x,y) + Y - y$, если $x = X, y \neq Y; C_2 = C(x,y), C_1 = C(x,y) + X - x$, если $y = Y, x \neq X; C_1 = C_2 = C(x,y)$, если $x = X, y = Y$:

точка $(21,10) - C_1 = 21, C_2 = 21 + 16 - 10 = 27, f(C_1, C_2) = 30 \cdot 21 + 27^2 = 1359$;

точка $(8,16) - C_2 = 16, C_1 = 16 + 21 - 8 = 29, f(C_1, C_2) = 30 \cdot 29 + 16^2 = 1126$;

точка $(9,16) - C_2 = 18, C_1 = 18 + 21 - 9 = 30, f(C_1, C_2) = 30 \cdot 30 + 18^2 = 1224$;

точка $(11,16) - C_2 = 18, C_1 = 18 + 21 - 11 = 28, f(C_1, C_2) = 30 \cdot 28 + 18^2 = 1164$;

точка $(14,16) - C_2 = 19, C_1 = 19 + 21 - 14 = 26, f(C_1, C_2) = 30 \cdot 26 + 19^2 = 1141$;

точка $(15,16) - C_2 = 19, C_1 = 19 + 21 - 15 = 25, f(C_1, C_2) = 30 \cdot 25 + 19^2 = 1111$;

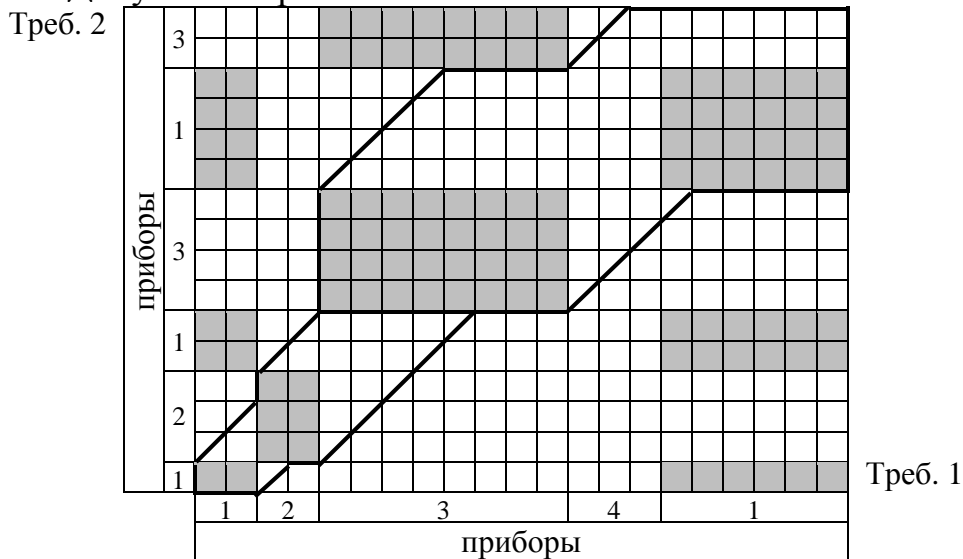
точка $(18,16) - C_2 = 22, C_1 = 22 + 21 - 18 = 25, f(C_1, C_2) = 30 \cdot 25 + 22^2 = 1234$.

Оптимальным является расписание $\{(0,0), (2,0), (3,1), (4,1), (9,6), (9,10), (15,16), (21,16)\}$, которому соответствует минимальное значение $f(C_1, C_2) = 1111$.

Алгоритм решения задачи $J//f(C_1, C_2)$ (прерывания обслуживания требований запрещены) отличается от рассмотренного тем, что допустимое расписание (ломаная линия) может проходить только по границам «запрещенных прямоугольников».

Пример. Решить задачу предыдущего примера в постановке $J//f(C_1, C_2)$.

Допустимые расписания:



Точки вида (X,y) и (x,Y) и кратчайшие пути $C(x,y)$ от точки $(0,0)$ до каждой из них:
 точка $(21,10) - C(21,10) = 2 + 1 + 1 + 5 + 3 + 4 + 5 = 21$
 точка $(14,16) - C(14,16) = 1 + 2 + 1 + 2 + 4 + 4 + 4 + 2 = 20$
 Значения C_1, C_2 и $f(C_1, C_2)$ для расписаний, которые соответствуют выделенным точкам, с добавлением отрезков, соединяющих эти точки с точкой (X,Y) :
 точка $(21,10) - C_1 = 21, C_2 = 21 + 16 - 10 = 27, f(C_1, C_2) = 30 \cdot 21 + 27^2 = 1359$;
 точка $(14,16) - C_2 = 20, C_1 = 20 + 21 - 14 = 27, f(C_1, C_2) = 30 \cdot 27 + 20^2 = 1210$.
 Оптимальным является расписание $\{(0,0), (0,1), (2,3), (2,4), (4,6), (4,10), (8,14), (12,14), (14,16), (21,16)\}$, которому соответствует значение $f(C_1, C_2) = 1210$.

2.2.3 Построение оптимальных расписаний обслуживания требований группами

Многие современные производственные системы обслуживают схожие либо идентичные требования группами. Требования одной и той же группы обслуживаются приборами непосредственно друг за другом, либо одновременно. Такая технология обслуживания приводит к значительному снижению затрат на переналадку.

Общая постановка задачи обслуживания требований группами. Образование групп – это разбиение множества требований на попарно непересекающиеся подмножества. Предполагается, что разбиение множества требований на группы одинаково для всех приборов, а обслуживание требований приборами происходит без прерываний.

Каждый прибор может обслуживать не более одной группы в каждый момент времени и не может обслуживать требования во время выполнения переналадки. Каждое требование может обслуживаться не более чем одним прибором в каждый момент времени, если не оговорено обратное.

Под моментом завершения обслуживания требования прибором понимается момент времени, когда требование покидает данный прибор. Этот момент может не совпадать с моментом завершения работы по обслуживанию данного требования, а соответствовать моменту завершения обслуживания последнего требования группы. На множестве групп, так же как и на множестве требований, может быть определено отношение предшествования (порядка). Под моментом завершения обслуживания группы понимается момент завершения обслуживания всех ее требований.

Непосредственно перед началом обслуживания каждой группы необходима переналадка приборов. В дальнейшем предполагается, что все переналадки являются упреждающими, т.е. переналадка должна закончиться до того, как хотя бы одно требование соответствующей группы поступило на обслуживание. Длительность переналадки для группы g равна $s_{hg}^{(j)}$ если эта группа обслуживается прибором j непосредственно после группы h . Если группа g является первой, обслуживаемой прибором j , то длительность соответствующей переналадки (наладки) равна $s_{0g}^{(j)}$. Предполагается, что длительности переналадок удовлетворяют «неравенству треугольника» для каждого прибора, т.е. $s_{hg}^{(j)} \leq s_{hf}^{(j)} + s_{fg}^{(j)}, j = 1, \dots, J$, для всех групп h, f и g , включая случай $h = 0$. Переналадки называются не зависящи-

ми, от прибора, если $s_{hg}^{(j)} = s_{hg}$ для $j = 1, \dots, J$, и зависящими, от прибора в противном случае. Переналадки называются не зависящими, от последовательности, если $s_{hg}^{(j)} = s_g^{(j)}$ для любой пары групп h и $g, j = 1, \dots, J$, и зависящими, от последовательности в противном случае.

Под расписанием понимается пара "разбиение-функция": разбиение – это разделение множества требований на группы, а функция – это отображение, которое каждому прибору j и моменту времени t , сопоставляет номер обслуживаемого требования, либо указывает, что прибор простаивает или выполняется его переналадка. Расписание полностью определяется разбиением множества требований на группы, последовательностями обслуживания групп приборами и порядком обслуживания требований каждой группы. Критерием оптимальности расписания является соблюдение требованиями заданных директивных сроков, либо минимизация некоторой функции стоимости, зависящей от моментов завершения обслуживания требований.

Задачи построения оптимальных расписаний обслуживания требований группами могут быть условно разделены на несколько классов.

1. Индивидуальное завершение обслуживания – предполагается, что требование покидает прибор в момент, когда прибор завершает работу по его обслуживанию. Примером может служить ТС производства синтетических красителей. Требования (партии продуктов) разбиваются на группы по принципу принадлежности к конкретному красителю. Выпуск любого красителя заканчивается в момент, когда последняя аппаратурная стадия ТС заканчивает обработку последней его партии. Переналадки аппаратов стадий ТС необходимы только между периодами выпуска разных красителей, а между обработкой партий одного и того же продукта отсутствуют. Поэтому максимальная эффективность работы ТС достигается при непрерывном производстве каждого из красителей с последующим переходом к продукту другого цвета.

2. Одновременное завершение обслуживания – предполагается, что все требования группы покидают прибор одновременно: в момент, когда он завершает работу по обслуживанию всех требований группы (момент завершения обслуживания требования некоторой группы совпадает с моментом завершения обслуживания последнего требования этой группы). Такие задачи возникают при планировании работы производственных систем, в которых изделия перемещаются между обрабатывающими устройствами в контейнерах. Множество изделий, назначенных в один и тот же контейнер, рассматривается как группа. Устройство не начинает обслуживание новой группы до тех пор, пока не завершено обслуживание предыдущей. Все изделия одной и той же группы покидают устройство одновременно в момент завершения обработки последнего изделия этой группы. Переналадка необходима для удаления предшествующей группы и установки новой.

3. Последовательное обслуживание – предполагается, что требования каждой группы обслуживаются последовательно, и длительность обслуживания группы равна сумме длительностей обслуживания входящих в нее требований. Последовательное обслуживание требований является естественным для систем, в

которых прибор не может обслуживать более одного требования в каждый момент времени.

4. Параллельное обслуживание – предполагается, что требования одной и той же группы обслуживаются прибором одновременно (параллельно), и длительность обслуживания группы равна максимуму из длительностей обслуживания входящих в нее требований. Примерами приборов, которые способны обслуживать несколько требований одновременно, могут служить печи и химические ванны.

5. Неограниченный размер групп – каждая группа может включать произвольное количество требований.

6. Ограниченный размер групп – каждая группа может включать не более чем b , $b < I$, требований. Такие задачи возникают, когда верхний предел размера группы не может быть превышен по технологическим соображениям, например, в силу ограниченной емкости контейнеров.

В системах flow-shop и open-shop группа может обслуживаться одновременно несколькими приборами, если каждое требование покидает прибор в момент завершения работы по его обслуживанию. Если не оговорено особо, порядок обслуживания требований каждой группы может быть различным на различных приборах,

Обозначения. Для представления задач построения оптимальных расписаний обслуживания требований группами используется традиционное для теории расписаний обозначение $\alpha/\beta/\gamma$, состоящее из трех полей. Содержание первого поля ($\alpha = \alpha_1\alpha_2$) аналогично рассмотренному в п. 2.1.2. Второе поле характеризует группы и требования. В нем могут присутствовать следующие обозначения:

GT – требования каждой группы обслуживаются последовательно;

$sum-job$ – требования обслуживаются последовательно, индивидуальное завершение обслуживания;

$sum-batch$ – требования обслуживаются последовательно, одновременное завершение обслуживания;

$max-batch$ – параллельное обслуживание, длительность обслуживания группы равна максимальной из длительностей обслуживания составляющих ее требований;

$b = I$ – верхний предел для размера групп отсутствует, каждая группа может включать до I требований;

$b < I$ – размер группы ограничен;

$b = a$ – каждая группа может включать не более чем a требований, например, $b = 2$;

$G = c$ – количество групп фиксировано и равно c (иначе количество групп произвольно);

$s_{hg}^{(j)}, s_{hg}, s_{g}^{(j)}, s_g, s_g = s$ – соответственно: длительности переналадки зависят от прибора и последовательности групп, не зависят от прибора, зависят от прибора и не зависят от последовательности, не зависят ни от прибора, ни от последовательности, одинаковые.

Если не оговорено особо, то все переналадки являются упреждающими,

$gI = q$ – каждая группа включает одинаковое количество требований (q), иначе количества требований различны;

τ_g, d_g, ω_g – соответствующие параметры τ_i, d_i и ω_i одинаковы и равны τ_g, d_g и ω_g для всех требований группы g .

Третье поле описывает критерий задачи, см. п. 2.1.2.

Например, обозначение задачи $1/GT, s_g, prec / \sum_i \omega_i C_i$ означает, что имеется

один прибор, требования каждой группы обслуживаются последовательно, каждое требование каждой группы имеет индивидуальный момент завершения обслуживания, на множестве требований и на множестве групп определены отношения предшествования, длительности переналадок не зависят от последовательности обслуживания требований, критерий предусматривает минимизацию взвешенной суммы моментов завершения обслуживания требований.

Обозначение $QJ/sum-job, s_g = cp, \tau_i = \tau, gI = q, d_i = d/C_i < d_i$ означает, что имеется J параллельных приборов разной производительности, несколько групп требований, каждое из которых имеет индивидуальный момент завершения обслуживания, каждая группа включает одинаковое количество идентичных требований с одинаковыми значениями $\tau_i = \tau$ и одинаковыми директивными сроками завершения обслуживания, длительности переналадок одинаковы и кратны cp , критерий состоит в отыскании расписания, допустимого относительно заданных директивных сроков.

Обозначение $1/sum-batch, s_g = s / \sum_i U_i C_i$ означает, что имеется один прибор,

количество групп требований не ограничено, все требования каждой группы покидают прибор одновременно в момент времени, когда завершается работа по обслуживанию последнего требования каждой группы, длительности всех переналадок одинаковы, критерий состоит в минимизации взвешенного числа запаздывающих требований

Во всех приведенных примерах требования обслуживаются последовательно и размеры партий неограниченны.

Фиксированные группы. Пусть разбиение требований на группы задано априори и не может быть изменено. Задача $1/GT, s_g, prec / f_{max}$ формулируется следующим образом: требования множества $\{1, \dots, I\}$ обслуживаются одним прибором, начиная с момента $t = 0$. Для каждого требования i заданы длительность его обслуживания $\tau_i > 0$ и неубывающая функция $f_i(t)$ стоимости завершения обслуживания требования i в момент времени $t, f_i(t) \geq 0$ при $t \geq 0$. Задано разбиение множества требований на G групп. На множестве требований группы $g, g = 1, 2, \dots, G$ и на множестве групп заданы произвольные отношения предшествования. Перед началом обслуживания каждой группы g должна быть выполнена переналадка (наладка) прибора длительностью s_g . Задача состоит в построении такой допустимой последовательности обслуживания требований, которая минимизирует функцию

$$f_{max}(C_1, \dots, C_I) = \max \{ f_i(C_i) | i = 1, \dots, I \}.$$

Оптимальную последовательность обслуживания требований каждой группы можно определить с помощью представленного в п. 2.2.1 алгоритма решения задачи $1/prec / f_{max}$: формирование множества gI^L требований, которые не являются

предшествующими и расчет значения C_{gI} (момента завершения обслуживания всех требований группы g , совпадающий с моментом завершения обслуживания одного из требований множества gI^L); последним в группе g обслуживается требование i , которому соответствует минимальное значение $f(C_i)$, $i \in \{1, \dots, gI\}$, а момент завершения обслуживания оставшихся требований $C_{gI-1} = C_{gI} - \tau_i$; из оставшихся требований вновь формируется множество gI^L , из вошедших в него требований выбирается то, которое следует обслужить последним, и т.д.

Последовательность обслуживания групп определяется следующим образом:

1) формируется множество $H_G = \{1, \dots, G\}$, определяется момент окончания обслуживания всех требований $L_I = \sum_{i=1}^I \tau_i + \sum_{g=1}^G s_g$;

2) формируется множество H_G^L групп, которые не являются предшествующими, для каждой из них определяется оптимальная последовательность обслуживания требований (i_1, \dots, i_k) (см. выше) и рассчитывается значение $\Phi_g(L_I) = \max \{f(C_{i_l}) \mid l=1, \dots, k; C_{i_k} = L_I\}$;

3) отыскивается группа h , такая, что $\Phi_h(L_I) = \min \{\Phi_g(L_I) \mid g \in H_G^L\}$, эта группа будет обслужена последней, $G = G - 1$;

4) если $G = 1$, алгоритм прекращает работу, в противном случае формируется множество $H_{G-1} = H_G \setminus h$, рассчитывается значение $L_{I-1} = L_I - s_h - \sum_{i \in h} \tau_i$ и вновь выполняются п.п. 2), 3).

Индивидуальное завершение обслуживания. Рассмотрим ситуацию, когда разбиение требований на группы произвольно и момент окончания обслуживания каждого требования соответствует моменту окончания работы прибора по его обслуживанию.

Для ряда задач существование оптимального расписания доказано:

- оптимальному решению задачи $1/sum-job, s_g, \tau_g, d_g / L_{max}$ (один прибор, требования обслуживаются последовательно, индивидуальное завершение обслуживания, длительности переналадки зависят от прибора и не зависят от последовательности, значения $\tau_i = \tau_g$ и $d_i = d_g$ для всех требований группы g , критерий – момент окончания обслуживания всех требований), соответствует упорядочение групп требований по неубыванию значений d_g ;

- оптимальному решению задачи $1/sum-job, s_g, \tau_g, \omega_g / \sum_i \omega_i C_i$ (в отличие от предыдущей значения $\tau_i = \tau_g$ и $\omega_i = \omega_g$ для всех требований группы g , критерий – взвешенная сумма моментов окончания обслуживания требований), соответствует упорядочение групп по неубыванию значений $(s_g + \tau_g \cdot gI) / (\omega_g \cdot gI)$.

- оптимальным решением задачи $R/sum-job, s_g, \tau_g, d_g / C_i \leq d_i$ (параллельные приборы разной производительности, критерий – соблюдение директивных сроков окончания обслуживания требований) является одно из расписаний, предусматривающих обслуживание каждым прибором групп требований в порядке

EDD неубывания значений d_g , причем группы, обслуживаемые одним и тем же прибором, могут объединяться в одну.

Одновременное завершение обслуживания. Требования одной группы покидают прибор одновременно, когда он завершает обслуживание всех требований этой группы. Требования каждой группы обслуживаются прибором либо последовательно (длительность обслуживания группы равна сумме длительностей обслуживания входящих в нее требований), либо параллельно (длительность обслуживания группы равна максимальной из длительностей обслуживания входящих в нее требований).

Предположим, что требования каждой группы обслуживаются прибором непосредственно друг за другом. Ниже приводятся алгоритмы решения задач $1/sum\text{-}batch, s_g = s/f$ (один прибор, длительности переналадки не зависят от последовательности групп), в которых $f \in \{C_i \leq d_i, L_{max}\}$. Доказано, что существует оптимальное решение задачи $1/sum\text{-}batch, s_g = s/L_{max}$ – расписание, предусматривающее:

- принадлежность требований с одинаковыми директивными сроками одной группе;

- обслуживание требований в порядке *EDD* неубывания директивных сроков окончания их обслуживания.

Размерность подобных задач можно сократить, объединяя требования с одинаковыми директивными сроками в одно составное требование с тем же директивным сроком и длительностью обслуживания, равной сумме длительностей обслуживания образующих его исходных требований.

Алгоритм решения задачи $1/sum\text{-}batch, s_g = s/ C_i \leq d_i$ (отыскания расписания, допустимого относительно директивных сроков) предусматривает нумерацию составных требований так, что $d_1 < \dots < d_I$.

Рассмотрим последовательность требований $(1, 2, \dots, I)$. Включим в первую группу максимальное количество требований с наименьшими номерами, которое может быть обслужено до директивного срока d_1 . Пусть i – номер последнего требования первой группы. Включим во вторую группу максимальное количество требований с наименьшими номерами (не вошедших в первую группу), которое может быть обслужено до директивного срока d_{i+1} . Продолжим процесс формирования групп до включения в некоторую группу требования I , либо возникновения ситуации, когда очередную группу невозможно сформировать без нарушения соответствующего директивного срока. В первом случае допустимое расписание построено. Второй случай означает, что такое расписание не существует.

Параллельное обслуживание. В задаче $1/max\text{-}batch, s_g = 0/f$ (переналадка перед обслуживанием групп не требуется), где f – некоторая регулярная функция, предполагается, что размер групп не ограничен, т.е. $b = I$. Для этой задачи расписание однозначно определяется последовательностью обслуживания групп (g_1, \dots, g_k) . Обозначим длительность обслуживания группы g_l как $\tau(g_l) = \max_{i \in g_l} \{\tau_i\}$, а момент завершения ее обслуживания при заданной последовательности групп –

как $C(g_l) = \sum_{m=i}^l \tau(g_m)$. Напомним, что при заданной последовательности групп момент завершения обслуживания требования $i \in g_l, l = 1, \dots, k$ равен $C_i = C(g_l)$.

Задача минимизации C_{max} в данном случае решается тривиально: путем назначения всех требований в единственную группу g_1 . Тогда минимальное значение C_{max} равно $\tau(g_1) = \max_{1 \leq i \leq I} \{\tau_i\}$.

2.3 Календарное планирование работы МХП

Задача календарного планирования работы МХП заключается в поиске расписания выпуска продукции и функционирования технологического оборудования (ТО) при которых критерий оптимальности решения задачи (условная прибыль) достигает максимума, выполняются плановые задания по выпуску заданного ассортимента продукции в установленных объемах за отведенное время и графики планово-предупредительных ремонтов (ППР), а также ограничения на наличие сырья, хранение готового продукта и число ремонтных рабочих. Решение данной задачи актуально в масштабах совокупности ТС цеха. Исходными данными для решения данной задачи являются результаты решения задач АО ТС, а также объемы выпуска продукции в течение планируемого периода.

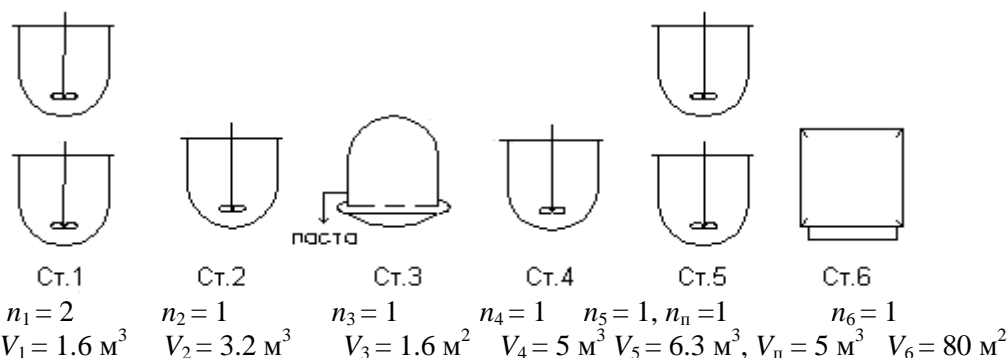
Оптимальный календарный план работы МХП должен обеспечивать выпуск продукции в заданных объемах и ассортименте в установленные сроки при максимальной условной прибыли от ее реализации. Выпуск каждого из продуктов в плановом объеме может осуществляться в несколько приемов с учетом контрактных обязательств предприятия перед заказчиками. Решением задачи оптимального календарного планирования является последовательность выпуска продуктов, в которой допускается повторение их номеров, и объемы выпуска продуктов с учетом возможности их временного хранения до контрактных сроков отгрузки.

Эта задача может быть обозначена как $JJ/GT, G = I, s_{hg}^{(j)}/f(C_1, \dots, C_I)$: система «job-shop», включающая J приборов (аппаратурных стадий ТС); требования каждой группы (партии каждого продукта) обслуживаются последовательно; количество групп (продуктов, выпускаемых ТС) равно I ; длительности переналадки (перехода с выпуска одного продукта на другой) зависят от прибора (типов аппаратов стадий ТС) и последовательности групп (особенностей технологии синтеза предыдущего и следующего продуктов); критерий – зависимость стоимости обработки от моментов окончания выпуска продуктов в требуемых объемах. К сожалению, современная теория расписаний не может предложить эффективный алгоритм решения такой задачи, поэтому предлагаемый порядок рассмотрения вопросов ее постановки и решения является традиционным для задач оптимизации производственных процессов: математическая модель, постановка задачи, метод и алгоритм решения.

Вначале рассмотрим пример формирования календарного плана ТС, выпускающей два продукта, и порядок его совмещения с графиком ППР основного оборудования стадий системы.

2.3.1 Пример формирования календарного плана ТС МХП с учетом графика ППР ее оборудования

Исходные данные для формирования календарного плана работы ТС: $Q_1 = 128$ т, $Q_2 = 96$ т; период $T \leq 2160$ ч (1 квартал – 90 календарных суток при круглосуточной работе); продолжительность промывки оборудования стадий и подготовки к выпуску следующего продукта $T_{\text{п}} = 80$ ч; основное оборудование стадий системы



(один из аппаратов стадии 5 используется как промежуточный аппарат для подачи суспензии в фильтр стадии 6); размеры партий продуктов $w_1 = 0.8$ т, $w_2 = 0.64$ т; занятость оборудования стадий при обработке партий продуктов $p_{11} = 7$ ч., $p_{13} = 6.7$ ч., $p_{14} = 6.7 \cdot 0.6 + 3 = 7$ ч., $p_{15} = 5$ ч., $p_{1\text{п}} = 3.1 \cdot 0.7 = 2.2$ ч., $p_{16} = 3.1$ ч., $p_{22} = 5$ ч., $p_{23} = 5.5$ ч., $p_{24} = 5.5 \cdot 0.75 + 2 = 6.1$ ч., $p_{25} = 4$ ч., $p_{2\text{п}} = 4 \cdot 0.75 = 3$ ч., $p_{26} = 4$ ч. (партии первого продукта минуют стадию 2, второго продукта – стадию 1).

Продолжительности циклов выпуска продуктов: $T_{\text{ц1}} = p_{11} = 7$ ч, $T_{\text{ц2}} = p_{24} = 6.1$ ч; продолжительности выпуска партий продуктов: $\sum_j t_{1j} = 7 + 6.7 + 3 + 5 + 3.1 = 24.8$ ч,

$\sum_j t_{2j} = 5 + 5.5 + 2 + 4 + 4 = 20.5$ ч. Число партий продуктов: $b_1 = 128 / 0.8 = 160$,

$b_2 = 96 / 0.64 = 150$, продолжительности выпуска продуктов без учета перехода и ППР оборудования ТС: $[24.8 + (b_1 - 1) \cdot 7] + [20.5 + (b_2 - 1) \cdot 6.1] = 1137.8 + 929.4 = 2067.2$ ч.

Календарный план без учета ремонтов:

1-й продукт: 1-я партия – вход 0 ч, выход 24.8 ч
 2-я партия – вход 7 ч, выход 31.8 ч.,
 3-я партия – вход 14 ч, выход 38.8 ч.
 160-я партия – вход 1113 ч, выход 1137.8 ч.

Переход на выпуск 2-го продукта: ст. 1 – 1113 + 7 = 1120 + 80 = 1200 ч.
 ст. 3 – 1120 + 6.7 = 1126.7 + 80 = 1206.7 ч.
 ст. 4 – 1126.7 + 3 = 1129.7 + 80 = 1209.7 ч.
 ст. 5 – 1129.7 + 5 = 1134.7 + 80 = 1214.7 ч.
 п.ап. – 1134.7 + 2.2 = 1136.9 + 80 = 1216.9 ч.
 ст. 6 – 1134.7 + 3.1 = 1137.8 + 80 = 1217.8 ч.

2-й продукт: 1-я партия – вход 1209.7 – 5 – 1.4 = 1203.4 ч, выход 1223.9 ч
 2-я партия – вход 1209.5 ч, выход 1230 ч,
 3-я партия – вход 1215.6 ч, выход 1236.1 ч ...
 150-я партия – вход 2112.3 ч, выход 2132.8 ч.

Рисунок 2.3 иллюстрирует функционирование ТС в период от начала выпуска 160-й партии 1-го продукта до окончания выпуска 1-й партии 2-го продукта.

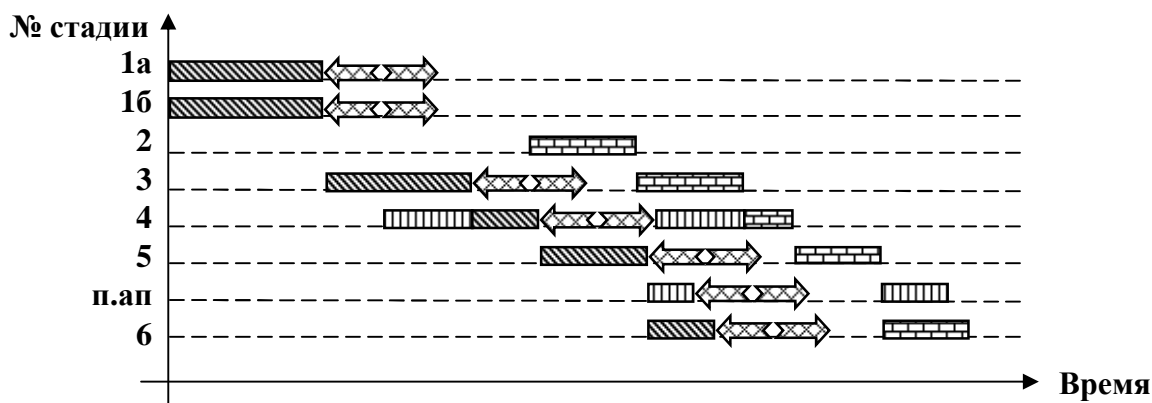


Рисунок 2.3 – Функционирование ТС при переходе с выпуска продукта 1 на выпуск продукта 2

- реализация стадий выпуска продукта 1;
- реализация стадий выпуска продукта 2;
- промывка оборудования стадий ТС;
- прием фильтра или подача суспензии на фильтр.

Для учета ППР оборудования стадий ТС при календарном планировании ее работы необходимы данные о периодичности и продолжительности текущих (ТР) и капитальных (КР) ремонтов, а также о наработке аппаратов стадий системы на момент начала работ по реализации конкретного заказа:

№ ст.	Межремонтный цикл, ч	Простой при КР, ч	Межремонтный период, ч	Простой при ТР, ч	Предыдущая наработка, ч
1	23040	196	5760	48	4900
2	26880	168	3840	42	2800
3	17280	366	5760	108	1050
4	17280	142	4320	48	3140
5	28800	176	5760	76	3730
п.ап	28800	176	5760	76	3730
6	34560	120	4320	56	33460

Наработки аппаратов за время выпуска продуктов:

$$\text{ст.1} - 160 \cdot 7 + 80 = 1200 \text{ ч.}$$

$$\text{ст.2} - 150 \cdot 5 = 750 \text{ ч.}$$

$$\text{ст.3} - 160 \cdot 6.7 + 80 + 150 \cdot 5.5 = 1072 + 80 + 825 = 1977 \text{ ч.}$$

$$\text{ст.4} - 160 \cdot 7 + 80 + 150 \cdot 6.1 = 1120 + 80 + 915 = 2115 \text{ ч.}$$

$$\text{ст.5} - 160 \cdot 5 + 80 + 150 \cdot 4 = 800 + 80 + 600 = 1480 \text{ ч.}$$

$$\text{п.ап} - 160 \cdot 2.2 + 80 + 150 \cdot 3 = 352 + 80 + 450 = 882 \text{ ч.}$$

$$\text{ст.6} - 160 \cdot 3.1 + 80 + 150 \cdot 4 = 496 + 80 + 600 = 1176 \text{ ч.}$$

Необходимые ремонты в период выпуска продуктов и коррекция первоначального календарного плана:

Ст. 1 – $4900 + 1200 = 6100$ ч, т.е. через 860 ч необходим ТР 48 ч, а затем доработка 340 ч; $860/7 = 122.857$, т.е. ремонт попадает на время выпуска 123-й партии 1-го продукта – вход 854 ч, выход 878.8 ч, и его придется сместить на 6 ч ранее:

122-я партия – вход 847 ч, выход 871.8 ч, ТР 48 ч,
 123-я партия – вход 902 ч, выход 926.8 ч,...
 160-я партия – вход 1161 ч, выход 1185.8 ч.

Функционирование ТС в период от начала выпуска 122-й и до окончания выпуска 123-й партий 1-го продукта иллюстрирует рис. 2.4.

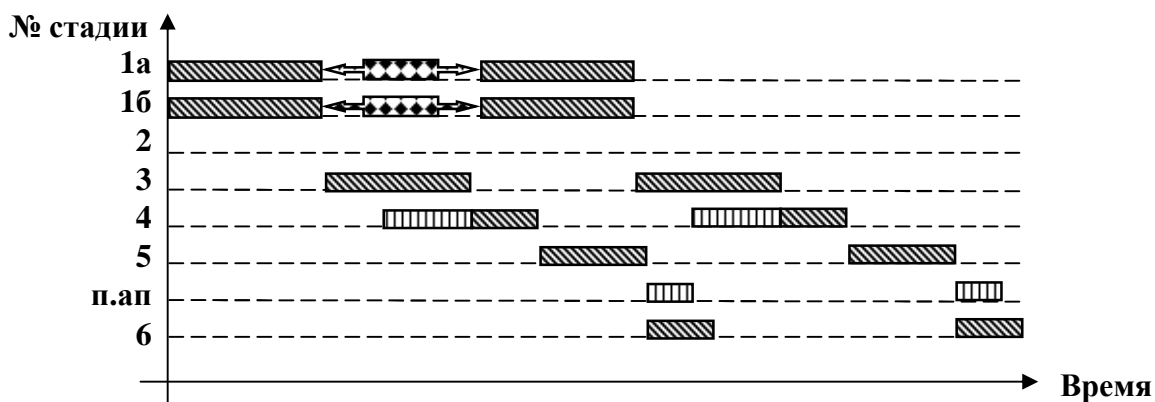


Рисунок 2.4 – Функционирование ТС с учетом ТР аппаратов стадии 1

▨ реализация стадий выпуска продукта 1;
 ↔ ромб ТР аппаратов стадии 1;
 ▤ прием фильтрата или подача суспензии на фильтр.

Ст. 4 – $3140 + 1120 + 80 = 4340$ ч, т.е. через 1180 ч необходим ТР 48 ч, а затем до-
 работка 935 ч; ремонт совмещается с промывкой ТС после выпуска 1-го продукта:

ст. 1 – $1161 + 7 = 1168 + 80 = 1248$ ч.
 ст. 3 – $1168 + 6.7 = 1174.7 + 80 = 1254.7$ ч.
 ст. 4 – $1174.7 + 3 = 1177.7 + 48 + 32 = 1257.7$ ч.
 ст. 5 – $1177.7 + 5 = 1182.7 + 80 = 1262.7$ ч.
 п.ап – $1182.7 + 2.2 = 1184.9 + 80 = 1264.9$
 ст. 6 – $1182.7 + 3.1 = 1185.8 + 80 = 1265.8$

2-й продукт: 1-я партия – вход $1257.7 - 5 - 1.4 = 1251.3$ ч, выход 1271.8 ч
 2-я партия – вход 1257.4 ч, выход 1277.9 ч,
 3-я партия – вход 1263.5 ч, выход 1284 ч ...
 150-я партия – вход 2160.2 ч, выход 2180.7 ч.

Ст. 6 – $33460 + 1176 = 34636$ ч, т.е. через 1100 ч необходим КР 120 ч, а затем до-
 работка 76 ч; $(1100 - 576)/4 = 131$, т.е. ремонт попадает на время окончания вы-
 пуска 131-й партии 2-го продукта и может быть проведен вовремя:

131-я партия – вход 2044.3 ч, выход 2064.8, КР 120 ч,
 132-я партия – вход $2064.8 + 120 - 16.5 = 2168.3$ ч, выход 2188.8 ч....
 150-я партия – вход 2278.1 ч, выход 2298.6 ч.

На рис. 2.5 показано функционирование ТС в период от начала выпуска 131-й и
 до окончания выпуска 132-й партий 2-го продукта.

С учетом ремонтов продолжительность выпуска продуктов превышает пер-
 воначально принятую на $2298.6 - 2160 = 138.6$ ч (5.8 сут). Процессы наработки
 партий продуктов с учетом ППР оборудования ТС иллюстрирует рис. 2.6.

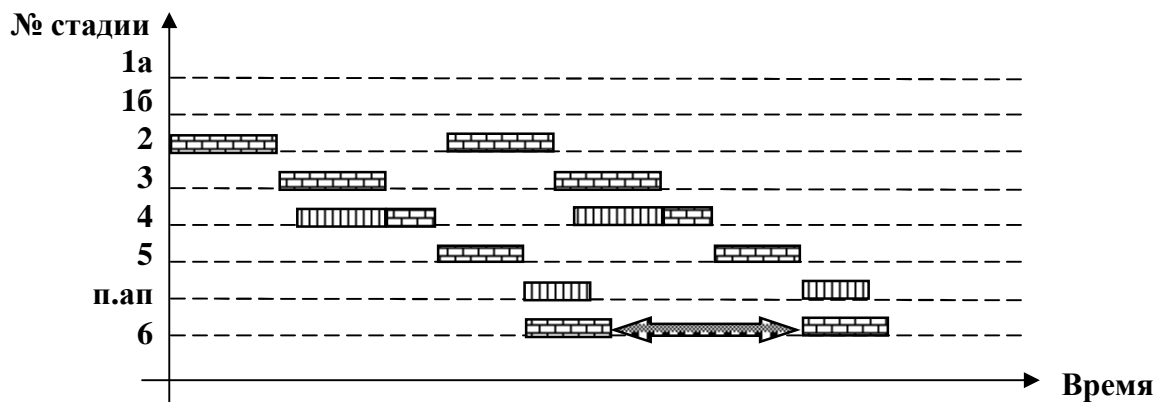


Рисунок 2.5 – Функционирование ТС с учетом КР аппарата стадии 6

- ▨ реализация стадий выпуска продукта 2;
- ↔ КР аппарата стадии 6;
- ▤ прием фильтрата или подача суспензии на фильтр.

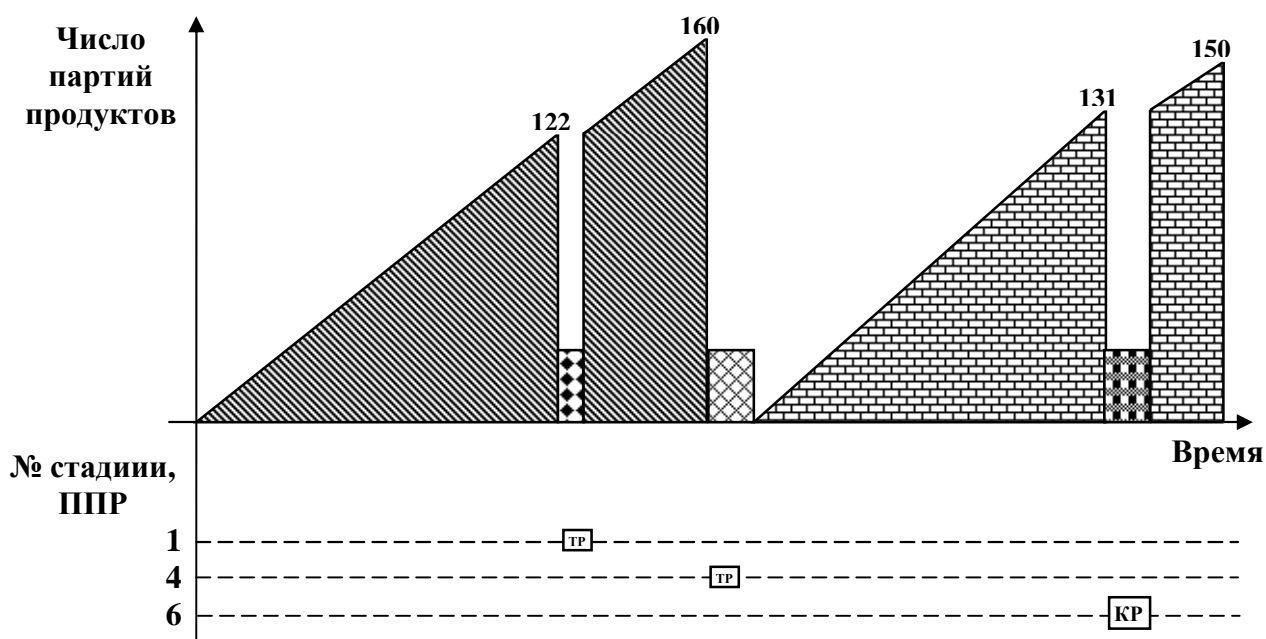


Рисунок 2.6 – Нарработка партий продуктов с учетом ППР оборудования ТС

- ▨ выпуск партий продукта 1;
- ▤ установка на период ТР аппаратов стадии 1;
- ▤ ТР аппарата стадии 4, совмещенный с промывкой;
- ▨ выпуск партий продукта 2;
- ▤ установка на период КР аппарата стадии 6.

Нормативы проведения ППР химического оборудования допускают перенос сроков текущих ремонтов на $\pm 15\%$ межремонтного периода от нормативных, а капитальных ремонтов – на $\pm 10\%$ межремонтного цикла, т.е. ТР на ст.1 можно совместить с промывкой аппарата по окончании выпуска 1-го продукта (переработка 340 ч, т.е. 6% продолжительности межремонтного периода), а КР на ст.6 перенести на момент окончания выпуска 2-го продукта (переработка 76 ч, т.е. 0.2% от продолжительности межремонтного цикла).

Окончательный календарный план работы ТС, см. рис. 2.7:

1-й продукт: 1-я партия – вход 0 ч, выход 24.8 ч
 2-я партия – вход 7 ч, выход 31.8 ч.,
 3-я партия – вход 14 ч, выход 38.8 ч.
 160-я партия – вход 1113 ч, выход 1137.8 ч.

Переход на выпуск 2-го продукта: ст. 1 – $1113 + 7 = 1120 + 48 + 32 = 1200$ ч.
 ст. 3 – $1120 + 6.7 = 1126.7 + 80 = 1206.7$ ч.
 ст. 4 – $1126.7 + 3 = 1129.3 + 48 + 32 = 1209.7$ ч.
 ст. 5 – $1129.7 + 5 = 1134.7 + 80 = 1214.7$ ч.
 п.ап.– $1134.7 + 2.2 = 1136.9 + 80 = 1216.9$ ч.
 ст. 6 – $1134.7 + 3.1 = 1137.8 + 80 = 1217.8$ ч.

2-й продукт: 1-я партия – вход 1209.7 – 5 – 1.4 = 1203.4 ч, выход 1223.9 ч
 2-я партия – вход 1209.5 ч, выход 1230 ч,
 3-я партия – вход 1215.6 ч, выход 1236.1 ч ...
 150-я партия – вход 2112.3 ч, выход 2132.8 ч,
 КР на ст. 6 $2132.8 + 120 = 2252.8$ ч.

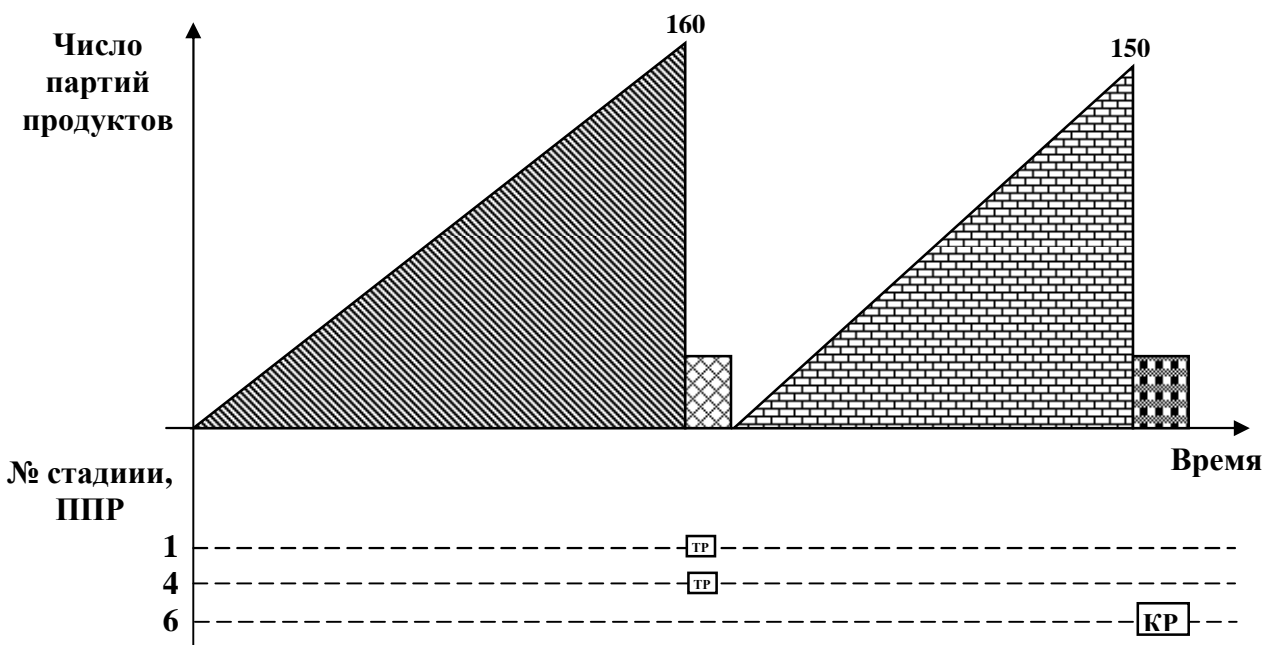


Рисунок 2.7 – Календарный план работы ТС с учетом переноса сроков ППР

- ▨ выпуск партий продукта 1;
- ▩ ПР аппаратов стадий 1 и 4, совмещенные с промывкой ТС;
- ▤ выпуск партий продукта 2;
- ▧ ПР аппарата стадии 6.

Продолжительность выпуска продуктов составила 2132.8 ч, т.е. ТС имеет резерв рабочего времени $2160 - 2132.8 = 27.2$ ч. Оборудование ст. 6 будет занято работами по капитальному ремонту еще 120 ч.

Заметим, что при составлении данного календарного плана не учтена возможность нехватки персонала для одновременного ремонта двух аппаратов на стадии 1 и аппарата стадии 4, а также возможность наличия месячного и даже недельного плана поставок продуктов, который предусматривает не один, а несколько переходов с выпуска одного продукта на выпуск другого.

2.3.2 Математическая модель календарного плана работы МХП

Математическая модель календарного плана (КП) МХП в условиях ограниченного штата ремонтного персонала сформирована при следующих допущениях.

1. ТС МХП функционируют в режиме с частичным перекрытием циклов обработки партий продуктов в аппаратах различных стадий.

2. В состав АО ТС входят аппараты периодического и непрерывного действия, причем последние работают в полунепрерывном режиме (с остановками).

3. Маршруты обработки партий продуктов (последовательности задействованных аппаратурных стадий ТС) фиксированы.

4. Продолжительности физико-химических превращений в аппаратах периодического действия не зависят от размеров партий, являются постоянными и превышают продолжительности подготовительных операций.

5. При переходе с выпуска одного продукта на другой не допускается одновременная обработка партий разных продуктов в аппаратах различных стадий ТС.

6. Суточный фонд рабочего времени оборудования всех ТС цеха одинаков.

7. Число ремонтников цеха строго ограничено.

8. Число свободных ремонтников является переменной величиной, зависящей от времени.

9. Время промывки аппаратов при переходе с выпуска одного продукта на другой зависит от конкретных условий перехода.

Выпуск продукции МХП характеризуется множеством характеристик Ω_1 :

– продолжительность цикла выпуска партий i -го продукта (T_{Li});

– размер партии i -го продукта (w_i);

– продолжительность переработки партии i -го продукта для каждой стадии ТС (τ_{ij} , $j \in J_i$, где J_i – множество номеров стадий выпуска i -го продукта);

– продолжительность выпуска первой партии i -го продукта ($\sum_{j \in J_i} \tau_{ij}$);

– продолжительность перехода с одного (i -го) продукта на другой (l -й): Δt_{il} .

Маршруты обработки партий продуктов формализуются с применением матриц $\|z_{js}^i\|$, $i = \overline{1, I}$, $j \in J_i$, $s = \overline{1, S_j}$, где S_j – количество основных аппаратов стадии j ТС. Элементы матрицы принимают значения, равные единице, если в ходе выпуска i -го продукта технологические операции j -ой стадии осуществляются в s -ом аппарате и равны нулю в противном случае.

Для определения продолжительности перехода с выпуска k -го продукта на выпуск l -го определяется момент завершения обработки партии k -го продукта на j -ой стадии (t_{kj} – момент начала выгрузки партии продукта из основного аппарата стадии). Пусть в начальный момент выпуска k -го продукта ТС свободна, т.е.

$$t_{kj} = 0, \quad j \in J_k.$$

Тогда для произвольного момента времени процесса выпуска k -го продукта

$$t_{kj} = \begin{cases} t_{k,j-1} + p_{k,j-1} + \tau_{kj}, \forall j, (j-1) \in J_b; \\ t_{k,j-1} + \tau_{kj}, \forall (j-1) \in J_b, j \in J_s, \end{cases} \quad (2.1)$$

где $p_{k,j-1}$ – продолжительность выгрузки партии k -го продукта из аппарата стадии $j-1$;
 J_s, J_b – множества стадий, оснащенных основными аппаратами непрерывного и периодического действия, соответственно.

Таким образом, продолжительность перехода с k -го на l -й продукт можно представить следующим образом:

$$\Delta t_{kl} = (t_{lj_l} + p_{lj_l}) - (t_{kj_k} + p_{kj_k}), \quad (2.2)$$

где j_l – последняя стадия маршрута выпуска l -го продукта; j_k – последняя стадия переработки партии k -го продукта, в аппараты которой подается партия l -го продукта:

$$j_k = \max\{J_k\} \quad \text{при} \quad z_{js}^k = z_{js}^l = 1; \quad j \in J_k, \quad s = \overline{1, S_j}$$

Расписание работы ТС МХП представим в виде упорядоченной последовательности состояний:

$$\bar{q}_A = \langle i_1, i_2, \dots, i_\alpha, \dots, i_A \rangle,$$

т.е. указаний на номер выпускаемого продукта или на остановку системы: при $i_\alpha \leq I$ состояние соответствует номеру выпускаемого продукта из ассортимента I , а при $i_\alpha > I$ состояние соответствует остановке выпуска продукции. Остановки ТС МХП могут быть планируемыми, аварийными и вынужденными. К планируемым остановкам относятся периоды проведения ППР, аварийные остановки соответствуют периодам внезапных отказов оборудования, вынужденные остановки – это периоды отсутствия необходимого сырья или переходов на выпуск другого продукта.

Вектору состояний \bar{q}_A ставится в соответствие вектор их продолжительностей $\bar{\sigma}_A$:

$$\bar{\sigma}_A = \langle \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_\alpha, \dots, \lambda_A \rangle,$$

где λ_α – продолжительность состояния с порядковым номером α . Тогда момент смены состояния с порядковым номером α определяется по соотношению:

$$T_\alpha = T_{\alpha-1} + \lambda_\alpha, \quad \alpha = \overline{1, A} \quad \text{при} \quad T_0 = 0.$$

Рассмотрим различные варианты определения продолжительностей состояний.

1. При $i_{\alpha-1} = i_\alpha$ и $i_{\alpha-1}, i_\alpha \leq I$ двум последовательным состояниям соответствует выпуск одного и того же продукта, следовательно, продолжительность состояния α определяется продолжительностью цикла выпуска i -го продукта: $\lambda_\alpha = T_{Li}$.

2. При $i_{\alpha-1} \neq i_\alpha$ и $i_{\alpha-1}, i_\alpha \leq I$ осуществляется переход с выпуска одного продукта на другой. Продолжительность этого состояния рассчитывается по соотношению (2.2).

3. При $i_{\alpha-1} > I$ и (или) $i_{\alpha+1} > I$ состоянию i_α предшествует и (или) за ним следует полная остановка системы. В этом случае продолжительность λ_α рассчитывается по соотношению (2.1): $\lambda_\alpha = t_{i_\alpha}$.

4. При $\alpha = 1$ рассматривается первое состояние системы, которое начнется по окончании предыдущего планируемого периода и закончится в начале расчет-

ного периода: $\lambda_1 = t_n$ (продолжительности промежутка между планируемыми периодами).

5. При $i_\alpha > I$ фиксируется остановка выпуска продукции. Очевидно, что для уменьшения суммарных простоев оборудования ТС МХП необходимо совмещать вынужденные остановки ТС с проведением планово-предупредительных ремонтов оборудования, попадающих по нормативам на время выпуска следующего продукта. При этом должно выполняться ограничение $i_\alpha \in \Delta_\beta$, где Δ_β – максимально возможное смещение β -го ремонта.

Продолжительность состояния $i_\alpha > I$ зависит от времени, необходимого на проведение ППР. По существующим нормативам на каждый ремонт оборудования МХП отводится определенное число ремонтных рабочих и количество времени. При планировании ремонта конкретного аппарата одной из ТС цеха на момент времени t , время ремонтов других аппаратов цеха может быть уже зафиксировано, т.е. при планировании ремонта определенного аппарата количество свободного ремонтного персонала цеха является переменной величиной и зависит от сроков проведения ремонтных работ на других аппаратах.

При планировании ремонта конкретного аппарата формируется интервал времени ремонта $[t_1, t_2]$ согласно действующим нормативам на проведение ППР. При этом изменение величины свободного ремонтного персонала можно представить функцией $g(t)$, см. рис. 2.8, которая ограничена сверху числом ремонтных рабочих цеха: $g(t) \leq G \forall t$. Величину $g(t)$ можно получить в результате совмещения ремонтов с календарным планом работы ТС цеха. На проведение β -го планово-предупредительного ремонта аппарата j -ой стадии n -ой ТС необходимо определенное число ремонтных рабочих η_β^{nj} . Так как на интервале времени планирования ремонта $[t_1, t_2]$ число свободных ремонтников цеха может быть как больше так и меньше η_β^{nj} , проведение β -го ремонта может оказаться "растянутым" во времени и реальная продолжительность ремонта будет больше нормативной. Таким образом, при планировании ППР конкретного аппарата его продолжительность определяется функционалом $\Delta t_\beta(g(t))$.

Так как продолжительность состояния $i_\alpha > I$ до включения в него ППР (λ'_α) может быть как больше, так и меньше продолжительности ремонта, то необходимо провести его коррекцию в случае, если продолжительность ремонта не полностью входит в это состояние:

$$\lambda_\alpha = \max(\lambda'_\alpha, \lambda'_\alpha + \Delta t_\beta(g(t)) + t_{kj_l} + p_{kj_l} - t_{l(j_l-1)}),$$

где t_{kj_l} – время начала выгрузки k -го продукта со стадии проведения ППР j_l ;

p_{kj_l} – продолжительность выгрузки k -го продукта со стадии проведения ППР;

$t_{l(j_l-1)}$ – время поступления l -го продукта на стадию проведения ППР.

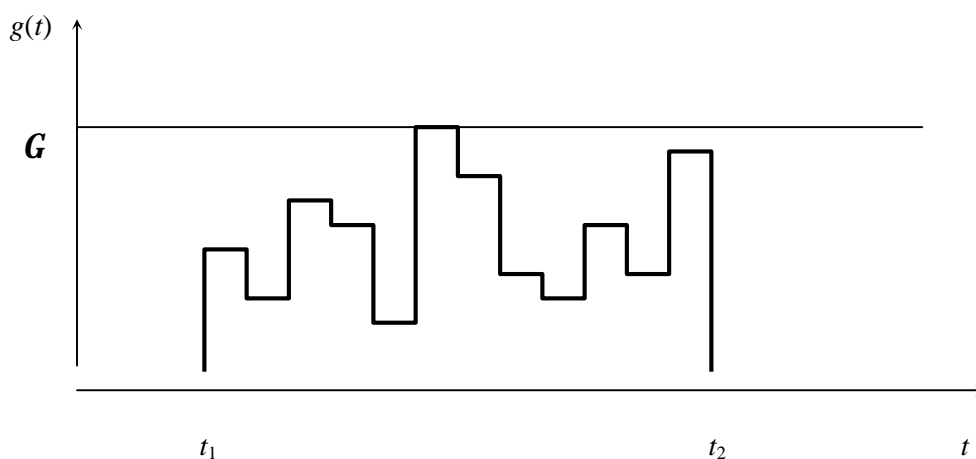


Рисунок 2.8 – Функция суммарных трудозатрат ремонтного персонала цеха

Если ППР невозможно перенести на состояние $i_\alpha > I$, то ремонт проводится перед состоянием, на которое он попал по нормативам, то есть после выгрузки партии продукта из аппаратов соответствующей стадии. При этом в случае, если $T_{Li} - T_{ij} \leq \Delta t_\beta(g(t))$, то в расписание системы вводится дополнительное состояние с продолжительностью:

$$\lambda_\alpha = \Delta t_\beta(g(t)) - (T_{Li} - T_{ij}),$$

где T_{Li} – время цикла обработки i -го продукта;

T_{ij} – время пребывания партии i -го продукта на j -ой стадии.

В результате рассмотрения различных состояний функционирования МХП продолжительность α -го состояния находится следующим образом:

$$\lambda_\alpha = \begin{cases} t_H, & \alpha = 1; \alpha = \overline{1, A}; \\ T_{Li_\alpha}, & i_{\alpha-1} = i_\alpha; i_{\alpha-1}, i_\alpha \leq I; \\ \Delta t_{i_{\alpha-1}i_\alpha}, & i_{\alpha-1} \neq i_\alpha; i_{\alpha-1}, i_\alpha \leq I; \\ t_{i_\alpha}, & (i_{\alpha-1} > I) \vee (i_{\alpha+1} > I); \\ \max(\lambda'_\alpha, \lambda'_\alpha + \Delta t_\beta(g(t)) + t_{kj_l} + p_{kj_l} - t_{l(j_l-1)}), & \exists i_\alpha \in \Delta_\beta; i_\alpha > I; \\ \Delta t_\beta(g(t)) - (T_{Li} - T_{ij}), & \exists i_\alpha \notin \Delta_\beta; i_\alpha > I. \end{cases} \quad (2.3)$$

Математическая модель выпуска продукции МХП, представленная соотношениями (2.1)-(2.3) и множеством основных характеристик ТС Ω_1 , позволяет рассчитывать календарный план выпуска продукции МХП с учетом проведения ППР в условиях ограниченности ремонтного персонала цеха.

2.3.3 Математическая модель построения графика ППР

В постановках задач оптимального календарного планирования выпуска продукции МХП обычно вводится допущение, что техническое обслуживание и ремонты аппаратов ТС проводится в те периоды времени, когда аппараты свобод-

ны от работы, или за счет резервного фонда рабочего времени. При реальной эксплуатации МХП такой вариант проведения ремонтных работ является оптимальным, но далеко не всегда выполнимым. Реализация графика ППР накладывает дополнительные возмущения на решение задачи календарного планирования МХП.

В современных условиях спрос на продукцию МХП часто меняется, причем как по ассортименту, так и объемам выпуска. Вместе с тем, существуют перебои с поставкой сырья, незапланированные ремонты. Все это заставляет пересчитывать календарный план выпуска продукции, который может корректироваться ежемесячно. Поэтому возникает задача построения графика ремонтных работ технологического оборудования, которая является внутренней по отношению к задаче оптимального календарного планирования работы совокупности ТС цеха.

Величина прибыли, получаемой предприятием, напрямую зависит от выполнения плановых заданий по выпуску продукции в установленные сроки. Если за плановый период не удастся произвести необходимый объем продукции, на предприятие накладываются штрафные санкции. Время выполнения плановых заданий зависит от следующих факторов:

– последовательности наработки продуктов заданного ассортимента (различные продолжительности переходов с выпуска одного продукта на другой, включая переналадку и промывку оборудования, а также возможные совпадения времени ремонтов оборудования разных ТС при ограниченности штата ремонтного персонала);

– последовательности совмещения ППР цехового оборудования с календарным планом работы совокупности ТС цеха (различная эффективность использования рабочего времени ремонтного персонала при различных вариантах совмещения);

Очевидно, что лучшим будет такое расписание работы совокупности ТС цеха, при котором цеховой график ППР позволяет выполнить плановые задания по выпуску продукции за минимальное время. Для получения такого расписания необходимо перебрать все возможные варианты последовательностей наработки продуктов на ТС и выбрать лучший. Для каждого варианта расписания необходимо перебрать и проанализировать все возможные варианты совмещения графика ремонтов с календарным планом работы ТС цеха.

При разработке математической модели построения графика ППР принимаются следующие допущения.

1. На всех ТС цеха продукты нарабатываются последовательно и они функционируют в условиях допущений, принятых в п. 2.3.2.

2. График ППР включает сроки проведения текущих и капитальных ремонтов аппаратов стадий ТС.

3. Нарботка основных аппаратов каждой стадии любой ТС цеха в рамках планового периода одинакова.

4. Сроки проведения ППР могут переноситься в пределах, допускаемых нормативами.

5. ППР проводятся только на полностью разгруженных аппаратах.

6. Нумерация аппаратов ТС цеха, которые включаются в график ППР, является сквозной: начинается с первого аппарата первой ТС и заканчивается последним аппаратом последней ТС.

Расписание работы оборудования цеха может быть представлено совокупностью расписаний отдельных ТС. Пусть N – количество ТС цеха. Расписание работы оборудования цеха \tilde{q} представим следующим образом:

$$\tilde{q} = \left\{ \langle i_{\alpha_1}^1, \dots, i_{A_1}^1 \rangle, \dots, \langle i_{\alpha_n}^n, \dots, i_{A_n}^n \rangle, \dots, \langle i_{\alpha_N}^N, \dots, i_{A_N}^N \rangle \right\}, \quad (2.4)$$

где $i_{\alpha_n}^n, i_{A_n}^n$ – состояния функционирования первого и последнего аппаратов n -ой ТС, включаемых в график ППР.

Кроме множества векторов состояний функционирования ТС работу цеха характеризует множество продолжительностей состояний $\tilde{\sigma}$:

$$\tilde{\sigma} = \left\{ \langle \lambda_{\alpha_1}^1, \dots, \lambda_{A_1}^1 \rangle, \dots, \langle \lambda_{\alpha_n}^n, \dots, \lambda_{A_n}^n \rangle, \dots, \langle \lambda_{\alpha_N}^N, \dots, \lambda_{A_N}^N \rangle \right\}, \quad (2.5)$$

где $\lambda_{\alpha_n}^n, \lambda_{A_n}^n$ – продолжительности состояний функционирования $i_{\alpha_n}^n, i_{A_n}^n$ первого и последнего аппаратов n -ой ТС

Определение нормативных сроков проведения ППР осуществляется в расчете на планируемый период следующим образом. Пусть на начало планируемого периода α_n -й аппарат n -ой ТС имеет наработку $t_{\alpha_n}^n$, а по окончании выпуска всех продуктов заданного ассортимента в плановых объемах – наработку $T_{\alpha_n}^n$. Тогда количество капитальных и текущих ремонтов этого аппарата в течение планируемого периода можно определить следующим образом:

$$K_{\alpha_n}^n = \left\lfloor \frac{T_{\alpha_n}^n + t_{\alpha_n}^n}{\Delta t_{Ц\alpha_n}^n} \right\rfloor, \quad (2.6)$$

$$M_{\alpha_n}^n = \left\lfloor \frac{\Delta t_{Ц\alpha_n}^n - t_{\alpha_n}^n}{\Delta t_{П\alpha_n}^n} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{T_{\alpha_n}^n + t_{\alpha_n}^n - \Delta t_{Ц\alpha_n}^n}{\Delta t_{П\alpha_n}^n} \right\rfloor, \quad (2.7)$$

где $K_{\alpha_n}^n$ – число капитальных ремонтов (КР) за планируемый период;

$M_{\alpha_n}^n$ – число текущих ремонтов (ТР) за планируемый период;

$\Delta t_{Ц\alpha_n}^n, \Delta t_{П\alpha_n}^n$ – межремонтный цикл (период времени между капитальными ремонтами) и межремонтный период (период времени между плановыми ремонтами) для α_n -го аппарата n -ой ТС;

$[a]$ – максимальное целое число, не превышающее a .

При определении времени начала проведения КР и ТР необходимо учитывать, что на стадиях ТС могут быть установлены как один, так и несколько аппаратов одинаковой конструкции. Тогда для стадии j , где число аппаратов равно единице, моменты начала проведения КР и ТР:

$$t_{КР1j}^n = \Delta t_{Цj}^n - t_j^n, \quad (2.8)$$

$$t_{TP1j}^n = t_{KP1j}^n - \left[\frac{\Delta t_{Lj}^n - t_j^n}{\Delta t_{Пj}^n} \right] \Delta t_{Пj}^n, \quad (2.9)$$

$$t_{KPyj}^n = t_{KP1j}^n + (y-1)\Delta t_{Lj}^n, \quad y = \overline{2, K_j^n}, \quad (2.10)$$

$$t_{TPxj}^n = t_{TP1j}^n + (x-1)\Delta t_{Пj}^n, \quad y = \overline{2, M_j^n}, \quad (2.11)$$

где индекс j соответствует порядковому номеру единственного основного аппарата стадии j , индексы y и x указывают на порядковый номер КР и ТР соответственно.

На стадиях, где установлено по одному основному аппарату, проведение планово-предупредительных ремонтов возможно, как правило, лишь при остановке выпуска продукции. При проведении КР и ТР для стадий, на которых установлено два и более основных аппаратов, необходимо распределить моменты начала их ремонтов так, чтобы ремонты не накладывались друг на друга и выпуск продукции не прерывался. Заметим, что это возможно лишь для стадий, аппараты которых способны принять и переработать партию продукта целиком (такой вариант является характерным для рассматриваемого класса производств).

Отправными точками моментов начала проведения КР и ТР являются значения, полученные по зависимостям (2.8)-(2.11). Фиксирование этих моментов осуществляется в пределах допустимых отклонений: для межремонтного цикла $\pm 10\%$, для межремонтного периода $\pm 15\%$.

Тогда для текущих ремонтов при $L_{ij}^n \Delta t_{TPxj}^n \leq 0.15 \Delta t_{Пj}^n$

$$t_{TPxj}^{nf} = \begin{cases} \Delta t_{TPxj}^n, & f = 1, x = \overline{1, M_j^n} \\ (-1)^f \Delta t_{TPxj}^n + t_{TPxj}^{n(f-1)}, & f = 3, 5, \dots, L_{ij}^n, x = \overline{1, M_j^n} \\ \Delta t_{TPxj}^n + t_{TPxj}^n, & f = 2, 4, \dots, L_{ij}^n, x = \overline{1, M_j^n} \end{cases} \quad (2.12)$$

Аналогично для капитальных ремонтов при $L_{ij}^n \Delta t_{KPyj}^n \leq 0.1 \Delta t_{Lj}^n$

$$t_{KPyj}^{nf} = \begin{cases} \Delta t_{KPyj}^n, & f = 1, y = \overline{1, N_j^n} \\ (-1)^f \Delta t_{KPyj}^n + t_{KPyj}^{n(f-1)}, & f = 3, 5, \dots, L_{ij}^n, y = \overline{1, K_j^n} \\ \Delta t_{KPyj}^n + t_{KPyj}^n, & f = 2, 4, \dots, L_{ij}^n, y = \overline{1, K_j^n} \end{cases} \quad (2.13)$$

Здесь L_{ij}^n – число аппаратов j -й стадии n -й ТС, задействованных в процессе выпуска i -го продукта; f – порядковый номер аппарата; $\Delta t_{KPyj}^n, \Delta t_{TPxj}^n$ – продолжительность проведения КР и ТР на любом из аппаратов j -й стадии n -й ТС, определяемая согласно нормативам на проведение ППР и количеству ремонтников, задействованных в работе.

Если для текущего ремонта $0.15 \Delta t_{Пj}^n < L_{ij}^n \Delta t_{TPxj}^n \leq 0.3 \Delta t_{Пj}^n$, то

$$t_{TPxj}^{nf} = t_{TPxj}^n - 0.15 \Delta t_{Пj}^n + (f-1) \Delta t_{TPxj}^n, \quad f = \overline{1, L_{ij}^n}, x = \overline{1, M_j^n}. \quad (2.14)$$

Для капитального ремонта при $0.1 \Delta t_{Lj}^n < L_{ij}^n \Delta t_{KPyj}^n \leq 0.2 \Delta t_{Lj}^n$

$$t_{KPyj}^{nf} = t_{KPyj}^n - 0.1 \Delta t_{Lj}^n + (f-1) \Delta t_{KPyj}^n, \quad f = \overline{1, L_{ij}^n}, y = \overline{1, K_j^n}. \quad (2.15)$$

Зависимости (2.12)-(2.15) указывают возможные смещения сроков начала ТР и КР без остановки работы МХП. Если $L_{ij}^n \Delta t_{TPxj}^n > 0.3 \Delta t_{IIj}^n$ или $L_{ij}^n \Delta t_{KPyj}^n > 0.2 \Delta t_{IIj}^n$ ремонт некоторых аппаратов придется проводить с остановкой системы: без остановки могут проводиться ремонты для аппаратов с номерами

$$t_{TPxj}^{nf} = t_{TPxj}^n - 0.15 \Delta t_{IIj}^n + (f - 1) \Delta t_{TPxj}^n, \quad x = \overline{1, M_j^n}, \quad f = 1, \left[\frac{0.3 \Delta t_{IIj}^n}{\Delta t_{TPxj}^n} \right], \quad (2.16)$$

$$t_{KPyj}^{nf} = t_{KPyj}^n - 0.1 \Delta t_{IIj}^n + (f - 1) \Delta t_{KPyj}^n, \quad y = \overline{1, K_j^n}, \quad f = 1, \left[\frac{0.2 \Delta t_{IIj}^n}{\Delta t_{KPyj}^n} \right],$$

с остановкой –

$$f = \left[\frac{0.3 \Delta t_{IIj}^n}{\Delta t_{TPxj}^n} \right] + 1, L_{ij}^n \quad \text{и} \quad f = \left[\frac{0.2 \Delta t_{IIj}^n}{\Delta t_{KPyj}^n} \right] + 1, L_{ij}^n. \quad (2.17)$$

К сожалению, существующие нормативы на продолжительность межремонтных периодов и циклов не отражают реальные условия эксплуатации оборудования. Поэтому предлагается вводить поправочные коэффициенты, учитывающие различия в режимах функционирования аппаратов.

Исходя из понятия наиболее благоприятного режима функционирования по температуре, давлению, вязкости среды и скорости коррозии, а также зная предельные значения данных параметров для аппаратов МХП, введем следующие коэффициенты:

– по температуре	$a_{Tj} = \left \frac{T_{Pj} - T_{IIj}}{\Delta T_j} \right ,$	
– по давлению	$a_{Pj} = \left \frac{P_{Pj} - P_{IIj}}{\Delta P_j} \right ,$	
– по вязкости среды	$a_{\mu j} = \left \frac{\mu_{Pj} - \mu_{IIj}}{\Delta \mu_j} \right ,$	(2.18)
– по скорости коррозии	$a_{vj} = \left \frac{v_{Pj} - v_{IIj}}{\Delta v_j} \right ,$	

где индексы P – рабочее, II – наилучшее, Δ – допустимый интервал параметра.

Коэффициенты (2.18) рассчитываются на основе имеющейся информации о работе оборудования в различных условиях, мнений экспертов и по согласованию с контролирующей организацией. С их помощью проводится обоснованная коррекция значений межремонтных периодов и циклов ТО в зависимости от веса каждого коэффициента. Существенную помощь в решении данной проблемы может оказать накопленная статистическая информация по отказам аналогичного оборудования, функционирующего в схожих условиях на других промышленных предприятиях.

Таким образом, соотношения (2.6)-(2.18) позволяют определять количество текущих и капитальных ремонтов ТО всех ТС цеха в течение планируемого периода его работы, а также моменты начала их проведения. Варьируя значениями t_{TPxj}^{nf} и t_{KPyj}^{nf} в указанных интервалах ($\pm 15\%$ от Δt_{IIj}^n и $\pm 10\%$ от Δt_{IIj}^n соответственно), можно получить оптимальный график планово-предупредительных ремонтов.

Рассмотрим более подробно планирование проведения ремонтных работ для оборудования совокупности ТС цеха в условиях ограниченности количества ремонтного персонала. Множество всех ремонтов цеха за планируемый период имеет вид:

$$\tilde{r} = \left\{ \left\langle r_1^{nm}, \dots, r_\beta^{nm}, \dots, r_B^{nm} \right\rangle \middle| n = 1, \dots, N; m = \alpha_n, \dots, A_n \right\} \quad (2.19)$$

Каждый элемент множества \tilde{r} имеет следующую индексацию: β – порядковый номер ремонта; n – номер ТС, на которой проводится ремонт; m – номер ремонтируемого аппарата; $r_\beta^{nm} = 1$ – текущий ремонт; $r_\beta^{nm} = 2$ – капитальный ремонт. В множество \tilde{r} входят все ППР цеха, моменты начала которых рассчитаны по соотношениям (2.6)-(2.15) и при решении задачи выбора оптимальной стратегии ремонта к ним добавляется ремонт, планируемый на время t . Необходимо также учитывать тот факт, что в течение проведения β -го ремонта на n -ой ТС штат свободного ремонтного персонала постоянно меняется, в связи с началом или окончанием ремонтов на других системах.

Следовательно, задача оптимального совмещения ремонтов оборудования с календарным планом работы совокупности ТС цеха заключается в поиске такого варианта совмещения множеств \tilde{r} и \tilde{q} , при котором «условная» прибыль будет максимальной.

При рассмотрении ремонтов оборудования одной ТС для ее произвольного расписания достаточно было бы перебрать все состояния, на которые попали ремонты, с первого до последнего, и в случае необходимости, корректировать продолжительность данных состояний. При рассмотрении ремонтов оборудования всех ТС цеха возникает вопрос, в какой последовательности совмещать ремонты цеха \tilde{r} с расписанием работы \tilde{q} ? Самый простой способ: последовательно для всех ТС, начиная с первой, совмещать вектора ремонтов их оборудования с векторами состояний. В результате такого совмещения загруженность ремонтного персонала может оказаться малоэффективной. Кроме того, может произойти запаздывание начала выпуска продукта по окончании ремонта на той системе, где оно более всего нежелательно.

Для описания произвольной последовательности совмещения множеств \tilde{q} и \tilde{r} в общем случае введем дополнительное множество \tilde{c} :

$$\tilde{c} = \left\{ \left\langle c_1^{nm}, \dots, c_\beta^{nm}, \dots, c_B^{nm} \right\rangle \middle| n = 1, \dots, N; m = \alpha_n, \dots, A_n \right\}. \quad (2.20)$$

Элемент c_β^{nm} представляет собой «приоритет» ремонта r_β^{nm} и определяет порядковый номер его совмещения с календарным планом работы совокупности ТС цеха

\tilde{q} . Варианты множества \tilde{c} формируются в виде в дерева перебора вариантов для каждого \tilde{q} с использованием алгоритма, рассматриваемого далее в п. 2.3.4.

Так как, при совмещении ремонта r_{β}^{nj} с календарным планом работы совокупности ТС цеха штат свободного ремонтного персонала является переменным во времени, то для расчета реального времени проведения ремонта r_{β}^{nj} , в условиях ограниченности штата ремонтного персонала необходимо, выполнить следующее:

$$\forall n, m, i_{\alpha} > I \left\{ \begin{array}{l} t = t_{kj_l}^n + p_{kj_l}^n; d = 0 \\ t = t + h \\ g(t) = g(t) + \eta_{\beta}^{nm} \\ d = d + h \end{array} \right\} g(t) + \eta_{\beta}^{nm} < G \left. \vphantom{\left\{ \right.} \right\} d < \tau_{\beta}^{nm}. \quad (2.21)$$

Здесь $t_{kj_l}^n$ – время завершения обработки последней партии k -го продукта, нарабатываемого на n -ой ТС, после выгрузки которой в расписании работы ТС размещается ремонт r_{β}^{nm} ;

$p_{kj_l}^n$ – продолжительность выгрузки партии k -го продукта;

τ_{β}^{nm} и η_{β}^{nm} – общее время и количество ремонтного персонала, необходимые для проведения ремонта r_{β}^{nm} ;

$g(t)$ – функция суммарных трудозатрат ремонтного персонала цеха;

G – число ремонтных рабочих цеха;

t – время от начала проведения ремонта;

d – время, затраченное на ремонт;

h – выбранная дискретность времени (часы, минуты и т.п.).

Началу ремонта r_{β}^{nm} будет соответствовать окончание выгрузки k -го продукта n -ой ТС, см. первое уравнение системы (2.21). Размещение ремонта в расписании работы ТС производится учетом общего числа дней τ_{β}^{nm} и штата ремонтного персонала η_{β}^{nm} , необходимых для его проведения. При этом, ввиду ограниченности штата ремонтного персонала цеха, текущий ремонт может проводиться с «разрывами» во времени, так как ремонтники могут временно сниматься с выполнения текущего задания для проведения другого, более важного или «лимитирующего» по времени ремонта. Поэтому реальная продолжительность ремонта r_{β}^{nm} (время от начала до завершения, включая «разрывы») может быть больше τ_{β}^{nm} . В процессе размещения очередного ремонта корректируется функция суммарных трудозатрат ремонтного персонала цеха $g(t)$. Реальная продолжительность ремонта определяется по последнему уравнению системы (2.21).

На рисунке 2.9 представлен пример календарного плана цеха ОАО «Пигмент» до и после совмещения с ним графика ремонтов. В цехе размещены 5 ТС. За планируемый период (один квартал) на первой, четвертой и пятой ТС

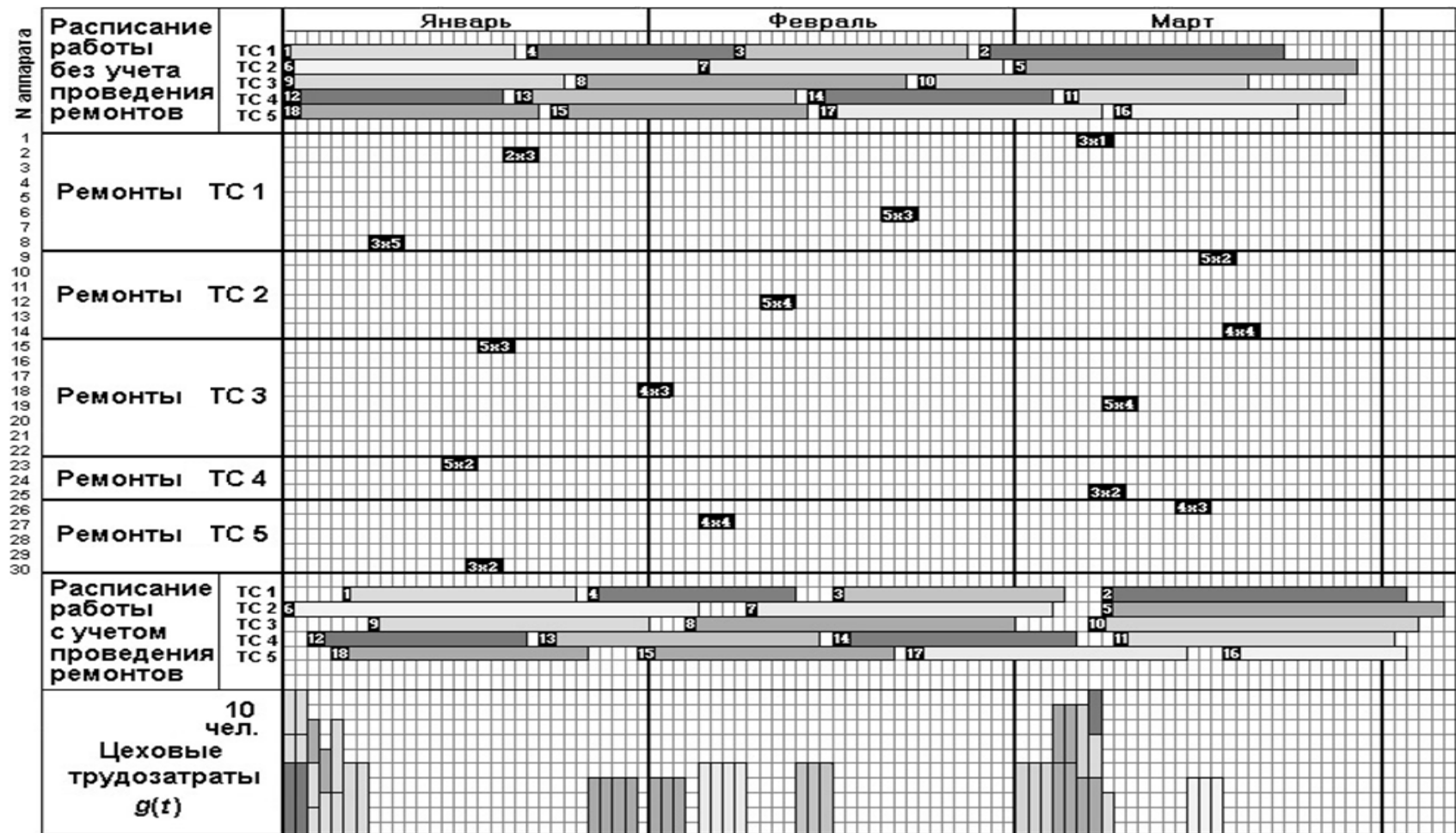


Рисунок 2.9 – Календарный план работы совокупности ТС цеха ОАО «Пигмент» до и после его совмещения с графиком ремонтов ТО

нарабатываются по четыре продукта, на второй и третьей – по три. Штат ремонтного персонала цеха включает 10 человек. Количество аппаратов ТС №№1-5, включаемых в график ППР, равно 8, 6, 8, 3 и 5 соответственно. Для наглядности представления результатов дискретность по времени была принята равной одним суткам. Малые горизонтальные прямоугольники рисунка 2.9 характеризуют базовые стартовые времена ППР, число человек и дней, необходимых на ремонт по нормативам. Вертикальные прямоугольники внизу рисунка представляют собой полученную функцию суммарных трудозатрат на ремонтные работы цехового оборудования.

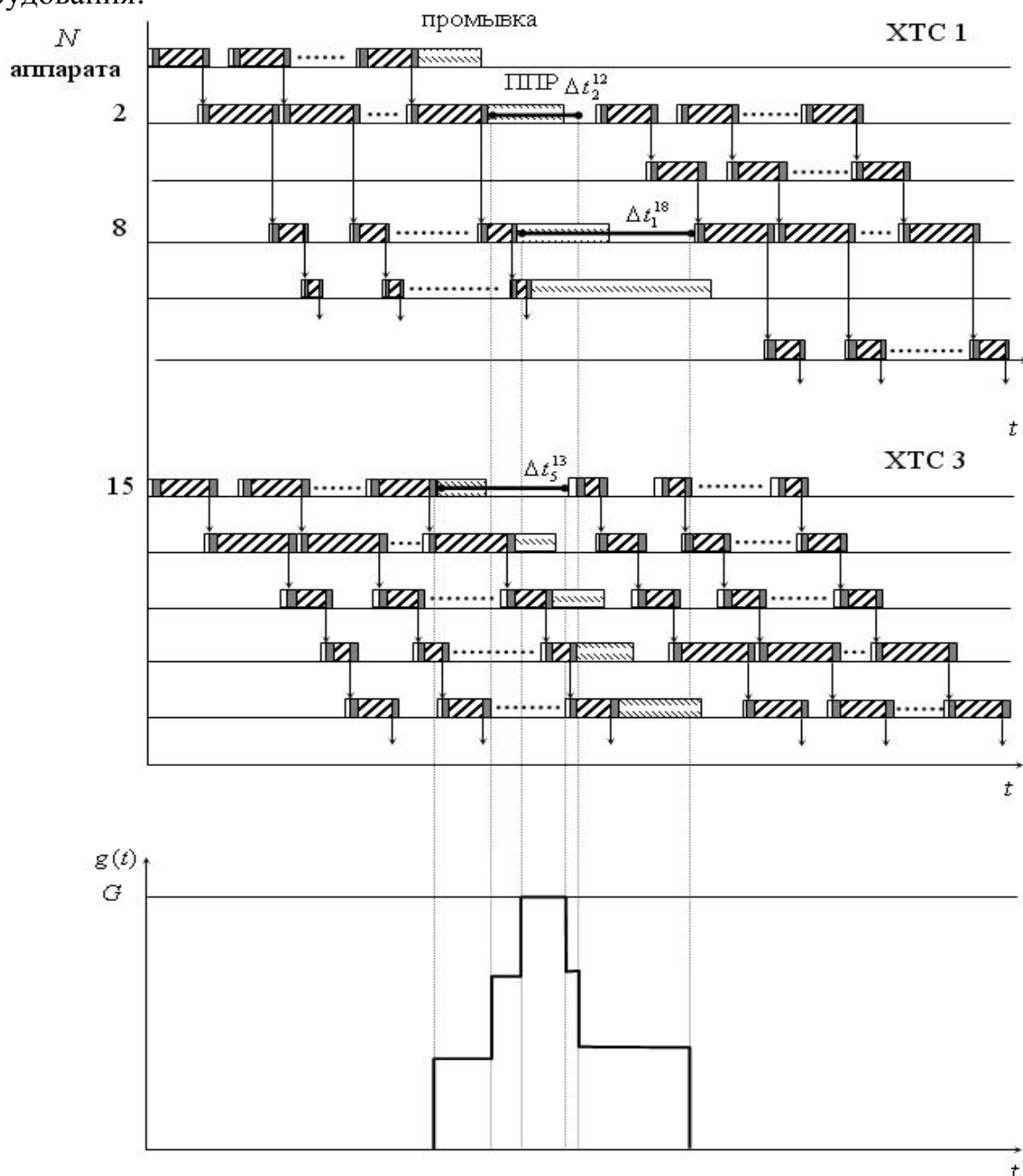


Рисунок 2.10 – Фрагмент календарного плана двух ТС и функция суммарных трудозатрат, полученная после совмещения трех ремонтов с календарным планом работы ТС №№ 1,3

Для произвольной последовательности наработки продуктов на ТС \tilde{q} , задаваемой алгоритмом решения задачи оптимального календарного планирования, по моделям выпуска продукции рассчитывается первоначальный календарный план производства без учета совмещения с ППР. На рисунке 2.9 представлен календарный план со следующей последовательностью наработки продуктов на схемах \tilde{q} :

$$\tilde{q} = \{\langle 1,4,3,2 \rangle, \langle 6,7,5 \rangle, \langle 9,8,10 \rangle, \langle 12,13,14 \rangle, \langle 18,15,17,16 \rangle\} \quad (2.22)$$

На рисунке 2.10 изображен фрагмент календарного плана работы ТС №№ 1,3 и функция суммарных трудозатрат, полученная после совмещения трех ремонтов аппаратов этих систем с текущим вариантом календарного плана. Из рисунка видно, что полученные продолжительности ремонтов Δt_{β}^{nif} в основном превышают времена переходов с наработки одного продукта на другой. Поэтому начало наработки следующего продукта переносится на более поздний срок. Функция суммарных трудозатрат изменяется по мере проведения ремонтов. Множество всех ремонтов \tilde{r} цеха за планируемый период имеет вид:

$$\tilde{r} = \{\langle r_1^{18}, r_2^{12}, r_3^{16}, r_4^{11} \rangle, \langle r_1^{212}, r_2^{29}, r_3^{214} \rangle, \langle r_1^{315}, r_2^{318}, r_3^{319} \rangle, \langle r_1^{423}, r_2^{425} \rangle, \langle r_1^{530}, r_2^{527}, r_3^{526} \rangle\} \quad (2.23)$$

По уравнениям (2.6)-(2.15) и соотношению (2.21) реализовано оптимальное совмещение графика ремонтов с календарным планом работы совокупности ТС цеха. Проведена коррекция продолжительности состояний функционирования систем согласно (2.5).

2.3.4 Постановка задачи оптимального календарного планирования МХП

Будем считать, что МХП представляет собой совокупность ТС цеха, а штат ремонтного персонала цеха ограничен. Задача оптимального календарного планирования работы совокупности ТС цеха в условиях ограниченности штата ремонтного персонала формулируется следующим образом: необходимо найти значения компонент векторов \tilde{q} состояний функционирования ТС цеха (2.4), $\tilde{\sigma}$ продолжительностей состояний функционирования (2.5), \tilde{r} последовательности проведения планово-предупредительных ремонтов (2.19) и \tilde{c} последовательности совмещения ППР (2.20) с расписанием, при которых "условная" прибыль достигает максимума

$$\{\tilde{q}^*, \tilde{\sigma}^*, \tilde{r}^*, \tilde{c}^*\} = \underset{\tilde{q}, \tilde{\sigma}, \tilde{r}, \tilde{c}}{\operatorname{argmax}} P(\tilde{q}, \tilde{r}, \tilde{c}, Z^c, Q_i^n, \Delta Q_{ij}^n, h_i^n)$$

и выполняются связи и ограничения математических моделей выпуска продукции (2.1)-(2.3) и построения графика ППР ТО (2.6)-(2.18), а также ограничения на производительность ТС, наличие сырья, хранение готового продукта, число ремонтных рабочих цеха (2.21) и проведение ППР.

Термином "условная" прибыль обозначают часть прибыли от реализации продукции, при расчете которой не учитываются затраты, не подверженные изменениям при варьировании параметров \tilde{q} , $\tilde{\sigma}$, \tilde{r} , \tilde{c} :

$$\begin{aligned}
P = S - Z^C - Z^\exists - Z^\Pi - Z^\text{III} - Z^{\text{PEM}} = \\
\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n} (Q_{i0}^n + Q_i^n) C_{\Pi i}^n - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{m=1}^M (R_{im}^n C_{Cm}) Q_i^n - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{j \in J_i} z_{ij}^{\exists n} L_{ij}^n Q_i^n - \\
- \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{j \in J_i} \{ (\Delta Q_{ij}^n L_{ij}^n C_{\Pi i}^n + z_{\Pi ij}^n L_{ij}^n) \sum_{l=1}^{I_n} T_{il}^n \} - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n} (Q_{\Pi \Pi i}^n - Q_i^n) h_i^n - \sum_{\beta=1}^B \sum_{g=1}^G C_{g\beta}^{3.ч.},
\end{aligned} \quad (2.24)$$

где S – сумма, полученная от реализации продукции;

I_n – число продуктов, выпускаемых на n -й ТС;

$C_{\Pi i}^n$ – цена 1 т i -го продукта, выпускаемого на n -й ТС;

Q_{i0}^n – запас i -го продукта n -й ТС на начало планируемого периода;

Q_i^n – выпуск i -го продукта n -й ТС за планируемый период;

Z^C – затраты на сырье;

R_{im}^n – расходная норма m -го компонента сырья на 1 т i -го продукта n -й ТС;

C_{Cm} – цена 1 т m -го компонента сырья;

Z^\exists – эксплуатационные затраты;

$z_{ij}^{\exists n}$ – затраты на эксплуатацию аппарата при выпуске i -го продукта;

Z^Π – экономические потери при переходе с продукта на продукт;

ΔQ_{ij}^n – потери i -го продукта n -й ТС при промывке аппарата j -й стадии;

L_{ij}^n – число параллельных аппаратов j -й стадии n -й ТС, задействованных при выпуске i -го продукта;

T_{il}^n – количество переходов n -й ТС с выпуска i -го продукта на l -й;

Z^III – штрафные выплаты за несвоевременную поставку продукции;

$Q_{\Pi \Pi i}^n$ – плановое задание по выпуску i -го продукта на n -й ТС;

h_i^n – сумма штрафа за недопоставку 1 т i -го продукта n -й ТС;

Z^{PEM} – суммарные затраты на покупку запасных частей при проведении ремонтов;

$C_{g\beta}^{3.ч.}$ – стоимость запасной части g при проведении ремонта β .

Ограничения на производительность n -й ТС: количество i -го продукта, произведенное за планируемый период Q_i^n , а также его начальный запас Q_{i0}^n не должны превышать потребностей, т.е.

$$Q_{i0}^n + Q_i^n \leq Q_{\Pi \Pi i}^n. \quad (2.25)$$

Ограничения на наличие сырья: количество сырья, израсходованного за планируемый период, не должно превышать имеющихся запасов (количества поступившего сырья и его остатков):

$$S_{m\text{IIIЗ}} \leq S_{m\text{IIIЗ}}^n + (S_m^0 - S_{m\text{IIIЗ}}^0), \quad m = \overline{1, M}. \quad (2.26)$$

Ограничения на хранение готового продукта: суммарные остатки продуктов, выпускаемых каждой ТС не должны превышать емкости хранилищ D :

$$\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n} (Q_i^n - Q_{ПЛИ}^n) \leq D. \quad (2.27)$$

Ограничения на проведение ППР: при проведении планово-предупредительных ремонтов необходимо соблюдать действующие нормативы, т.е.

$$r_{\beta}^{HOPM} - \Delta_{\beta} t_{\beta} \leq r_{\beta}^{nj} \leq r_{\beta}^{HOPM} + \Delta_{\beta} t_{\beta}. \quad (2.28)$$

Сформулированная задача оптимального календарного планирования работы совокупности ТС цеха относится к классу экстремальных комбинаторных задач.

2.3.5 Алгоритм оптимального календарного планирования работы МХП

Высокая размерность варьируемых параметров задачи оптимального календарного планирования МХП и необходимость ее неоднократного решения на этапе эксплуатации производства не позволяют применить классические алгоритмы оптимизации для поиска глобального экстремума критерия оптимальности (2.24), по причине чрезмерно больших затрат времени. В то же время, генетические алгоритмы (ГА), хорошо зарекомендовали себя при решении задач теории расписаний, т.к. позволяют найти решение близкое к оптимальному за приемлемое время. Поэтому, для решения задачи (2.24)-(2.28) разработан алгоритм, в основе которого лежит генетический поиск. При решении задачи используются математические модели выпуска продукции (2.1)-(2.3) и автоматизированного построения графика планово-предупредительных ремонтов ТО (2.6)-(2.15), (2.21).

Рассмотрим алгоритм решения задачи на примере пяти ТС цеха, которые выпускают восемнадцать продуктов для планового периода, равного одному кварталу. К числу варьируемых параметров задачи относятся:

- множество состояний функционирования ТС цеха \tilde{q} (2.4);
- последовательность совмещения множества ремонтных работ \tilde{r} (2.19) с множеством \tilde{q} , которую характеризует множество \tilde{c} (2.20).

В отличие от классических методов оптимизации, ГА работает сразу с несколькими потенциальными решениями – индивидуумами популяции. В качестве функции приспособленности индивидуума используется критерий (2.24). С помощью таких генетических операций как отбор, скрещивание и мутация проводится адаптивный поиск лучших решений задачи (исследуются наиболее перспективные области множества допустимых решений, где условная прибыль наиболее высока). Учитывая разную продолжительность промывок аппаратов стадий ТС при переходах с выпуска одного продукта на выпуск другого, решение задачи предлагается искать на множестве перестановок нарабатываемых продуктов.

Алгоритм предусматривает следующие действия.

1. Ввод исходных данных: информации из регламентов выпуска продуктов, наработках аппаратов всех стадий всех ТС к моменту начала планируемого перио-

да, продолжительность планируемого периода и плановые производительности ТС по продуктам.

2. С применением математической модели выпуска продукции МХП строятся графики Гантта для всех продуктов, определяются моменты начала и окончания процессов выпуска каждой партии каждого продукта и переходов с выпуска одного продукта на другой.

3. Создается начальная популяция, формирующая множество потенциальных решений: сто индивидуумов, каждый из которых кодируется в хромосоме, представляющей собой набор идентификаторов продуктов заданного ассортимента, которые необходимо выпустить на ТС производства за плановый период. Последовательность идентификаторов в генах хромосомы соответствует последовательности наработки продуктов. Каждый ген хромосомы формирует вектор состояний функционирования отдельной ТС цеха. На рисунке 2.11 изображена хромосома одного из индивидуумов, первый ген которой фиксирует последовательность выпуска четырех продуктов первой ТС цеха (1,3,4,2). Далее кодируется последовательность выпуска продуктов на других ТС: вторая и третья выпускают по три продукта, остальные – по четыре.



Рисунок 2.11 – Хромосома, формирующая вектор состояний функционирования ТС цеха

4. К наработке аппаратов на момент начала планируемого периода добавляется наработка за планируемый период. С применением математической модели автоматизированного построения графика ППР определяются нормативные значения типа и количества ремонтных работ в течение планируемого периода на парке оборудования производства, сроков их проведения.

5. Оптимальное совмещение множества ремонтов с множеством состояний функционирования ТС цеха. Число вариантов совмещения зависит от числа ремонтов, которые необходимо провести за плановый период (рисунок 2.12). В зависимости от рассматриваемой последовательности выпуска продуктов на ТС, представленных в хромосоме индивидуума, ремонт аппарата одной системы может совпасть по времени с ремонтом аппарата другой. В условиях ограниченности штата ремонтного персонала это может привести к увеличению продолжительности ремонтных работ и, как следствие, увеличению продолжительности выпуска продуктов в плановых объемах и уменьшению получаемой прибыли.

Совмещение множества ремонтов \tilde{r} с множеством состояний функционирования ТС производства \tilde{q} определяется значениями приоритетов ремонтов

множества \tilde{c} , которое формируется в результате построения дерева перебора вариантов совмещения по следующей схеме:

- поиск ближайшего ремонта или множества ближайших ремонтов, если они пересекаются между собой по времени;
- формирование множества вариантов совмещения в виде дерева;
- совмещение множества ремонтов с множеством состояний функционирования ТС цеха для каждого варианта, полученного на этапе б);
- если текущий ремонт не последний в списке, то проводится переход к этапу а).

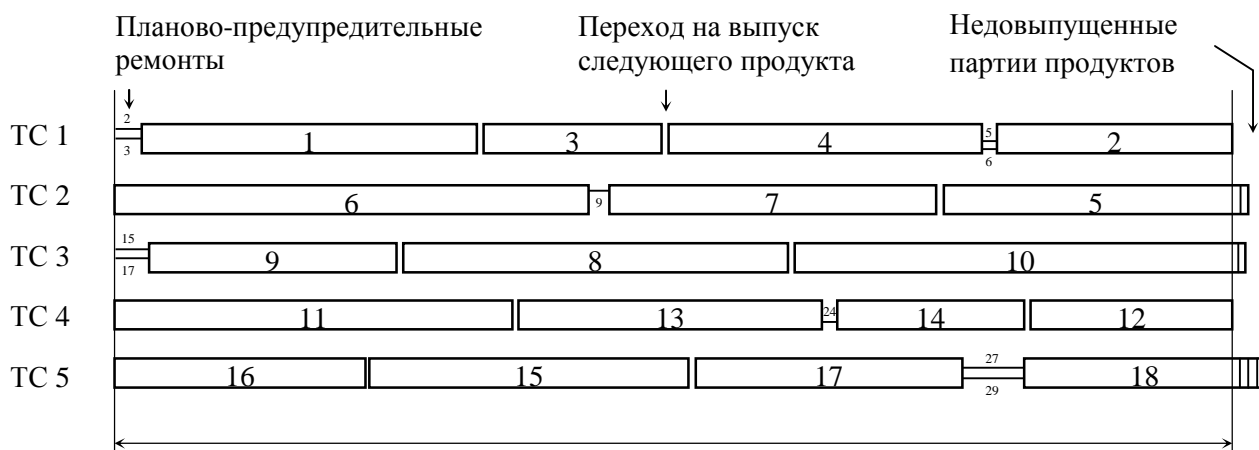


Рисунок 2.12 – Квартальный календарный план цеха с учетом проведения ППР
крупные цифры – идентификаторы продуктов,
мелкие цифры – номера ремонтируемых аппаратов цеха

Для каждого полученного варианта совмещения множеств \tilde{r} и \tilde{q} проводится расчет критерия оптимальности по формуле (2.24). Множество ремонтов цеха, представленных на рисунке 2.12, записывается согласно (2.19), следующим образом:

$$\tilde{r} = \{ \langle r_{\beta}^{n,j} \rangle \} = \{ \langle r_1^{1,2}, r_2^{1,3}, r_3^{1,5}, r_4^{1,6} \rangle, \langle r_1^{2,9} \rangle, \langle r_1^{3,15}, r_2^{3,17} \rangle, \langle r_1^{4,24} \rangle, \langle r_1^{5,27}, r_2^{5,29} \rangle \} \quad (2.29)$$

Согласно варианту КП, представленному на рисунке 2.9, ближайшие планово-предупредительные ремонты проводятся на ТС 1 и ТС 3. ППР ТС 1 проводится перед началом выпуска продукта 1 на аппаратах №№ 2, 3, ППР ТС 3 – перед началом выпуска продукта 9 на аппаратах №№ 15, 17. Построение дерева перебора вариантов совмещения множества ремонтов с множеством состояний функционирования ТС цеха (рисунок 2.13) начинается с этих четырех аппаратов. Число вариантов на данном этапе равно 24 (число перестановок последовательности ремонтов 4-х аппаратов). Вариант совмещения ремонтов аппаратов в последовательности 15-17-2-3 записывается следующим образом:

$$\tilde{c} = \{ \langle c_{\beta}^{n,j} \rangle \} = \{ \langle 3, 4, -, - \rangle, \langle -, - \rangle, \langle 1, 2 \rangle, \langle -, - \rangle, \langle -, - \rangle \}, \quad (2.30)$$

где 1, 2, 3, 4 – порядковые номера ремонтов (2.29) при данном варианте совмещения множеств \tilde{r} и \tilde{q} ; «-» – означает, что на данном этапе ремонт не рассматривается

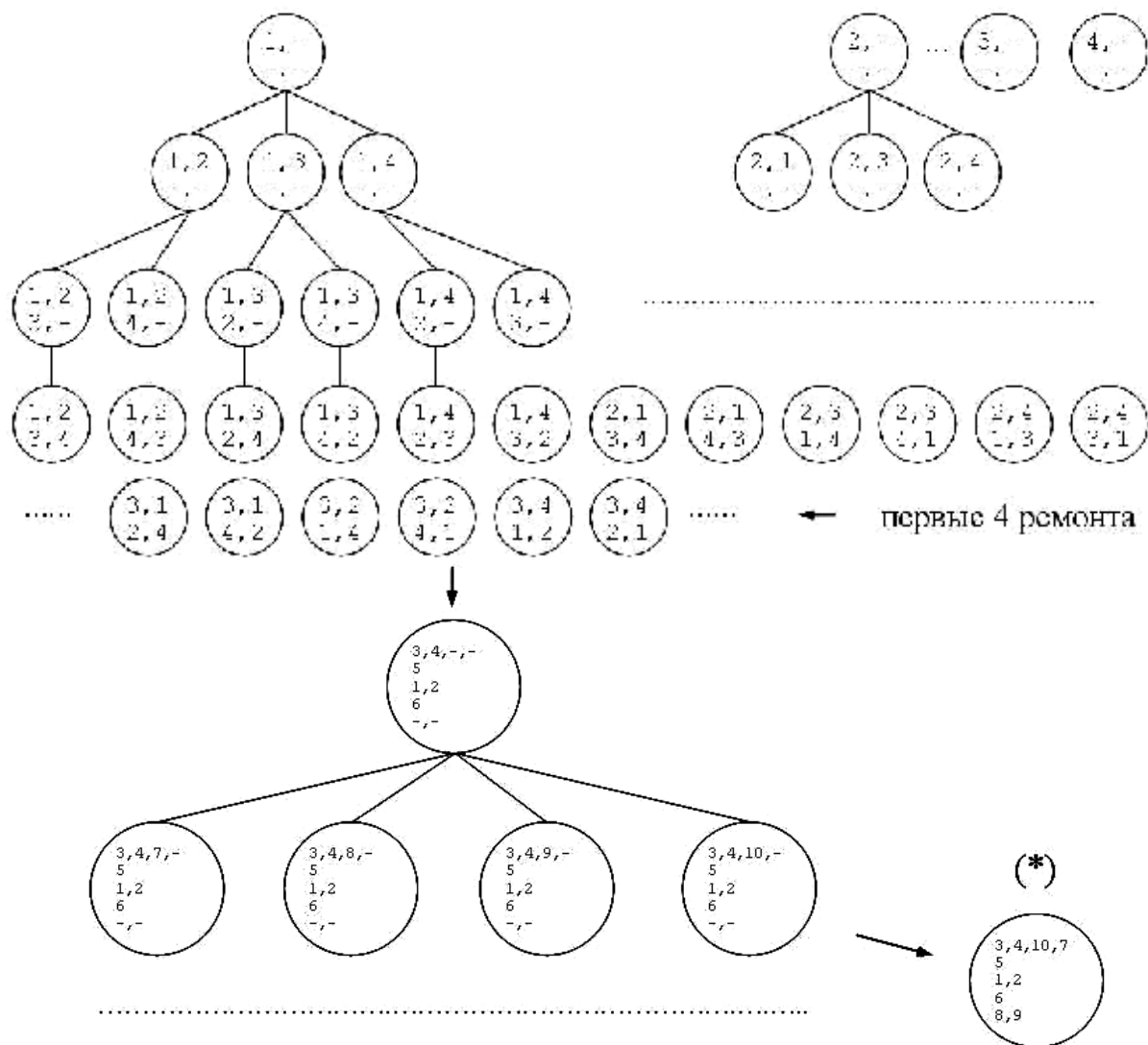


Рисунок 2.13 – Построение дерева вариантов совмещения множества ремонтов с множеством состояний функционирования ТС цеха

На рисунке 2.14 изображены два варианта совмещения ремонтов проводимых на ТС 1 и 3, аппаратах №№ 2,3,15,17. Так как реальное время простоя в ремонте по обеим ТС меньше у нижнего варианта, то вероятность его сохранения в окончательном варианте совмещения множеств \tilde{r} и \tilde{q} будет выше. В результате совмещения множеств \tilde{r} и \tilde{q} формируются различные распределения трудозатрат во времени. Количество ремонтного персонала цеха ограничено десятью ремонтниками, поэтому во время перехода с выпуска одного продукта на другой провести необходимые ремонты не удастся. Лучшие варианты совмещения множеств \tilde{r} и \tilde{q} характеризуются высокой плотностью «упаковки» ремонтов – прямоугольных объектов в области, ограниченной слева моментом окончания выпуска предыдущего продукта, включая необходимые промывки, а сверху – числом ремонтников в цеху. Основные отличия процедуры совмещения множеств \tilde{r} и \tilde{q} от алгоритма

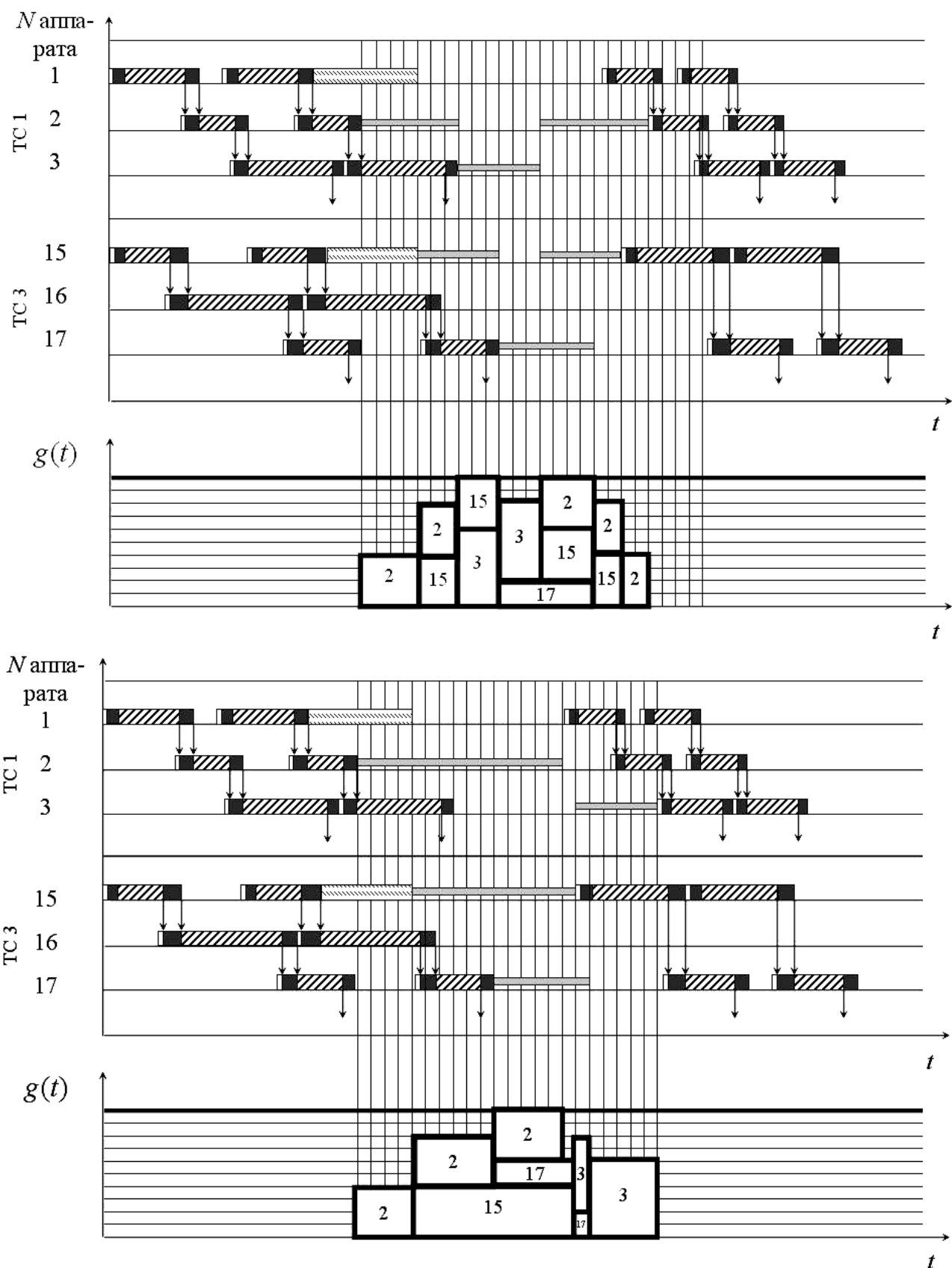


Рисунок 2.14 – Варианты совмещения ремонтов с календарным планом, Последовательности совмещения: 17-3-15-2 и 15-17-2-3

задачи упаковки двумерных объектов состоят в следующем:

- областей «упаковки» ремонтов, как правило, несколько;
- ремонты, представленные в виде двумерных объектов могут быть сплошными или разделенными на несколько частей.

На этапе совмещения множеств \tilde{r} и \tilde{q} для каждого полученного варианта рассчитывается «условная» прибыль по формуле (2.24). Вариант, при котором условная прибыль максимальна является оптимальным для заданного индивидуума. В результате формирования полного дерева вариантов совмещения (576 вариантов), оптимальный вариант, отмеченный на рисунке 2.13 звездочкой, записывается следующим образом:

$$\tilde{c} = \{ \langle c_{\beta}^{n_j} \rangle \} = \{ \langle 3, 4, 10, 7 \rangle, \langle 5 \rangle, \langle 1, 2 \rangle, \langle 6 \rangle, \langle 8, 9 \rangle \} \quad (2.31)$$

Этап 5 решения задачи реализуется для каждого индивидуума популяции (варианта последовательности выпуска продуктов на ТС), а его приспособленность в дальнейшем рассчитывается по оптимальному варианту совмещения множеств \tilde{r} и \tilde{q} .

6. Отбор наиболее приспособленных индивидуумов и воспроизводство новых решений. Чем лучше вариант КП и больше прибыль, тем более приспособленным будет индивидуум, представляющий данный вариант последовательностей выпуска продуктов на ТС. Вероятность отбора индивидуума для последующего скрещивания и воспроизводства новых решений пропорциональна его приспособленности. На рисунке 2.15 изображена популяция первого поколения, для которой значения номеров продуктов в генах задаются случайным образом. Используемая модель представления популяции предусматривает локальный отбор индивидуумов для скрещивания и получения новых решений. Такой способ отбора обеспечивает высокую степень разнородности всей популяции и предотвращает преждевременную сходимость ГА. На рисунке 2.16 изображена модель популяции 10x10.

индивидуум №	Популяция из 100 индивидуумов															условная прибыль			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		16	17	18
74	1	3	4	2	6	7	5	9	8	10	11	13	14	12	16	15	17	18	274136
35	3	2	1	4	7	6	5	10	8	9	13	12	14	11	15	17	16	18	273545
85	2	3	4	1	5	7	6	8	9	10	12	11	13	14	16	18	17	15	275831
22	4	1	2	3	5	6	7	10	8	9	11	12	14	13	18	15	17	16	273123
...																		
95	4	1	2	3	5	6	7	10	8	9	11	12	14	13	18	15	17	16	274259
ТС №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	

Рисунок 2.15 – Популяция индивидуумов первого поколения

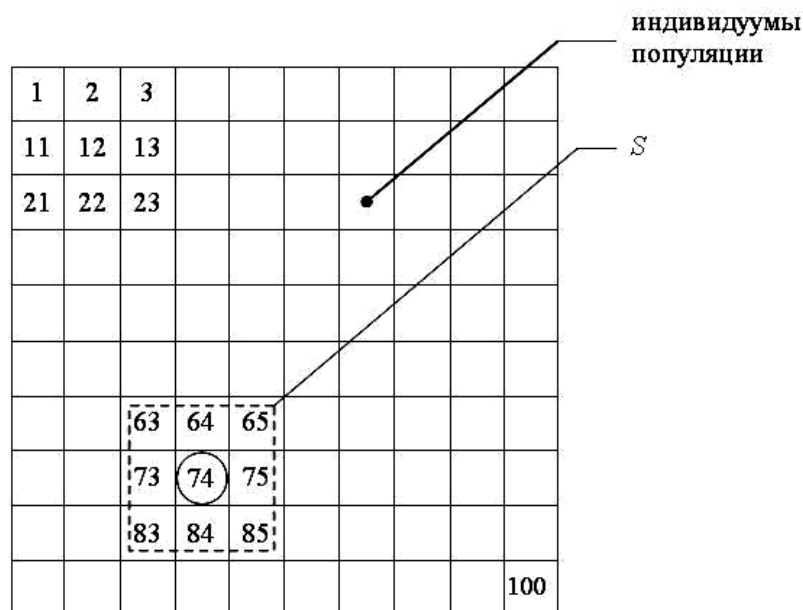


Рисунок 2.16 – Модель популяции 10x10

Процесс отбора приспособленных индивидуумов и воспроизводства новых решений проводится следующим образом:

- 1) рассчитывается приспособленность каждого индивидуума популяции;
- 2) в качестве текущей ячейки матрицы выбирается первая;
- 3) для текущей ячейки матрицы формируется множество S , состоящее из самой ячейки и ее соседей;
- 4) из полученного множества случайно отбирается один индивидуум, причем вероятность отбора пропорциональна его приспособленности;
- 5) с заданной вероятностью проводится «скрещивание» выбранного индивидуума и индивидуума текущей ячейки с использованием одноточечного кроссинговера и получением одного потомка.
- 6) с заданной вероятностью полученный потомок подвергается мутации.
- 7) если текущая ячейка не последняя, то осуществляется переход к следующей ячейке и к пункту 3), иначе – переход к пункту 8);
- 8) если в результате ста последних поколений не удалось улучшить значение критерия, то ГА заканчивает работу, иначе – переход к пункту 1).

Приспособленность индивидуума ind принимается равной условной прибыли, получаемой за плановый период при последовательной наработке продуктов на ТС цеха, представленной в хромосоме данного индивидуума.

$$f(ind) = P(ind) \tag{2.32}$$

Вероятность отбора индивидуума из множества S :

$$Ps(ind) = \frac{f(ind)}{\sum_{i=1}^N f(i)}, \tag{2.33}$$

где $i = \overline{1, IN}$ - множество индивидуумов популяции. Одноточечный кроссинговер необходим для «скрещивания» приспособленных индивидуумов и получения нового потенциального решения задачи в виде нового потомка популяции. Численный эксперимент показал, что лучшая сходимость алгоритма достигается при вероятности кроссинговера равной 0.85. Соответственно, с вероятностью 0.15 кроссинговер не проводится и потомок сразу переходит на стадию мутации. Оператор кроссинговера работает следующим образом (рисунок 2.17):

- 1) случайным образом выбирается точка разрыва хромосом обоих индивидуумов;
- 2) в хромосому потомка копируются гены первого индивидуума, находящиеся левее точки разрыва;
- 3) если точка разрыва делит один из генов на части, то номера продуктов разрываемого гена первого индивидуума, находящиеся левее точки разрыва, копируются в соответствующий ген хромосомы потомка, который затем дополняется номерами продуктов гена второго индивидуума;
- 4) в хромосому потомка копируются гены второго индивидуума, находящиеся правее точки разрыва.

индивидуум №																условная прибыль			
74	1	3	4	2	6	7	5	9	8	10	11	13	14	12	16	15	17	18	274136
85	2	3	4	1	5	7	6	8	9	10	12	11	13	14	16	18	17	15	275831
74'	1	3	4	2	6	7	5	9	8	10	11	13	12	14	16	18	17	15	275953

Рисунок 2.17 – Операция одноточечного кроссинговера, полученный потомок представлен в нижней строке

Операция мутации служит для "прохода" локальных экстремумов критерия оптимальности. Численный эксперимент показал, что максимальная скорость сходимости ГА обеспечивается при вероятности проведения мутации 0,25. Операция мутации предусматривает перестановку двух номеров продуктов в случайно выбранном гене. Это приводит к формированию потенциального решения задачи, в котором случайно меняется последовательность выпуска двух продуктов, см. рисунок 2.18.

Как видно из рисунков 2.17 и 2.18, полученный после операций кроссинговера и мутации потомок имеет лучшую приспособленность, чем его родители, так как значение критерия оптимизации рассчитанное по его хромосоме больше.

индивидуум №														условная прибыль					
74'	1	3	4	2	6	7	5	9	8	10	11	13	12	14	16	18	17	15	275953
74''	1	3	4	2	6	7	5	9	8	10	14	13	12	11	16	18	17	15	276372

Рисунок 2.18 Операция мутации, состоящая в случайной перестановке двух идентификаторов продуктов

Часть потомков может оказаться хуже родителей, т.е. при следующем отборе вероятность их сохранения в новой популяции становится меньше. По мере работы ГА, в популяции постепенно накапливаются индивидуумы, формирующие все лучшие и лучшие варианты решения задачи.

2.3.6 Формирование прогноза по ассортименту и объемам выпуска продукции МХП

В начале раздела отмечено, что в процессе эксплуатации МХП решение задач календарного планирования с учетом необходимости проведения ППР ТО осуществляется многократно по причинам выхода из строя оборудования, изменения плановых заданий выпуска продукции, сбоя в поставке сырья и др. При этом необходимо оперативно обрабатывать огромные объемы информации, связанные с особенностями технологического оборудования ТС, производственными регламентами выпуска продуктов, маршрутами выпуска, текущим состоянием ТО, нормативами проведения ППР, экономическими показателями. Предварительная оценка емкости рынка и формирование прогноза по ассортименту и объемам выпуска продукции позволяет снизить влияние одного из перечисленных возмущений на качество формируемых вариантов КП МХП.

К числу наиболее популярных подходов к определению потребности в выпускаемой продукции относятся нормативный метод, статистико-экстраполяционный метод и метод экспертных оценок.

Нормативный метод применяется для оценки потребности в выпускаемой продукции, если известен норматив потребления i -го вида продукта для производства j -го вида изделия. Тогда плановый объем выпуска i -го продукта

$$Q_{плi} = \sum_i \sum_j b_{ij} D_{ij} (K_{ij} + 1), \quad i = \overline{1, I}, \quad (2.34)$$

где l – отрасль-потребитель;

b_{ij} – норматив потребления i -го продукта в j -м виде изделий;

D_{ij} – количество изделий j -го вида, производимых в течение планируемого периода;

K_{ij} – потери i -го продукта, используемого в изделии j -го вида (устанавливается статистически на основе действующего производства j -го вида изделий). Расчет перспективного норматива потребности производится с учетом количественного и качественного анализа действующих нормативов, анализа состояния производства, опытных данных по новым областям использования и других факторов, влияющих на потребность.

Статистико-экстраполяционный метод. Правомерность экстраполяции и прогноза экономических данных на основе анализа показателей за прошедший период обосновывается тем, что при значительных объемах применения выпускаемой продукции в отдельных отраслях промышленности в течение относительно короткого времени невозможны резкие изменения сложившихся связей. Поэтому изменение потребности в будущем будет подчиняться той же зависимости, что и в ретроспективе. Период, в течение которого возможна экстраполяция потребности, находится в пределах от 10 до 15 планируемых периодов. Для выбора модельной функции предлагается использовать экстраполяционные методы временных рядов Дженкинса-Бокса и аппарат математической статистики.

Привлечение *экспертных оценок* необходимо в тех случаях, когда спрос имеет колеблющийся характер. Данный метод включает:

- комплекс логических и математико-статистических процедур, направленных на получение научной, технической и экономической информации от наиболее компетентных специалистов;
- анализ полученной информации и ее обобщение с целью выбора рационального решения, способствующего обоснованной оценке перспективной потребности.

Определение цели экспертизы, проведение опроса, анализ и обработка информации выполняются группой аналитиков. В состав группы должны входить как ведущие специалисты в области анализируемой проблемы, задействованные в производстве, так и непосредственные потребители продукции.

Для получения наилучшей оценки показателя $Q_{Плi}$ рекомендуется поочередное применение всех трех упомянутых методов.

Оценка текущего состояния технологического оборудования МХП осуществляется на основе информации, поступающей от АСУ ТП. Современные SCADA-системы дают возможность не только решать задачи непосредственно связанные с реализацией производственного процесса, но и предоставляют множество средств и методов взаимодействия и обмена данными с другими автоматизированными системами.

На основе данных, полученных от контрольно-измерительных приборов, установленных на аппаратах и трубопроводах МХП, система технической диагностики по текущим значениям измеряемых параметров, а также динамике их изменения дает возможность отследить первые признаки появления дефектов и дать прогноз их развития в течение времени. На основе этой информации принимаются решения по предотвращению аварий и формированию оптимальной стратегии

проведения ремонтов ТО. Кроме того, опрос датчиков времени работы ТО позволяет контролировать фактическое время, в течение которого тот или иной аппарат был задействован в выпуске продукции. Именно на основе этой информации принимается решение о сроках проведения и видах технического обслуживания и ремонта.

Оперативная информация об экономических показателях производства (стоимость продукции, сырья, запасных частей; нормативы расхода сырья и энергии; наличие договоров на выпуск продукции; штат задействованного ремонтного персонала и другие) может быть получена из системы оперативного управления (СОУ) МХП. Применение современных СОУ производством, построенных на базе систем класса ERP, позволяет оперативно предоставить данную информацию для расчета оптимального календарного плана выпуска продукции и построения графика планово-предупредительных ремонтов ТО.

3 ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

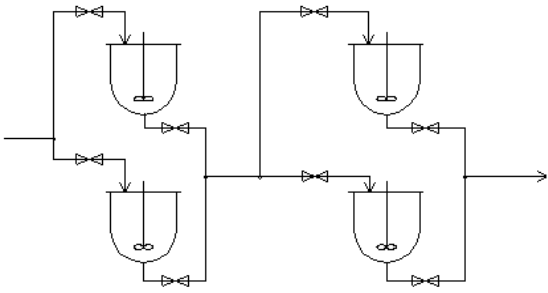
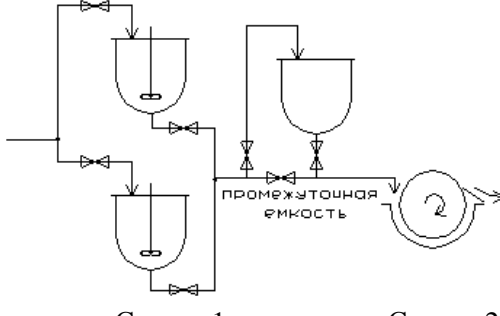
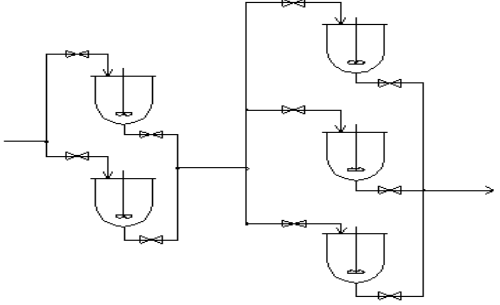
3.1 Лабораторная работа №1.

Построение диаграмм взаимодействия аппаратов ТС МХП

Задание: построить возможные диаграммы взаимодействия аппаратов стадий индивидуальных ТС, удовлетворяющие условиям:

- 1) число партий, включенное в диаграмму не должно быть меньше максимального числа аппаратов на стадии;
- 2) рассматриваются только реально реализуемые способы передачи массы между аппаратами;
- 3) аппараты одной из стадий должны работать без простоев;
- 4) изображаются только варианты диаграмм, использующие все аппараты предложенного фрагмента ТС.

Таблица 3.1 – Фрагменты ТС и длительности обработки партий продукта

№ п/п	Фрагмент ТС	№ варианта	Длительности обработки, ч.
1	 <p>Стадия 1 Стадия 2</p>	1.1	$t_1 = 4, t_2 = 7$
		1.2	$t_1 = 6, t_2 = 5$
		1.3	$t_1 = 7, t_2 = 5$
		1.4	$t_1 = 4, t_2 = 6$
		1.5	$t_1 = 5, t_2 = 4$
2	 <p>Стадия 1 Стадия 2</p>	2.1	$t_1 = 6; t_2 = 5, h_2 = 1$
		2.2	$t_1 = 7; t_2 = 4, h_2 = 1$
		2.3	$t_1 = 8; t_2 = 6, h_2 = 1$
		2.4	$t_1 = 5; t_2 = 3, h_2 = 1$
		2.5	$t_1 = 4; t_2 = 3, h_2 = 1$
3	 <p>Стадия 1 Стадия 2</p>	3.1	$t_1 = 7, t_2 = 11$
		3.2	$t_1 = 4, t_2 = 10$
		3.3	$t_1 = 5, t_2 = 9$
		3.4	$t_1 = 6, t_2 = 12$
		3.5	$t_1 = 3, t_2 = 8$

№ п/п	Фрагмент ТС	№ вар-та	Длительности обработки, ч.
4	<p>Стадия 1 Стадия 2</p>	4.1	$t_1 = 5, h_1 = 0.8; t_2 = 7$
		4.2	$t_1 = 7, h_1 = 0.85; t_2 = 9$
		4.3	$t_1 = 6, h_1 = 0.8; t_2 = 8$
		4.4	$t_1 = 4, h_1 = 0.75; t_2 = 6$
		4.5	$t_1 = 3, h_1 = 0.67; t_2 = 5$
5	<p>Стадия 1 Стадия 2</p>	5.1	$t_1 = 10, t_2 = 5$
		5.2	$t_1 = 11, t_2 = 6$
		5.3	$t_1 = 12, t_2 = 7$
		5.4	$t_1 = 9, t_2 = 4$
		5.5	$t_1 = 7, t_2 = 3$
6	<p>Стадия 1 Стадия 2</p>	6.1	$t_1 = 7; t_2 = 4, h_2 = 0.75$
		6.2	$t_1 = 8; t_2 = 5, h_2 = 0.8$
		6.3	$t_1 = 6; t_2 = 3, h_2 = 0.67$
		6.4	$t_1 = 9; t_2 = 6, h_2 = 0.85$
		6.5	$t_1 = 10; t_2 = 7, h_2 = 0.9$

Контрольные вопросы

1. Какие режимы обработки партий продукта на стадии ТС МХП возможны, если на стадии установлены два или более идентичных основных аппарата?
2. Почему на практике более популярен режим работы нескольких основных аппаратов стадии ТС МХП, предусматривающий прием и обработку каждым из аппаратов целых партий продукта со сдвигом по времени?
3. Укажите особенность работы фрагмента ТС МХП, на одной из стадий которого установлен емкостной аппарат периодического действия, а на соседней – фильтр или сушилка непрерывного действия.
4. В каких ситуациях между стадиями ТС МХП, оснащенными основными аппаратами периодического и непрерывного действия вводится дополнительная стадия, оснащенная буферной емкостью?
5. Почему взаимодействие двух стадий ТС МХП, оснащенных основными аппаратами непрерывного действия, как правило, осуществляется через буферную емкость?

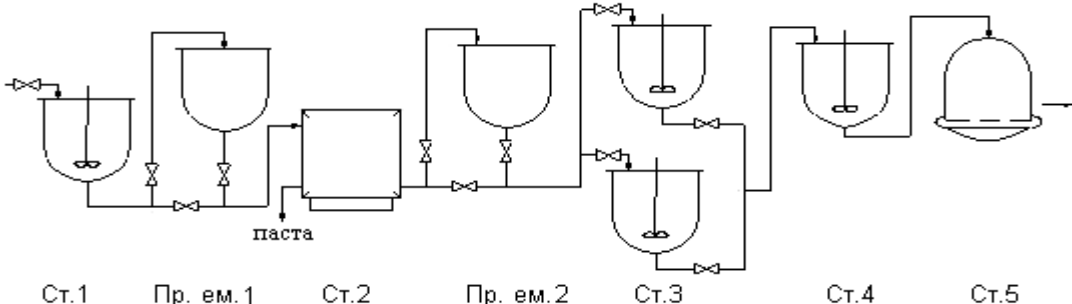
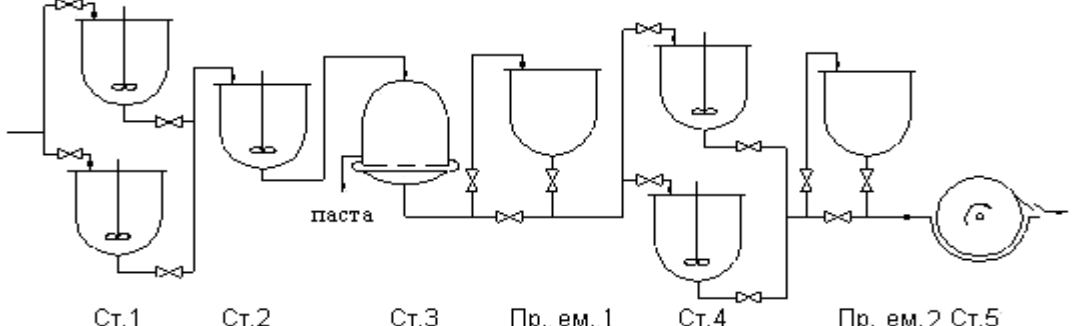
3.2 Лабораторная работа №2.

Выбор возможных режимов функционирования оборудования ТС МХП

Задание: 1. Выбрать два возможных режима функционирования оборудования ТС, при которых задействованы все аппараты всех стадий ТС и указанные вами промежуточные емкости. Определить соответствующие значения длительности цикла выпуска партий продукта ($T_{ц}$).

2. Для каждого режима: а) построить диаграмму Ганта; б) определить число партий продукта (b) и их размер (w), если объем выпуска продукта $Q=100$ т, продолжительность выпуска $T=4000$ ч; в) определить эффективность функционирования оборудования каждой стадии и ТС в целом.

Таблица 3.2 – ТС и длительности обработки партий продукта

№ п/п	Технологическая система					
1						
	№ вар-та	Длительности обработки, ч.				
	1.1	$t_1 = 2$	$t_2 = 4, h_2 = 0.75$	$t_3 = 8$	$t_4 = 5$	$t_5 = 4$
	1.2	$t_1 = 3$	$t_2 = 5, h_2 = 0.6$	$t_3 = 10$	$t_4 = 4$	$t_5 = 3$
	1.3	$t_1 = 2$	$t_2 = 5, h_2 = 0.8$	$t_3 = 9$	$t_4 = 3$	$t_5 = 4$
	1.4	$t_1 = 3$	$t_2 = 6, h_2 = 0.67$	$t_3 = 10$	$t_4 = 4$	$t_5 = 5$
1.5	$t_1 = 4$	$t_2 = 6, h_2 = 0.5$	$t_3 = 12$	$t_4 = 5$	$t_5 = 3$	
2						
	№ вар-та	Длительности обработки, ч.				
	2.1	$t_1 = 6$	$t_2 = 3$	$t_3 = 4, h_3 = 0.75$	$t_4 = 7$	$t_5 = 4, h_5 = 1$
	2.2	$t_1 = 5$	$t_2 = 2$	$t_3 = 4, h_3 = 0.5$	$t_4 = 6$	$t_5 = 3, h_5 = 1$
	2.3	$t_1 = 7$	$t_2 = 2$	$t_3 = 5, h_3 = 0.8$	$t_4 = 8$	$t_5 = 4, h_5 = 1$
	2.4	$t_1 = 8$	$t_2 = 3$	$t_3 = 5, h_3 = 0.6$	$t_4 = 7$	$t_5 = 3, h_5 = 1$
2.5	$t_1 = 7$	$t_2 = 2$	$t_3 = 3, h_3 = 0.67$	$t_4 = 6$	$t_5 = 5, h_5 = 1$	

3						
	№ вар-та	Длительности обработки, ч.				
	3.1	$t_1 = 6$	$t_2 = 3, h_2 = 0.67$	$t_3 = 3$	$t_4 = 7$	$t_5 = 4, h_5 = 0.75$
	3.2	$t_1 = 7$	$t_2 = 4, h_2 = 0.75$	$t_3 = 2$	$t_4 = 8$	$t_5 = 5, h_5 = 0.8$
	3.3	$t_1 = 8$	$t_2 = 5, h_2 = 0.6$	$t_3 = 3$	$t_4 = 7$	$t_5 = 6, h_5 = 0.5$
	3.4	$t_1 = 7$	$t_2 = 6, h_2 = 0.5$	$t_3 = 2$	$t_4 = 6$	$t_5 = 3, h_5 = 0.67$
3.5	$t_1 = 8$	$t_2 = 4, h_2 = 0.5$	$t_3 = 3$	$t_4 = 6$	$t_5 = 5, h_5 = 0.6$	
4						
	№ вар-та	Длительности обработки, ч.				
	4.1	$t_1 = 2$	$t_2 = 3, h_2 = 0.67$	$t_3 = 10$	$t_4 = 4$	$t_5 = 5, h_5 = 0.6$
	4.2	$t_1 = 2$	$t_2 = 4, h_2 = 0.5$	$t_3 = 7$	$t_4 = 3$	$t_5 = 4, h_5 = 0.75$
	4.3	$t_1 = 3$	$t_2 = 4, h_2 = 0.75$	$t_3 = 10$	$t_4 = 2$	$t_5 = 5, h_5 = 0.8$
	4.4	$t_1 = 3$	$t_2 = 5, h_2 = 0.6$	$t_3 = 8$	$t_4 = 2$	$t_5 = 4, h_5 = 0.5$
4.5	$t_1 = 2$	$t_2 = 5, h_2 = 0.8$	$t_3 = 7$	$t_4 = 3$	$t_5 = 3, h_5 = 0.67$	
5						
	№ вар-та	Длительности обработки, ч.				
	5.1	$t_1 = 7$	$t_2 = 3, h_2 = 0.67$	$t_3 = 3$	$t_4 = 6$	$t_5 = 4$
	5.2	$t_1 = 6$	$t_2 = 4, h_2 = 0.75$	$t_3 = 2$	$t_4 = 7$	$t_5 = 3$
	5.3	$t_1 = 7$	$t_2 = 5, h_2 = 0.6$	$t_3 = 3$	$t_4 = 8$	$t_5 = 4$
	5.4	$t_1 = 8$	$t_2 = 5, h_2 = 0.8$	$t_3 = 2$	$t_4 = 7$	$t_5 = 3$
5.5	$t_1 = 6$	$t_2 = 4, h_2 = 0.5$	$t_3 = 3$	$t_4 = 8$	$t_5 = 2$	

6						
	№ вар-та	Длительности обработки, ч.				
	6.1	$t_1 = 5$	$t_2 = 10$	$t_3 = 3, h_3 = 0.67$	$t_4 = 2$	$t_5 = 4, h_5 = 1$
	6.2	$t_1 = 3$	$t_2 = 7$	$t_3 = 4, h_3 = 0.5$	$t_4 = 1$	$t_5 = 3, h_5 = 1$
	6.3	$t_1 = 4$	$t_2 = 8$	$t_3 = 5, h_3 = 0.6$	$t_4 = 2$	$t_5 = 2, h_5 = 1$
	6.4	$t_1 = 5$	$t_2 = 9$	$t_3 = 6, h_3 = 0.5$	$t_4 = 2$	$t_5 = 3, h_5 = 1$
6.5	$t_1 = 3$	$t_2 = 6$	$t_3 = 5, h_3 = 0.4$	$t_4 = 1$	$t_5 = 2, h_5 = 1$	

Контрольные вопросы

1. В каких случаях рабочий цикл ТС МХП следует организовать без перекрытия технологических циклов переработки партий продукта на стадиях системы?
2. Какая аппаратная стадия ТС МХП называется лимитирующей по времени?
3. Как выглядит на диаграмме Гантта процесс переработки партий продукта на стадии ТС МХП, лимитирующей по времени?
4. Как определяют число партий продукта, выпускаемых ТС МХП и их размер?
5. Почему на практике обычно устанавливают на стадиях ТС МХП минимум основных аппаратов, который позволяет выпустить требуемое количество продукта в установленный срок?

3.3 Лабораторная работа № 3.

Расчет оборудования индивидуальной ТС МХП

Задание: рассчитать оборудование индивидуальной ТС (найти любой работоспособный вариант ее АО), построить диаграмму Гантта для периода выпуска двух партий продукта, обрабатываемых одна за другой.

Типоразмеры стандартных аппаратов:

Емкостные: 0.1; 0.25; 0.4; 0.63; 1; 1.6; 2.5; 3.2; 5; 6.3; 10; 16; 25; 32; 50 м³.

Ленточные вакуум-фильтры (ЛВФ): 1.6; 2.5; 3.2; 4; 10 м².

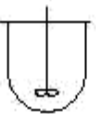
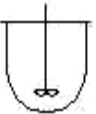
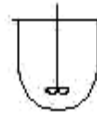

Друк-фильтры (ДФ): 0.2; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6 м².

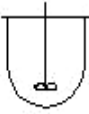
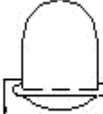
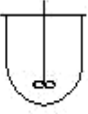

Барабанные вакуум-фильтры (БВФ): 1; 3; 5; 10; 20; 40 м².





Фильтр-прессы камерные (ФПК): 40; 50; 63; 80; 100; 112; 140 м².

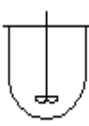
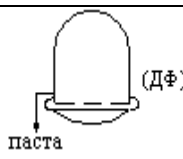
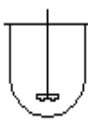
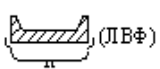
Фильтр-прессы рамные (ФПР): 12; 16; 24; 36; 54 м².

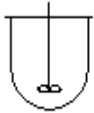
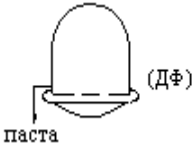
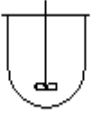
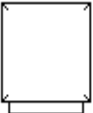
Таблица 3.3 – Данные для расчета оборудования индивидуальной ТС МХП




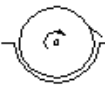
№ п/п	Типы основных аппаратов стадий ТС				
	 Стадия 1	 Стадия 2	 Стадия 3	 (ПВФ) Стадия 4	
№ вар-та	Характеристики процессов, реализуемых на стадиях ТС и ее производительность				
1	1.1	$g_1 = 1.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 4 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.3$ $\varphi_{*1} = 0.75$	$g_2 = 2.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_2 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*2} = 0.3$ $\varphi_{*2} = 0.85$	$g_3 = 3.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.3$ $\varphi_{*3} = 0.8$	$g_4 = 1200 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 16 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.8$
	Объем выпуска продукта $Q = 50 \text{ т}$, период выпуска $T = 400 \text{ ч}$.				
	1.2	$g_1 = 4.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.4$ $\varphi_{*1} = 0.7$	$g_2 = 6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_2 = 6 \text{ ч}$ $\varphi_{*2} = 0.25$ $\varphi_{*2} = 0.75$	$g_3 = 7.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.3$ $\varphi_{*3} = 0.8$	$g_4 = 2000 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 10 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.75$
	Объем выпуска продукта $Q = 70 \text{ т}$, период выпуска $T = 1500 \text{ ч}$.				
	1.3	$g_1 = 8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.3$ $\varphi_{*1} = 0.8$	$g_2 = 9 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_2 = 4 \text{ ч}$ $\varphi_{*2} = 0.4$ $\varphi_{*2} = 0.7$	$g_3 = 12 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 5 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.25$ $\varphi_{*3} = 0.75$	$g_4 = 2500 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 28 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.9$
	Объем выпуска продукта $Q = 60 \text{ т}$, период выпуска $T = 550 \text{ ч}$.				
1.4	$g_1 = 3.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 5 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.25$ $\varphi_{*1} = 0.85$	$g_2 = 5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_2 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*2} = 0.3$ $\varphi_{*2} = 0.8$	$g_3 = 6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 4 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.35$ $\varphi_{*3} = 0.8$	$g_4 = 1500 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 25 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.7$	
Объем выпуска продукта $Q = 100 \text{ т}$, период выпуска $T = 600 \text{ ч}$.					
1.5	$g_1 = 2.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 6 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.35$ $\varphi_{*1} = 0.8$	$g_2 = 4 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_2 = 4 \text{ ч}$ $\varphi_{*2} = 0.25$ $\varphi_{*2} = 0.85$	$g_3 = 5.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.4$ $\varphi_{*3} = 0.7$	$g_4 = 1600 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 18 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.85$	
Объем выпуска продукта $Q = 80 \text{ т}$, период выпуска $T = 660 \text{ ч}$.					

№ п/п	Типы основных аппаратов стадий ТС			
	 Стадия 1	 Стадия 2	 Стадия 3	 Стадия 4
№ вар-та	Характеристики процессов, реализуемых на стадиях ТС и ее производительность			
2.1	$g_1 = 4 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.3$ $\varphi_1 = 0.8$	$g_2 = 2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_2 = 0.11 \text{ м}^3/\text{М}^2\text{ч}$ $h_2 = 0.8$	$g_3 = 5.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.35$ $\varphi_3 = 0.75$	$g_4 = 1500 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 7.5 \text{ кг/М}^2\text{ч}$ $h_4 = 1$
	Объем выпуска продукта $Q = 75 \text{ т}$, период выпуска $T = 1200 \text{ ч}$.			
2.2	$g_1 = 2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 4 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.25$ $\varphi_1 = 0.85$	$g_2 = 1.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_2 = 0.08 \text{ м}^3/\text{М}^2\text{ч}$ $h_2 = 0.85$	$g_3 = 3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.3$ $\varphi_3 = 0.8$	$g_4 = 1200 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 4 \text{ кг/М}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.95$
2	Объем выпуска продукта $Q = 40 \text{ т}$, период выпуска $T = 1000 \text{ ч}$.			
2.3	$g_1 = 5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 5 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.4$ $\varphi_1 = 0.7$	$g_2 = 2.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_2 = 0.12 \text{ м}^3/\text{М}^2\text{ч}$ $h_2 = 0.75$	$g_3 = 6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.25$ $\varphi_3 = 0.85$	$g_4 = 2000 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 8 \text{ кг/М}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.9$
	Объем выпуска продукта $Q = 45 \text{ т}$, период выпуска $T = 900 \text{ ч}$.			
2.4	$g_1 = 6.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.35$ $\varphi_1 = 0.75$	$g_2 = 3.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_2 = 0.15 \text{ м}^3/\text{М}^2\text{ч}$ $h_2 = 0.7$	$g_3 = 8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.4$ $\varphi_3 = 0.7$	$g_4 = 2500 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 5 \text{ кг/М}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.8$
	Объем выпуска продукта $Q = 55 \text{ т}$, период выпуска $T = 1100 \text{ ч}$.			
2.5	$g_1 = 3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 6 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.3$ $\varphi_1 = 0.75$	$g_2 = 1.75 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_2 = 0.1 \text{ м}^3/\text{М}^2\text{ч}$ $h_2 = 0.9$	$g_3 = 5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.4$ $\varphi_3 = 0.75$	$g_4 = 1400 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 6 \text{ кг/М}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.75$
	Объем выпуска продукта $Q = 65 \text{ т}$, период выпуска $T = 950 \text{ ч}$.			

№ п/п	Типы основных аппаратов стадий ТС				
	 Стадия 1	 Стадия 2	 Стадия 3	 (ФПК) Стадия 4	
№ вар-та	Характеристики процессов, реализуемых на стадиях ТС и ее производительность				
3	3.1	$g_1 = 6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.4$ $\varphi_{*1} = 0.75$	$g_2 = 8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_2 = 4 \text{ ч}$ $\varphi_{*2} = 0.3$ $\varphi_{*2} = 0.8$	$g_3 = 9.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.35$ $\varphi_{*3} = 0.7$	$v_4 = 2.9 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_4 = 1750 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 4 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $\delta_4 = 20 \text{ мм}$ $h_4 = 0.7$
	Объем выпуска продукта $Q = 100 \text{ т}$, период выпуска $T = 450 \text{ ч}$.				
	3.2	$g_1 = 4 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 4 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.3$ $\varphi_{*1} = 0.8$	$g_2 = 5.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_2 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*2} = 0.35$ $\varphi_{*2} = 0.75$	$g_3 = 8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.4$ $\varphi_{*3} = 0.7$	$v_4 = 3.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_4 = 2500 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 6 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $\delta_4 = 25 \text{ мм}$ $h_4 = 0.8$
	Объем выпуска продукта $Q = 90 \text{ т}$, период выпуска $T = 550 \text{ ч}$.				
	3.3	$g_1 = 5.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.25$ $\varphi_{*1} = 0.85$	$g_2 = 7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_2 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*2} = 0.4$ $\varphi_{*2} = 0.7$	$g_3 = 8.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 4 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.3$ $\varphi_{*3} = 0.8$	$v_4 = 2.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_4 = 1250 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 3 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $\delta_4 = 20 \text{ мм}$ $h_4 = 0.67$
	Объем выпуска продукта $Q = 85 \text{ т}$, период выпуска $T = 500 \text{ ч}$.				
3.4	$g_1 = 4.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 5 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.35$ $\varphi_{*1} = 0.75$	$g_2 = 6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_2 = 4 \text{ ч}$ $\varphi_{*2} = 0.25$ $\varphi_{*2} = 0.85$	$g_3 = 7.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.4$ $\varphi_{*3} = 0.75$	$v_4 = 2.7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_4 = 1800 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 4.5 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $\delta_4 = 20 \text{ мм}$ $h_4 = 0.75$	
Объем выпуска продукта $Q = 95 \text{ т}$, период выпуска $T = 550 \text{ ч}$.					
3.5	$g_1 = 6.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.4$ $\varphi_{*1} = 0.7$	$g_2 = 8.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_2 = 5 \text{ ч}$ $\varphi_{*2} = 0.3$ $\varphi_{*2} = 0.85$	$g_3 = 10 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.25$ $\varphi_{*3} = 0.85$	$v_4 = 3.75 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_4 = 2300 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 5 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $\delta_4 = 25 \text{ мм}$ $h_4 = 0.85$	
Объем выпуска продукта $Q = 105 \text{ т}$, период выпуска $T = 600 \text{ ч}$.					

№ п/п	Типы основных аппаратов стадий ТС				
					
	Стадия 1	Стадия 2	Стадия 3	Стадия 4	
№ вар-та	Характеристики процессов, реализуемых на стадиях ТС и ее производительность				
4	4.1	$g_1 = 5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 5 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.25$ $\varphi_1 = 0.85$	$g_2 = 1.75 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_2 = 0.09 \text{ м}^3/\text{М}^2\text{ч}$ $h_2 = 0.85$	$g_3 = 6.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.3$ $\varphi_3 = 0.8$	$g_4 = 1600 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 15 \text{ кг/М}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.75$
	Объем выпуска продукта $Q = 55 \text{ т}$, период выпуска $T = 1000 \text{ ч}$.				
	4.2	$g_1 = 7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 4 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.3$ $\varphi_1 = 0.8$	$g_2 = 3.7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_2 = 0.16 \text{ м}^3/\text{М}^2\text{ч}$ $h_2 = 0.7$	$g_3 = 8.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.4$ $\varphi_3 = 0.75$	$g_4 = 2750 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 17 \text{ кг/М}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.67$
	Объем выпуска продукта $Q = 70 \text{ т}$, период выпуска $T = 1400 \text{ ч}$.				
	4.3	$g_1 = 1.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 6 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.4$ $\varphi_1 = 0.7$	$g_2 = 1.2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_2 = 0.06 \text{ м}^3/\text{М}^2\text{ч}$ $h_2 = 0.9$	$g_3 = 2.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 1 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.25$ $\varphi_3 = 0.85$	$g_4 = 1250 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 9.5 \text{ кг/М}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.8$
	Объем выпуска продукта $Q = 45 \text{ т}$, период выпуска $T = 750 \text{ ч}$.				
4.4	$g_1 = 3.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 7 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.35$ $\varphi_1 = 0.75$	$g_2 = 1.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_2 = 0.11 \text{ м}^3/\text{М}^2\text{ч}$ $h_2 = 0.67$	$g_3 = 5.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.4$ $\varphi_3 = 0.7$	$g_4 = 1850 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 18 \text{ кг/М}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.7$	
Объем выпуска продукта $Q = 60 \text{ т}$, период выпуска $T = 900 \text{ ч}$.					
4.5	$g_1 = 6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.3$ $\varphi_1 = 0.75$	$g_2 = 2.75 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_2 = 0.12 \text{ м}^3/\text{М}^2\text{ч}$ $h_2 = 0.8$	$g_3 = 7.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 1 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.35$ $\varphi_3 = 0.75$	$g_4 = 2000 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 15 \text{ кг/М}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.85$	
Объем выпуска продукта $Q = 50 \text{ т}$, период выпуска $T = 1200 \text{ ч}$.					

№ п/п	Типы основных аппаратов стадий ТС			
				
	Стадия 1	Стадия 2	Стадия 3	Стадия 4
№ вар-та	Характеристики процессов, реализуемых на стадиях ТС и ее производительность			
5.1	$g_1 = 4 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 4 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.3$ $\varphi_1 = 0.8$	$g_2 = 2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_2 = 0.12 \text{ м}^3/\text{М}^2\text{ч}$ $h_2 = 0.67$	$g_3 = 6.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.25$ $\varphi_3 = 0.85$	$v_4 = 1.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_4 = 1300 \text{ кг}/\text{Т}$ $a_4 = 3.3 \text{ кг}/\text{М}^2\text{ч}$ $\delta_4 = 15 \text{ мм}$ $h_4 = 0.7$
	Объем выпуска продукта $Q = 45 \text{ т}$, период выпуска $T = 650 \text{ ч}$.			
5.2	$g_1 = 5.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 5 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.4$ $\varphi_1 = 0.75$	$g_2 = 1.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_2 = 0.1 \text{ м}^3/\text{М}^2\text{ч}$ $h_2 = 0.7$	$g_3 = 7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.3$ $\varphi_3 = 0.8$	$v_4 = 2.2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_4 = 1700 \text{ кг}/\text{Т}$ $a_4 = 4.5 \text{ кг}/\text{М}^2\text{ч}$ $\delta_4 = 20 \text{ мм}$ $h_4 = 0.67$
	Объем выпуска продукта $Q = 50 \text{ т}$, период выпуска $T = 700 \text{ ч}$.			
5.3	$g_1 = 6.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 6 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.25$ $\varphi_1 = 0.85$	$g_2 = 3.2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_2 = 0.15 \text{ м}^3/\text{М}^2\text{ч}$ $h_2 = 0.75$	$g_3 = 8.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 1 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.4$ $\varphi_3 = 0.7$	$v_4 = 2.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_4 = 2000 \text{ кг}/\text{Т}$ $a_4 = 5 \text{ кг}/\text{М}^2\text{ч}$ $\delta_4 = 20 \text{ мм}$ $h_4 = 0.8$
	Объем выпуска продукта $Q = 60 \text{ т}$, период выпуска $T = 850 \text{ ч}$.			
5.4	$g_1 = 2.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.4$ $\varphi_1 = 0.7$	$g_2 = 1.4 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_2 = 0.085 \text{ м}^3/\text{М}^2\text{ч}$ $h_2 = 0.8$	$g_3 = 4 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 1 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.35$ $\varphi_3 = 0.75$	$v_4 = 1.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_4 = 1200 \text{ кг}/\text{Т}$ $a_4 = 3 \text{ кг}/\text{М}^2\text{ч}$ $\delta_4 = 15 \text{ мм}$ $h_4 = 0.75$
	Объем выпуска продукта $Q = 55 \text{ т}$, период выпуска $T = 750 \text{ ч}$.			
5.5	$g_1 = 3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 7 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.35$ $\varphi_1 = 0.75$	$g_2 = 1.6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_2 = 0.11 \text{ м}^3/\text{М}^2\text{ч}$ $h_2 = 0.9$	$g_3 = 5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.3$ $\varphi_3 = 0.75$	$v_4 = 2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_4 = 1500 \text{ кг}/\text{Т}$ $a_4 = 6 \text{ кг}/\text{М}^2\text{ч}$ $\delta_4 = 20 \text{ мм}$ $h_4 = 0.6$
	Объем выпуска продукта $Q = 65 \text{ т}$, период выпуска $T = 900 \text{ ч}$.			

№ п/п	Типы основных аппаратов стадий ТС				
	 Стадия 1	 Стадия 2	 Стадия 3	 (БВФ) Стадия 4	
№ вар-та	Характеристики процессов, реализуемых на стадиях ТС и ее производительность				
6	6.1	$g_1 = 7.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 5 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.3$ $\varphi_1 = 0.75$	$g_2 = 9.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_2 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*2} = 0.3$ $\varphi_2 = 0.8$	$g_3 = 11.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.3$ $\varphi_3 = 0.85$	$g_4 = 3000 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 7.5 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $h_4 = 1$
	Объем выпуска продукта $Q = 40 \text{ т}$, период выпуска $T = 700 \text{ ч}$.				
	6.2	$g_1 = 2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 4 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.25$ $\varphi_1 = 0.85$	$g_2 = 3.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_2 = 6 \text{ ч}$ $\varphi_{*2} = 0.4$ $\varphi_2 = 0.7$	$g_3 = 5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.3$ $\varphi_3 = 0.8$	$g_4 = 1400 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 6.5 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.95$
	Объем выпуска продукта $Q = 70 \text{ т}$, период выпуска $T = 600 \text{ ч}$.				
	6.3	$g_1 = 4 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.4$ $\varphi_1 = 0.7$	$g_2 = 6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_2 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*2} = 0.25$ $\varphi_2 = 0.75$	$g_3 = 7.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 4 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.35$ $\varphi_3 = 0.75$	$g_4 = 1800 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 10 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.9$
	Объем выпуска продукта $Q = 110 \text{ т}$, период выпуска $T = 650 \text{ ч}$.				
6.4	$g_1 = 1.2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 2 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.35$ $\varphi_1 = 0.8$	$g_2 = 2.3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_2 = 6 \text{ ч}$ $\varphi_{*2} = 0.25$ $\varphi_2 = 0.85$	$g_3 = 3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 5 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.4$ $\varphi_3 = 0.7$	$g_4 = 1100 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 5.5 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $h_4 = 0.95$	
Объем выпуска продукта $Q = 30 \text{ т}$, период выпуска $T = 500 \text{ ч}$.					
6.5	$g_1 = 5.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_1 = 6 \text{ ч}$ $\varphi_{*1} = 0.4$ $\varphi_1 = 0.7$	$g_2 = 7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_2 = 4 \text{ ч}$ $\varphi_{*2} = 0.35$ $\varphi_2 = 0.8$	$g_3 = 8.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_3 = 3 \text{ ч}$ $\varphi_{*3} = 0.25$ $\varphi_3 = 0.85$	$g_4 = 2200 \text{ кг/Т}$ $a_4 = 7 \text{ кг/м}^2\text{ч}$ $h_4 = 1$	
Объем выпуска продукта $Q = 35 \text{ т}$, период выпуска $T = 750 \text{ ч}$.					

Контрольные вопросы

1. Какие варианты режима функционирования основных аппаратов стадии j ТС МХП, если число аппаратов $n_j > 1$?
2. Для каких стадий ТС МХП значения длительностей обработки партий продуктов можно рассчитать предварительно, до расчета оборудования ТС?
3. Для каких основных аппаратов стадий ТС МХП необходимо учитывать ограничения на степень заполнения рабочего объема?
4. Для каких основных аппаратов стадий ТС МХП задаются два основных размера: рабочий объем и рабочая поверхность?
5. Как следует поступить, если максимальный допустимый стандартный размер аппарата окажется недостаточным для обработки партий продукта?

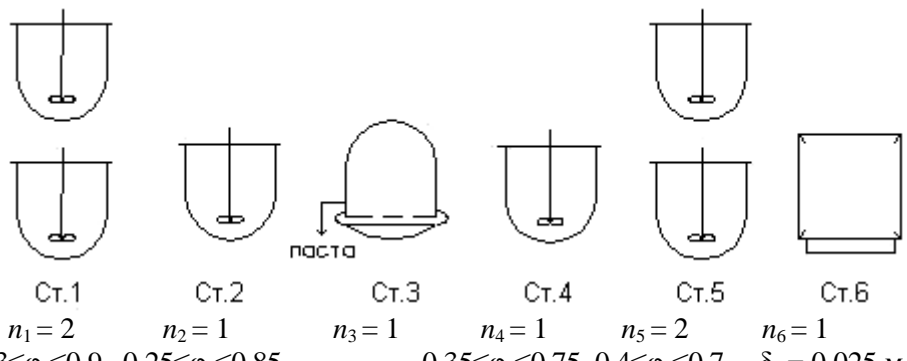
3.4 Лабораторная работа № 4. Расчет оборудования ТС действующего МХП при организации выпуска новых продуктов

Задание: 1. Разместить процессы синтеза двух продуктов на АО ТС действующего МХП при заданных условиях;

2. Построить диаграммы Ганта процессов обработки двух партий каждого продукта и определить эффективность функционирования оборудования ТС.

Таблица 3.4 – Данные для расчета оборудования ТС действующего МХП

№ п/п	Аппаратурное оформление стадий ТС					
	$n_1 = 1$		$n_2 = 2$		$n_3 = 1$	
	$0.25 \leq \varphi_1 \leq 0.85$		$0.3 \leq \varphi_2 \leq 0.8$		$0.35 \leq \varphi_3 \leq 0.75$	
			$\delta_4 = 0.02 \text{ м}$		$0.4 \leq \varphi_5 \leq 0.7$	
					$h_6 = 0.9$	
№ вар-та	Размеры аппаратов, характеристики процессов, реализуемых на стадиях ТС и ее производительность					
1.1	$V_1 = 2.5 \text{ м}^3$	$V_2 = 1.6 \text{ м}^3$	$V_3 = 5 \text{ м}^3$	$V_4 = 80 \text{ м}^2$	$V_5 = 3.2 \text{ м}^3$	$V_6 = 20 \text{ м}^3$
	$g_{11} = 3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 3 \text{ ч.}$	-	$g_{13} = 4 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{13} = 2 \text{ ч.}$	$v_{14} = 1.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{14} = 1500 \text{ кг/Т}$ $a_{14} = 5 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{14} = 0.8$	$g_{15} = 3.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 5 \text{ ч.}$	$g_{16} = 1150 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 8 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
	-	$g_{22} = 2.6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{22} = 7 \text{ ч.}$	$g_{23} = 3.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{23} = 3 \text{ ч.}$	$v_{24} = 2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{24} = 1700 \text{ кг/Т}$ $a_{24} = 4 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{24} = 0.7$	$g_{25} = 3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 4 \text{ ч.}$	$g_{26} = 1200 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 10 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
	Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 40 \text{ т}$, $Q_2 = 75 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 1100 \text{ ч.}$					
1.2	$V_1 = 3.2 \text{ м}^3$	$V_2 = 2.5 \text{ м}^3$	$V_3 = 6.3 \text{ м}^3$	$V_4 = 100 \text{ м}^2$	$V_5 = 5 \text{ м}^3$	$V_6 = 20 \text{ м}^3$
	$g_{11} = 4 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 2 \text{ ч.}$	-	$g_{13} = 5.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{13} = 4 \text{ ч.}$	$v_{14} = 2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{14} = 1500 \text{ кг/Т}$ $a_{14} = 5 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{14} = 0.67$	$g_{15} = 4.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 5 \text{ ч.}$	$g_{16} = 1120 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 5.5 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
	-	$g_{22} = 3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{22} = 10 \text{ ч.}$	$g_{23} = 6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{23} = 2 \text{ ч.}$	$v_{24} = 2.4 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{24} = 1800 \text{ кг/Т}$ $a_{24} = 6 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{24} = 0.8$	$g_{25} = 5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 3 \text{ ч.}$	$g_{26} = 1180 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 8 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
	Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 35 \text{ т}$, $Q_2 = 60 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 850 \text{ ч.}$					
1.3	$V_1 = 5 \text{ м}^3$	$V_2 = 2.5 \text{ м}^3$	$V_3 = 10 \text{ м}^3$	$V_4 = 112 \text{ м}^2$	$V_5 = 6.3 \text{ м}^3$	$V_6 = 20 \text{ м}^3$
	$g_{11} = 4.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 3 \text{ ч.}$	-	$g_{13} = 6.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{13} = 3 \text{ ч.}$	$v_{14} = 2.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{14} = 1700 \text{ кг/Т}$ $a_{14} = 8.5 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{14} = 0.75$	$g_{15} = 5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 4 \text{ ч.}$	$g_{16} = 1200 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 6 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
	-	$g_{22} = 3.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{22} = 6 \text{ ч.}$	$g_{23} = 7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{23} = 2 \text{ ч.}$	$v_{24} = 3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{24} = 2000 \text{ кг/Т}$ $a_{24} = 5 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{24} = 0.67$	$g_{25} = 6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 5 \text{ ч.}$	$g_{26} = 1150 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 7.5 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
	Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 50 \text{ т}$, $Q_2 = 80 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 1200 \text{ ч.}$					

№ п/п	Аппаратурное оформление стадий ТС						
							
№ вар-та	Размеры аппаратов, характеристики процессов, реализуемых на стадиях ТС и ее производительность						
2	2.1	$V_1 = 6.3 \text{ м}^3$	$V_2 = 16 \text{ м}^3$	$V_3 = 1.6 \text{ м}^2$	$V_4 = 25 \text{ м}^3$	$V_5 = 32 \text{ м}^3$	$V_6 = 140 \text{ м}^2$
		$g_{11} = 5.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 9 \text{ ч.}$	-	$g_{13} = 1.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{13} = 0.22 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{13} = 0.6$	$g_{14} = 18 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{14} = 3 \text{ ч.}$	$g_{15} = 3.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 5 \text{ ч.}$	$v_{16} = 3.2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{16} = 2500 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 5 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{16} = 0.75$
		-	$g_{22} = 13 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{22} = 3 \text{ ч.}$	$g_{23} = 2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{23} = 0.2 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{23} = 0.7$	$g_{24} = 19.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{23} = 2 \text{ ч.}$	$g_{25} = 3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 4 \text{ ч.}$	$v_{26} = 3.3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{26} = 2400 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 4 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{26} = 0.8$
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 65 \text{ т}$, $Q_2 = 40 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 1000 \text{ ч.}$							
2	2.2	$V_1 = 3.2 \text{ м}^3$	$V_2 = 6.3 \text{ м}^3$	$V_3 = 1.6 \text{ м}^2$	$V_4 = 10 \text{ м}^3$	$V_5 = 16 \text{ м}^3$	$V_6 = 100 \text{ м}^2$
		$g_{11} = 5.7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 6 \text{ ч.}$	-	$g_{13} = 1.7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{13} = 0.15 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{13} = 0.75$	$g_{14} = 7.2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{14} = 2 \text{ ч.}$	$g_{15} = 12.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 4 \text{ ч.}$	$v_{16} = 2.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{16} = 2100 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 6 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{16} = 0.75$
		-	$g_{22} = 5.9 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{22} = 5 \text{ ч.}$	$g_{23} = 1.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{23} = 0.18 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{23} = 0.8$	$g_{24} = 8.1 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{23} = 2 \text{ ч.}$	$g_{25} = 13.2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 3 \text{ ч.}$	$v_{26} = 2.3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{26} = 1900 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 5 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{26} = 0.85$
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 40 \text{ т}$, $Q_2 = 35 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 680 \text{ ч.}$							
2	2.3	$V_1 = 5 \text{ м}^3$	$V_2 = 10 \text{ м}^3$	$V_3 = 1.6 \text{ м}^2$	$V_4 = 16 \text{ м}^3$	$V_5 = 25 \text{ м}^3$	$V_6 = 112 \text{ м}^2$
		$g_{11} = 4.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 10 \text{ ч.}$	-	$g_{13} = 2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{13} = 0.18 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{13} = 0.75$	$g_{14} = 12.7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{14} = 4 \text{ ч.}$	$g_{15} = 19.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 7 \text{ ч.}$	$v_{16} = 2.9 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{16} = 2400 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 3.5 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{16} = 0.8$
		-	$g_{22} = 5.9 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{22} = 5 \text{ ч.}$	$g_{23} = 1.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{23} = 0.215 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{23} = 0.8$	$g_{24} = 13.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{23} = 4 \text{ ч.}$	$g_{25} = 21 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 8 \text{ ч.}$	$v_{26} = 3.1 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{26} = 2600 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 3 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{26} = 0.85$
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 60 \text{ т}$, $Q_2 = 75 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 1500 \text{ ч.}$							

№ п/п	Аппаратурное оформление стадий ТС					
	Ст.1 $n_1 = 1$ $0.25 \leq \varphi_1 \leq 0.85$	Ст.2 $n_2 = 2$ $0.3 \leq \varphi_2 \leq 0.8$	Ст.3 $n_3 = 1$	Ст.4 $n_4 = 1$	Ст.5 $n_5 = 2$ $0.4 \leq \varphi_5 \leq 0.7$	Ст.6 $n_6 = 1$ $h_6 = 0.95$
№ вар-та	Размеры аппаратов, характеристики процессов, реализуемых на стадиях ТС и ее производительность					
3.1	$V_1 = 2.5 \text{ м}^3$	$V_2 = 1 \text{ м}^3$	$V_3 = 1.6 \text{ м}^2$	$V_4 = 3.2 \text{ м}^3$	$V_5 = 5 \text{ м}^3$	$V_6 = 20 \text{ м}^2$
	$g_{11} = 2.9 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 3 \text{ ч.}$	-	$g_{13} = 2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{13} = 0.15 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{13} = 0.75$	$g_{14} = 2.9 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{14} = 2 \text{ ч.}$	$g_{15} = 4.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 5 \text{ ч.}$	$g_{16} = 1200 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 10 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$
	-	$g_{22} = 2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{22} = 7 \text{ ч.}$	$g_{23} = 1.6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{23} = 0.17 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{23} = 0.8$	$g_{24} = 2.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{24} = 3 \text{ ч.}$	$g_{25} = 5.1 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 6 \text{ ч.}$	$g_{26} = 2500 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 12 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 60 \text{ т}$, $Q_2 = 35 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 1100 \text{ ч.}$						
3.2	$V_1 = 6.3 \text{ м}^3$	$V_2 = 3.2 \text{ м}^3$	$V_3 = 1.6 \text{ м}^2$	$V_4 = 10 \text{ м}^3$	$V_5 = 16 \text{ м}^3$	$V_6 = 40 \text{ м}^2$
	$g_{11} = 7.3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 5 \text{ ч.}$	-	$g_{13} = 2.1 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{13} = 0.155 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{13} = 0.83$	$g_{14} = 9.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{14} = 2 \text{ ч.}$	$g_{15} = 14.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 6 \text{ ч.}$	$g_{16} = 1700 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 9 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$
	-	$g_{22} = 4 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{22} = 9 \text{ ч.}$	$g_{23} = 1.7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{23} = 0.195 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{23} = 0.75$	$g_{24} = 8.3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{24} = 2 \text{ ч.}$	$g_{25} = 15.3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 6 \text{ ч.}$	$g_{26} = 1800 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 7 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 50 \text{ т}$, $Q_2 = 40 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 750 \text{ ч.}$						
3.3	$V_1 = 10 \text{ м}^3$	$V_2 = 5 \text{ м}^3$	$V_3 = 1.6 \text{ м}^2$	$V_4 = 16 \text{ м}^3$	$V_5 = 25 \text{ м}^3$	$V_6 = 40 \text{ м}^2$
	$g_{11} = 11.3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 5 \text{ ч.}$	-	$g_{13} = 2.2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{13} = 0.177 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{13} = 0.8$	$g_{14} = 14.1 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{14} = 1 \text{ ч.}$	$g_{15} = 24.2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 7 \text{ ч.}$	$g_{16} = 1600 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 8 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$
	-	$g_{22} = 6.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{22} = 10 \text{ ч.}$	$g_{23} = 1.9 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{23} = 0.185 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{23} = 0.75$	$g_{24} = 13.2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{24} = 2 \text{ ч.}$	$g_{25} = 25.3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 6 \text{ ч.}$	$g_{26} = 2100 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 9 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 70 \text{ т}$, $Q_2 = 45 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 1000 \text{ ч.}$						
3.4	$V_1 = 3.2 \text{ м}^3$	$V_2 = 1.6 \text{ м}^3$	$V_3 = 1.6 \text{ м}^2$	$V_4 = 5 \text{ м}^3$	$V_5 = 6.3 \text{ м}^3$	$V_6 = 20 \text{ м}^2$
	$g_{11} = 3.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 6 \text{ ч.}$	-	$g_{13} = 1.9 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{13} = 0.14 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{13} = 0.83$	$g_{14} = 4.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{14} = 3 \text{ ч.}$	$g_{15} = 5.9 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 10 \text{ ч.}$	$g_{16} = 1300 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 8 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$
	-	$g_{22} = 3.1 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{22} = 8 \text{ ч.}$	$g_{23} = 2.1 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{23} = 0.19 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{23} = 0.8$	$g_{24} = 4.1 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{24} = 2 \text{ ч.}$	$g_{25} = 6.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 8 \text{ ч.}$	$g_{26} = 1500 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 13 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 35 \text{ т}$, $Q_2 = 55 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 950 \text{ ч.}$						

№ п/п	Аппаратурное оформление стадий ТС					
	Ст.1 $n_1 = 2$ $0.25 \leq \varphi_1 \leq 0.85$	Ст.2 $n_2 = 1$ $0.3 \leq \varphi_2 \leq 0.8$	Ст.3 $n_3 = 1$ $0.35 \leq \varphi_4 \leq 0.75$	Ст.4 $n_4 = 1$ $0.4 \leq \varphi_5 \leq 0.7$	Ст.5 $n_5 = 2$	Ст.6 $n_6 = 1$ $h_6 = 0.9$
№ вар-та	Размеры аппаратов, характеристики процессов, реализуемых на стадиях ТС и ее производительность					
4.1	$V_1 = 1 \text{ м}^3$	$V_2 = 2.5 \text{ м}^3$	$V_3 = 1.2 \text{ м}^2$	$V_4 = 3.2 \text{ м}^3$	$V_5 = 5 \text{ м}^3$	$V_6 = 20 \text{ м}^3$
	$g_{11} = 1.3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 10 \text{ ч.}$	-	$g_{13} = 1.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{13} = 0.185 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{13} = 0.75$	$g_{14} = 3.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{14} = 2 \text{ ч.}$	$g_{15} = 5.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 6 \text{ ч.}$	$g_{16} = 1070 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 5.5 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
	-	$g_{22} = 2.3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{22} = 4 \text{ ч.}$	$g_{23} = 1.7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{23} = 0.19 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{23} = 0.67$	$g_{24} = 2.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{24} = 2 \text{ ч.}$	$g_{25} = 4.7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 5 \text{ ч.}$	$g_{26} = 1030 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 8 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 40 \text{ т}$, $Q_2 = 35 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 800 \text{ ч.}$						
4.2	$V_1 = 1.6 \text{ м}^3$	$V_2 = 3.2 \text{ м}^3$	$V_3 = 1.6 \text{ м}^2$	$V_4 = 2.5 \text{ м}^3$	$V_5 = 5 \text{ м}^3$	$V_6 = 20 \text{ м}^3$
	$g_{11} = 3.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 6 \text{ ч.}$	-	$g_{13} = 2.1 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{13} = 0.175 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{13} = 0.75$	$g_{14} = 2.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{14} = 2 \text{ ч.}$	$g_{15} = 4.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 5 \text{ ч.}$	$g_{16} = 1050 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 7 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
	-	$g_{22} = 2.9 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{22} = 3 \text{ ч.}$	$g_{23} = 1.9 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{23} = 0.19 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{23} = 0.85$	$g_{24} = 2.2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{24} = 3 \text{ ч.}$	$g_{25} = 5.2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 4 \text{ ч.}$	$g_{26} = 1090 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 5 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 45 \text{ т}$, $Q_2 = 50 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 1050 \text{ ч.}$						
4.3	$V_1 = 2.5 \text{ м}^3$	$V_2 = 5 \text{ м}^3$	$V_3 = 1.2 \text{ м}^2$	$V_4 = 3.2 \text{ м}^3$	$V_5 = 6.3 \text{ м}^3$	$V_6 = 20 \text{ м}^3$
	$g_{11} = 2.9 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 8 \text{ ч.}$	-	$g_{13} = 1.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{13} = 0.19 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{13} = 0.85$	$g_{14} = 3.3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{14} = 3 \text{ ч.}$	$g_{15} = 6.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 6 \text{ ч.}$	$g_{16} = 1100 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 6 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
	-	$g_{22} = 5.3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{22} = 4 \text{ ч.}$	$g_{23} = 1.6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{23} = 0.2 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{23} = 0.75$	$g_{24} = 2.9 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{24} = 2 \text{ ч.}$	$g_{25} = 6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 5 \text{ ч.}$	$g_{26} = 1050 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 5 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 55 \text{ т}$, $Q_2 = 30 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 1000 \text{ ч.}$						
4.4	$V_1 = 3.2 \text{ м}^3$	$V_2 = 6.3 \text{ м}^3$	$V_3 = 1.6 \text{ м}^2$	$V_4 = 5 \text{ м}^3$	$V_5 = 10 \text{ м}^3$	$V_6 = 20 \text{ м}^3$
	$g_{11} = 6.6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 7 \text{ ч.}$	-	$g_{13} = 1.7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{13} = 0.24 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{13} = 0.67$	$g_{14} = 5.3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{14} = 2 \text{ ч.}$	$g_{15} = 9.7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 5 \text{ ч.}$	$g_{16} = 1080 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 9.5 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
	-	$g_{22} = 6.1 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{22} = 4 \text{ ч.}$	$g_{23} = 1.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $a_{23} = 0.21 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{23} = 0.8$	$g_{24} = 4.9 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{24} = 3 \text{ ч.}$	$g_{25} = 10.2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 10 \text{ ч.}$	$g_{26} = 1060 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 10 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 65 \text{ т}$, $Q_2 = 40 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 900 \text{ ч.}$						

№ п/п	Аппаратурное оформление стадий ТС					
	<p style="text-align: center;"> Ст.1 Ст.2 Ст.3 Ст.4 Ст.5 Ст.6 $n_1=1$ $n_2=1$ $n_3=2$ $n_4=1$ $n_5=2$ $n_6=1$ $0.25 \leq \varphi_1 \leq 0.85$ $\delta_2 = 0.03 \text{ м}$ $0.3 \leq \varphi_3 \leq 0.8$ $0.35 \leq \varphi_4 \leq 0.75$ $0.4 \leq \varphi_5 \leq 0.7$ $h_6 = 0.95$ </p>					
№ вар-та	Размеры аппаратов, характеристики процессов, реализуемых на стадиях ТС и ее производительность					
5.1	$V_1 = 6.3 \text{ м}^3$	$V_2 = 36 \text{ м}^2$	$V_3 = 5 \text{ м}^3$	$V_4 = 10 \text{ м}^3$	$V_5 = 16 \text{ м}^3$	$V_6 = 20 \text{ м}^2$
	$g_{11} = 7.1 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 3 \text{ ч.}$	$v_{12} = 1.6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{12} = 1300 \text{ кг/Т}$ $a_{12} = 8 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{12} = 0.67$	$g_{13} = 6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{13} = 14 \text{ ч.}$	-	$g_{15} = 17 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 8 \text{ ч.}$	$g_{16} = 2700 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 12 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$
	$g_{21} = 6.1 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{21} = 3 \text{ ч.}$	$v_{22} = 1.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{22} = 1650 \text{ кг/Т}$ $a_{22} = 7 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{22} = 0.75$	-	$g_{24} = 11.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{24} = 6 \text{ ч.}$	$g_{25} = 15 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 7 \text{ ч.}$	$g_{26} = 3000 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 10 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 35 \text{ т}$, $Q_2 = 30 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 950 \text{ ч.}$						
5.2	$V_1 = 5 \text{ м}^3$	$V_2 = 36 \text{ м}^2$	$V_3 = 3.2 \text{ м}^3$	$V_4 = 6.3 \text{ м}^3$	$V_5 = 10 \text{ м}^3$	$V_6 = 40 \text{ м}^2$
	$g_{11} = 5.7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 2 \text{ ч.}$	$v_{12} = 1.4 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{12} = 1200 \text{ кг/Т}$ $a_{12} = 7 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{12} = 0.67$	$g_{13} = 7.5 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{13} = 5 \text{ ч.}$	-	$g_{15} = 11 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 5 \text{ ч.}$	$g_{16} = 2500 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 10 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$
	$g_{21} = 5.2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{21} = 2 \text{ ч.}$	$v_{22} = 1.6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{22} = 1300 \text{ кг/Т}$ $a_{22} = 5 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{22} = 0.75$	-	$g_{24} = 8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{24} = 4 \text{ ч.}$	$g_{25} = 9.7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 6 \text{ ч.}$	$g_{26} = 2800 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 9 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 20 \text{ т}$, $Q_2 = 35 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 600 \text{ ч.}$						
5.3	$V_1 = 3.2 \text{ м}^3$	$V_2 = 54 \text{ м}^2$	$V_3 = 2.5 \text{ м}^3$	$V_4 = 5 \text{ м}^3$	$V_5 = 6.3 \text{ м}^3$	$V_6 = 20 \text{ м}^2$
	$g_{11} = 3.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{11} = 1 \text{ ч.}$	$v_{12} = 1.8 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{12} = 1600 \text{ кг/Т}$ $a_{12} = 6 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{12} = 0.55$	$g_{13} = 2.9 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{13} = 10 \text{ ч.}$	-	$g_{15} = 6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{15} = 5 \text{ ч.}$	$g_{16} = 1500 \text{ кг/Т}$ $a_{16} = 11 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$
	$g_{21} = 3 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{21} = 2 \text{ ч.}$	$v_{22} = 1.7 \text{ м}^3/\text{Т}$ $m_{22} = 1500 \text{ кг/Т}$ $a_{22} = 7 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{22} = 0.63$	-	$g_{24} = 5.6 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{24} = 4 \text{ ч.}$	$g_{25} = 6.2 \text{ м}^3/\text{Т}$ $t_{25} = 6 \text{ ч.}$	$g_{26} = 1300 \text{ кг/Т}$ $a_{26} = 15 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 15 \text{ т}$, $Q_2 = 30 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 400 \text{ ч.}$						

№ п/п	Аппаратурное оформление стадий ТС						
	Ст.1	Ст.2	Ст.3	Ст.4	Ст.5	Ст.6	
	$n_1 = 1$	$n_2 = 1$	$n_3 = 2$	$n_4 = 1$	$n_5 = 2$	$n_6 = 1$	
	$0.25 \leq \varphi_1 \leq 0.85$	$0.3 \leq \varphi_2 \leq 0.8$	$0.35 \leq \varphi_3 \leq 0.75$	$h_4 = 0.95$	$0.4 \leq \varphi_5 \leq 0.7$	$h_6 = 0.9$	
№ вар-та	Размеры аппаратов, характеристики процессов, реализуемых на стадиях ТС и ее производительность						
6	6.1	$V_1 = 1.6 \text{ м}^3$	$V_2 = 2.5 \text{ м}^3$	$V_3 = 5 \text{ м}^3$	$V_4 = 40 \text{ м}^2$	$V_5 = 3.2 \text{ м}^3$	$V_6 = 20 \text{ м}^3$
		$g_{11} = 2 \text{ м}^3/\text{Т}$	-	$g_{13} = 2.8 \text{ м}^3/\text{Т}$	$g_{14} = 1900 \text{ кг/Т}$	$g_{15} = 2.9 \text{ м}^3/\text{Т}$	$g_{16} = 1140 \text{ кг/Т}$
		$t_{11} = 5 \text{ ч.}$	-	$t_{13} = 2 \text{ ч.}$	$a_{14} = 13 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$	$t_{15} = 3 \text{ ч.}$	$a_{16} = 6.5 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
		-	$g_{22} = 1.8 \text{ м}^3/\text{Т}$	$g_{23} = 4.3 \text{ м}^3/\text{Т}$	$g_{24} = 2100 \text{ кг/Т}$	$g_{25} = 3 \text{ м}^3/\text{Т}$	$g_{26} = 1090 \text{ кг/Т}$
		$t_{22} = 6 \text{ ч.}$	$t_{23} = 3 \text{ ч.}$	$a_{24} = 10.5 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$	$t_{25} = 2 \text{ ч.}$	$a_{26} = 5.8 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$	
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 35 \text{ т}$, $Q_2 = 50 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 800 \text{ ч.}$							
6	6.2	$V_1 = 5 \text{ м}^3$	$V_2 = 6.3 \text{ м}^3$	$V_3 = 16 \text{ м}^3$	$V_4 = 40 \text{ м}^2$	$V_5 = 10 \text{ м}^3$	$V_6 = 20 \text{ м}^3$
		$g_{11} = 5.4 \text{ м}^3/\text{Т}$	-	$g_{13} = 12.8 \text{ м}^3/\text{Т}$	$g_{14} = 2100 \text{ кг/Т}$	$g_{15} = 8.5 \text{ м}^3/\text{Т}$	$g_{16} = 1100 \text{ кг/Т}$
		$t_{11} = 4 \text{ ч.}$	-	$t_{13} = 8 \text{ ч.}$	$a_{14} = 12.5 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$	$t_{15} = 3 \text{ ч.}$	$a_{16} = 7.5 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
		-	$g_{22} = 5 \text{ м}^3/\text{Т}$	$g_{23} = 14.3 \text{ м}^3/\text{Т}$	$g_{24} = 1700 \text{ кг/Т}$	$g_{25} = 7.8 \text{ м}^3/\text{Т}$	$g_{26} = 1170 \text{ кг/Т}$
		$t_{22} = 5 \text{ ч.}$	$t_{23} = 5 \text{ ч.}$	$a_{24} = 10 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$	$t_{25} = 1 \text{ ч.}$	$a_{26} = 9 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$	
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 55 \text{ т}$, $Q_2 = 50 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 830 \text{ ч.}$							
6	6.3	$V_1 = 3.2 \text{ м}^3$	$V_2 = 5 \text{ м}^3$	$V_3 = 10 \text{ м}^3$	$V_4 = 40 \text{ м}^2$	$V_5 = 6.3 \text{ м}^3$	$V_6 = 20 \text{ м}^3$
		$g_{11} = 3.5 \text{ м}^3/\text{Т}$	-	$g_{13} = 7.8 \text{ м}^3/\text{Т}$	$g_{14} = 2000 \text{ кг/Т}$	$g_{15} = 5.8 \text{ м}^3/\text{Т}$	$g_{16} = 1080 \text{ кг/Т}$
		$t_{11} = 5 \text{ ч.}$	-	$t_{13} = 3 \text{ ч.}$	$a_{14} = 12.5 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$	$t_{15} = 2 \text{ ч.}$	$a_{16} = 6 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$
		-	$g_{22} = 3.9 \text{ м}^3/\text{Т}$	$g_{23} = 8.7 \text{ м}^3/\text{Т}$	$g_{24} = 1900 \text{ кг/Т}$	$g_{25} = 6.5 \text{ м}^3/\text{Т}$	$g_{26} = 1130 \text{ кг/Т}$
		$t_{22} = 6 \text{ ч.}$	$t_{23} = 2 \text{ ч.}$	$a_{24} = 10 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$	$t_{25} = 3 \text{ ч.}$	$a_{26} = 7 \text{ кг/м}^3/\text{ч}$	
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 40 \text{ т}$, $Q_2 = 65 \text{ т}$; период $T_1 + T_2 \leq 1200 \text{ ч.}$							

Контрольные вопросы

1. Почему задачи перепрофилирования действующих МХП на выпуск новой продукции решаются чаще, чем задачи проектирования новых производств?
2. Укажите отличия постановки задачи расчета оборудования ТС действующего МХП от задачи расчета оборудования ТС проектируемого МХП?
3. Какие действия предпринимаются, если выпуск нового продукта с использованием аппаратов действующего производства невозможен?
4. Для чего решается задача определения максимальной производительности комплекта основных аппаратов, подходящих для реализации всех стадий выпуска нового продукта?
5. Какие решения по использованию оборудования действующего производства для выпуска новой продукции принимаются с участием эксперта?

Лабораторная работа № 5. Применение динамического программирования для построения оптимального расписания

Задание: Найти последовательность обработки восьми деталей, при которой указанный критерий оптимальности достигает минимума. Для каждого из вариантов задания в таблице 3.5 приведены продолжительности обработки деталей и штрафы за превышение срока их обработки, критерий оптимальности, ограничение, тип алгоритма решения задачи и вид используемого пространства состояний.

Таблица 3.5 – Варианты заданий к лабораторной работе № 5

№ варианта	Номер детали								Критерий	Ограничение	Алгоритм	Пространство состояний
	1	2	3	4	5	6	7	8				
1	Трудоемкость операции (τ_i), мин								Минимальный штраф	Срок обработки деталей $d \leq 35$ мин.	Прямой	(k, a) , a – суммарное время обработки
	7	3	4	5	8	5	2	3				
	Штраф за просрочку (ω_i), руб											
	70	30	40	55	80	45	20	30				
2	Трудоемкость операции (τ_i), мин								Минимальное время	Суммарный штраф $\Omega \leq 90$ р.	Прямой	(k, ω) , ω – суммарный штраф
	5	4	3	6	8	9	7	2				
	Штраф за просрочку (ω_i), руб											
	50	40	30	60	80	90	70	20				
3	Трудоемкость операции (τ_i), мин								Минимальный штраф	Срок обработки деталей $d \leq 30$ мин.	Обратный	(k, a) , a – суммарное время обработки
	3	2	6	4	4	8	5	2				
	Штраф за просрочку (ω_i), руб											
	35	20	60	40	45	80	50	25				
4	Трудоемкость операции (τ_i), мин								Минимальное время	Суммарный штраф $\Omega \leq 110$ р.	Обратный	(k, ω) , ω – суммарный штраф
	7	8	5	2	3	4	6	9				
	Штраф за просрочку (ω_i), руб											
	70	80	50	20	30	40	60	90				
5	Трудоемкость операции (τ_i), мин								Минимальный штраф	Срок обработки деталей $d \leq 25$ мин	Прямой	$k, a)$, a – суммарное время обработки
	5	2	3	7	2	6	4	3				
	Штраф за просрочку (ω_i), руб											
	50	25	30	70	20	60	40	30				
6	Трудоемкость операции (τ_i), мин								Минимальное время	Суммарный штраф $\Omega \leq 100$ р.	Прямой	(k, ω) , ω – суммарный штраф
	2	5	8	4	9	3	4	6				
	Штраф за просрочку (ω_i), руб											
	20	50	80	40	90	30	45	60				
7	Трудоемкость операции (τ_i), мин								Минимальный штраф	Срок обработки деталей $d \leq 35$ мин	Обратный	(k, a) , a – суммарное время обработки
	8	2	4	6	3	5	9	7				
	Штраф за просрочку (ω_i), руб											
	80	20	40	60	30	50	90	70				
8	Трудоемкость операции (τ_i), мин								Минимальное время	Суммарный штраф $\Omega \leq 95$ р.	Обратный	(k, ω) , ω – суммарный штраф
	6	4	8	2	9	7	5	3				
	Штраф за просрочку (ω_i), руб											
	60	40	80	20	90	70	50	30				

Продолжение таблицы 3.5

№ варианта	Номер детали								Критерий	Ограничение	Алгоритм	Пространство состояний
	1	2	3	4	5	6	7	8				
9	Трудоемкость операции (τ_i), мин								Минимальный штраф	Срок обработки деталей $d \leq 35$ мин.	Обратный	(k,a) , a – суммарное время обработки
	7	3	4	5	8	5	2	3				
	Штраф за просрочку (ω_i), руб											
	70	30	40	55	80	45	20	30				
10	Трудоемкость операции (τ_i), мин								Минимальное время	Суммарный штраф $\Omega \leq 90$ р.	Обратный	(k,ω) , ω – суммарный штраф
	5	4	3	6	8	9	7	2				
	Штраф за просрочку (ω_i), руб											
	50	40	30	60	80	90	70	20				
11	Трудоемкость операции (τ_i), мин								Минимальный штраф	Срок обработки деталей $d \leq 30$ мин.	Прямой	(k,a) , a – суммарное время обработки
	3	2	6	4	4	8	5	2				
	Штраф за просрочку (ω_i), руб											
	35	20	60	40	45	80	50	25				
12	Трудоемкость операции (τ_i), мин								Минимальное время	Суммарный штраф $\Omega \leq 110$ р.	Прямой	(k,ω) , ω – суммарный штраф
	7	8	5	2	3	4	6	9				
	Штраф за просрочку (ω_i), руб											
	70	80	50	20	30	40	60	90				
13	Трудоемкость операции (τ_i), мин								Минимальный штраф	Срок обработки деталей $d \leq 25$ мин	Обратный	$k,a)$, a – суммарное время обработки
	5	2	3	7	2	6	4	3				
	Штраф за просрочку (ω_i), руб											
	50	25	30	70	20	60	40	30				
14	Трудоемкость операции (τ_i), мин								Минимальное время	Суммарный штраф $\Omega \leq 100$ р.	Обратный	(k,ω) , ω – суммарный штраф
	2	5	8	4	9	3	4	6				
	Штраф за просрочку (ω_i), руб											
	20	50	80	40	90	30	45	60				
15	Трудоемкость операции (τ_i), мин								Минимальный штраф	Срок обработки деталей $d \leq 35$ мин	Прямой	(k,a) , a – суммарное время обработки
	8	2	4	6	3	5	9	7				
	Штраф за просрочку (ω_i), руб											
	80	20	40	60	30	50	90	70				
16	Трудоемкость операции (τ_i), мин								Минимальное время	Суммарный штраф $\Omega \leq 95$ р.	Прямой	(k,ω) , ω – суммарный штраф
	6	4	8	2	9	7	5	3				
	Штраф за просрочку (ω_i), руб											
	60	40	80	20	90	70	50	30				

Порядок выполнения работы

1. Последовательное формирование согласно предложенному алгоритму частичных решений вида $U = (\times, \times, \times, \times, \times, \times, \times, \times)$, где $\times = 0$, если соответствующая деталь обрабатывается вовремя и $\times = 1$, – если с запаздыванием.

2. Расчет значений функций доминирования и дальнейшее развитие доминирующих решений.

3. Выбор из решений, достроенных до полного, лучшего по указанному критерию. При равенстве значений критерия учесть степень выполнения ограничения.

Контрольные вопросы

1. Какое частичное решение задачи методом динамического программирования называют *доминирующим*?
2. Что такое *состояние* решения задачи методом динамического программирования?
3. Какую функцию называют функцией доминирования при решении задачи методом динамического программирования?
4. Почему формула для вычисления значений функции доминирования называется рекуррентной?
5. Чем различаются прямой и обратный алгоритм решения задачи методом динамического программирования?

Лабораторная работа № 6. Применение эвристических решающих правил для построения расписаний работы многостадийных ТС

Задание: Решить задачу о загрузке четырех станков обработкой заготовок восьми деталей с применением эвристических решающих правил. Для каждого из вариантов задания в таблице 3.6 приведены номера станков и коды правил, которые следует использовать:

- 1 – правило "*кратчайшей операции*",
- 2 – правило "*максимальной остаточной трудоемкости*",
- 3 – правило "*минимальной остаточной трудоемкости*".

В таблице 3.7 приведены продолжительности обработки деталей на каждом из станков.

Таблица 3.6 – Варианты заданий к лабораторной работе № 6

№ варианта	№,№ станков	Коды правил	№ варианта	№,№ станков	Коды правил	№ варианта	№,№ станков	Коды правил
1	5,6,7,8	1,2	6	2,4,6,8	1,3	11	3,5,7,8	2,3
2	4,5,6,7	2,3	7	1,4,6,7	1,2	12	3,4,6,7	1,3
3	3,4,5,6	1,3	8	1,3,5,8	2,3	13	4,6,7,8	1,2
4	2,3,4,5	1,2	9	1,2,7,8	1,3	14	2,6,7,8	2,3
5	1,3,5,7	2,3	10	2,5,6,8	1,2	15	3,5,6,7	1,3

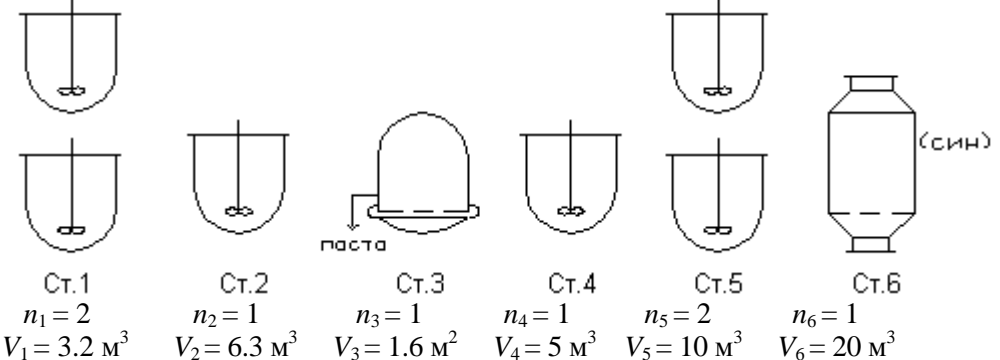
Таблица 3.7 – Продолжительности обработки деталей на станках

№ станка	№ детали							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Продолжительность обработки, мин							
1	7	3	4	5	8	5	2	3
2	5	4	3	6	8	9	7	2
3	3	2	6	4	4	8	5	2
4	5	2	3	7	2	6	4	3
5	7	8	5	2	3	4	6	9
6	2	5	8	4	9	3	4	6
7	8	2	4	6	3	5	9	7
8	6	4	8	2	9	7	5	3

Таблица 3.8 – Исходные данные для составления календарного плана работы ТС

№ п/п	Аппаратурное оформление стадий ТС					
	$n_1 = 1$ $V_1 = 2.5 \text{ м}^3$		$n_2 = 2$ $V_2 = 1.6 \text{ м}^3$		$n_3 = 1$ $V_3 = 5 \text{ м}^3$	
			$n_4 = 1$ $V_4 = 80 \text{ м}^2$		$n_5 = 2$ $V_5 = 3.2 \text{ м}^3$	
					$n_6 = 1$ $V_6 = 20 \text{ м}^3$	
№ вар-та	Длительности операций, реализуемых на стадиях ТС, режим работы аппаратов стадий и производительность ТС					
1.1	$t_{11} = 3 \text{ ч.}$	-	$t_{13} = 2 \text{ ч.}$	$t_{14} = 4.5 \text{ ч.}$ $h_{14} = 0.8$	$t_{15} = 5 \text{ ч.}$, со сдвигом по времени	$t_{16} = 6 \text{ ч.}$ $h_{16} = 0.9$
	-	$t_{22} = 7 \text{ ч.}$, синхронно	$t_{23} = 3 \text{ ч.}$	$t_{24} = 5 \text{ ч.}$ $h_{24} = 0.7$	$t_{25} = 4 \text{ ч.}$, со сдвигом по времени	$t_{26} = 5.5 \text{ ч.}$ $h_{26} = 0.9$
	Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 140 \text{ т.}$, $Q_2 = 77 \text{ т.}$; размеры партий: $w_1 = 0.7 \text{ т.}$, $w_2 = 0.55 \text{ т.}$					
1.2	$t_{11} = 2 \text{ ч.}$	-	$t_{13} = 4 \text{ ч.}$	$t_{14} = 3 \text{ ч.}$ $h_{14} = 0.67$	$t_{15} = 5 \text{ ч.}$, реактор и емкость	$t_{15} = 8 \text{ ч.}$ $h_{16} = 0.9$
	-	$t_{22} = 10 \text{ ч.}$, со сдвигом по времени	$t_{23} = 2 \text{ ч.}$	$t_{24} = 4 \text{ ч.}$ $h_{24} = 0.8$	$t_{25} = 3 \text{ ч.}$, реактор и емкость	$t_{25} = 7 \text{ ч.}$ $h_{26} = 0.9$
	Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 160 \text{ т.}$, $Q_2 = 150 \text{ т.}$; размеры партий $w_1 = 1 \text{ т.}$, $w_2 = 0.75 \text{ т.}$					
1.3	$t_{11} = 3 \text{ ч.}$	-	$t_{13} = 3 \text{ ч.}$	$t_{13} = 4 \text{ ч.}$ $h_{14} = 0.75$	$t_{15} = 4 \text{ ч.}$, реактор и емкость	$t_{26} = 6.5 \text{ ч.}$ $h_{26} = 0.9$
	-	$t_{22} = 6 \text{ ч.}$, синхронно	$t_{23} = 2 \text{ ч.}$	$t_{23} = 3 \text{ ч.}$ $h_{24} = 0.67$	$t_{25} = 5 \text{ ч.}$, реактор и емкость	$t_{26} = 6 \text{ ч.}$ $h_{26} = 0.9$
	Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 130 \text{ т.}$, $Q_2 = 96 \text{ т.}$; размеры партий $w_1 = 0.65 \text{ т.}$, $w_2 = 0.8 \text{ т.}$					

№ п/п	Аппаратурное оформление стадий ТС						
	Ст.1 $n_1 = 1$ $V_1 = 6.3 \text{ м}^3$	Ст.2 $n_2 = 2$ $V_2 = 3.2 \text{ м}^3$	Ст.3 $n_3 = 1$ $V_3 = 1.6 \text{ м}^2$	Ст.4 $n_4 = 1$ $V_4 = 10 \text{ м}^3$	Ст.5 $n_5 = 2$ $V_5 = 16 \text{ м}^3$	Ст.6 $n_6 = 1$ $V_6 = 40 \text{ м}^2$	
№ вар-та	Длительности операций, реализуемых на стадиях ТС, режим работы аппаратов стадий и производительность ТС						
2	2.1	$t_{11} = 3 \text{ ч.}$	-	$t_{13} = 6 \text{ ч.}$ $h_{13} = 0.75$	$t_{14} = 2 \text{ ч.}$	$t_{15} = 5 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	$t_{16} = 2.5 \text{ ч.}$ $h_{16} = 0.95$
		-	$t_{22} = 7 \text{ ч.},$ синхронно	$t_{23} = 5.3 \text{ ч.}$ $h_{23} = 0.8$	$t_{23} = 3 \text{ ч.}$	$t_{25} = 6 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	$t_{26} = 4.5 \text{ ч.}$ $h_{26} = 0.95$
	Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 105 \text{ т}, Q_2 = 90 \text{ т};$ размеры партий: $w_1 = 0.75 \text{ т}, w_2 = 0.9 \text{ т}$						
2.2	$t_{11} = 5 \text{ ч.}$	-	$t_{13} = 7 \text{ ч.}$ $h_{13} = 0.83$	$t_{14} = 2 \text{ ч.}$	$t_{15} = 6 \text{ ч.},$ реактор и емкость	$t_{16} = 4 \text{ ч.}$ $h_{16} = 0.95$	
	-	$t_{22} = 9 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	$t_{23} = 5.5 \text{ ч.}$ $h_{23} = 0.8$	$t_{24} = 2 \text{ ч.}$	$t_{25} = 6 \text{ ч.},$ реактор и емкость	$t_{26} = 4.5 \text{ ч.}$ $h_{26} = 0.95$	
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 102 \text{ т}, Q_2 = 112 \text{ т};$ размеры партий: $w_1 = 0.85 \text{ т}, w_2 = 0.7 \text{ т}$							
2.3	$t_{11} = 5 \text{ ч.}$	-	$t_{13} = 6.5 \text{ ч.}$ $h_{13} = 0.8$	$t_{14} = 1 \text{ ч.}$	$t_{15} = 7 \text{ ч.},$ реактор и емкость	$t_{16} = 3.5 \text{ ч.}$ $h_{16} = 0.95$	
	-	$t_{22} = 10 \text{ ч.},$ синхронно	$t_{23} = 5 \text{ ч.}$ $h_{23} = 0.75$	$t_{24} = 2 \text{ ч.}$	$t_{25} = 6 \text{ ч.},$ реактор и емкость	$t_{26} = 5.5 \text{ ч.}$ $h_{26} = 0.95$	
Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 120 \text{ т}, Q_2 = 100 \text{ т};$ размеры партий: $w_1 = 0.8 \text{ т}, w_2 = 1 \text{ т}$							

№ п/п	Аппаратурное оформление стадий ТС						
							
№ вар-та	Длительности операций, реализуемых на стадиях ТС, режим работы аппаратов стадий и производительность ТС						
3	3.1	$t_{11} = 10$ ч., синхронно	-	$t_{13} = 4.8$ ч. $h_{13} = 0.75$	$t_{14} = 2$ ч.	$t_{15} = 6$ ч., со сдвигом по времени	$t_{16} = 7$ ч. $h_{16} = 0.9$
	-	$t_{22} = 4$ ч.	$t_{23} = 5.1$ ч. $h_{23} = 0.67$	$t_{24} = 2$ ч.	$t_{25} = 5$ ч., со сдвигом по времени	$t_{26} = 6$ ч. $h_{26} = 0.9$	
	Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 102$ т, $Q_2 = 133$ т; размеры партий: $w_1 = 0.85$ т, $w_2 = 0.95$ т						
3	3.2	$t_{11} = 6$ ч., синхронно	-	$t_{13} = 6.4$ ч $h_{13} = 0.75$	$t_{14} = 2$ ч.	$t_{15} = 5$ ч., реактор и емкость	$t_{16} = 6.5$ ч. $h_{16} = 0.9$
	-	$t_{22} = 3$ ч.	$t_{23} = 4.8$ ч $h_{23} = 0.85$	$t_{24} = 3$ ч.	$t_{25} = 4$ ч., реактор и емкость	$t_{26} = 7.5$ ч. $h_{26} = 0.9$	
	Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 126$ т, $Q_2 = 120$ т; размеры партий: $w_1 = 0.9$ т, $w_2 = 0.75$ т						
3	3.3	$t_{11} = 8$ ч., со сдвигом по времени	-	$t_{13} = 3.6$ ч $h_{13} = 0.75$	$t_{14} = 3$ ч.	$t_{15} = 6$ ч., реактор и емкость	$t_{16} = 5.5$ ч. $h_{16} = 0.9$
	-	$t_{22} = 4$ ч.	$t_{23} = 5.6$ ч $h_{23} = 0.75$	$t_{24} = 2$ ч.	$t_{25} = 5$ ч., реактор и емкость	$t_{26} = 5$ ч. $h_{26} = 0.9$	
	Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 133$ т, $Q_2 = 127.5$ т; размеры партий: $w_1 = 0.7$ т, $w_2 = 0.85$ т						

№ п/п	Аппаратурное оформление стадий ТС						
	<p style="text-align: center;"> Ст.1 Ст.2 Ст.3 Ст.4 Ст.5 Ст.6 $n_1=1$ $n_2=1$ $n_3=2$ $n_4=1$ $n_5=2$ $n_6=1$ $V_1=5 \text{ м}^3$ $V_2=36 \text{ м}^2$ $V_3=3.2 \text{ м}^3$ $V_4=6.3 \text{ м}^3$ $V_5=10 \text{ м}^3$ $V_6=40 \text{ м}^2$ </p>						
№ вар-та	Длительности операций, реализуемых на стадиях ТС, режим работы аппаратов стадий и производительность ТС						
4	4.1	$t_{11} = 3 \text{ ч.}$	$t_{12} = 3 \text{ ч.}$ $h_{12} = 0.67$	$t_{13} = 7 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	-	$t_{15} = 6 \text{ ч.},$ реактор и емкость	$t_{16} = 4.5 \text{ ч.}$ $h_{16} = 0.95$
		$t_{21} = 3 \text{ ч.}$	$t_{22} = 2.8 \text{ ч.}$ $h_{22} = 0.75$	-	$t_{24} = 5.9 \text{ ч.}$	$t_{25} = 4 \text{ ч.},$ реактор и емкость	$t_{26} = 5 \text{ ч.}$ $h_{26} = 0.95$
	Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 144 \text{ т.}$, $Q_2 = 91 \text{ т.}$; размеры партий: $w_1 = 0.8 \text{ т.}$, $w_2 = 0.65 \text{ т.}$						
4	4.2	$t_{11} = 2 \text{ ч.}$	$t_{12} = 3.6 \text{ ч.}$ $h_{12} = 0.67$	$t_{13} = 6 \text{ ч.},$ емкость и реактор	-	$t_{15} = 5 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	$t_{16} = 5.5 \text{ ч.}$ $h_{16} = 0.95$
		$t_{21} = 2 \text{ ч.}$	$t_{22} = 4.8 \text{ ч.}$ $h_{22} = 0.75$	-	$t_{24} = 3.4 \text{ ч.}$	$t_{25} = 6 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	$t_{26} = 6.5 \text{ ч.}$ $h_{26} = 0.95$
	Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 153 \text{ т.}$, $Q_2 = 154 \text{ т.}$; размеры партий: $w_1 = 0.85 \text{ т.}$, $w_2 = 1.1 \text{ т.}$						
4	4.3	$t_{11} = 1 \text{ ч.}$	$t_{12} = 5 \text{ ч.}$ $h_{12} = 0.6$	$t_{13} = 8 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	-	$t_{15} = 5 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	$t_{16} = 7.4 \text{ ч.}$ $h_{16} = 0.95$
		$t_{21} = 2 \text{ ч.}$	$t_{22} = 3.9 \text{ ч.}$ $h_{22} = 0.67$	-	$t_{24} = 4.4 \text{ ч.}$	$t_{25} = 6 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	$t_{26} = 3.5 \text{ ч.}$ $h_{26} = 0.95$
	Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 135 \text{ т.}$, $Q_2 = 126 \text{ т.}$; размеры партий: $w_1 = 0.75 \text{ т.}$, $w_2 = 0.9 \text{ т.}$						

№ п/п	Аппаратурное оформление стадий ТС						
	Ст.1 $n_1 = 1$ $V_1 = 5 \text{ м}^3$	Ст.2 $n_2 = 1$ $V_2 = 6.3 \text{ м}^3$	Ст.3 $n_3 = 2$ $V_3 = 16 \text{ м}^3$	Ст.4 $n_4 = 1$ $V_4 = 40 \text{ м}^2$	Ст.5 $n_5 = 2$ $V_5 = 10 \text{ м}^3$	Ст.6 $n_6 = 1$ $V_6 = 20 \text{ м}^3$	
№ вар-та	Длительности операций, реализуемых на стадиях ТС, режим работы аппаратов стадий и производительность ТС						
5	5.1	$t_{11} = 5 \text{ ч.}$	-	$t_{13} = 4 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	$t_{14} = 4 \text{ ч.}$ $h_{14} = 0.95$	$t_{15} = 2 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	$t_{16} = 3.5 \text{ ч.}$ $h_{16} = 0.9$
		-	$t_{22} = 6 \text{ ч.}$	$t_{23} = 3 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	$t_{24} = 4.5 \text{ ч.}$ $h_{24} = 0.95$	$t_{25} = 3 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	$t_{26} = 4 \text{ ч.}$ $h_{26} = 0.9$
	Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 209 \text{ т}, Q_2 = 153 \text{ т};$ размеры партий: $w_1 = 1.1 \text{ т}, w_2 = 0.85 \text{ т}$						
5	5.2	$t_{11} = 6 \text{ ч.}$	-	$t_{13} = 5 \text{ ч.},$ реактор и емкость	$t_{14} = 3.5 \text{ ч.}$ $h_{14} = 0.95$	$t_{15} = 3 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	$t_{16} = 4.5 \text{ ч.}$ $h_{16} = 0.9$
		-	$t_{22} = 5 \text{ ч.}$	$t_{23} = 4 \text{ ч.},$ реактор и емкость	$t_{24} = 4 \text{ ч.}$ $h_{24} = 0.95$	$t_{25} = 1 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	$t_{26} = 5 \text{ ч.}$ $h_{26} = 0.9$
	Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 135 \text{ т}, Q_2 = 180.5 \text{ т};$ размеры партий: $w_1 = 0.75 \text{ т}, w_2 = 0.95 \text{ т}$						
5	5.3	$t_{11} = 5.5 \text{ ч.}$	-	$t_{13} = 3 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	$t_{14} = 3 \text{ ч.}$ $h_{14} = 0.95$	$t_{15} = 1 \text{ ч.},$ емкость и емкость	$t_{16} = 5 \text{ ч.}$ $h_{16} = 0.9$
		-	$t_{22} = 6.5 \text{ ч.}$	$t_{23} = 2.5 \text{ ч.},$ со сдвигом по времени	$t_{24} = 5 \text{ ч.}$ $h_{24} = 0.95$	$t_{25} = 1 \text{ ч.},$ емкость и емкость	$t_{26} = 5.5 \text{ ч.}$ $h_{26} = 0.9$
	Объемы выпуска продуктов: $Q_1 = 144 \text{ т}, Q_2 = 160 \text{ т};$ размеры партий: $w_1 = 0.8 \text{ т}, w_2 = 1 \text{ т}$						

Порядок выполнения работы

1. Определить значения занятости оборудования стадий ТС при обработке партий продуктов $p_{ij}, i = 1, 2; j = 1, \dots, 6$.

2. Рассчитать значения длительностей циклов выпуска партий продуктов $T_{ц1}$, и $T_{ц2}$, числа партий, продолжительностей выпуска партии каждого продукта.

3. Составить календарный план работы ТС без учета ремонтов.
4. Построить диаграмму Ганта для периода работы ТС от начала выпуска последней партии 1-го продукта до окончания выпуска первой партии 2-го продукта.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой решение задачи оптимального календарного планирования работы ТС МХП?
2. Почему для решения задачи оптимального календарного планирования работы ТС МХП не применяются методы и алгоритмы теории расписаний?
3. Что представляет собой календарный план работы ТС МХП без учета ремонтов?
4. Какие исходные данные необходимы для составления календарного плана работы ТС МХП без учета ремонтов?
5. Значения каких параметров режима работы ТС МХП необходимо определить для составления календарного плана работы ТС МХП без учета ремонтов?

Лабораторная работа № 8. Составление календарного плана работы ТС МХП с учетом графика ППР

Задание: Скорректировать календарный план работы ТС, составленный в результате выполнения лабораторной работы № 7, с учетом графика ППР оборудования ее стадий. Оптимизировать скорректированный календарный план с учетом возможностей переноса сроков текущих и капитальных ремонтов аппаратов стадий ТС.

Данные о нормативной продолжительности текущих и капитальных ремонтов, межремонтных циклах и межремонтных периодах аппаратов стадий ТС, а также их наработке на момент начала выпуска первого продукта, приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Ремонтные характеристики аппаратов стадий ТС (см. таблицу 3.8)

№ вар-та	№ ст.	Межремонтный цикл, ч	Простой при КР, ч	Межремонтный период, ч	Простой при ТР, ч	Предыдущая наработка, ч
1.1	1	23040	196	5760	48	2900
	2	26880	168	3840	42	3180
	3	23040	196	5760	48	3830
	4	34560	120	4320	56	33470
	5	28800	176	5760	76	3730
	6	17280	366	4320	108	2160
1.2	1	23040	196	5760	48	2900
	2	26880	168	3840	42	2800
	3	23040	196	5760	48	4850
	4	34560	120	4320	56	2190
	5	28800	176	5760	76	4610
	п.ап	28800	176	5760	76	3730
	6	17280	366	4320	108	15660
1.3	1	23040	196	5760	48	2900
	2	26880	168	3840	42	25800
	3	23040	196	5760	48	3050
	4	34560	120	4320	56	3540
	5	28800	176	5760	76	3330
	п.ап	28800	176	5760	76	3330
	6	17280	366	4320	108	3460

2.1	1	23040	196	5760	48	2900
	2	26880	168	3840	42	3180
	3	17280	366	5760	108	4830
	4	23040	196	5760	48	21470
	5	28800	176	5760	76	3730
	6	17280	304	4320	86	2160
2.2	1	23040	196	5760	48	2900
	2	26880	168	3840	42	2800
	3	17280	366	5760	108	4850
	4	23040	196	5760	48	2190
	5	28800	176	5760	76	4610
	п.ап	28800	176	5760	76	3730
	6	17280	304	4320	86	15660
2.3	1	23040	196	5760	48	2900
	2	26880	168	3840	42	25800
	3	17280	366	5760	108	3050
	4	23040	196	5760	48	3440
	5	28800	176	5760	76	2330
	п.ап	28800	176	5760	76	2560
	6	17280	304	4320	86	3460
3.1	1	23040	196	5760	48	2900
	2	26880	168	3840	42	3180
	3	17280	366	5760	108	5430
	4	23040	196	5760	48	22470
	5	28800	176	5760	76	3910
	6	17280	366	4320	108	2160
3.2	1	23040	196	5760	48	2900
	2	26880	168	3840	42	2800
	3	17280	366	5760	108	4900
	4	23040	196	5760	48	2230
	5	28800	176	5760	76	4630
	п.ап	28800	176	5760	76	3730
	6	17280	366	4320	108	15490
3.3	1	23040	196	5760	48	22480
	2	26880	168	3840	42	2580
	3	17280	366	5760	108	3050
	4	23040	196	5760	48	4440
	5	28800	176	5760	76	5430
	п.ап	28800	176	5760	76	2560
	6	17280	366	4320	108	3460

4.1	1	23040	196	5760	48	4810
	2	34560	120	4320	56	2180
	3	23040	196	5760	48	5430
	4	23040	196	5760	48	3670
	5	28800	176	5760	76	1910
	п.ап	28800	176	5760	76	1910
	6	17280	304	4320	86	15060
4.2	1	23040	196	5760	48	2900
	2	34560	120	4320	56	33620
	п.ап	23040	196	5760	48	2620
	3	23040	196	5760	48	2620
	4	23040	196	5760	48	4830
	5	28800	176	5760	76	2630
	6	17280	304	4320	86	3490
4.3	1	23040	196	5760	48	4480
	2	34560	120	4320	56	3580
	3	23040	196	5760	48	3050
	4	23040	196	5760	48	21440
	5	28800	176	5760	76	3130
	6	17280	304	4320	86	1460
	5.1	1	23040	196	5760	48
2		26880	168	3840	42	3350
3		23040	196	5760	48	2430
4		17280	304	4320	86	15430
5		28800	176	5760	76	1910
6		17280	366	4320	108	2090
5.2		1	23040	196	5760	48
	2	26880	168	3840	42	1300
	3	23040	196	5760	48	2730
	п.ап	23040	196	5760	48	2730
	4	17280	304	4320	86	3530
	5	28800	176	5760	76	4630
	6	17280	366	4320	108	15520
5.3	1	23040	196	5760	48	4480
	2	26880	168	3840	42	25980
	3	23040	196	5760	48	3050
	4	17280	304	4320	86	2040
	5	28800	176	5760	76	1560
	п.ап	28800	176	5760	76	1560
	6	17280	366	4320	108	2590

Порядок выполнения работы

1. Определить наработки аппаратов стадий ТС за период выпуска продуктов в заданных объемах.
2. Выделить аппараты стадий ТС, для которых необходимо проводить ППР в период выпуска продуктов. Определить тип ремонта и номера партий первого или второго продукта, между выпуском которых необходимо произвести ремонт.
3. Скорректировать календарный план, составленный в ходе выполнения лабораторной работы № 7, с учетом ремонтов, определить уточненные сроки выпуска продуктов в заданных объемах.
4. Выявить возможности переноса сроков ремонтов так, чтобы провести их до начала выпуска 1-го продукта, после окончания выпуска 2-го продукта или совместить с промывкой оборудования ТС по окончании выпуска 1-го продукта.
5. Выполнить иллюстрации календарного плана работы ТС до и после переноса сроков ППР. Определить переработку или резерв производительности системы.

Контрольные вопросы

1. Какая информация необходима для учета ППР оборудования стадий ТС при календарном планировании ее работы?
2. Как определяется наработка аппаратов конкретной стадии ТС за период выпуска продуктов?
3. Как определить номер продукта и номера его партий, между выпуском которых необходимо провести ППР аппаратов конкретной стадии?
4. Укажите способ определения возможностей переноса текущих и капитальных ремонтов оборудования ТС МХП относительно нормативных сроков.
5. Как может повлиять на составленный календарный план штат ремонтного персонала МХП и график поставок продукции заказчику?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемое пособие включает основные сведения о двух этапах технологического проектирования многоассортиментных химических производств: расчетах и выборе основной аппаратуры ТС МХП и календарном планировании работы ТС МХП с учетом графика ППР оборудования, графика поставок продукции заказчиком и ограниченности штата ремонтного персонала.

В пособии рассмотрены:

- методика расчета оборудования ТС непрерывного действия, в том числе при перепрофилировании действующего производства на выпуск новой продукции;
- методика расчета оборудования ТС периодического действия и комбинированных с учетом параметров режима функционирования ТС и аппаратов ее стадий;
- подходы к моделированию технологических операций и аппаратов ТС МХП, в том числе информационно-логические, регрессионные и математические модели;
- методика проектных расчетов наиболее распространенных основных аппаратов стадий ТС МХП: емкостные реакторы, фильтры и сушилки;
- основы теории расписаний, в том числе применение для построения расписаний динамического программирования и эвристических решающих правил;
- методы и алгоритмы составления расписаний работы одностадийных и многостадийных ТС, в том числе построения оптимальных расписаний обслуживания требований группами;
- методика календарного планирования работы МХП, в том числе постановка и алгоритм решения задачи оптимального календарного планирования МХП.

Лабораторный практикум содержит формулировки заданий, исходные данные, рекомендации по выполнению и контрольные вопросы к восьми лабораторным работам:

- построение диаграмм взаимодействия аппаратов ТС МХП;
- выбор возможных режимов функционирования оборудования ТС МХП;
- расчет оборудования индивидуальной ТС МХП;
- расчет оборудования ТС действующего МХП при организации выпуска новых продуктов;
- применение динамического программирования для построения оптимального расписания;
- применение эвристических решающих правил для построения расписания работы многостадийных ТС;
- составление календарного плана работы ТС МХП;
- составление календарного плана работы ТС МХП с учетом графика ППР.

Авторы надеются, что предлагаемое пособие будет полезно для студентов, обучающихся по специальности 15.05.01 "Проектирование технологических машин и комплексов", направлению 15.03.01 "Машиностроение" дневной и заочной формы обучения, а также для аспирантов и работников проектно-конструкторских отделов промышленных предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беркман, Б.Е. Основы технологического проектирования производств органического синтеза / Б.Е. Беркман. – М.: Химия, 1970. – 368 с.
2. Гуревич, Д.А. Проектные исследования химических производств / Д.А. Гуревич. – М.: Химия, 1976. – 208 с.
3. Танаев, В.С. Введение в теорию расписаний / В.С. Танаев, В.В. Шкурба. – М.: Наука, 1975. – 256 с.
4. Конвей, Р.В. Теория расписаний / Р.В. Конвей, В.Л. Максвелл, Л.В. Миллер. – М.: Наука, 1975. – 360 с.
5. Альперт, З.А. Основы проектирования химических установок: Учебное пособие / З.А. Альперт. – М.: Высшая школа, 1989. – 304 с.
6. Кафаров, В.В. Гибкие автоматизированные производственные системы в химической промышленности / В.В. Кафаров, В.В. Макаров. – М., 1990. – 319 с.
7. Дворецкий, С.И. Компьютерное моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования. Учебное пособие / Дворецкий С.И., Егоров А.Ф., Дворецкий Д.С. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2003. – 224 с.
8. Карпушкин, С.В. Выбор аппаратурного оформления многоассортиментных химических производств / С.В. Карпушкин. – М.: Изд-во Машиностроение-1, 2006. – 140 с.
9. Сутягин, В.М. Основы проектирования и оборудование производств органического синтеза: Учебное пособие - 2-е изд. / В.М. Сутягин, В.В. Бочкарев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 188 с.
10. Беляев, В.М.. Расчет и конструирование основного оборудования отрасли: учебное пособие / В.М. Беляев, В.М. Миронов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 288 с.
11. Карпушкин, С.В. Расчеты и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов: Учебное пособие для вузов / С.В. Карпушкин, М.Н. Краснянский, А.Б. Борисенко. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2009. – 168 с.
12. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии: Примеры и задачи / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк, М.И. Курочкина. – СПб.: Химия, 2010. – 544 с.
13. Краснянский, М.Н. Надежность функционирования процессов и аппаратов многоассортиментных химических производств / М.Н. Краснянский. – М.: Машиностроение, 2010. – 115 с.
14. Лазарев, А.А. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы: учебное пособие / А.А. Лазарев, Е.Р. Гафаров. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011. – 223 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Режимы функционирования и взаимодействия оборудования стадий ТС

На графиках функционирования оборудования аппаратных стадий отображаются только основные аппараты (реактор, фильтр, сушилка). График функционирования стадии, оснащенной единственным основным аппаратом, представлен на рис. А1. На этом графике t_j – это продолжительность занятости основного аппарата j -й стадии переработкой одной партии сырья или промежуточных продуктов (промежуток времени от начала загрузки аппарата до окончания его опорожнения и очистки, если она необходима).

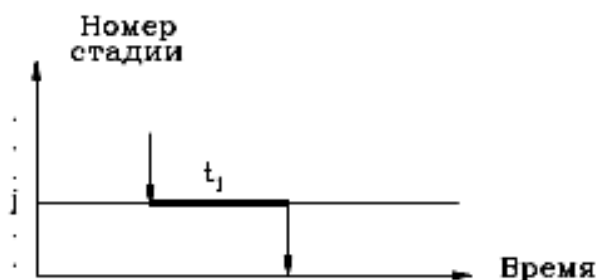


Рисунок А1 – График функционирования стадии ТС с единственным основным аппаратом

Если же на стадии установлены несколько идентичных основных аппаратов, то возможны следующие варианты их функционирования:

1) каждый из аппаратов принимает партию обрабатываемых материалов целиком, аппараты работают со сдвигом по времени, см. рис. А2а;

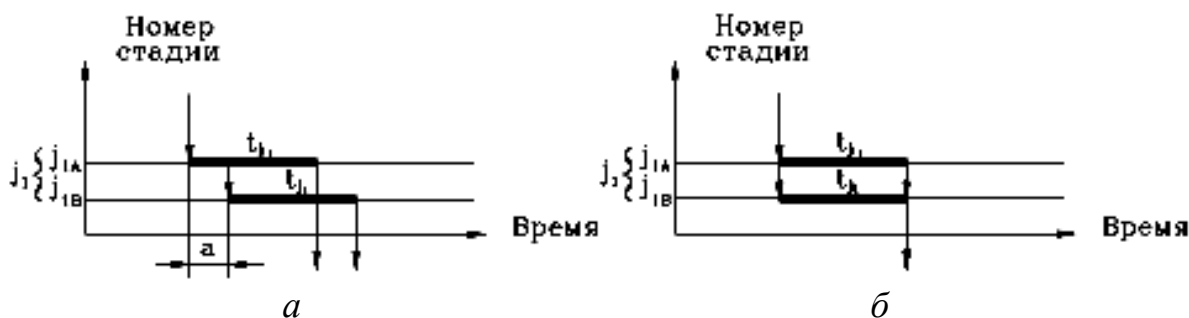


Рисунок А2 – График функционирования стадии ТС с двумя основными аппаратами

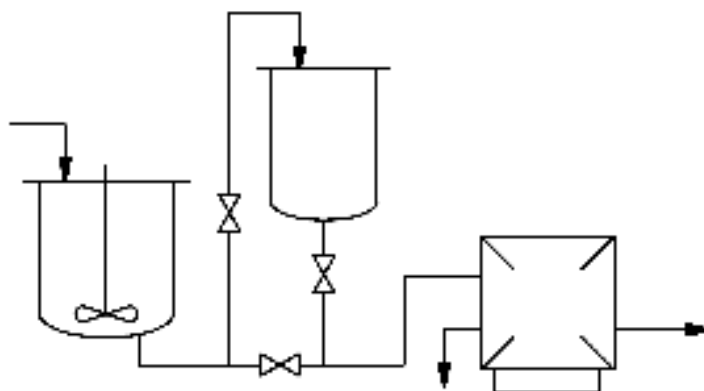
2) каждый из аппаратов принимает $1/n_j$ долю партии материалов (n_j – число основных аппаратов j -й стадии), аппараты работают синхронно, см. рис. А2б. Отметим, что такой график работы двух основных аппаратов является приемлемым, если продолжительности их поочередного заполнения и опорожнения пренебрежимо малы по сравнению с t_j .

Графики на рис. А2 иллюстрируют функционирование стадии ТС, оснащенной емкостными аппаратами с перемешивающими устройствами. В этих ап-

паратах реализуется режим, близкий к идеальному перемешиванию, поэтому величина t_j почти не зависит от размера обрабатываемой партии.

На стадиях, где величина t_j прямо пропорциональна размеру обрабатываемой партии (стадии фильтрования, сушки) при синхронной работе n_j аппаратов длительность обработки $1/n_j$ доли партии составит t_j/n_j . Исключением из этого правила является случай установки на стадии нескольких рамных или камерных фильтр-прессов: включение следующего аппарата осуществляется после заполнения осадком всех рам (камер) предыдущего, т.е. n_j аппаратов рассматриваются как один с поверхностью фильтрования $V_j \cdot n_j$.

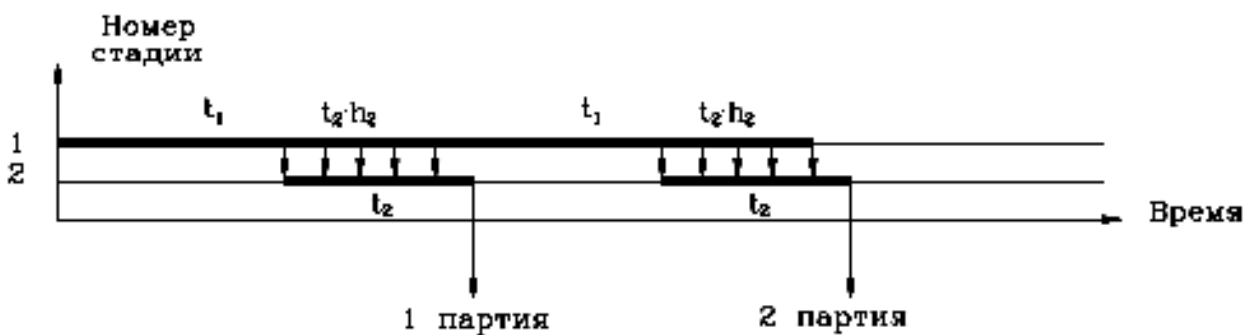
Пример 1. Определить возможные режимы функционирования аппаратов стадий следующего фрагмента ТС и изобразить их графики:



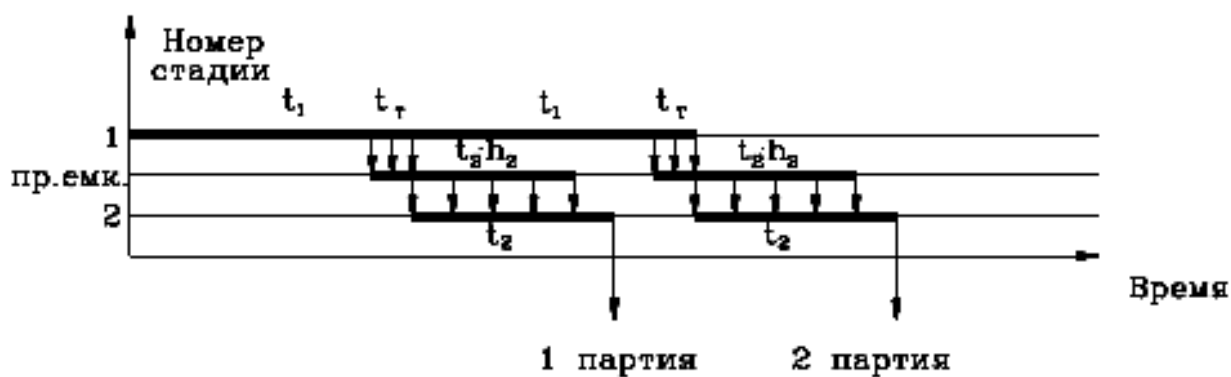
Ст. 1: $t_1=6$ ч. Промежуточная Ст. 2: $t_2=5$ ч., $h_2=0.8$,
емкость

где h_2 – доля t_2 , в течение которой осуществляется собственно фильтрование (и промывка осадка, если промывные воды идут в дальнейшую переработку).

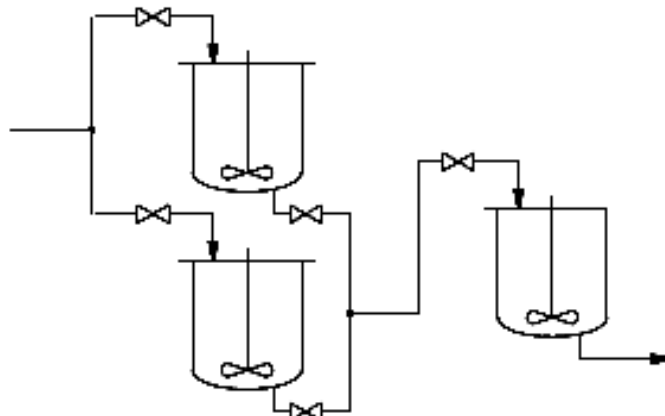
а) режим без промежуточного накопления: $p_1 = t_1 + h_2 \cdot t_2 = 6 + 0.8 \cdot 5 = 10$ ч.:



б) с промежуточной емкостью и учетом времени перекачки: $t_T = 1$ ч.,
 $p_{\text{п}} = h_2 \cdot t_2 = 0.8 \cdot 5 = 4$ ч.:



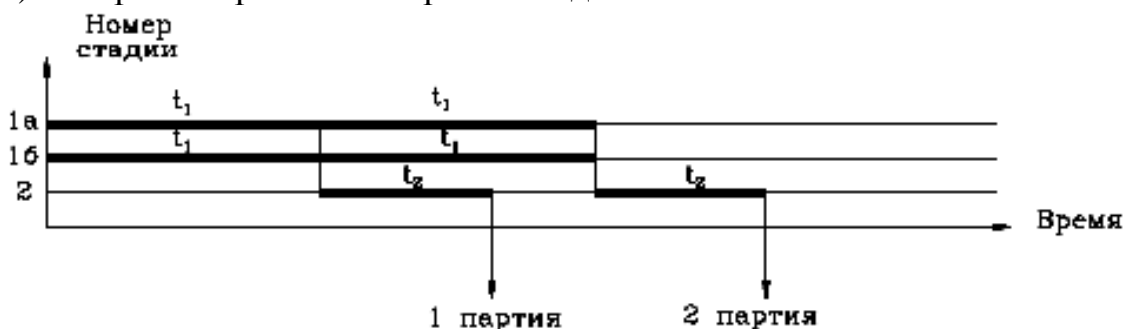
Пример 2. Определить возможные режимы функционирования аппаратов стадий следующего фрагмента ТС и изобразить их графики:



Ст. 1: $t_1=8$ ч.

Ст. 2: $t_2=5$ ч.

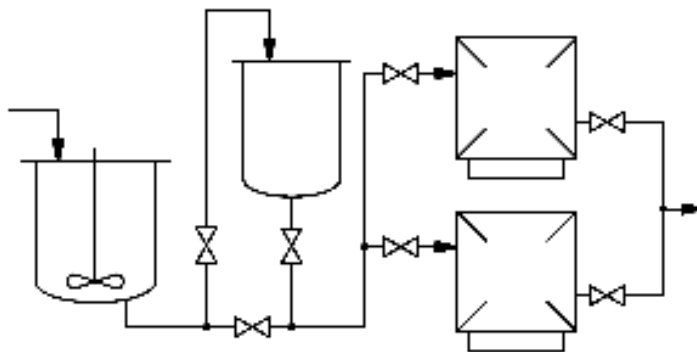
а) синхронная работа аппаратов стадии 1:



б) работа аппаратов стадии 1 со сдвигом по времени:



Пример 3. Определить возможные режимы функционирования аппаратов стадий следующего фрагмента ТС и изобразить их графики:

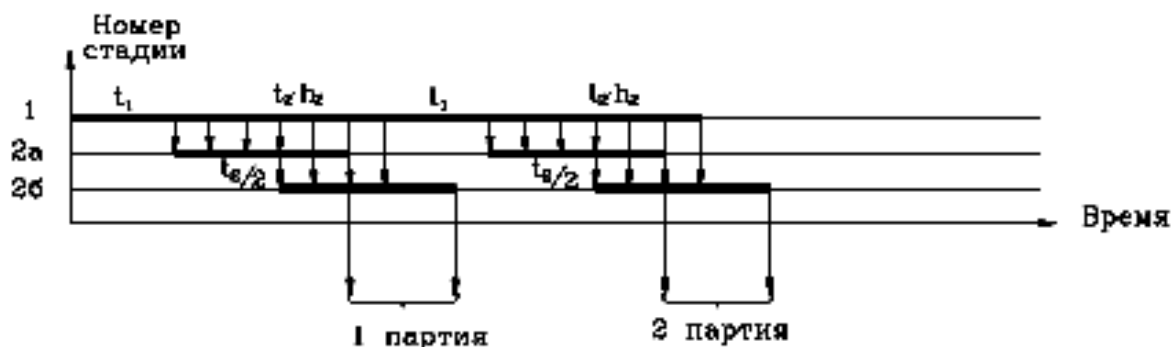


Ст. 1: $t_1=3$ ч. Промежуточная Ст. 2: $t_2=10$ ч., $h_2=0.6$ емкость

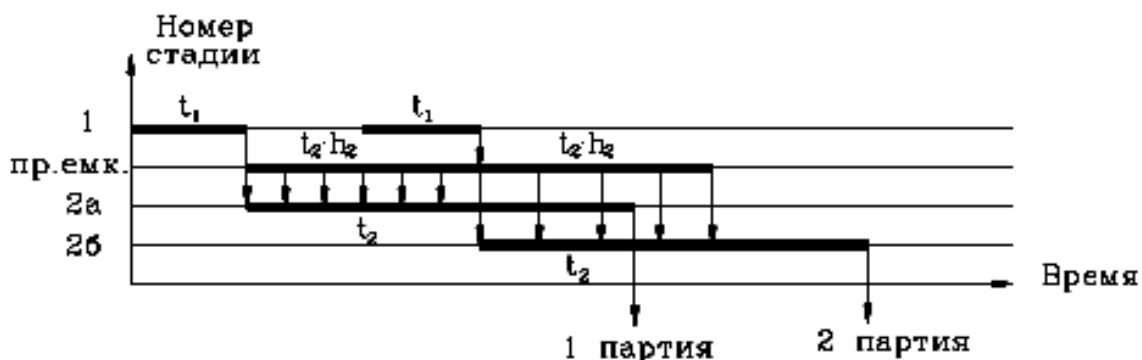
а) без промежуточной емкости, фильтр-прессы стадии 2 принимают партии осадка целиком: $p_1 = t_1 + h_2 \cdot t_2 = 9$ ч.:



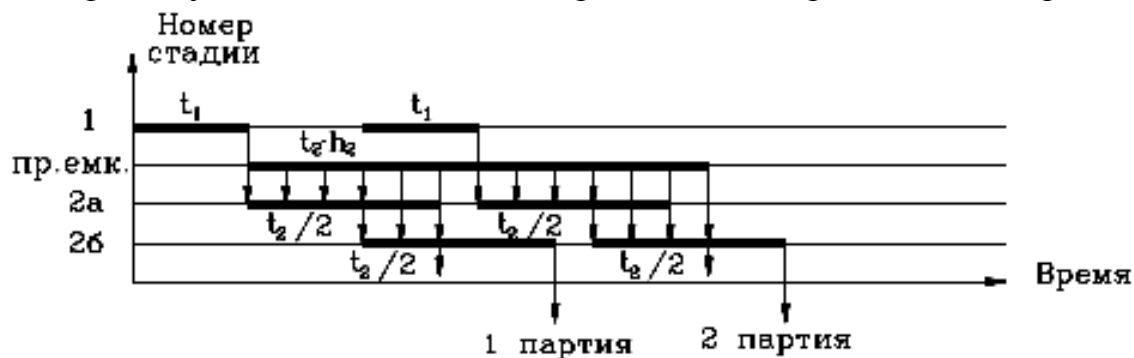
б) без промежуточной емкости, аппараты стадии 2 работают синхронно:



в) с промежуточной емкостью, аппараты стадии 2 работают со сдвигом:

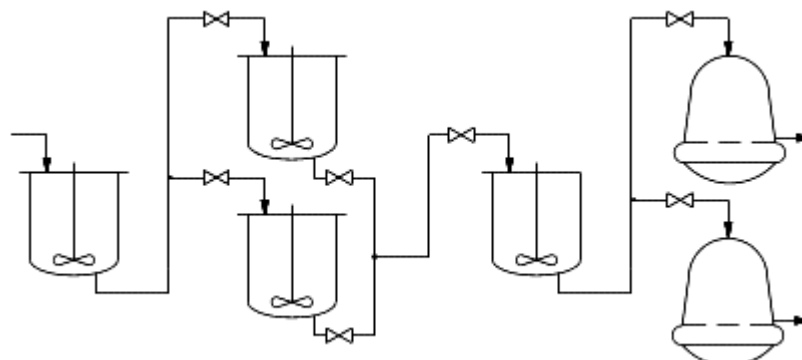


г) с промежуточной емкостью, аппараты стадии 2 работают синхронно:



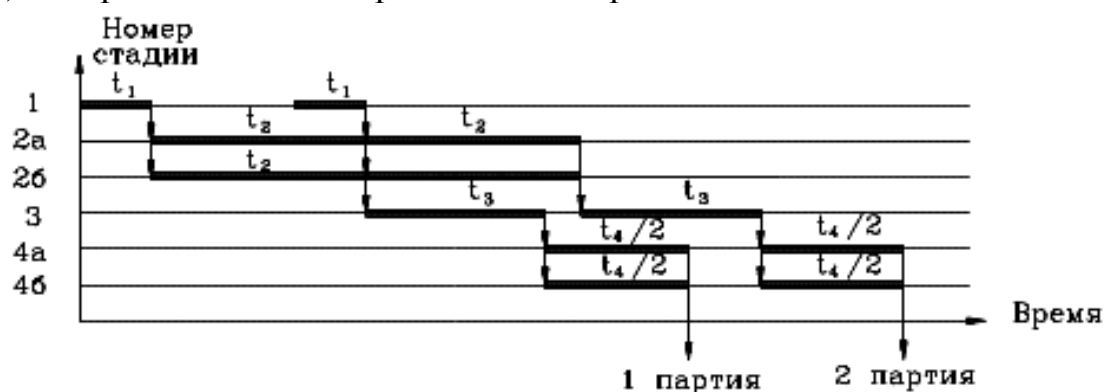
Приложение Б. Определение характеристик режима функционирования индивидуальных ТС

Пример 1. Объем выпуска продукта $Q = 36$ т, период выпуска $T = 2400$ ч.
Структура ТС:



Ст. 1: $t_1=2$ ч Ст. 2: $t_2=6$ ч Ст. 3: $t_3=5$ ч Ст. 4: $t_4=8$ ч

а) аппараты ст. 2 и ст. 4 работают синхронно:



$$p_1 = 2 \text{ ч}, p_2 = 6 \text{ ч}, p_3 = 5 \text{ ч}, p_4 = t_4/n_4 = 4 \text{ ч} \rightarrow T_{\text{ц}} = p_2 = 6 \text{ ч};$$

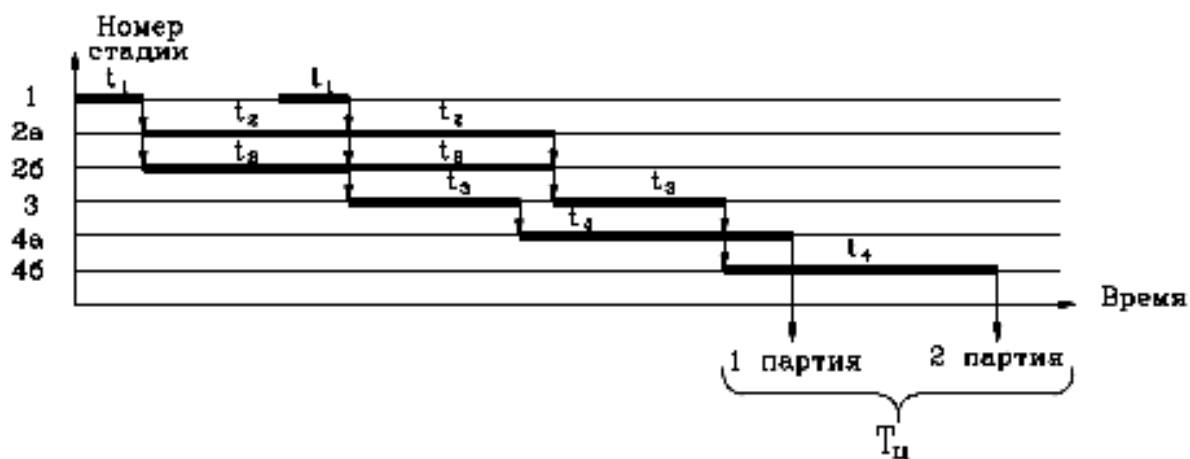
$$e_1 = p_1/T_{\text{ц}} = 0.33, e_2 = p_2/T_{\text{ц}} = 1, e_3 = p_3/T_{\text{ц}} = 0.83, e_4 = p_4/T_{\text{ц}} = 0.67 \rightarrow$$

$$E = (0.33 + 1 + 0.83 + 0.67)/4 = 0.71;$$

$$b = 1 + \left(T - \sum_j p_j \right) / T_{\text{ц}} = [2400 - (2 + 4 + 5 + 4)] / 6 \approx 398;$$

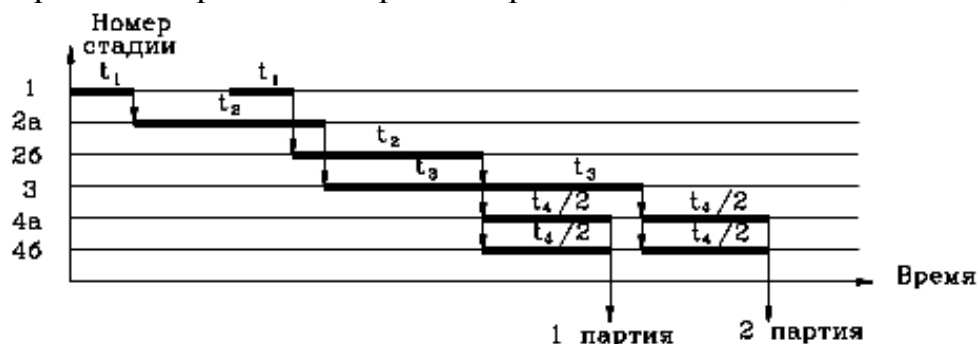
$$w = Q/b = 36000/398 \approx 90 \text{ кг.}$$

б) аппараты ст. 2 работают синхронно, ст. 4 – с равномерным запаздыванием:



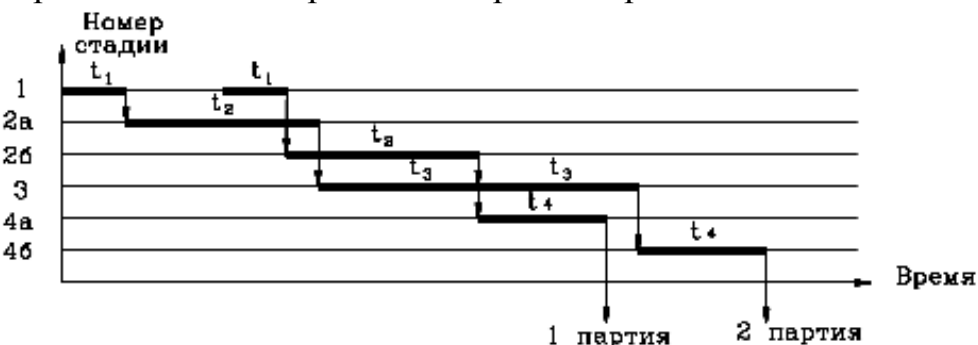
$p_1 = 2$ ч, $p_2 = 6$ ч, $p_3 = 5$ ч, $p_4 = t_4/n_4 = 4$ ч $\rightarrow T_{ц} = p_2 = 6$ ч, $E = (0.33+1+0.83+0.67)/4 = 0.71$;
 $b = 1 + [2400 - (2 + 4 + 5 + 8)]/6 \approx 397$, $w = 36000/397 \approx 91$ кг.

в) аппараты ст. 2 работают с равномерным запаздыванием, ст. 4 - синхронно:



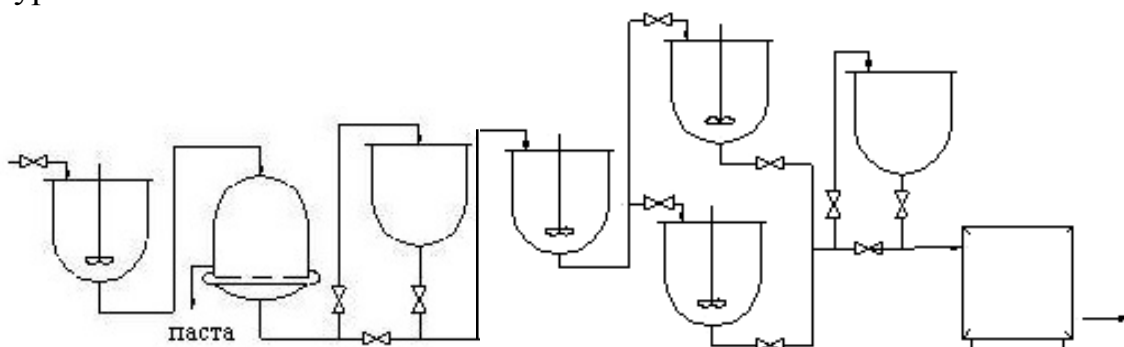
$p_1 = 2$ ч, $p_2 = t_2/n_2 = 3$ ч, $p_3 = 5$ ч, $p_4 = t_4/n_4 = 4$ ч $\rightarrow T_{ц} = p_3 = 5$ ч;
 $E = (0.4 + 0.6 + 1 + 0.8)/4 = 0.7$;
 $b = 1 + [2400 - (2 + 6 + 5 + 4)]/5 \approx 478$, $w = 36000/478 \approx 78$ кг.

г) аппараты ст. 2 и ст. 4 работают с равномерным запаздыванием:



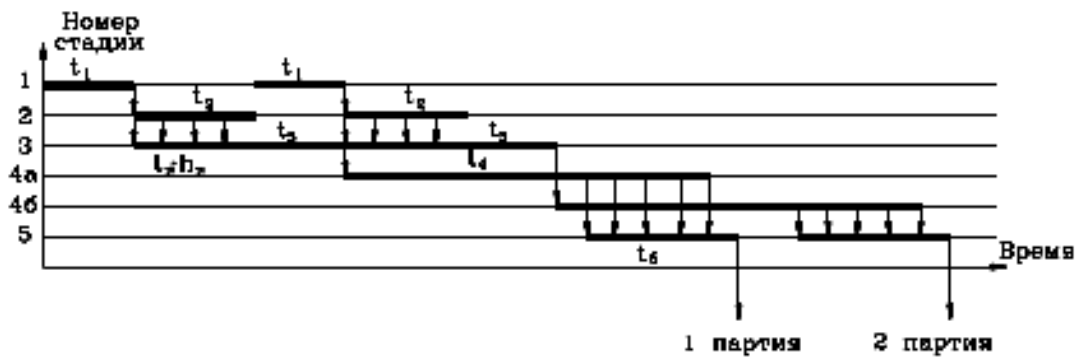
$p_1 = 2$ ч, $p_2 = t_2/n_2 = 3$ ч, $p_3 = 5$ ч, $p_4 = t_4/n_4 = 4$ ч $\rightarrow T_{ц} = 5$ ч, $E = (0.4+0.6+1+0.8)/4 = 0.7$;
 $b = 1 + [2400 - (2 + 6 + 5 + 8)]/5 \approx 477$, $w = 36000/477 \approx 79$ кг.

Пример 2. Объем выпуска продукта $Q=100$ т, период выпуска $T=2400$ ч.
 Структура ТС:



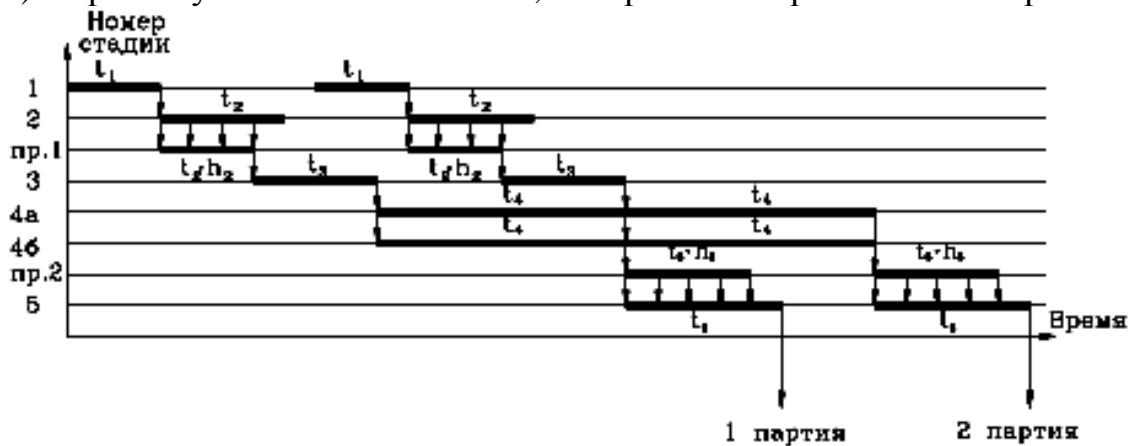
Ст.1: $t_1=3$ ч; Ст.2: $t_2=4$ ч; Пр. емк.1; Ст.3: $t_3=4$ ч; Ст.4: $t_4=8$ ч; Пр. емк.2; Ст.5: $t_5=5$ ч.
 $h_2=0.75$ $h_5=0.8$

а) без промежуточных емкостей, аппараты ст. 4 работают с равномерным запаздыванием:



$p_1 = 3$ ч, $p_2 = 4$ ч, $p_3 = t_3 + t_2 \cdot h_2 = 4 + 3 = 7$ ч, $p_4 = (t_4 + t_5 \cdot h_5) / n_4 = (8 + 4) / 2 = 6$ ч, $p_5 = 5$ ч $\rightarrow T_{ц} = 7$ ч;
 $E = (3/7 + 4/7 + 7/7 + 6/7 + 5/7) / 5 = (0.43 + 0.57 + 1 + 0.86 + 0.71) / 5 = 0.71$;
 $b = 1 + [2400 - (3 + 4 + 4 + 8 + 5)] / 7 \approx 478$, $w = 100000 / 478 \approx 209$ кг.

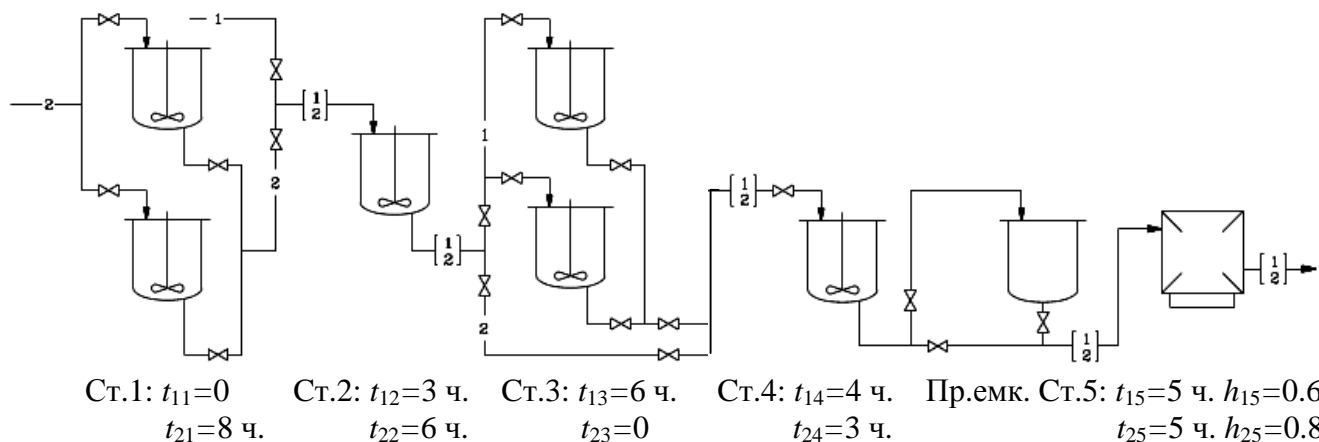
б) с промежуточными емкостями, аппараты ст. 4 работают синхронно:



$p_1 = 3$ ч, $p_2 = 4$ ч, $p_{п1} = t_2 \cdot h_2 = 3$ ч, $p_3 = 4$ ч, $p_4 = 8$ ч, $p_{п2} = t_5 \cdot h_5 = 4$ ч, $p_5 = 5$ ч $\rightarrow T_{ц} = 8$ ч;
 $E = (3/8 + 4/8 + 3/8 + 4/8 + 8/8 + 4/8 + 5/8) / 7 = 3.875 / 7 = 0.553$;
 $b = 1 + [2400 - (3 + 4 + 4 + 8 + 5)] / 8 \approx 418$, $w = 100000 / 418 \approx 240$ кг.

Приложение В. Определение характеристик режима функционирования совмещенных ТС

Пример. Система выпускает два продукта: $Q_1=50$ т, $Q_2=80$ т:



Определить возможные режимы производства каждого продукта, выбрать два различных способа функционирования ТС, подобрать для каждого из них значения числа выпускаемых партий b_1 и b_2 , обеспечивающие выполнение условия $T_1 + T_2 \leq T = 5000$ ч.

Режимы функционирования ТС при выпуске 1-го продукта:

1) без промежуточной емкости, аппараты стадии 3 синхронно обрабатывают равные доли партий материалов: $T_{ц1}=p_{14}=t_{14}+h_{15} \cdot t_{15}=7$ ч.

2) без промежуточной емкости, аппараты стадии 3 поочередно обрабатывают партии материалов целиком: $T_{ц1}=p_{14}=t_{14}+h_{15} \cdot t_{15}=7$ ч.

3) с промежуточной емкостью, аппараты стадии 3 синхронно обрабатывают равные доли партий материалов: $T_{ц1}=p_{13}=t_{13}=6$ ч.

4) с промежуточной емкостью, аппараты стадии 3 поочередно обрабатывают партии материалов целиком: $T_{ц1}=p_{15}=t_{15}=5$ ч.

Режимы функционирования ТС при выпуске 2-го продукта:

1) без промежуточной емкости, аппараты стадии 1 синхронно обрабатывают равные доли партий материалов: $T_{ц2}=p_{21}=t_{21}=8$ ч.

2) без промежуточной емкости, аппараты стадии 1 поочередно обрабатывают партии материалов целиком: $T_{ц2}=p_{24}=t_{24}+h_{25} \cdot t_{25}=7$ ч.

3) с промежуточной емкостью, аппараты стадии 1 синхронно обрабатывают равные доли партий материалов: $T_{ц2}=p_{21}=t_{21}=8$ ч.

4) с промежуточной емкостью, аппараты стадии 1 поочередно обрабатывают партии материалов целиком: $T_{ц2}=p_{22}=t_{22}=6$ ч.

Как видно, возможны восемь различных способов функционирования ТС. Рассмотрим следующие два.

1. Режим 2) для 1-го и режим 1) для 2-го продукта:

$$T_{ц1}=7 \text{ ч.} \rightarrow T_1 = \sum_j t_{1j} + (b_1 - 1) \cdot T_{ц1} = 18 + (b_1 - 1) \cdot 7 = 11 + 7 \cdot b_1;$$

$$T_{ц} = 8 \text{ ч.} \rightarrow T_2 = \sum_j t_{2j} + (b_2 - 1) \cdot T_{ц2} = 22 + (b_1 - 1) \cdot 8 = 14 + 8 \cdot b_2.$$

Значения b_1 и b_2 надо подобрать так, чтобы размеры партий продуктов были близкими (их можно было бы обрабатывать в одних и тех же аппаратах):

Пусть $b_1 = 250$, тогда $w_1 = Q_1/b_1 = 50000/250 = 200$ кг и $T_1 = 11 + 250 \cdot 7 = 1761$ ч.
 $T_2 = T - T_1 = 5000 - 1761 = 3239$ ч. = $14 + 8 \cdot b_2$, т.е. $b_2 = 3225/8 = 403$, $w_2 = 80000/403 = 198.5$ кг.

Эффективность использования оборудования:

$$e_{11} = 0, e_{12} = 3/7 = 0.43, e_{13} = 3/7 = 0.43, e_{14} = 1, e_{15} = 5/7 = 0.7 \rightarrow E_1 = 2.56/5 = 0.51;$$

$$e_{21} = 1, e_{22} = 6/8 = 0.75, e_{23} = 0, e_{24} = 7/8 = 0.87, e_{25} = 5/8 = 0.63 \rightarrow E_2 = 3.25/5 = 0.65;$$

$$E = (E_1 \cdot T_1 + E_2 \cdot T_2) / T = (0.51 \cdot 1761 + 0.65 \cdot 3239) / 5000 = 0.6.$$

2. Режим 4) для 1-го и режим 4) для 2-го продукта:

$$T_{ц1} = 5 \text{ ч.} \rightarrow T_1 = \sum_j t_{1j} + (b_1 - 1) \cdot T_{ц1} = 18 + (b_1 - 1) \cdot 5 = 13 + 5 \cdot b_1.$$

$$T_{ц2} = 6 \text{ ч.} \rightarrow T_2 = \sum_j t_{2j} + (b_2 - 1) \cdot T_{ц2} = 22 + (b_1 - 1) \cdot 6 = 16 + 6 \cdot b_2.$$

Пусть $b_1 = 350$, тогда $w_1 = Q_1/b_1 = 50000/350 = 142.8$ кг и $T_1 = 13 + 350 \cdot 5 = 1763$ ч.
 $T_2 = T - T_1 = 5000 - 1763 = 3237$ ч. = $16 + 6 \cdot b_2$, т.е. $b_2 = 3221/6 = 537$, $w_2 = 80000/537 = 149$ кг.

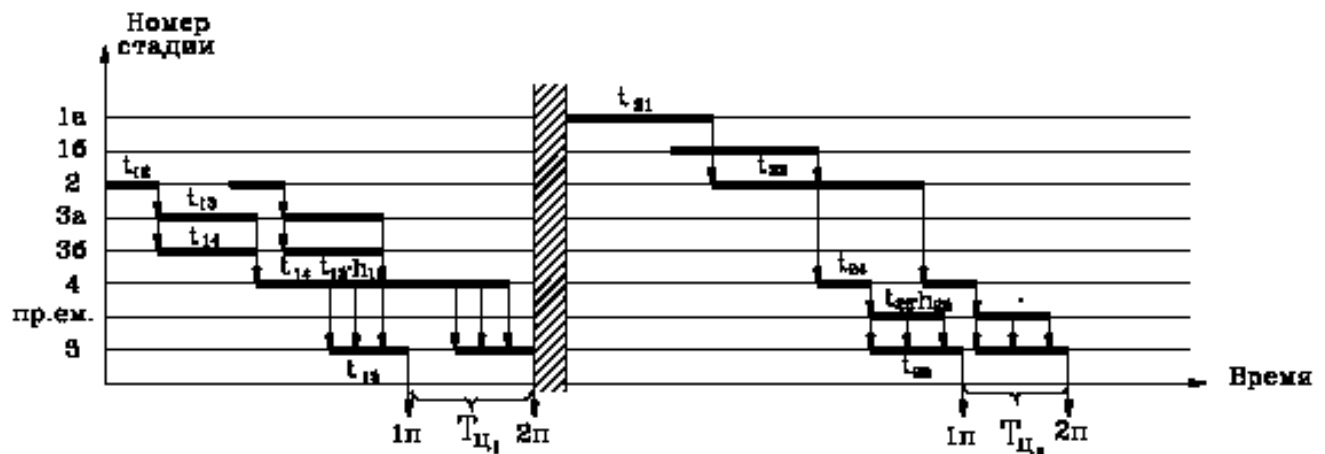
Эффективность использования оборудования:

$$e_{11} = 0, e_{12} = 3/5 = 0.6, e_{13} = 3/5 = 0.6, e_{14} = 4/5 = 0.8, e_{1п} = 3/5 = 0.6, e_{15} = 1 \rightarrow E_1 = 3.6/6 = 0.6;$$

$$e_{21} = 4/6 = 0.67, e_{22} = 1, e_{23} = 0, e_{24} = 3/6 = 0.5, e_{2п} = 4/6 = 0.67, e_{25} = 5/6 = 0.83 \rightarrow E_2 = 3.67/6 = 0.61;$$

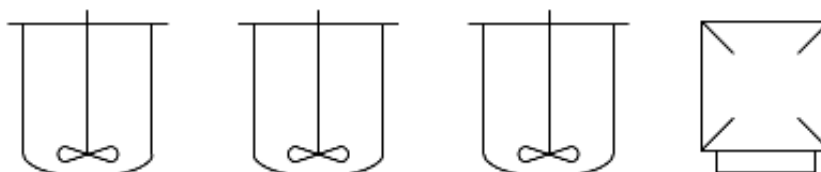
$$E = (E_1 \cdot T_1 + E_2 \cdot T_2) / T = (0.6 \cdot 1763 + 0.61 \cdot 3237) / 5000 = 0.606.$$

Первый вариант предпочтительнее с точки зрения количества аппаратуры, второй – с точки зрения размеров аппаратов и эффективности их использования.
 График Гантта для режима 1) по 1-му и режима 4) по 2-му продукту:



Приложение Г. Определение аппаратного оформления индивидуальных ТС

Пример 1. Определить АО ТС, если $Q=100$ т, $T=500$ ч.:



Ст. 1: $g_1=5$ м ³ /т $t_1=2$ ч $\varphi_{1*}=0.25$ $\varphi_1=0.85$	Ст. 2: $g_2=7.5$ м ³ /т $t_2=6$ ч $\varphi_{2*}=0.3$ $\varphi_2=0.8$	Ст. 3: $g_3=9$ м ³ /т $t_3=4$ ч $\varphi_{3*}=0.4$ $\varphi_3=0.7$	Ст. 4: $v_4=3$ м ³ /т $m_4=2000$ кг/т $\delta_4=0.025$ м $a_4=3.3$ кг/м ² ч $h_4=0.8$
--	--	--	---

Доступные емкостные аппараты (м³): 0.1; 0.25; 0.4; 0.63; 1; 1.6; 2.5; 3.2; 5; 6.3; 10; 16.
Доступные фильтр-прессы (м²): 50; 63; 80; 100; 112; 140.

Фиксируем $n_1=n_2=n_3=n_4=1$. Расчет значения t_4 :

$$t_4 = \frac{m_4 \cdot \delta_4}{v_4 \cdot a_4} = \frac{2000 \cdot 0.025}{3 \cdot 3.3} = 5 \text{ ч.} \rightarrow T_{\text{ц}} = p_3 = t_3 + t_4 \cdot h_4 = 4 + 5 \cdot 0.8 = 8 \text{ ч.,}$$

$$b = \frac{T - \sum_j t_j}{T_{\text{ц}}} + 1 = \frac{500 - 17}{8} + 1 \approx 61 \rightarrow w = Q/b = 100/61 = 1.64 \text{ т.}$$

Реальные загрузки аппаратов: $g_1 \cdot w = 8.2$ м³, $g_2 \cdot w = 12.3$ м³, $g_3 \cdot w = 14.75$ м³, $v_4 \cdot w = 4.9$ м³.

$$\text{Тогда: } \frac{8.2}{0.85} = 9.647 \leq V_1 \leq 32.8 = \frac{8.2}{0.25} \rightarrow V_1 = 10 \text{ м}^3;$$

$$\frac{12.3}{0.8} = 15.4 \leq V_2 \leq 41.0 = \frac{12.3}{0.3} \rightarrow V_2 = 16 \text{ м}^3;$$

$$\frac{14.75}{0.7} = 21.07 \leq V_3 \leq 36.875 = \frac{14.75}{0.4} \rightarrow \text{на лимитирующей стадии (ст.3) не-}$$

обходимо увеличить число аппаратов, такой же эффект даст введение промежуточной емкости между ст. 3 и ст. 4:

$$t_{\text{п}} = t_4 \cdot h_4 = 4 \text{ ч., } \varphi_{\text{п}*} = 0.15, \varphi_{\text{п}}^* = 0.9 \rightarrow T_{\text{п}} = t_2 = 6 \text{ ч, } b = 1 + (500 - 17)/6 \approx 81, w = 100/81 = 1.23 \text{ т.}$$

Загрузки аппаратов: 6.15 м³, 7.5 м³, 11.07 м³, 3.7 м³, т.е.

$$7.235 \leq V_1 \leq 24.6 \rightarrow V_1 = 10 \text{ м}^3;$$

$$11.5 \leq V_2 \leq 30.7 \rightarrow V_2 = 16 \text{ м}^3;$$

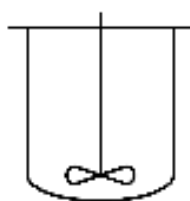
$$15.59 \leq V_3 \leq 27.7 \rightarrow V_3 = 16 \text{ м}^3;$$

$$\frac{11.07}{0.9} = 12.3 \leq V_{\text{п}} \leq 73.8 = \frac{11.07}{0.15} \rightarrow V_{\text{п}} = 16 \text{ м}^3;$$

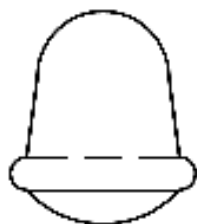
$$V_4 \geq \frac{v_4 \cdot w}{\delta_4} = \frac{3.7}{0.025} = 148 \text{ м}^2 \rightarrow V_4 = 80 \text{ м}^2, n_4 = 2 \text{ (включаются последовательно).}$$

Полученный вариант АО ТС: $n_1=1$; $n_2=1$; $n_3=1$; $n_{\text{п}}=1$; $n_4=2$;
 $V_1=10$ м³; $V_2=16$ м³; $V_3=16$ м³; $V_{\text{п}}=16$ м³; $V_4=80$ м².

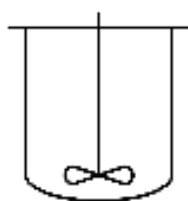
Пример 2. Определить АО ТС, если $Q=50$ т, $T=1000$ ч.:



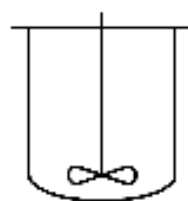
Ст. 1: $g_1=3$ м³/т
 $t_1=4$ ч
 $\varphi_{1*}=0.3$
 $\varphi_{1*}^*=0.75$



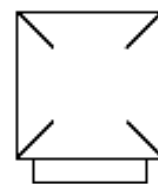
Ст. 2: $g_2=2.5$ м³/т
 $a_2=0.1$ м³/м²ч
 $h_2=0.9$



Ст. 3: $g_3=4.5$ м³/т
 $t_3=3$ ч
 $\varphi_{3*}=0.3$
 $\varphi_{3*}^*=0.8$



Ст. 4: $g_4=6$ м³/т
 $t_4=4$ ч
 $\varphi_{4*}=0.4$
 $\varphi_{4*}^*=0.7$



Ст. 5: $v_5=2.5$ м³/т
 $m_5=1500$ кг/т
 $\delta_5=0.02$ м
 $a_5=2$ кг/м²ч
 $h_5=0.67$

Доступные емкостные аппараты (м³): 0.1; 0.25; 0.4; 0.63; 1; 1.6; 2.5; 3.2; 5; 6.3; 10; 16.

Доступные фильтр-прессы (м²): 12, 16, 24, 36, 54.

Доступные друк-фильтры (м²): 0.2; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6.

Фиксируем: $n_1=n_2=n_3=n_4=1$.

Расчет значения t_5 :

$$t_5 = \frac{m_5 \cdot \delta_5}{v_5 \cdot a_5} = \frac{1500 \cdot 0.02}{2.5 \cdot 2} = 6 \text{ ч.} \rightarrow T_{\text{ц}} = t_4 + t_5 \cdot h_5 = 4 + 6 \cdot 0.67 = 8 \text{ ч.,}$$

$$b = \frac{T - \sum_j t_j}{T_{\text{ц}}} + 1 = \frac{1000 - 17}{8} + 1 \approx 124 \rightarrow w = Q/b = 50/124 = 0.4 \text{ т.}$$

Реальные загрузки аппаратов: $g_1 \cdot w = 1.2$ м³, $g_2 \cdot w = 1$ м³, $g_3 \cdot w = 1.8$ м³, $g_4 \cdot w = 2.4$ м³, $v_5 \cdot w = 1$ м³.

Тогда: $\frac{1.2}{0.75} = 1.6 \leq V_1 \leq 4.0 = \frac{1.2}{0.3} \rightarrow V_1 = 1.6$ м³;

$$V_2 \geq \frac{g_2 \cdot w}{a_2 \cdot (T_{\text{ц}} - t_3) / h_2} = \frac{1}{0.1 \cdot (8 - 3) / 0.9} = 1.8 \text{ м}^2 > 1.6 \rightarrow \text{необходимо ввести}$$

между ст. 2 и ст. 3 промежуточную емкость (сборник фильтрата), тогда:

$$V_2 \geq \frac{g_2 \cdot w}{a_2 \cdot T_{\text{ц}}} = \frac{1}{0.1 \cdot 8} = 1.25 \text{ м}^2 \rightarrow V_2 = 1.6 \text{ м}^2, t_2 = 1 / (0.1 \cdot 1.6) = 6.25 \text{ ч.};$$

если $\varphi_{\text{п}*}=0.2$, $\varphi_{\text{п}*}^*=0.8$, то $\frac{1}{0.8} = 1.25 \leq V_{\text{п}} \leq 5 = \frac{1}{0.2} \rightarrow V_{\text{п}} = 1.6$ м³;

$$\frac{1.8}{0.8} = 2.25 \leq V_3 \leq 6.0 = \frac{1.8}{0.3} \rightarrow V_3 = 2.5 \text{ м}^3;$$

$$\frac{2.4}{0.7} = 3.43 \leq V_4 \leq 6.0 = \frac{2.4}{0.4} \rightarrow V_4 = 5 \text{ м}^3;$$

$$V_5 \geq \frac{v_5 \cdot w}{\delta_5} = \frac{1}{0.02} = 50 \text{ м}^2 \rightarrow V_5 = 54 \text{ м}^2$$

1-й вариант АО ТС: $n_1=1$, $n_2=1$, $n_{\text{п}}=1$, $n_3=1$, $n_4=1$, $n_5=1$.

$$V_1=1.6 \text{ м}^3, V_2=1.6 \text{ м}^2, V_{\text{п}}=1.6 \text{ м}^3, V_3=2.5 \text{ м}^3, V_4=5 \text{ м}^3, V_5=54 \text{ м}^2.$$

Для устранения емкости необходимо:

$$T_{\text{ц}} \geq t_3 + t_2 \cdot h_2 = 3 + 5.63 = 8.63 \text{ ч., примем } T_{\text{ц}} = 10 \text{ ч.,}$$

$$b = \frac{1000 - 23.25}{10} + 1 \approx 99 \rightarrow w = Q/b = 50/99 \approx 0.5 \text{ т.}$$

Загрузки аппаратов: 1.5 м^3 , 1.25 м^3 , 2.25 м^3 , 3 м^3 , 1.25 м^3 .

Тогда: $2.0 \leq V_1 \leq 5.0 \rightarrow V_1 = 2.5 \text{ м}^3$;

$$V_2 \geq \frac{g_2 \cdot w}{a_2 \cdot (T_{\text{н}} - t_3)/h_2} = \frac{1.25}{0.1 \cdot (10 - 3)/0.9} = 1.6 \text{ м}^2 \rightarrow V_2 = 1.6 \text{ м}^2,$$

$t_2 = 1.25/(0.1 \cdot 1.6) = 7.8 \text{ ч.}$;

$2.813 \leq V_3 \leq 7.5 \rightarrow V_3 = 3.2 \text{ м}^3$;

$4.276 \leq V_4 \leq 7.5 \rightarrow V_4 = 5 \text{ м}^3$;

$V_5 \geq \frac{1.25}{0.02} = 62.5 \text{ м}^2 \rightarrow V_5 = 36 \text{ м}^2, n_5 = 2$ (включаются последовательно).

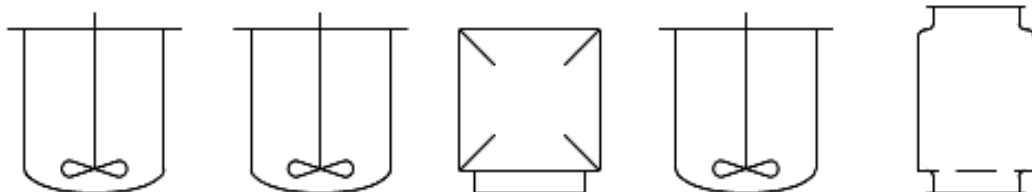
Проверка значения $T_{\text{н}}$: $t_3 + t_2 \cdot h_2 = 3 + 7.8 \cdot 0.9 = 10 \text{ ч.}$

2-й вариант АО ТС: $n_1=1, n_2=1, n_3=1, n_4=1, n_5=2$
 $V_1=2.5 \text{ м}^3, V_2=1.6 \text{ м}^2, V_3=3.2 \text{ м}^3, V_4=5 \text{ м}^3, V_5=36 \text{ м}^2$.

Стоимость оборудования 2-го варианта превышает стоимость оборудования 1-го варианта.

Приложение Д. Определение аппаратного оформления совмещенной ТС

Пример. Определить размеры и число аппаратов, необходимые для выпуска двух продуктов, если $Q_1=40$ т, $Q_2=60$ т, $T=1000$ ч.:



Ст. 1: $g_{11}=2.5$ м ³ /Т	Ст. 2: $g_{12}=4.5$ м ³ /Т	Ст. 3: $v_{13}=2$ м ³ /Т	Ст. 4: $g_{14}=3.5$ м ³ /Т	Ст. 5: $g_{15}=1100$ кг/Т
$t_{11}=3$ ч.	$t_{12}=5$ ч.	$m_{13}=1500$ кг/Т	$t_{14}=2$ ч.	$a_{15}=5$ кг/м ³ ч
$g_{21}=4$ м ³ /Т	$g_{22}=6.5$ м ³ /Т	$a_{13}=4.5$ кг/м ² ч	$g_{24}=5$ м ³ /Т	$h_{15}=0.9$
$t_{21}=2$ ч.	$t_{22}=6$ ч.	$h_{13}=0.8$	$t_{24}=3$ ч.	$g_{25}=1200$ кг/Т
$\phi_{1*}=0.3$	$\phi_{2*}=0.35$	$v_{23}=4.5$ м ³ /Т	$\phi_{4*}=0.4$	$a_{25}=6$ кг/м ² ч
$\phi_1^*=0.8$	$\phi_2^*=0.75$	$m_{23}=2000$ кг/Т	$\phi_4^*=0.8$	$h_{25}=0.9$
		$a_{23}=2$ кг/м ² ч		
		$h_{23}=0.7$		
		$\delta_3=0.02$ м		

Доступные емкостные аппараты: 0.1; 0.25; 0.4; 0.63; 1; 1.6; 2.5; 3.2; 5; 6.3; 10; 16; 25; 32; 50 м³; доступные фильтр-прессы: 40, 50, 63, 80, 100, 112, 140, 220 м²; доступные сушилки СИН: 4.6; 20; 40 м³.

$$t_{13} = \frac{m_{13} \cdot \delta_3}{a_{13} \cdot v_{13}} = \frac{1500 \cdot 0.02}{4.5 \cdot 2} = 3.3 \text{ ч.} \quad t_{23} = \frac{2000 \cdot 0.02}{4.5 \cdot 2} = 4.4 \text{ ч.}$$

Принимаем: $n_j = 1, j = 1, \dots, 5$.

При непосредственном взаимодействии аппаратов ст. 2 и ст. 3:

$$p_{12} = t_{12} + t_{13} \cdot h_{13} = 5 + 3.3 \cdot 0.8 = 7.6 \text{ ч.} \rightarrow T_{ц1} = 7.6 \text{ ч.}$$

$$p_{22} = t_{22} + t_{23} \cdot h_{23} = 6 + 4.4 \cdot 0.7 = 9.1 \text{ ч.} \rightarrow T_{ц2} = 9.1 \text{ ч.}$$

Примем значения продолжительностей выпуска продуктов пропорциональными объемам их выпуска: $T_1 = Q_1 \cdot T / (Q_1 + Q_2) = 40 \cdot 1000 / 100 = 400$ ч.

$$T_2 = T - T_1 = 1000 - 400 = 600 \text{ ч.}$$

$$b_1 = \frac{T_1 - \sum_j t_{1j}}{T_{ц1}} + 1 = \frac{400 - 13.3}{7.6} + 1 \approx 52, \quad b_2 = \frac{600 - 15.4}{9.1} + 1 \approx 65.$$

$$w_1 = Q_1 / b_1 = 40 / 52 = 0.77 \text{ т.}, \quad w_2 = Q_2 / b_2 = 60 / 65 = 0.923 \text{ т.}$$

Загрузки аппаратов: 1.95 м³, 3.465 м³, 1.54 м³, 2.695 м³, 847 кг
3.692 м³, 5.999 м³, 4.15 м³, 4.615 м³, 1015 кг

Выбор размеров аппаратов:

$$\text{емкостных} - \max_i \left\{ \frac{g_{ij} \cdot w_i}{\phi_j^*} \right\} \leq V_j \leq \min_i \left\{ \frac{g_{ij} \cdot w_i}{\phi_{j*}} \right\}, \text{ т.е}$$

$$\max \left\{ \frac{1.95}{0.8}, \frac{3.692}{0.8} \right\} \leq V_1 \leq \min \left\{ \frac{1.95}{0.3}, \frac{3.692}{0.3} \right\} \rightarrow 4.615 \leq V_1 \leq 6.500 \rightarrow V_1 = 5 \text{ м}^3;$$

$$\max \left\{ \frac{3.465}{0.75}, \frac{5.999}{0.75} \right\} \leq V_2 \leq \min \left\{ \frac{3.465}{0.35}, \frac{5.999}{0.35} \right\} \rightarrow 7.998 \leq V_2 \leq 10 \rightarrow V_2 = 10 \text{ м}^3;$$

$$\max\left\{\frac{2.695}{0.8}, \frac{4.615}{0.8}\right\} \leq V_4 \leq \min\left\{\frac{2.695}{0.4}, \frac{4.615}{0.4}\right\} \rightarrow 5.678 \leq V_4 \leq 6.737 \rightarrow V_4 = 6.3 \text{ м}^3;$$

$$\text{фильтр-прессов} - V_j \geq \max_i \left\{ \frac{v_{ij} \cdot w_i}{\delta_j} \right\}, \text{ т.е.}$$

$$V_3 \geq \max\left\{\frac{1.54}{0.02}, \frac{4.15}{0.02}\right\} \rightarrow V_3 \geq 207.5 \rightarrow V_3 = 220 \text{ м}^2;$$

$$\text{сушилок СИН} - V_j \geq \max_i \left\{ \frac{g_{ij} \cdot w_i}{a_{ij} \cdot t_{ij}^*} \right\}, \text{ т.е.}$$

$$t_{15}^* = \frac{T_{\text{н1}} - t_{14}}{h_{15}} = \frac{7.6 - 2}{0.9} = 6.2 \text{ ч. } t_{25}^* = \frac{9.1 - 3}{0.9} = 6.8 \text{ ч.}$$

$$V_5 \geq \max\left\{\frac{847}{5 \cdot 6.2}, \frac{1015}{6 \cdot 6.8}\right\} \rightarrow V_5 \geq 27.3 \rightarrow V_5 = 40 \text{ м}^3.$$

Максимально допустимые значения размеров партий продуктов при выбранном аппаратурном оформлении ТС:

$$\text{для стадий с емкостным оборудованием} - \max_j \left\{ \frac{\phi_{j^*} \cdot V_j}{g_{ij}} \right\} \leq w_i \leq \min_j \left\{ \frac{\phi_j^* \cdot V_j}{g_{ij}} \right\},$$

$$\text{для стадий, оснащенных фильтр-прессами} - w_i \leq \min_j \left\{ \frac{\delta_j \cdot V_j}{v_{ij}} \right\},$$

$$\text{для стадий, оснащенных сушилками СИН} - w_i \leq \min_j \left\{ \frac{a_{ij} \cdot t_{ij} \cdot V_j}{g_{ij}} \right\}.$$

$$\text{По первому продукту} - \max\left\{\frac{5 \cdot 0.3}{2.5}, \frac{10 \cdot 0.35}{4.5}, \frac{6.3 \cdot 0.4}{3.5}\right\} = \max\{0.6, 0.78, 0.72\} = 0.78 \text{ т,}$$

$$\min\left\{\frac{5 \cdot 0.8}{2.5}, \frac{10 \cdot 0.75}{4.5}, \frac{140 \cdot 0.02}{3}, \frac{6.3 \cdot 0.8}{3.5}, \frac{40 \cdot 5 \cdot 4.2}{1100}\right\} = \min\{1.6, 1.67, 1.4, 1.44, 1.075\} = 1.075 \text{ т:}$$

значение w_1 может быть увеличено до 1.075 т. $\rightarrow b_1 = 40/1.075 \approx 38$,

$T_1 = 17.5 + 38 \cdot 7.6 = 306.3$ ч., т.е. имеется запас производительности $400 - 306.3 = 93.7$ ч., можно дополнительно выпустить 12 партий или 12.8 т продукта;

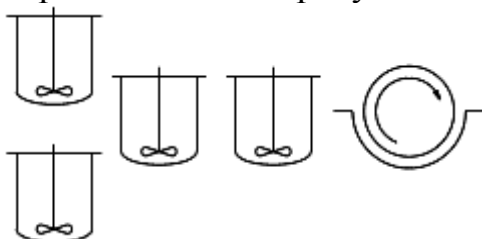
$$\text{По второму продукту} - \max\left\{\frac{5 \cdot 0.3}{4}, \frac{10 \cdot 0.35}{6.5}, \frac{6.3 \cdot 0.4}{5}\right\} = \max\{0.375, 0.538, 0.504\} = 0.504 \text{ т,}$$

$$\min\left\{\frac{5 \cdot 0.8}{4}, \frac{10 \cdot 0.75}{6.5}, \frac{140 \cdot 0.02}{3}, \frac{6.3 \cdot 0.8}{5}, \frac{40 \cdot 6 \cdot 4.3}{1200}\right\} = \min\{1, 1.15, 0.925, 1.01, 1.34\} = 0.925 \text{ т:}$$

резерва по 2-му продукту практически нет.

Приложение Е. Размещение новых продуктов на оборудовании действующей ТС

Пример 1: разместить процесс синтеза продукта на ТС при $Q = 50$ т, $T \leq 550$ ч.



<i>Cm. 1</i>	<i>Cm. 2</i>	<i>Cm. 3</i>	<i>Cm. 4 (БВФ)</i>
$n_1 = 2$	$n_2 = 1$	$n_3 = 1$	$n_4 = 1$
$V_1 = 1.6 \text{ м}^3$	$V_2 = 3.2 \text{ м}^3$	$V_3 = 5 \text{ м}^3$	$V_4 = 40 \text{ м}^2$
$g_1 = 2.5 \text{ м}^3/\text{т}$	$g_2 = 4 \text{ м}^3/\text{т}$	$g_3 = 6.5 \text{ м}^3/\text{т}$	$g_4 = 1500 \text{ кг/т}$
$t_1 = 6 \text{ ч}$	$t_2 = 4 \text{ ч}$	$t_3 = 2 \text{ ч}$	$a_4 = 7.5 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$
$\varphi_{1*} = 0.3$ $\varphi_{1*} = 0.8$	$\varphi_{2*} = 0.35$ $\varphi_{2*} = 0.75$	$\varphi_{3*} = 0.4$ $\varphi_{3*} = 0.7$	$h_4 = 1$

Предположим, что аппараты стадии 1 поочередно принимают партии продукта целиком, тогда: $p_1 = t_1/2 = 3$ ч., $p_2 = t_2$, $p_3 = t_3 \rightarrow T_{ц} = p_2 = 4$ ч.

Поскольку промежуточная емкость между ст. 3 и ст. 4 отсутствует, максимально допустимая продолжительность фильтрования $t_4^* = T_{ц} - t_3 = 2$ ч.

Максимально допустимый размер партии продукта:

$$w^* = \min \left\{ \min_{x_j=0} \left[\frac{V_j \cdot \varphi_j^*}{g_j} \right], \min_{x_j>1} \left[\frac{V_j \cdot a_j \cdot t_j^*}{g_j} \right] \right\} = \min \left\{ \frac{1.6 \cdot 0.8}{2.5}, \frac{3.2 \cdot 0.75}{4}, \frac{5 \cdot 0.7}{6.5}, \frac{40 \cdot 7.5 \cdot 2}{1500} \right\} = 0.4 \text{ т.}$$

Минимально допустимый размер партии продукта:

$$w_* = \max_{x_j=0} \left\{ \frac{V_j \cdot \varphi_{*j}}{g_j} \right\} = \max \left\{ \frac{1.6 \cdot 0.3}{2.5}, \frac{3.2 \cdot 0.35}{4}, \frac{5 \cdot 0.4}{6.5} \right\} = 0.308 \text{ т.}$$

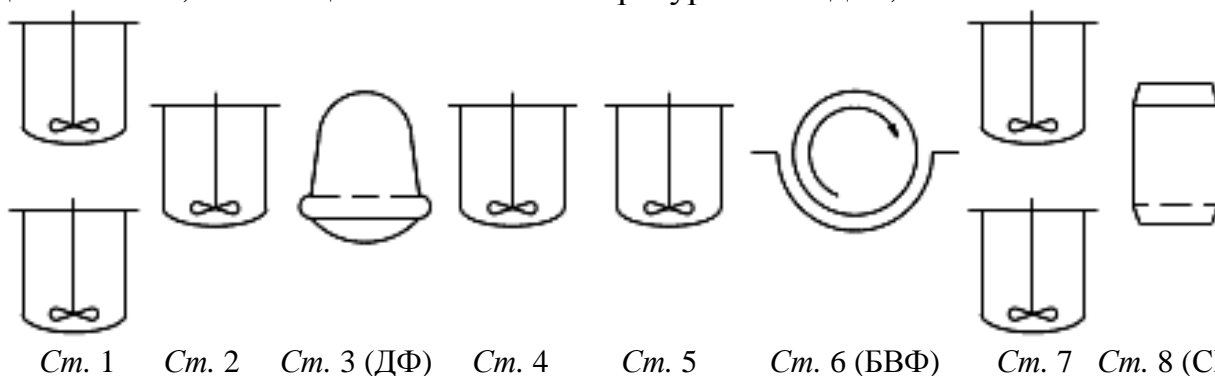
Принимаем $w = 0.4$ т, тогда

$$t_4 = (1500 \cdot 0.4) / (40 \cdot 0.75) = 2 \text{ ч}, p_3 = 2 + 2 \cdot 1 = 4 \text{ ч}, T_{ц} = 4 \text{ ч.}$$

$$b = Q/w = 50/0.4 = 125, T = 6 + 4 + 2 + 2 + (125 - 1) \cdot 4 = 510 \text{ ч.}$$

Следовательно, имеется резерв фонда рабочего времени 40 часов, т. е. дополнительно может быть выпущено 10 партий продукта (4 тонны).

Пример 2: разместить два новых продукта: $Q_1 = 50$ т, $Q_2 = 70$ т, – на оборудовании ТС, состоящей из восьми аппаратурных стадий, если $T = 1200$ ч.



Ст. 1	Ст. 2	Ст. 3	Ст. 4	Ст. 5	Ст. 6	Ст. 7	Ст. 8
$n_1 = 2$ $V_1 = 1.6 \text{ м}^3$ $g_{11} = 3.5 \text{ м}^3/\text{т}$ $t_{11} = 6 \text{ ч.}$ $0.3 \leq \varphi_1 \leq 0.8$	$n_2 = 1$ $V_2 = 5 \text{ м}^3$ $g_{22} = 4 \text{ м}^3/\text{т}$ $t_{22} = 2 \text{ ч.}$ $0.25 \leq \varphi_2 \leq 0.85$	$n_3 = 1$ $V_3 = 1.6 \text{ м}^2$ $g_{13} = 2 \text{ м}^3/\text{т}$ $a_{13} = 0.15 \text{ м}^3/\text{м}^2/\text{ч}$ $h_{13} = 0.8$	$n_4 = 1$ $V_4 = 6.3 \text{ м}^3$ $g_{24} = 5.5 \text{ м}^3/\text{т}$ $t_{24} = 5 \text{ ч.}$ $0.35 \leq \varphi_4 \leq 0.75$	$n_5 = 1$ $V_5 = 6.3 \text{ м}^3$ $g_{15} = 5 \text{ м}^3/\text{т}$ $t_{15} = 2 \text{ ч.}$ $0.3 \leq \varphi_5 \leq 0.8$	$n_6 = 1$ $V_6 = 40 \text{ м}^2$ $g_{16} = 1350 \text{ кг/т}$ $a_{16} = 10.5 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{16} = 0.95$ $g_{26} = 1500 \text{ кг/т}$ $a_{26} = 9 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{26} = 0.9$	$n_7 = 2$ $V_7 = 3.2 \text{ м}^3$ $g_{17} = 2.5 \text{ м}^3/\text{т}$ $t_{17} = 4 \text{ ч.}$ $g_{27} = 2.8 \text{ м}^3/\text{т}$ $t_{27} = 3 \text{ ч.}$ $0.4 \leq \varphi_7 \leq 0.7$	$n_8 = 1$ $V_8 = 20 \text{ м}^3$ $g_{18} = 1150 \text{ кг/т}$ $a_{18} = 6.25 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{18} = 0.9$ $g_{28} = 1120 \text{ кг/т}$ $a_{28} = 7 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$ $h_{28} = 0.95$

Выбор режима функционирования аппаратов ст. 1 и ст. 7, режима совместной работы емкостных реакторов с фильтрами и сушилкой.

$$w_{1*} = \max_{x_j=0} \left\{ \frac{V_j \cdot \varphi_{*j}}{g_{1j}} \right\} = \max \left\{ \frac{1.6 \cdot 0.3}{3.5}, \frac{6.3 \cdot 0.3}{5}, \frac{3.2 \cdot 0.4}{2.5} \right\} = \max\{0.135; 0.378; 0.512\} = 0.512 \text{ т.}$$

$$w_1^* = \min_{x_j=0} \left\{ \frac{V_j \cdot \varphi_j^*}{g_{1j}} \right\} = \min \left\{ \frac{1.6 \cdot 0.8}{3.5}, \frac{6.3 \cdot 0.8}{5}, \frac{3.2 \cdot 0.7}{2.5} \right\} = \min\{0.366; 1.01; 0.892\} = 0.366 \text{ т.}$$

Поскольку $w_{1*} > w_1^*$, аппараты ст. 1 не могут поочередно принимать партии первого продукта целиком. При синхронной обработке равных долей партий 1-го продукта ($g_{11} = 3.5/2 = 1.75 \text{ м}^3/\text{т}$) соответствующие граничные значения w_1 составят 0.27 и 0.732, следовательно, предварительно: $0.512 \leq w_1 \leq 0.732$ т.

$$w_{2*} = \max_{x_j=0} \left\{ \frac{V_j \cdot \varphi_{*j}}{g_{2j}} \right\} = \max \left\{ \frac{5 \cdot 0.25}{4}, \frac{6.3 \cdot 0.35}{5.5}, \frac{3.2 \cdot 0.4}{2.8} \right\} = \max\{0.31; 0.4; 0.456\} = 0.456 \text{ т.}$$

$$w_2^* = \min_{x_j=0} \left\{ \frac{V_j \cdot \varphi_j^*}{g_{2j}} \right\} = \min \left\{ \frac{5 \cdot 0.85}{4}, \frac{6.3 \cdot 0.75}{5.5}, \frac{3.2 \cdot 0.7}{2.8} \right\} = \min\{1.06; 0.86; 0.8\} = 0.8 \text{ т.}$$

Аппараты ст. 7 могут поочередно принимать партии второго продукта целиком: предварительно $0.456 \leq w_2 \leq 0.8$ т, $T_{ц1} = t_{11} = 6$ ч, $T_{ц2} = t_{24} = 5$ ч.

Аппарат ст. 4 можно дополнительно использовать как емкость для приема фильтрата 1-го продукта со ст. 3, а аппарат ст. 5 - как емкость для подачи суспензии 2-го продукта на фильтр ст. 6. Проверим эти возможности, приняв $\varphi_{п*} = 0.2$,

$\varphi_{\text{п}}^* = 0.9: \frac{6.3 \cdot 0.2}{2} = 0.63, \frac{6.3 \cdot 0.9}{2} = 2.84 \rightarrow 0.63 \leq w_1 \leq 0.732 \text{ т}, t_{13}^* = T_{\text{ц1}} = 6 \text{ ч}$ (в процессе выпуска первого продукта аппарат ст. 4 не задействован).

$$\frac{6.3 \cdot 0.2}{5.5} = 0.23, \frac{6.3 \cdot 0.9}{5.5} = 1.3 \rightarrow 0.456 \leq w_2 \leq 0.8 \text{ т.}$$

В группе стадий 6,7,8 временной режим очень напряженный. Предположим, что один из аппаратов ст. 7 будет играть роль напорной емкости сушилки ст. 8:

$$t_{18}^* = T_{\text{ц1}} = 6 \text{ ч}, t_{28}^* = T_{\text{ц2}} = 5 \text{ ч}, t_{16}^* = \min \left\{ \frac{T_{\text{ц1}} - t_{15}}{h_{16}}; \frac{T_{\text{ц1}} - t_{17}}{h_{16}} \right\} = \min \left\{ \frac{6-2}{0.95}, \frac{6-4}{0.95} \right\} = 2.1 \text{ ч},$$

$$t_{26}^* = \frac{T_{\text{ц2}} - t_{27}}{h_{26}} = \frac{5-3}{0.9} = 2.2 \text{ ч, тогда}$$

$$w_1^* = \min \left\{ 0.732, \frac{1.6 \cdot 0.15 \cdot 6}{2}, \frac{40 \cdot 10.5 \cdot 2.1}{1350}, \frac{20 \cdot 6.25 \cdot 6}{1150} \right\} = \min \{0.732; 0.72; 0.64; 0.65\} = 0.64 \text{ т.}$$

$$w_2^* = \min \left\{ 0.8, \frac{40 \cdot 9 \cdot 2.2}{1500}, \frac{20 \cdot 7 \cdot 5}{1120} \right\} = \min \{0.8; 0.528; 0.625\} = 0.528 \text{ т.}$$

Следовательно, можно принять $w_1 = 0.64 \text{ т}, w_2 = 0.528 \text{ т}$, тогда

$$t_{13} = (2 \cdot 0.64) / (1.6 \cdot 0.15) = 5.3 \text{ ч},$$

$$t_{16} = (1350 \cdot 0.64) / (10.5 \cdot 40) = 2 \text{ ч}, t_{18} = (1150 \cdot 0.64) / (6.25 \cdot 20) = 5.9 \text{ ч},$$

$$b_1 = Q_1 / w_1 = 50 / 0.64 = 78, T_1 = 6 + 5.3 + 2 + 2 + 4 + 5.9 + (78 - 1) \cdot 6 = 487 \text{ ч},$$

$$t_{26} = (1500 \cdot 0.528) / (9 \cdot 40) = 2.2 \text{ ч}, t_{18} = (1120 \cdot 0.528) / (7 \cdot 20) = 4.2 \text{ ч},$$

$$b_2 = Q_2 / w_2 = 70 / 0.528 = 132, T_2 = 2 + 5 + 2.2 + 3 + 4.2 + (132 - 1) \cdot 5 = 671 \text{ ч},$$

$$T_1 + T_2 = 487 + 671 = 1158 < 1200.$$