

*На правах рукописи*

**СОШНИКОВ**

**Антон Владимирович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ  
В ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ  
ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Специальность 05.02.22 – Организация производства  
(текстильная и легкая промышленность)

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

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» на кафедре экономики и финансов

Научный руководитель:	<b>Архипов Александр Валентинович</b> , доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», директор научно-исследовательского института информационных систем
Официальные оппоненты:	<b>Ястребов Анатолий Павлович</b> , доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», профессор кафедры информационных технологий предпринимательства, Заслуженный работник высшей школы РФ <b>Рымкевич Ольга Васильевна</b> кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского», доцент кафедры физики
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный экономический университет»

Защита состоится 24 ноября 2020 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.236.07 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18, круглый зал заседаний.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18, <http://www.sutd.ru>

Автореферат разослан «    » октября 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Переборова Нина Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время многие авторы аналитических публикаций отмечают непростое положение предприятий легкой промышленности. Вклад отрасли в объем производства обрабатывающей промышленности снизился с 11% до долей процента. По объективным причинам в сложившихся условиях в отрасли получают распространение малые предприятия. Это, в частности относится к трикотажной и швейной подотраслям. Возрастающее значение имеет обеспечение полного использования технологических ресурсов – оборудования и производственного персонала. Здесь в отрасли имеются значительные резервы. По данным ассоциации предпринимателей легкой промышленности загрузка оборудования, например, на предприятиях трикотажной подотрасли не превышает 62%. Среди факторов, влияющих на непроизводительные потери времени, определенное место занимает и качество календарного планирования, оперативного управления и диспетчеризации производственных процессов. Несмотря на внимание к этим вопросам и расширяющееся внедрение информационных систем, вопросы создания быстродействующих эффективных методов календарного планирования нельзя считать полностью решенными как в теоретическом плане, так и в плане практического использования на предприятиях отрасли. Вопросы совершенствования методов решения в производственных условиях оперативных и диспетчерских задач остаются весьма актуальными. Ряд таких задач является предметом рассмотрения в диссертации.

**Степень разработанности научной проблемы.** Совершенствованием планирования и управления производственными процессами занимались и занимаются многие специалисты в области экономики и организации производства. В рамках дискретной оптимизации и исследования операций развивается, в частности, такое направление, как теория расписаний, разрабатывающая модели и методы для решения задач календарного планирования. Вклад в развитие этой теории и ее практических приложений внесли многие зарубежные и отечественные ученые. Среди них Бурков В.Н., Генс Г.В., Конвей Р.В., Левнер Е.В., Лазарев А.А., Максвелл В.Л., Миллер Л.В., Рейнгольд Э., Романовский И.В., Танаев В.С., Шкурба В.В. и др. Прикладные задачи календарного планирования, в том числе, на предприятиях текстильной и легкой промышленности, решались в работах Архипова А.В., Богданова А.И., Вожакова А.В., Гаврилина Е.В., Гитмана М.Б., Загидуллина Р.Р., Кукаренко Е., Молочко Д., Павлова А.П., Петровой А.Г., Подчасовой Т.П., Португала В.М., Ястребова А.П. Однако, несмотря на внимание к проблеме, ряд вопросов по-прежнему остаются актуальными. В частности, есть резервы в совершенствовании методов решения задач планирования загрузки технологического оборудования с учетом условий реального производства, среди которых ограничения на длительность поиска удовлетворительных решений. Развитию таких методов посвящена данная диссертация.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является совершенствование календарного планирования производства в технологических комплексах предприятий легкой промышленности на основе разработки и применения эффективных методов обоснования оперативных организационных решений по использованию технологических ресурсов.

Научные и практические задачи исследования:

- исследовать характерные для предприятий отрасли задачи календарного планирования и оперативного управления загрузкой оборудования в технологических комплексах с различной структурой;
- разработать метод и алгоритм для обоснования очередности выполнения работ на технологической установке при необходимости выполнения операций по переналадке при смене ассортимента;
- разработать формальную модель, метод и алгоритм решения задачи календарного планирования работ в технологических комплексах, состоящих из параллельно работающих взаимозаменяемых машин при необходимости выполнения операций по их переналадке при смене ассортимента;
- разработать подход, формальную модель, метод и алгоритм решения задачи календарного планирования работ в технологических комплексах, состоящих из машин, реализующих многостадийную последовательную технологию обработки, при необходимости выполнения операций по их переналадке при смене ассортимента;
- разработать подход, формальную модель, метод и алгоритм решения задачи оперативного распределения работ между исполнителями с учетом их специализации;
- показать практическую полезность разработанных подходов и методов на примерах решения задач оперативно-календарного планирования выполнения работ в организационно-технологических комплексах предприятий легкой промышленности.

**Объектом исследования** являются предприятия легкой и других отраслей промышленности, для которых характерны организационно-технологические комплексы с различной структурой.

**Предметом исследования** являются управленческие отношения, возникающие в системе оперативного управления производством, в части относящейся к обоснованию организационно-технических решений при календарном планировании работ.

**Теоретической и методологической основой исследования** являются положения теории управления производством, методология математического моделирования производственных задачи и обоснования методов их решения в условиях производства.

**Информационной базой исследования** послужили опубликованные данные по теме диссертации и смежным вопросам, материалы конференций, Интернет-ресурсы, данные предприятий, полученные автором в процессе исследования.

**Соответствие диссертации Паспорту научной специальности.** Содержание диссертации соответствует Паспорту научной специальности 05.02.22 – Организация производства (текстильная и легкая промышленность), пунктам 4 – Моделирование и оптимизация

организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов; 5 – Разработка научных, методологических и системотехнических принципов повышения эффективности функционирования и качества организации производственных систем...; 6 – Разработка и реализация принципов производственного менеджмента, включая подготовку кадрового обеспечения и эффективность форм организации труда; 7 – Анализ и синтез организационно-технических решений. Стандартизация, унификация и типизация производственных процессов и их элементов...; 11 – разработка методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами.

**Научная новизна результатов исследования** заключается в разработке новых подходов и методов обоснования управленческих решений при календарном планировании работ в организационно-технологических комплексах с различной структурой.

**Наиболее существенные результаты, обладающие научной новизной и полученные лично соискателем:**

- разработан новый эвристический метод рационального упорядочения работ на технологической установке по критерию минимума простоя из-за переналадок при смене ассортимента. Метод отличается от известных использованием правила организации вычислений, позволяющего регулировать количество просматриваемых вариантов и тем самым обеспечить требования оперативности поиска;

- предложена содержательная постановка и формальная модель задачи рационального распределения работ по параллельно работающим, взаимозаменяемым, идентичным технологическим установкам и выбора порядка выполнения работ на каждой из них. Отличием подхода и модели является учет нескольких критериев качества искомого плана. Для решения задачи предложен новый эвристический метод;

- предложены содержательная постановка и формальная модель задачи рационального порядка выполнения работ, состоящих из нескольких операций и последовательно проходящих обработку на нескольких машинах. В отличие от известных постановок учтены переналадки машин, затраты на которые зависят от упорядочения работ; задача сформулирована как многокритериальная. Для решения задачи предложен новый эвристический метод, позволяющий получить компромиссный вариант плана;

- введено понятие «смешанные технологические ресурсы», отражающее соединение в отдельную «учетную единицу» нескольких неоднородных видов ресурсов (разных типов оборудования, производственного персонала), в совокупности необходимых для выполнения некоторой работы. Предложен ряд показателей, характеризующих такие ресурсы и используемых при формировании рациональных календарных планов.

- предложены содержательная постановка и формальная модель задачи формирования вариантов смешанных ресурсов для технологических комплексов, включающих специализированное

оборудование разных видов и работников, обладающих различной квалификацией и профессиональной специализацией. Разработан метод и алгоритм распределения заданного множества работ по предварительно сформированным смешанным технологическим ресурсам.

**Теоретическая значимость** диссертации состоит в теоретическом обосновании подхода к решению задач календарного планирования для технологических комплексов с различной структурой и разработке методов распределения и упорядочения работ, имеющих широкую область возможного применения.

**Практическая значимость** диссертации определяется прикладной направленностью основных положений, конструктивным характером предложенных методов, разработанных с учетом практических требований и ориентированных на применение в производственных условиях. Результаты исследования использованы в практике планирования швейного предприятия ООО «Мокко».

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты исследования были доложены и обсуждались на XXII международной научно-практической конференции «Наука России: Цели и задачи» 10.08.2020 г. Екатеринбург.

**Публикации.** Результаты исследования представлены в 8 публикациях общим объемом 7,1 п. л., личный вклад автора – 5,7 п. л., в том числе 2 статьи в издании, рекомендованном ВАК.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 125 наименований, и приложения. Основной текст диссертации изложен на 168 страницах, содержит 37 таблиц и 20 рисунков.

**Во введении** обоснованы актуальность темы диссертации, дана авторская оценка состояния рассматриваемой проблемы, сформулированы цель и задачи, приведена краткая характеристика содержания исследования.

**В первой главе** «Задачи и методы оперативно-календарного планирования работ в организационно-технологических комплексах предприятий легкой промышленности» приводятся данные о состоянии предприятий отрасли, подчеркивается значение фактора эффективности использования технологических ресурсов. Рассмотрено содержание характерных задач принятия организационно-технических решений при загрузке технологических комплексов с различной структурой (одиночные машины, параллельные идентичные машины, последовательные машины) с учетом необходимых переналадок машин. Приводятся примеры таких комплексов в красильно-отделочном, швейном производствах. Рассмотрены задачи упорядочения обработки партий материала в отдельных красильных аппаратах, в нескольких параллельно работающих идентичных аппаратах, а также в группе машин, реализующих многооперационную последовательную технологию обработки. В указанных задачах основным или дополнительным критерием выступают затраты ресурсов на переналадки оборудования при смене обрабатываемого ассортимента. Введено понятие «смешанные технологические ресурсы», отражающее соединение разнородных ресурсов (машины разных видов, производственный персонал) в единую

планово-учетную единицу. Сформулирована на содержательном уровне задача распределения работ, составляющих оперативное производственное задание, по предварительно сформированным смешанным ресурсам. Глава завершается формулировкой задач исследования.

**Во второй главе** «Метод сокращения организационных простоев оборудования при смене ассортимента продукции в комплексах с параллельной структурой» рассматриваются две задачи управления загрузкой машин при наличии операций по их переналадке при смене выполняемых работ. Для каждой из задач приводится формальная постановка в общем виде и предлагается метод решения, ориентированный на применение в условиях производства. Первая задача относится к загрузке единственного технологического аппарата при необходимости проводить операцию переналадки при смене выполняемых работ. Постановка задачи известна в литературе. Предложенный в данной главе эвристический метод расширяет арсенал известных методов. Он отличается от известных использованием правил поиска порядка выполнения работ, позволяющих регулировать количество просматриваемых вариантов и тем самым обеспечить требования оперативности поиска.

Схема технологического комплекса представлена на рисунке 1.

Формальная постановка задачи: имеется технологический аппарат, на котором должны быть выполнены  $n$  работ. Все работы подготовлены к выполнению и могут быть выполнены в любой очередности. При смене работ затрачиваются ресурсы, объем которых зависит от видов сменяющих друг друга работ. Для определенности принято, что речь идет о затратах времени. Нормативные длительности переналадок при выполнении всех работ представляются в виде квадратной  $(n \times n)$ -матрицы  $\vartheta = \{\vartheta_{ij}\}$ ,  $i, j = 1, \dots, n$ . Требуется найти такую очередность выполнения работ, при которой суммарные затраты на переналадки аппарата минимальны. Моделью задачи является известная в теории дискретной оптимизации задача коммивояжера.

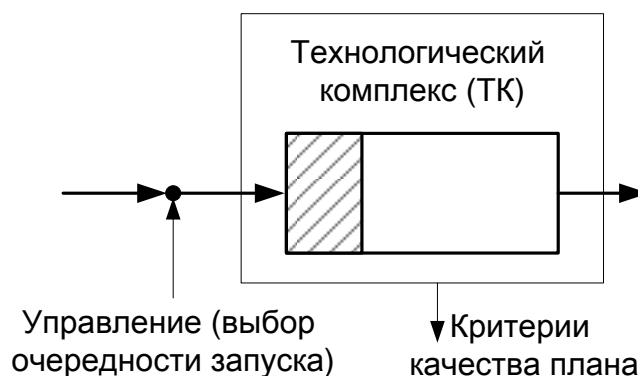


Рисунок 1 – Технологический комплекс, состоящий из одной машины, требующей переналадок при смене выполняемых работ

Задаче соответствует полный ориентированный граф, в котором каждая пара вершин (работ) связана двумя разнонаправленными дугами. Весами дуг являются известные длительности соответствующих переналадок. Требуется установить ориентированную цепь (орцепь), проходящую по одному разу через все вершины графа и имеющую минимальный суммарный вес. Предлагаемый алгоритм основан на следующих положениях. Наряду с множеством вершин графа данной задачи, рассматривается множество дуг  $D = \{(i \rightarrow j), i, j = 1, \dots, n, i \neq j\}$ , пронумерованных по определенному правилу. Число дуг  $n_c$  равно  $n(n-1)$ . Множеству  $D$  поставлена в соответствие  $(n_c \times n_c)$  - матрица  $S = \{s_{pq}\}$ ,  $p, q = 1, \dots, n_c$ , которая названа матрицей связи. Элементы матрицы принимают следующие значения:  $s_{pp} = \infty$ ;  $s_{pq} = 1$ ,  $p \neq q$ , если дуги, соответствующие индексам  $p$  и  $q$ , являются смежными, т. е. конечная вершина дуги  $p$  совпадает с начальной вершиной дуги  $q$ . Если  $s_{pq} = 1$ , то дуга  $p$  может быть соединена с дугой  $q$ , т. е. обе дуги могут войти в искомую цепь.

На основе этой матрицы путем последовательного соединения смежных дуг может быть построена процедура синтеза всех возможных цепей (процедура полного перебора). Основная идея алгоритма состоит в проведении процедуры синтеза при исключении из матрицы дуг с весами, превышающими заданное пороговое значение. При этом цепи с относительно «тяжелыми» дугами синтезироваться не будут, что сократит объем перебора, но при этом повышается риск формирования тупиковых участков цепей. В этом случае, если приемлемый результат не получен, процедура повторяется с повышенным значением порога. Расчеты, проведенные с характерными для практических задач числом работ и длительностями переналадок (весов дуг), показали удовлетворительные результаты.

Вторая задача относится к загрузке производственных комплексов, состоящих из группы взаимозаменяемых эквивалентных по производительности машин при необходимости выполнять операции их переналадки при смене выполняемых работ. Объемы ресурсов, в частности, времени, затрачиваемых при переналадках, предполагаются зависимыми от вида сменяющих друг друга работ. Структура комплекса представлена на рисунке 2. Задача разделена на две подзадачи: 1) распределение работ по машинам и 2) выбор очередности запуска работ на каждой машине. Вторая подзадача решается одним из известных методов, в частности, методом, предложенным в данной главе. Подробно рассмотрена первая подзадача, моделью которой может служить известная комбинаторная задача разбиения множества объектов на заданное число подмножеств с учетом различных требований (задача «о куче камней»).



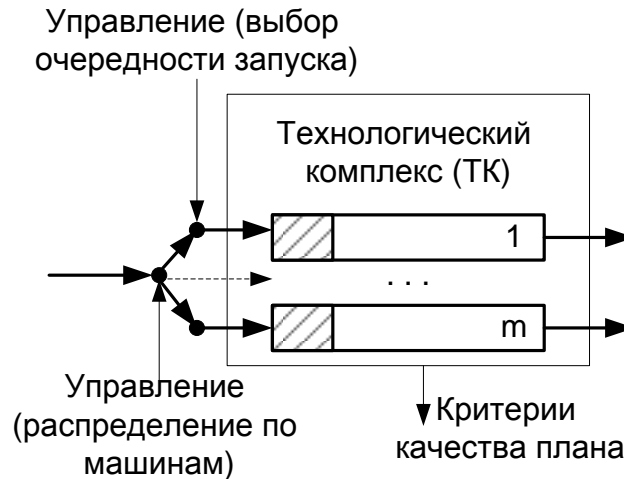


Рисунок 2 – Технологический комплекс, состоящий из  $m$  параллельно работающих машин с переналадками при смене работ

В развитие традиционных подходов к решению подобных задач предложена многокритериальная модель, ориентированная на поиск варианта распределения работ по машинам и порядка их выполнения, при котором достигается приближение к оптимальным значениям таких показателей, как общее время выполнения работ, объем работ по переналадкам при их равномерном распределении по машинам. Предложены выражения для целевых функций, соответствующих принятым критериям, и общая схема выбора компромиссного решения на основе выявления в предварительно сформированном множестве допустимых вариантов и последующего сравнения между собой Парето-оптимальных решений. Приведен ряд эвристических правил генерирования вариантов распределения работ по машинам. Порядок решения задач с помощью предложенных алгоритмов иллюстрируется численными примерами.

**В третьей главе** «Методы сокращения потерь времени работы оборудования в организационно-технологических комплексах с последовательной и сетевой структурой» рассматриваются две другие задачи загрузки оборудования, характерные для предприятий различных отраслей. Первая задача относится к технологическим комплексам, в которых специализированные машины последовательно выполняют соответствующие операции каждой из работ, входящих в производственное задание. В отличие от известных в теории расписаний постановок, в данной задаче предполагается необходимость выполнения на всех или некоторых машинах комплекса операций переналадки при смене работ. Затраты на переналадки, в том числе, затраты времени, приняты зависящими от машины и вида сменяющих друг друга работ. Структура комплекса представлена на рисунке 3. Задача рассмотрена как двухкритериальная. В качестве критериев в модель включены общее время выполнения всех работ и суммарные потери из-за простоев, связанных с переналадками машин. Указаны пути возможного расширения модели для повышения ее адекватности конкретным производственным условиям.

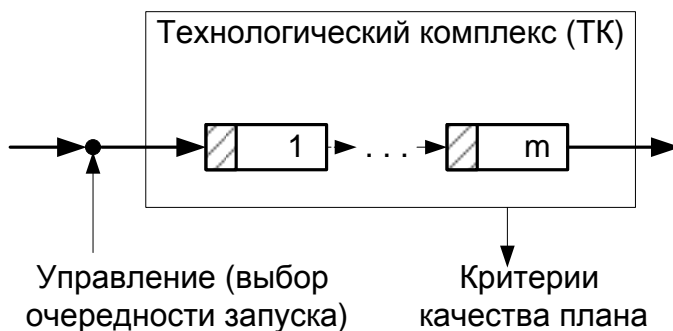


Рисунок 3 – Технологический комплекс, реализующий последовательную технологию выполнения работ при наличии переналадок машин

Предложен подход и конкретные методы поиска рациональных вариантов упорядочения работ при запуске их в производство. Предложено генерировать ограниченное и управляемое с учетом производственных условий количество вариантов, среди которых, как предполагается, имеются и рациональные (практически приемлемые) варианты. Процедура включает следующие действия: формулируются эвристические правила упорядочения запуска работ, каждое из которых ориентировано на улучшение одного из принятых показателей (критериев). По каждому правилу генерируется вариант запуска работ, оцениваемый набором принятых критериев. Среди множества вариантов выявляются Парето-оптимальные. Из этих вариантов субъект, принимающий решение, используя собственные оценки важности критериев, выбирает наиболее предпочтительный вариант. В главе предложен набор формализованных правил и показано применение модели с двумя критериями: 1) общее время выполнения всех работ на линии  $T^0 = T^0(\pi_q)$ , зависящее от упорядочения работ  $\pi_q$ ,  $q = 1, 2, \dots, N$ , и 2) суммарные потери, связанные с переналадками на всех машинах  $S^0 = S^0(\pi_q)$ , определяемые принятой очередностью выполнения работ и линейно зависящие от длительностей операций переналадки. Целевые функции, выражающие эти критерии, имеют вид:

$$T^0 = \max_k (T_k) \rightarrow \min_{U^*} \quad (1)$$

где

$T_k$  – момент окончания выполнения работ на  $k$ -й машине,  $k = 1, 2, \dots, m$ ;

$U^*$  – множество вариантов упорядочения работ  $\pi_q$ ,  $q = 1, 2, \dots, N$ , предварительно сгенерированных по принятым правилам и число которых  $N$  установлено с учетом ограничения на время поиска решения.

$$S^0 = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n-1} s^k \vartheta_{[i][i+1]}^k \rightarrow \min_{U^*} \quad (2)$$

где

$s^k$  – потери из-за простоев  $k$ -й машины в течение единицы времени;

$\vartheta_{[i][i+1]}^k$  – длительность операции переналадки  $k$ -й машины при смене  $[i]$ -й по очереди работы на  $[i+1]$ -ю (обозначение  $[i]$  указывает место  $i$ -й работы в упорядоченной последовательности  $\pi_q$ ).

Приведены численные примеры, иллюстрирующие предложенную процедуру планирования загрузки машин в технологическом комплексе с последовательной структурой.

Вторая задача, рассмотренная в данной главе, состоит в поиске рационального распределения работ между вариантами компоновки смешанных ресурсов и построении план-графика выполнения работ. Смешанным технологическим ресурсом названо объединение в некоторую целостную учетную единицу нескольких, возможно, разнородных, ресурсов, в совокупности необходимых для выполнения определенной работы (операции). Примером смешанного ресурса может служить группа машин, специализированных на отдельных операциях некоторой работы, и персонал, выполняющий эти операции. Отсутствие любого элемента смешанного ресурса делает выполнение операции и работы невозможным. Предложена модель, описывающая в виде трехслойного графа допустимые связи между работами (операциями), исполнителями и видами оборудования (см. рисунок 4).

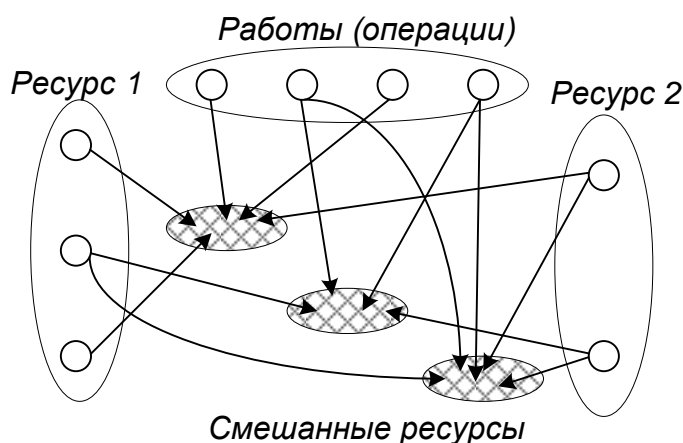


Рисунок 4 – Формирование смешанных ресурсов с учетом специализации различных видов ресурсов (заштрихованы группы вариантов смешанных ресурсов).

Согласно предлагаемому подходу, поиск искомого варианта графика выполнения заданного множества операций осуществляется в несколько этапов.

На первом этапе поиска для каждой операции выявляются допустимые варианты соединения ресурсов двух видов (операторов-исполнителей и оборудования), т. е. для каждой операции формируется возможный набор «смешанных» ресурсов, учитывающий специализацию исполнителей и машин. На втором этапе осуществляется выбор по тем или иным основаниям для каждой операции из соответствующего набора смешанных ресурсов одного подходящего варианта. На следующем, завершающем этапе решения формируется расписание выполнения

операций технологическим комплексом, элементами которого являются смешанные ресурсы. Схема решения задачи представлена на рисунке 5.

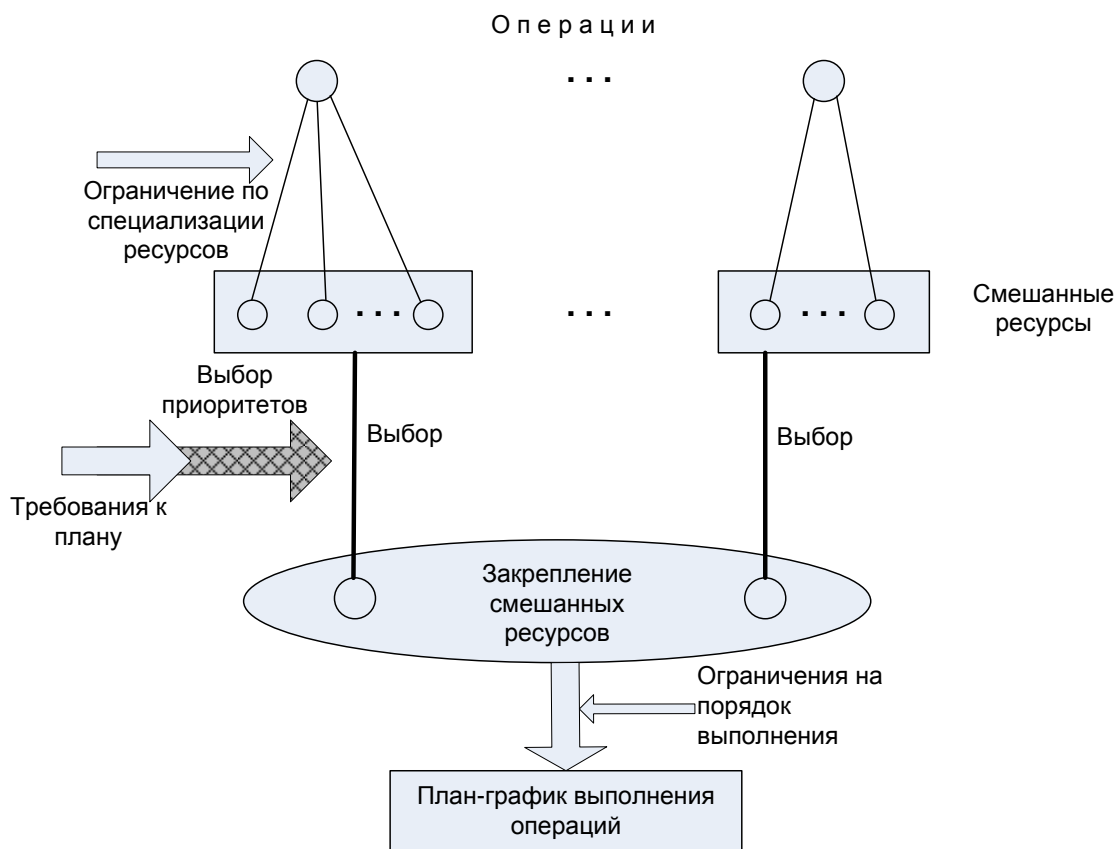


Рисунок 5 – Схема поиска варианта графика выполнения операций

Рассмотрим содержание этапов более подробно.

Связи между множествами операций  $R$ , операторов-исполнителей  $E$  и машин  $M$  представлены в виде неориентированного графа  $G(X, A)$ , в котором  $X$  – множество вершин, образованное объединением множеств  $R$ ,  $E$  и  $M$ , а  $A$  – множество ребер, соединяющих между собой все или некоторые вершины

Построенный граф позволяет ответить на вопрос: сколько существует допустимых комбинаций «операция – исполнитель – машина»? Каждая такая комбинация отражает возможность выполнения операции компетентным оператором на подходящей машине. Каждой такой комбинации в графе будет соответствовать определенный цикл, состоящий из трех смежных ребер (цикл длины 3), связывающих вершину в слое операций с вершиной в слое операторов и с вершиной в слое машин. Цикл начинается и заканчивается в одной и той же вершине в слое операций. Возникает формальная задача выявить в графе для каждой операции все циклы длины 3. Для этой цели используется прием, основанный на формальном синтезе для каждой операции всех комбинаций из трех вершин, поочередно выступающих в роли «представителей», указанных выше трех слоев (операций, операторов,

машин), с последующей проверкой по матрице смежности наличия ребер, связывающих эти вершины в цикл длины 3.

Любая комбинация трех вершин может быть описана в виде композиции из трех элементов матрицы смежности  $A = (a_{ij})$ . Композиция, описывающая цикл длины 3, будет иметь следующий вид:  $(a_{qj} a_{ji} a_{iq})$ , где  $q = 1, 2, \dots, N$  – индекс операции,  $j = N + 1, N + 2, \dots, N + n$  – индекс оператора-исполнителя,  $i = N + n + 1, N + n + 2, \dots, N + n + m$  – индекс машины. Для каждой операции с индексом  $q$  будет составлено  $n \times m$  композиций. Каждая композиция рассматривается как логическая функция произведения (конъюнкция) трех логических (булевых) переменных, значения которых устанавливаются по матрице смежности  $A$ . Значение этой функции будет равно 1, если все три переменные будут равными 1. Эта ситуация соответствует наличию в графе  $G$  цикла из ребер с входящими в композицию индексами. Количество таких циклов  $D$  для операции  $q$  равно числу единичных значений логической функции:

$$D_q = \sum_j \sum_i a_{qj} a_{ji} a_{iq}, \quad q = 1, 2, \dots, N.$$

(в соответствии с принятой нумерацией вершин графа в слоях  $j$  изменяется от  $N + 1$  до  $N + n$ ;  $i$  – от  $N + n + 1$  до  $N + n + m$ ).

В зависимости от структуры связей это число может изменяться от нуля (если для всех или некоторых операций отсутствуют компетентные исполнители и/или подходящее оборудование) до максимального значения, равного произведению  $n \times m$ .

На следующем этапе из множеств вариантов смешанных ресурсов для каждой операции по определенным правилам выбирается наиболее подходящий. При построении метода выбора определены и использованы различные категории смешанных ресурсов: несвязанные, связанные по конкретным ресурсам и связанные по всем ресурсам. Использовано также понятие «кратности» ресурса, характеризующее число вхождений ресурса в состав различных смешанных ресурсов. На основе этих понятий разработан эвристический метод, позволяющий генерировать допустимые сочетания «работа / исполнитель / оборудование» и выбирать рациональный вариант распределения работ по смешанным ресурсам по одному из критериев: минимуму задействованных исполнителей, либо минимуму общего времени выполнения работ. В первом случае более высокий приоритет получают смешанные ресурсы с большим значением кратности, что позволяет использовать ресурс для большего числа операций. Во втором случае, наоборот, более высокий приоритет получают ресурсы с меньшим значением кратности, что приводит к привлечению большего числа исполнителей, что позволяет сократить время выполнения всех операций. Предложенные в данной главе метод и алгоритм иллюстрируются численными примерами.

**В четвертой главе** «Практические задачи построения рациональных план-графиков производства в организационно-технологических комплексах с различной структурой» рассматриваются вопросы практической реализации предложенных в предыдущих главах

методов и алгоритмов. Изложение ведется на примере организационно-технологических комплексов красильных цехов (участков) трикотажных предприятий и монтажных участков швейного производства. Рассмотрены несколько производственных ситуаций. В первой рассматривается задача выбора рациональной очередности крашения нескольких партий трикотажного полотна. Партии окрашиваются в различные цвета с использованием различных красителей. При смене обрабатываемых партий материала аппарат промывается с применением определенных моющих средств горячей водой в течение времени, зависящего от цвета, следующих друг за другом партий. Во второй ситуации решается задача загрузки нескольких красильных аппаратов. Цель решения состоит в рациональном распределении партий полотна по аппаратам и установлении очередности выполнения операций крашения на каждом из них. Рациональное решение в этих двух ситуациях устанавливается с помощью алгоритмов, предложенных в главе 2.

В третьей ситуации рассматривается группа машин, последовательно выполняющих операции по обработке нескольких партий полотна. Примером служат вязальные, красильные и сушильно-ширильные машины. Показан порядок решения этой задачи, позволяющий построить компромиссный вариант плана, учитывающий требования сокращения общего времени выполнения задания и сокращения затрат на переналадку оборудования.

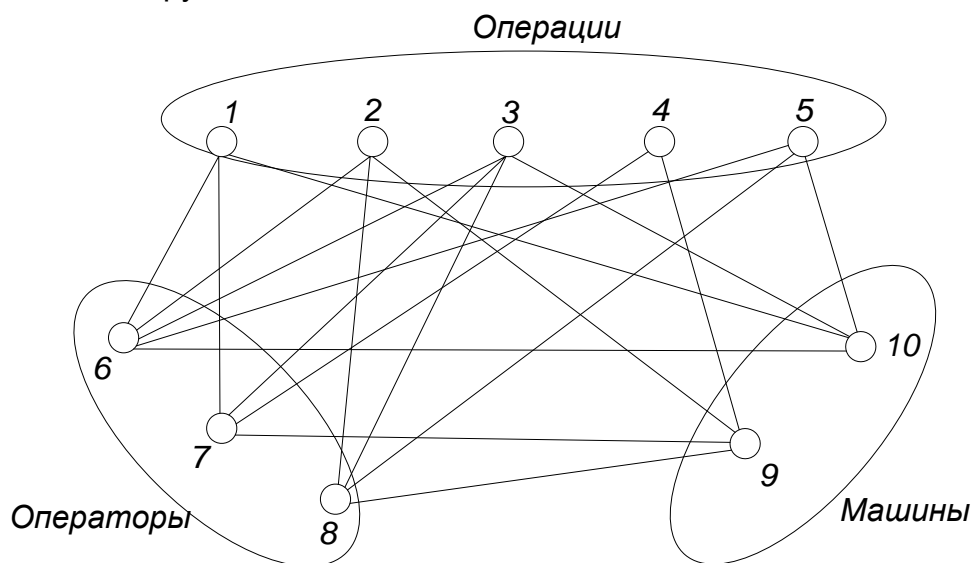


Рисунок 6 – Трёхслойный граф, отражающий допустимые варианты закрепления изделий за работниками и оборудованием

Последняя из рассмотренных ситуаций соответствует условиям малого швейного предприятия. На монтажном участке изготавливается несколько видов изделий (пальто, брюки, юбки, платья различных артикулов). Участок оснащен различными видами специализированного швейного оборудования. Работницы имеют разную квалификацию и профессиональный опыт, что учитывается в их специализации по

ассортименту и по используемому оборудованию. Задача состоит в формировании допустимых смешанных ресурсов и рациональном распределении планового производственного задания по этим ресурсам. На рисунке 6 представлен граф, отражающий допустимые связи операций, работниц и видов оборудования. Процедура выявления допустимых смешанных ресурсов для каждой операции сведена к поиску в графе замкнутых циклов длины 3, содержащих ребра, связывающие код операции, номер оператора-исполнителя и код оборудования. Изложена методика решения этой задачи с помощью алгоритма, разработанного в главе 3, с получением результата, подтверждающего работоспособность и целесообразность применения предложенного метода.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан новый эвристический метод рационального упорядочения работ на технологической установке по критерию минимума простоя из-за переналадок при смене ассортимента.
2. Предложены содержательная постановка и формальная модель задачи рационального распределения работ по параллельно работающим, взаимозаменяемым, идентичным машинам и выбора порядка выполнения работ на каждой из них. Отличием подхода и модели является учет нескольких критериев качества искомого плана. Для решения задачи предложен новый эвристический метод.
3. Предложены содержательная постановка и формальная модель задачи рационального порядка выполнения работ, состоящих из нескольких операций и последовательно проходящих обработку на нескольких машинах. В отличие от известных постановок в предложенной модели учтены переналадки машин, и задача сформулирована как многокритериальная. Для решения задачи предложен новый эвристический метод, позволяющий получить компромиссный вариант плана.
4. Введено понятие «смешанные технологические ресурсы», отражающее соединение в отдельную «учетную единицу» нескольких неоднородных видов ресурсов (разных типов оборудования, производственного персонала разной квалификации), в совокупности необходимых для выполнения некоторой работы. Предложен ряд показателей, характеризующих такие ресурсы и используемых при формировании рациональных календарных планов.
5. Предложены содержательная постановка и формальная модель задачи формирования вариантов смешанных ресурсов для технологических комплексов, включающих специализированное оборудование разных видов и работников, обладающих различной квалификацией и профессиональной специализацией. Разработаны метод и алгоритм распределения заданного множества работ по предварительно сформированным смешанным технологическим ресурсам.
6. Проведены практические расчеты по разработанным в диссертации методам и алгоритмам с использованием данных предприятий легкой промышленности. Получены результаты построения план-графиков выполнения операций крашения партий трикотажного полотна. Для

условий малого швейного предприятия ООО «Мокко» получены результаты расчета оперативного плана выполнения производственного задания, обеспечивающего рациональное использование смешанных технологических ресурсов (оборудования и персонала).

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Сошников, А.В. Выбор рациональной очередности выполнения работ на технологической установке с учетом требования по сокращению времени переналадок / А.В. Сошников // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. - №1(103). – С. 55-60. – 0,6 п. л.
2. Сошников, А.В. Метод распределения работ по технологическим машинам с учетом нескольких критериев / А.В. Архипов, А.В. Сошников // Наука и бизнес: пути развития. - 2020. - № 3(105). – С. 107-113. – 0.6 п. л./ авт. 0,3 п. л.

Публикации в прочих изданиях

3. Сошников, А.В. Метод сокращения организационных простоев оборудования при смене ассортимента продукции / А.В. Сошников // Вестник СПГУПТД. Серия 3. Экономические, гуманитарные и общественные науки. – 2019. №4. – С. 45–50. – 1,3 п. л.
4. Сошников, А.В. Формирование рациональных календарных планов работ с учетом нескольких критериев / А.В. Архипов, А.В. Сошников // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. Серия 3. Экономические, гуманитарные и общественные науки. – 2020. - № 1. – С. 24–31. – 1,4 п.л./ авт. 0,8 п. л.
5. Сошников, А. В. Метод рационального упорядочения работ на технологической линии при наличии переналадок оборудования / А.В. Архипов, А.В. Сошников // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. Серия 3. Экономические, гуманитарные и общественные науки. – 2020. - № 3. – С. 3-8. – 1,4 п. л./ авт. 0,9 п. л.
6. Сошников, А.В. Эвристический экспресс-метод сокращения времени переналадок технологической установки / А.В. Сошников // Наука России: Цели и задачи. Сб. научных трудов по материалам научн.-практ. конф. 10.08.2020 г. Екатеринбург. С. 110-116. – 0,8 п. л.
7. Сошников, А.В. Упорядочения работ на технологической линии при наличии переналадок оборудования / А.В. Сошников // Национальная ассоциация ученых (НАУ). Часть 1. – 2020. - №57. – С.40-43. – 0,4 п. л.
8. Сошников, А.В. Экспресс-метод сокращения потерь времени на переналадки оборудования при смене ассортимента продукции / А.В. Сошников // Национальная ассоциация ученых (НАУ). Часть 1. – 2020. - №57. – С.43-48. – 0,6 п. л.