

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. А.Н. КОСЫГИНА (ТЕХНОЛОГИИ. ДИЗАЙН. ИСКУССТВО)»

На правах рукописи

Самойлова Татьяна Алексеевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
РАЗЪЕДИНЕНИЯ, РАЗРЫХЛЕНИЯ И ОЧИСТКИ ВОЛОКНИСТОГО
СЫРЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность 05.19.02

«Технология и первичная обработка текстильных материалов и сырья»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор П. А. Севостьянов

Москва – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ РАЗРЫХЛЕНИЯ И ОЧИСТКИ ВОЛОКНИСТОЙ МАССЫ	10
1.1 Сущность процессов разрыхления и очистки волокнистой массы	10
1.2 Теоретические и экспериментальные исследования процессов разрыхления и очистки волокнистой массы	23
1.3 Обзор динамических моделей взаимодействия волокнистой массы с рабочими органами разрыхлительно-очистительных машин.....	29
1.4 Анализ результатов исследований статистических характеристик клочков в процессах разрыхления и очистки	37
1.5 Обзор балансовых динамических моделей процессов разрыхления и очистки.....	40
1.6 Обзор математических моделей рассортировки волокон.....	43
1.7 Анализ методов изучения процессов разрыхления и очистки волокнистого сырья.....	44
Выводы по первой главе	46
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАЗРЫХЛЕНИЯ И ОЧИСТКИ ПОТОКОВ ВОЛОКНИСТОЙ МАССЫ В РАЗРЫХЛИТЕЛЬНО-ОЧИСТИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТАХ.....	48
2.1 Балансовая модель движения материальных потоков в наклонных очистителях	48
2.2 Преобразование распределений характеристик волокнистых потоков при разрыхлении и очистке волокнистой массы	52
2.3 Статистическое моделирование деления материальных потоков в процессах разрыхления и очистки волокнистой массы.....	55
2.4 Сравнение аналитической и статистической моделей деления клочков волокнистой массы	62

Выводы по второй главе	71
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЫХЛЕНИЯ И ОЧИСТКИ КЛОЧКОВ	73
3.1 Обобщенная имитационная статистическая модель процессов разрыхления и очистки волокнистой массы.....	73
3.1.1 Анализ предельного распределения массы клочков	80
3.1.2 Зависимость распределения массы клочков от вероятностей разрыхления и деления клочков	83
3.1.3 Зависимость разрыхления и очистки от параметров процесса	84
3.2 Разработка и анализ эвристических имитационно-статистических моделей разрыхления и очистки волокнистой массы	92
3.2.1 Эмпирические соотношения и статистическая модель разрыхления и очистки волокнистой массы.....	92
3.2.2 Имитационная модель разрыхления и очистки клочков с учетом параметров рабочих камер машин разрыхлительно-очистительного агрегата	100
3.3 Многофакторный эксперимент с моделью разрыхления и очистки клочков на наклонных очистителях.....	105
3.3.1 Отсеивание малозначимых факторов.....	105
3.3.2 Анализ влияния значимых факторов на эффективность разрыхления и очистки волокнистой массы.....	110
Выводы по третьей главе	115
ГЛАВА 4. МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ШЕРСТЯНЫХ ВОЛОКОН НА ПРИГОТОВИТЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДАХ ПРЯДИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	117
4.1 Анализ распределений волокон шерсти по длине и тонине и их изменений	117
4.2 Метод оценки распределений длины и тонины волокон шерсти с учетом их коэффициента корреляции.....	120

4.3	Разработка алгоритма имитации одномерных и двумерных распределений по эмпирическим данным с учетом их корреляции	127
	Выводы по четвертой главе	140
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ВОЛОКНИСТЫХ ПОТОКОВ В МАШИНАХ РАЗРЫХЛИТЕЛЬНО-ОЧИСТИТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА НА ОСНОВЕ УСЛОВИЙ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА.....		
		141
5.1	Статистические особенности деления волокнистых потоков.....	142
5.2	Структура балансовой модели динамики волокнистых потоков в наклонных очистителях	146
5.3	Разработка балансовых Simulink-моделей разрыхления и очистки волокнистой массы	148
	Выводы по пятой главе	163
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ		164
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		166
ПРИЛОЖЕНИЯ.....		186

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Процессы разрыхления и очистки волокнистой массы являются важнейшими на подготовительных этапах прядильного производства. В настоящее время технологии очистки и разрыхления волокнистой массы в основном используют обработку клочков, находящихся в свободном, не зажатом состоянии. Многочисленные результаты исследований и практика эксплуатации доказали, что в этом случае увеличивается эффективность процессов очистки и разрыхления и снижается уровень повреждаемости волокон.

При неправильном выборе заправочных параметров разрыхлительно-очистительного оборудования возможны негативные эффекты: снижение выделения сорных примесей; повышение повреждаемости волокон; попадание прядомых волокон в отходы; зажгучивание клочков, приводящее к их уплотнению и запутыванию волокон; разрыв волокон.

Аналитические методы оказываются ограниченными для детального изучения процессов разрыхления и очистки, поскольку позволяют получать лишь приближенные оценки показателей эффективности этих процессов, основанные на усредненных значениях параметров, и не дают возможности учесть конструктивные особенности машин разрыхлительно-очистительного агрегата (РОА). Эксперименты на промышленном или опытном оборудовании являются трудоемкими и малоинформативными. В этих условиях метод статистической имитации процесса на ЭВМ оказывается наиболее эффективным и перспективным для решения рассматриваемой проблемы.

Изучение процессов разрыхления и очистки имеет длительную историю, и современная техника, используемая для осуществления этих процессов, доведена до высокого уровня совершенства. Однако проблема изучения этих процессов с точки зрения их статистической природы, динамики и управляемости остается до сих пор нерешенной и актуальной задачей.

Цели и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка методов исследования процессов разъединения, разрыхления и очистки волокнистого сырья на машинах подготовительных переходов прядильного производства с учетом статистических особенностей волокнистой массы на основе имитационного моделирования для выявления основных факторов, влияющих на динамику, эффективность и управляемость этих процессов.

Достижение поставленной цели включает решение следующих задач:

- анализ существующих теоретических и экспериментальных методов исследования процессов разрыхления и очистки волокнистой массы, оценка их информативности и перспективности для дальнейшего использования;
- изучение статистических характеристик клочков волокнистой массы и динамики их изменения в процессах разрыхления и очистки, а также выбор и обоснование перспективных методов анализа этих характеристик;
- разработка моделей процессов разрыхления и очистки, учитывающих статистические свойства клочков волокнистой массы;
- проведение имитационных экспериментов для установления видов распределений свойств волокнистого сырья и динамики их изменения в процессах разъединения волокон, разрыхления и очистки клочков;
- разработка методов обработки данных о свойствах волокнистого сырья на разных этапах производства и построение на их основе модели преобразования распределения этих свойств.

Методы исследования

В работе использованы методы математического, компьютерного статистического и имитационного моделирования, математической статистики и теории вероятностных процессов, современные методы компьютерной обработки информации, методы разработки автоматизированных моделирующих комплексов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработаны модели технологических процессов разрыхления и очистки с целью рационального использования сырьевых ресурсов при изготовлении тек-

стильного сырья и материалов;

- разработан комплекс алгоритмов для компьютерного моделирования статистической динамики процессов разрыхления и очистки;

- разработаны компьютерные модели статистической имитации различных схем деления клочков и выделения сорных примесей в процессах разрыхления и очистки, математические модели динамики процессов разрыхления и очистки на основе материального баланса для потоков волокнистой массы. Полученные модели позволили установить вид распределений массы, плотности клочков и содержания сорных примесей в клочках волокнистой массы, динамику их изменения, условия возникновения эффектов зажгучивания;

- с помощью разработанных моделей установлены зависимости эффективности очистки и разрыхления волокнистой массы от рабочего объема производственного оборудования, плотности расположения колков, числа колосников, скорости рабочих органов;

- предложены эмпирические соотношения между основными параметрами процессов разрыхления и очистки и характеристиками клочков, основанные на теории размерностей величин и асимптотических свойствах этих зависимостей;

- разработаны оригинальные методы получения двумерных распределений длины и тонины шерстяных волокон по данным натуральных экспериментов с учетом величины их корреляции;

- разработана динамическая модель процесса разрыхления и очистки волокнистой массы, позволившая исследовать динамику переходных режимов и частотные свойства разрыхлительно-очистительных машин.

Практическая значимость работы

Разработанные в диссертации модели позволяют выбрать оптимальные значения параметров технологического процесса и конструктивные особенности рабочих органов разрыхлительных машин.

На основе построенных моделей и полученных зависимостей даны рекомендации предпочтительных значений объема рабочих камер, числа колосников,

плотности разводки колосников и скоростных параметров рабочих органов машин РОА.

Особенностью и преимуществом подхода, реализованного в работе, является использование всех параметров и переменных величин в относительных единицах, поэтому полученные условия для оптимальных режимов и зависимости могут быть перемасштабированы в соответствии с базовыми параметрами: исходными размерами клочков, массой сорных примесей, скоростными параметрами.

Разработки, выполненные в диссертации, были использованы при выборе рациональных режимов обработки волокнистого сырья в ОАО «Пушкинский текстиль» и в учебном процессе РГУ им. А.Н. Косыгина.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на межвузовской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Студенты и молодые ученые КГТУ - производству» (2012, 2015, 2016, КГТУ, Кострома);

- на межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов с международным участием «Молодые ученые - развитию текстильной и легкой промышленности» (ПОИСК-2013, 2014, 2015, 2016, ИВГПУ, Иваново);

- на международной научно-технической конференции «Современные наукоемкие технологии и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности» (ПРОГРЕСС-2013, ИВГПУ, Иваново);

- на международной лектории, посвященном 30-летию кафедры «Системы автоматизированного проектирования и информационные системы» Воронежского государственного технического университета и памяти ведущих ученых в области САПР (2014, ВГТУ, Воронеж);

- на международной научно-технической конференции «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности» (ИННОВАЦИИ-2014, 2015, 2016, МГУДТ, Москва);

- на международной научно-технической конференции преподавателей и студентов УО «ВГТУ» (2015, 2016, ВГТУ, Витебск);
- на международной научно-практической конференции «Моделирование в технике и экономике» (2016, ВГТУ, Витебск);
- на международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы науки в технологиях текстильной и легкой промышленности» (ЛЕН-2016).

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликованы 25 работ, из которых 6 статей в журналах, входящих в перечень ВАК («Известия вузов. Технология текстильной промышленности», «Дизайн и технологии», «Технологии XXI века в легкой промышленности»), 3 статьи в других изданиях, 17 тезисов докладов в сборниках материалов научных конференций.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 185 страницах машинописного текста и состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе, списка используемой литературы из 164 наименований, 3 приложения, 86 рисунков и 19 таблиц.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ РАЗРЫХЛЕНИЯ И ОЧИСТКИ ВОЛОКНИСТОЙ МАССЫ

1.1 Сущность процессов разрыхления и очистки волокнистой массы

В настоящее время произошло изменение сырьевого баланса в текстильных производствах Российской Федерации, вызванное исчезновением дешевых источников хлопка, шерсти и шелка. Основным сырьем при производстве текстильных материалов для потребительского рынка и технических целей становятся лен и лубяные волокна, поскольку по климатическим условиям в Российской Федерации эти виды натурального сырья наиболее пригодны для выращивания и производства. Однако хлопок все равно закупается в больших количествах. В связи с его дороговизной встает вопрос об оптимальном расходовании этого сырьевого ресурса, уменьшении доли разорванных и поврежденных волокон, сокращении доли волокон, попадающих в отходы.

Хлопок, поступающий в производство, содержит сорные примеси. Процессы разрыхления и очистки клочков волокнистой массы являются ключевыми на начальных этапах прядильного производства, поскольку они обеспечивают подготовку волокна к прядению и напрямую влияют на надежность, производительность этих процессов и качество получаемой пряжи. В ходе разрыхления и очистки происходит удаление сорных примесей и коротких (непрядомых) волокон. От эффективности разрыхлительно-очистительного процесса зависят не только обрывность при производстве ровницы и пряжи, но также и такие качественные характеристики, как равномерность пряжи по геометрическим, физико-механическим и эксплуатационным свойствам. Поэтому изучению вопросов разрыхления и очистки уделяется большое внимание в работах многих авторов.

Одними из первых работ, посвященных процессам разрыхления и очистки хлопка, были труды проф. Ф. М. Дмитриева [1], проф. С. А. Фёдорова [2], проф. Л. М. Кузьмина [3].

Проф. Б. М. Владимиров подробно описал в работах [4, 5] процессы разрыхления и очистки клочков волокнистого материала. Им сформулированы основные типы процессов на машинах разрыхлительно-очистительного агрегата (РОА): выделение сорных примесей, разрыхление, выделение непрядомых волокон в отходы. Перечисленные эффекты являются положительными, но они могут сопровождаться отрицательными процессами: зажгучиванием, выделением прядомых волокон в отходы.

В [6] К. И. Бадаловым дано определение сущности процессов разрыхления и очистки: «Цель разрыхления – повышение эффективности очистки волокон от примесей, разъединения и смешивания волокон. Сущность разрыхления – превращение сильно спрессованной совокупности текстильных волокон путем разделения ее на мелкие клочки в рыхлую волокнистую массу. Цель очистки – получение чистой пряжи и создание условий для нормального протекания технологических процессов при минимальной обрывности и хорошей ровноте полуфабрикатов и пряжи. Сущность очистки – выделение сорных примесей и пороков волокна из волокнистых материалов».

Выделение сорных примесей из клочков происходит, когда примеси не волокнистой природы теряют связи с волокном и выпадают в отходы [7]. Разрыхление подразумевает уменьшение плотности и увеличение объемов клочков волокнистой массы. При зажгучивании плотность клочков увеличивается. Выделение прядомых волокон может происходить при повышенной интенсивности воздействия на волокнистую массу, неправильном выборе скоростных режимов рабочих органов, развонок между колосниками, размеров колков.

Геометрическими факторами, влияющими как на положительные, так и на отрицательные эффекты, являются диаметры колковых барабанов, рабочей зоны, колосниковых сегментов, длина, плотность расположения и форма колков, угловое расположение колосников и зазоры между ними. К кинематическим характеристикам относятся скорость вращения барабанов и связанная с ней скорость потока воздушно-волокнистой массы. К параметрам динамики можно отнести плотность воздушно-волокнистой массы и секундный расход волокнистой массы на

входе и выходах машины. В последние годы для сокращения числа барабанов и рабочих зон, уменьшения габаритов разрыхлительно-очистительных машин при сохранении их эффективности используют особую конфигурацию устройств, обеспечивающие движение волокнистого потока по винтовым образующим. Подробные исследования таких систем выполнены в работах А. Ф. Плеханова и С. А. Носковой [8, 9].

Результаты анализа литературных источников показали, что наиболее выгодно применять обработку клочков в свободном, не закрепленном в виде бородки состоянии волокон, поскольку считается, что при этом волокно меньше повреждается [10]. Для этих целей был сконструирован барабанный колковый наклонный очиститель-рыхлитель [11, 12]. В машинах РОА обработка клочков ведется на сравнительно небольшой скорости рабочих органов, что также снижает повреждаемость волокон. Типовая схема РОА [10] представлена на рисунке 1.1.

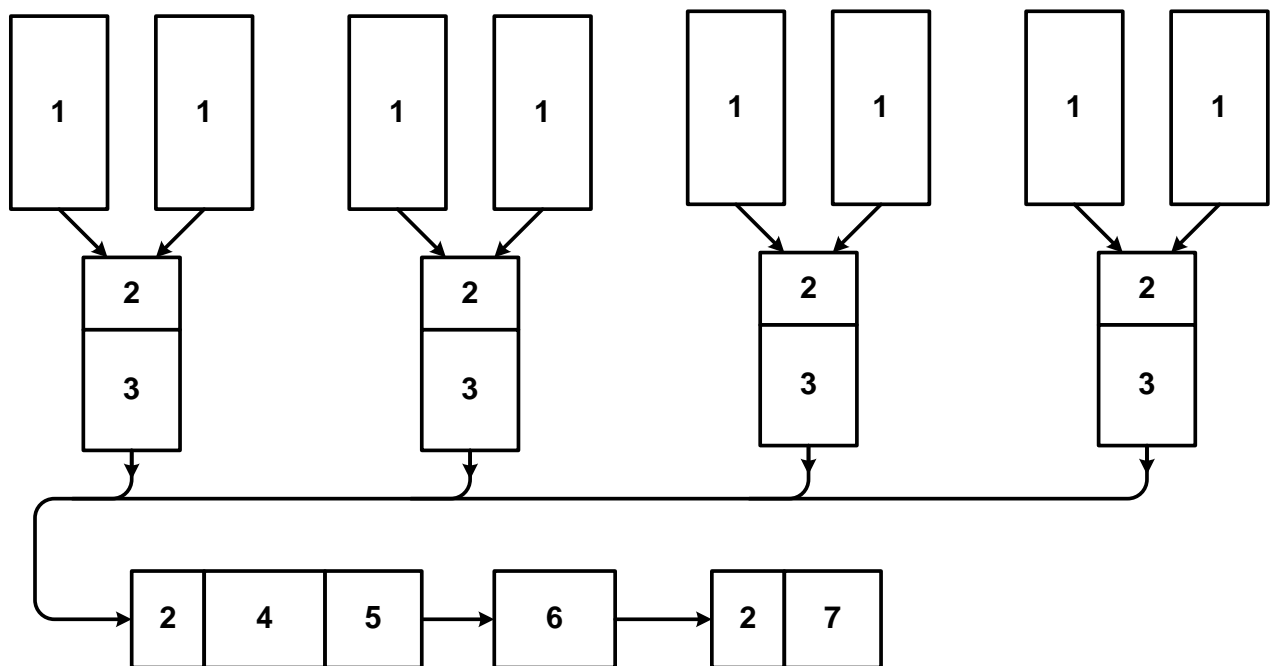


Рисунок 1.1 - Схема разрыхлительно-очистительного агрегата

На рисунке 1.1: 1 – автоматический кипоразрыхлитель; 2 – конденсоры; 3 – дозирующий бункер; 4 – головной питатель; 5 – наклонный очиститель ОН-6-3; 6 – осевой очиститель ЧО; 7 – наклонный очиститель ОН-6-4.

Для отбора клочков из кип используется кипоразрыхлитель, который создает непрерывный равномерный поток разрыхленных волокон. Отбор клочков с по-

верхности кипы производится с помощью разрыхляющих барабанов. Существуют кипные рыхлители с верхним и с нижним отбором клочков. В настоящее время вариант с нижним отбором считается устаревшим, а наибольшее распространение получили кипные разрыхлители с верхним отбором.

Одной из отличительных особенностей исследований машин РОА и происходящих на них технологических процессов являются высокая трудоемкость, большой статистический разброс массы, плотности и засоренности клочков при невысокой точности их измерения, зависимость результатов частных экспериментов с машинами от сырья и настроек исследуемого экземпляра машин. Сказанное относится и к кипным питателям-рыхлителям, которые в настоящее время представляют собой агрегаты, занимающие большие площади и включающие в себя сложные автоматизированные узлы, поэтому для исследования подобных систем все шире используются методы компьютерного моделирования, которые показали свою высокую информативность и перспективность. Примерами успешного использования метода имитационного моделирования для процессов подготовки волокнистой массы к прядению (разборка кип, смешивание, бункерное питание и распределение потоков) являются диссертационные работы Д. А. Горского [13], Г. Л. Гаспаряна [14], Е. Н. Вахромеевой [15], Ю. Б. Зензиновой [16], И. С. Горячей [17], В. И. Подрезовой [18]. В работах перечисленных авторов разработаны алгоритмы, программные реализации систем имитационного моделирования этих процессов и представлены результаты компьютерных экспериментов с моделями, позволившие создать инструментарий для выбора оптимальных режимов технологического оборудования.

После кипоразрыхлителя поток волокон с помощью конденсера передается в дозирующий бункер, где происходит выравнивание, смешивание, разрыхление волокон и частичная очистка от сорных примесей. После чего конденсер подает волокно в камеру головного питателя, в котором происходит дальнейшее смешивание, разрыхление и частичная очистка клочков. Затем волокно поступает в разрыхлительно-очистительный агрегат, состоящий из наклонного очистителя ОН-6-3, осевого очистителя ЧО и наклонного очистителя ОН-6-4, где производится

разрыхление и очистка клочков в свободном состоянии. Пример технологической схемы РОА [10] приведен на рисунке 1.2.

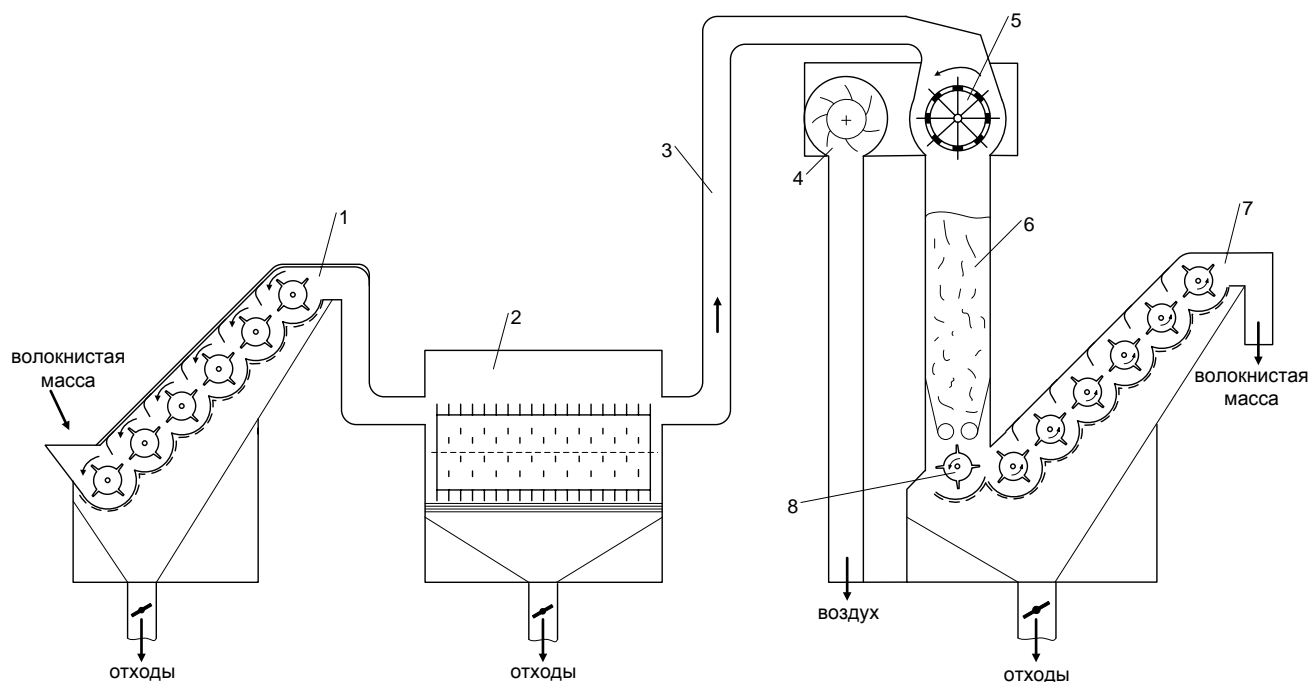


Рисунок 1.2 - Пример технологической схемы РОА

На рисунке 1.2: 1 – наклонный очиститель ОН-6-3; 2 – осевой двухбарабанный очиститель ЧО; 3 – трубопровод; 4 – вентилятор; 5 – конденсер КБ-4; 6 – резервный бункер; 7 – наклонный очиститель ОН-6-4; 8 – ножевой барабан.

Очиститель ОН-6-4 отличается от очистителя ОН-6-3 наличием резервного бункера с выпускными валиками и конденсера КБ-4. Установленные между ножевыми барабанами разделительные ножи в наклонном очистителе ОН-6-3 направляют поток волокон в зоны взаимодействия соседних барабанов. Разрыхлительно-очистительные процессы происходят в зоне взаимодействия ножей барабана и колосниковой решетки, а также в зоне взаимодействия соседних барабанов.

Схема взаимодействия ножа разрыхляющего барабана и клочка представлена на рисунке 1.3. Клочок состоит из двух связанных частей с условными массами m_1 и m_2 , сосредоточенными в точках A и B . Под воздействием ножа возникает сила P , которая действует на точку A по касательной к траектории движения клочка. Силу P можно разложить на две составляющие: P_1 , направленную по вдоль линии AB , и P_2 , направленную перпендикулярно AB . Сила P_1 стремится растянуть клочок, что обеспечивает разрыхление клочка и может привести к разделению его на

два. А сила P_2 стремится вращать массу m_1 вокруг массы m_2 , что может привести к зажгучиванию клочка [10].

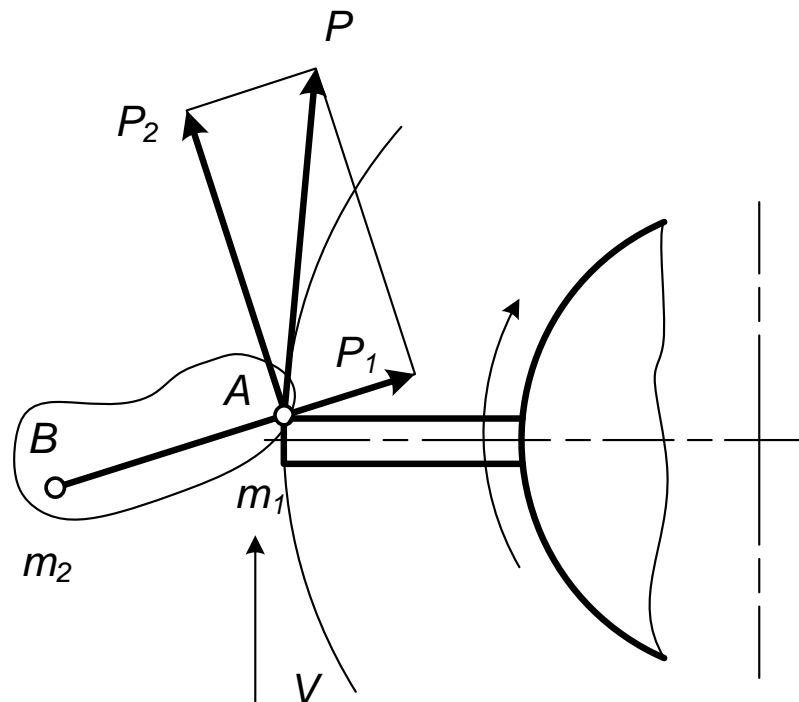


Рисунок 1.3 - Схема взаимодействия ножа разрыхляющего барабана и клочка

Интенсивность воздействия рабочих органов на волокно определяется по формуле:

$$S_p = \frac{nM \cdot 1000}{Q}, \quad (1.1)$$

где n – скорость вращения ножевого барабана, об./с; M – число ножей на ножевом барабане; Q – количество подаваемого в машину волокна, кг/с.

Осевой чиститель ЧО [19] снабжен двумя горизонтально расположенными колковыми барабанами и колосниковой решеткой. Разрыхлительно-очистительные процессы происходят при взаимодействии колков барабанов и колосниковой решетки, а также между колками соседних барабанов. Вентилятор обеспечивает движение клочков по винтовой траектории, что приводит к большему числу взаимодействий волокон и рабочих органов.

Эффективность разрыхления и очистки зависит от интенсивности воздействия рабочих органов на волокно. Также от интенсивности воздействия рабочих органов зависит и вредное воздействие на волокно, приводящее к разрывам, обра-

зованию жгутиков, размельчению примесей, которое может сопровождать процессы разрыхления и очистки. Вид этой зависимости [10] представлен на рисунке 1.4. Эффективность разрыхления определяется изменением массы клочка, а эффективность очистки – количеством выделившихся сорных примесей.

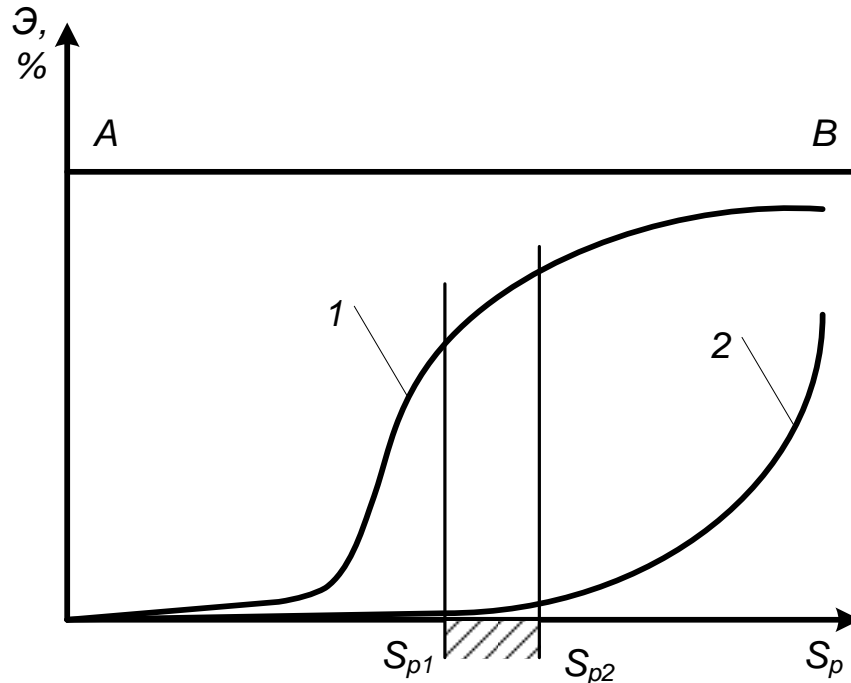


Рисунок 1.4 - Изменение эффективности разрыхления и очистки

На рисунке 1.4: 1 – кривая изменения эффективности разрыхления и очистки; 2 – кривая изменения вредного воздействия на волокно; AB – предел эффективности разрыхления и очистки; S_p – интенсивность воздействия рабочих органов на волокно; \mathcal{E} – эффективность разрыхления и очистки.

Как видно из рисунка, при малых скоростях рабочих органов эффективность разрыхления и очистки возрастает медленно. При увеличении скоростей эффективность резко повышается. При больших скоростях рост эффективности снижается и асимптотически приближается к прямой AB . Вредное воздействие на волокно при малых скоростях не обнаруживается, а затем при увеличении скоростей начинает возрастать все в увеличивающемся темпе. Оптимальная интенсивность воздействия рабочих органов на волокно находится в диапазоне от S_{p1} до S_{p2} , когда эффективность разрыхлительно-очистительного процесса достаточно высока при малой величине вредного воздействия рабочих органов на клочки волокон.

В настоящее время одной из ведущих фирм, производящих приготавительное оборудование для текстильных фабрик в области наших исследований, является фирма «Trützschler» (Германия). Учитывая высокую стоимость сырья и нацеленность на выход пряжи из волокна, фирма, кроме основного оборудования, производит ресайклинг-установки. Они предназначены для извлечения волокон из хлопчатобумажных отходов. Ресайклинг-установка может представлять собой как независимый технологический узел, так и составную часть машины предпрядильного цеха [20].

Автоматическая установка WILLOMAT RMS (рисунок 1.5) применяется для очистки хлопчатобумажных отходов, которые либо не сильно засорены, либо должны пройти еще один процесс очистки. На рисунке 1.5: *I* - питающий стол; *2* – магнитный уловитель; *3* – колковый барабан с колосниковой решеткой; *4* - отделитель крупных сорных примесей; *5* - переключающая заслонка; *6* - конденсер.

Двойная машина для переработки отходов NOVACOTONIA NCZA (рисунок 1.6) предназначена для окончательной очистки волокна после предварительной очистки их в установке WILLOMAT. На рисунке 1.6: *I* - высокопроизводительный конденсер; *II* – питающий бункер; *III* - двойная машина для очистки отходов NOVACOTONIA NCZA; *1* - уплотняющий валик; *2* - питающий столик; *3* - питающие цилиндры; *4* - сороотбойный нож; *5* - пильчатый барабан; *6* - колосниковая решетка; *7* - лопастной затвор; *8* - сетчатый барабан; *9* - выпускные валики; *10* – вентилятор; *11* - передаточный столик; *12* - питающий валик с лотком; *13* - чесальный сегмент с соровыделяющими ножами.

Очиститель волокнистых отходов представлен на рисунке 1.7. На рисунке 1.7: *I* - высокопроизводительный конденсер; *II* – питающий бункер; *1* - световой затвор; *2* - переключающая заслонка; *III* - угароочищающая машина NOVACOTONIA NCA; *3* - питающий валик с лотком; *4* - чесальный сегмент с соровыделяющими ножами; *5* - пильчатый барабан; *6* - лопастной затвор; *7* - сетчатый барабан; *8* – вентилятор; *9* - выпускные валики.

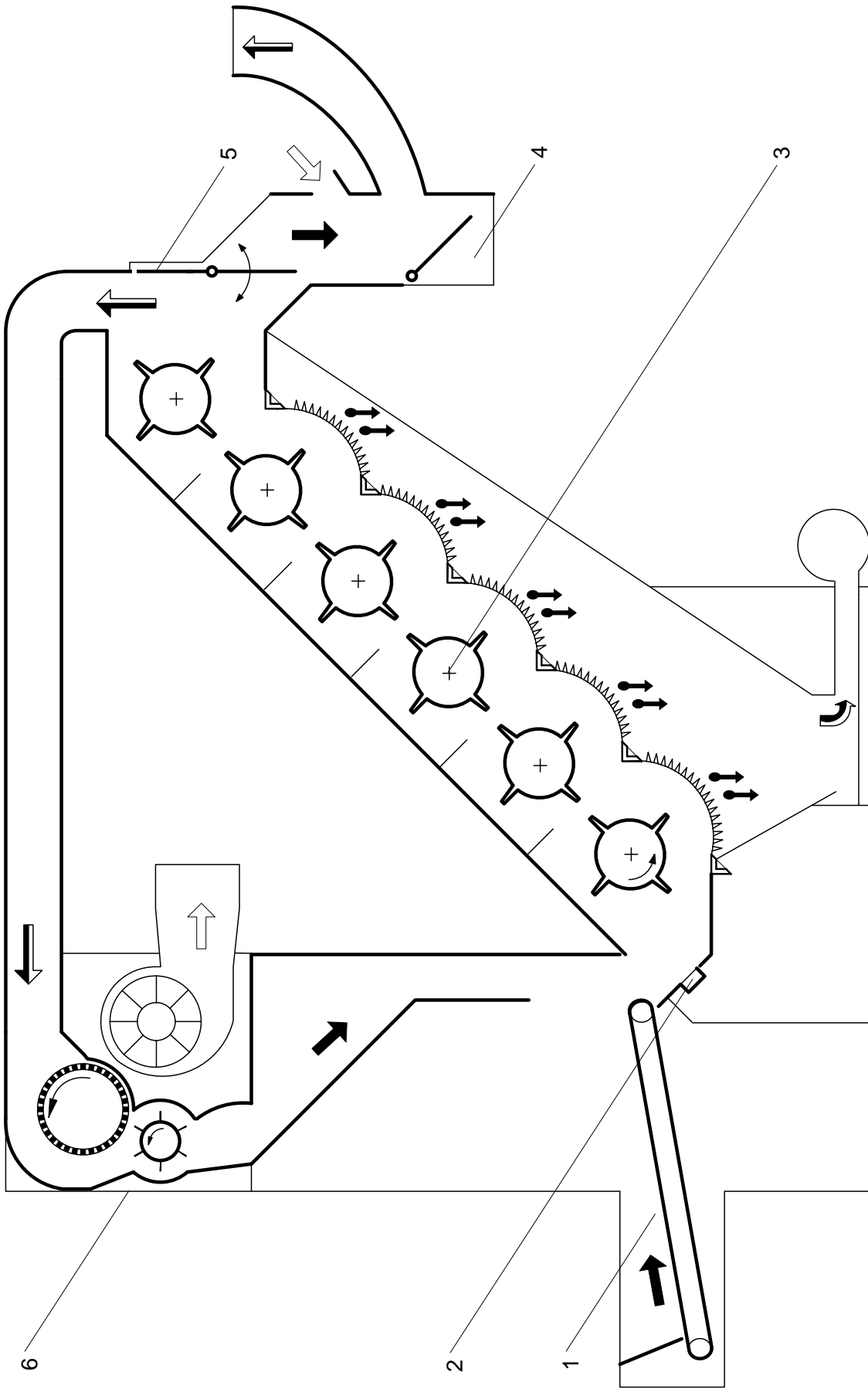


Рисунок 1.5 - Автоматическая установка WILLOMAT RMS для очистки отходов

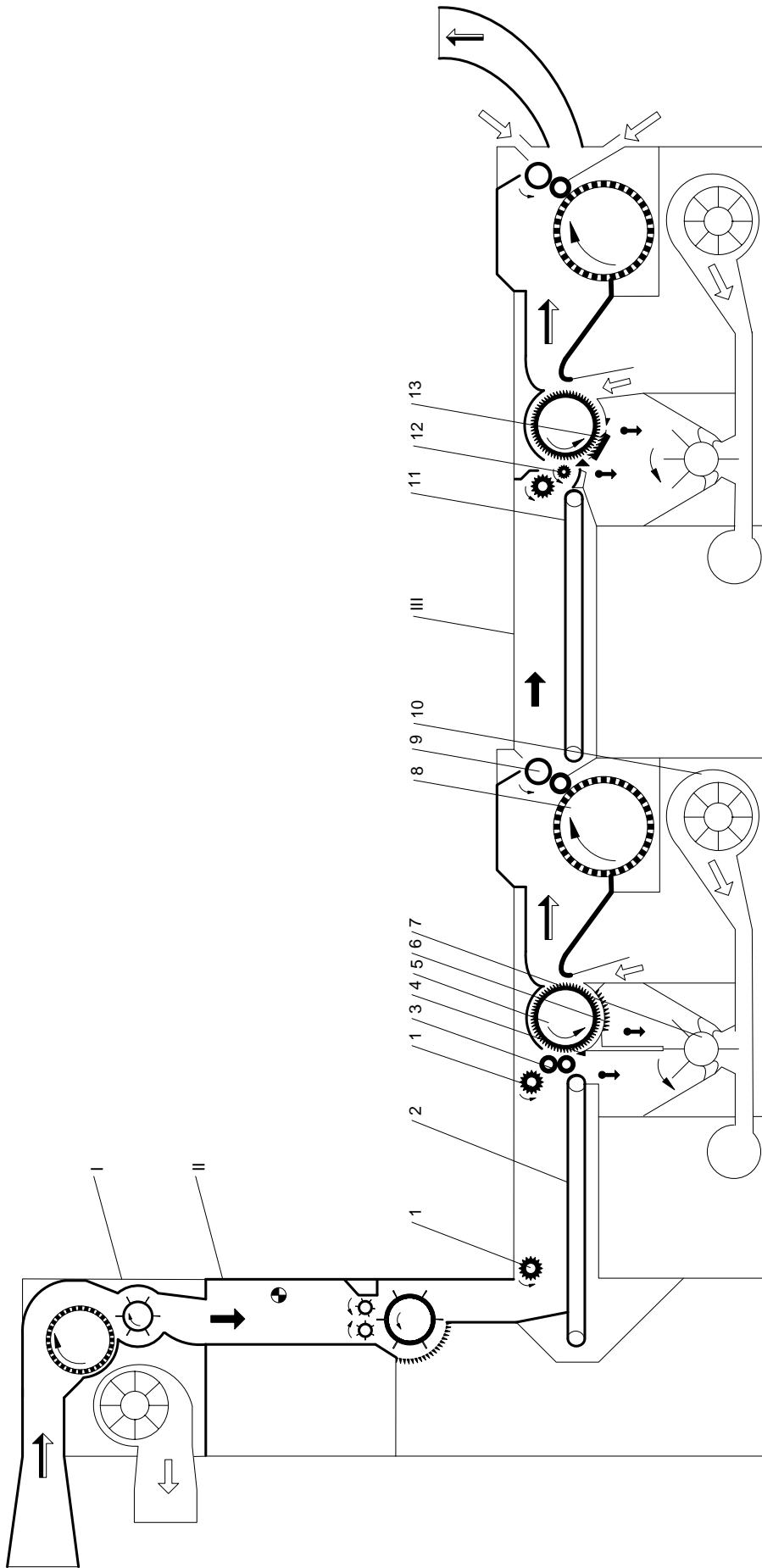


Рисунок 1.6 - Двойная угарочисающая машина NOVACOTONIA NCZA

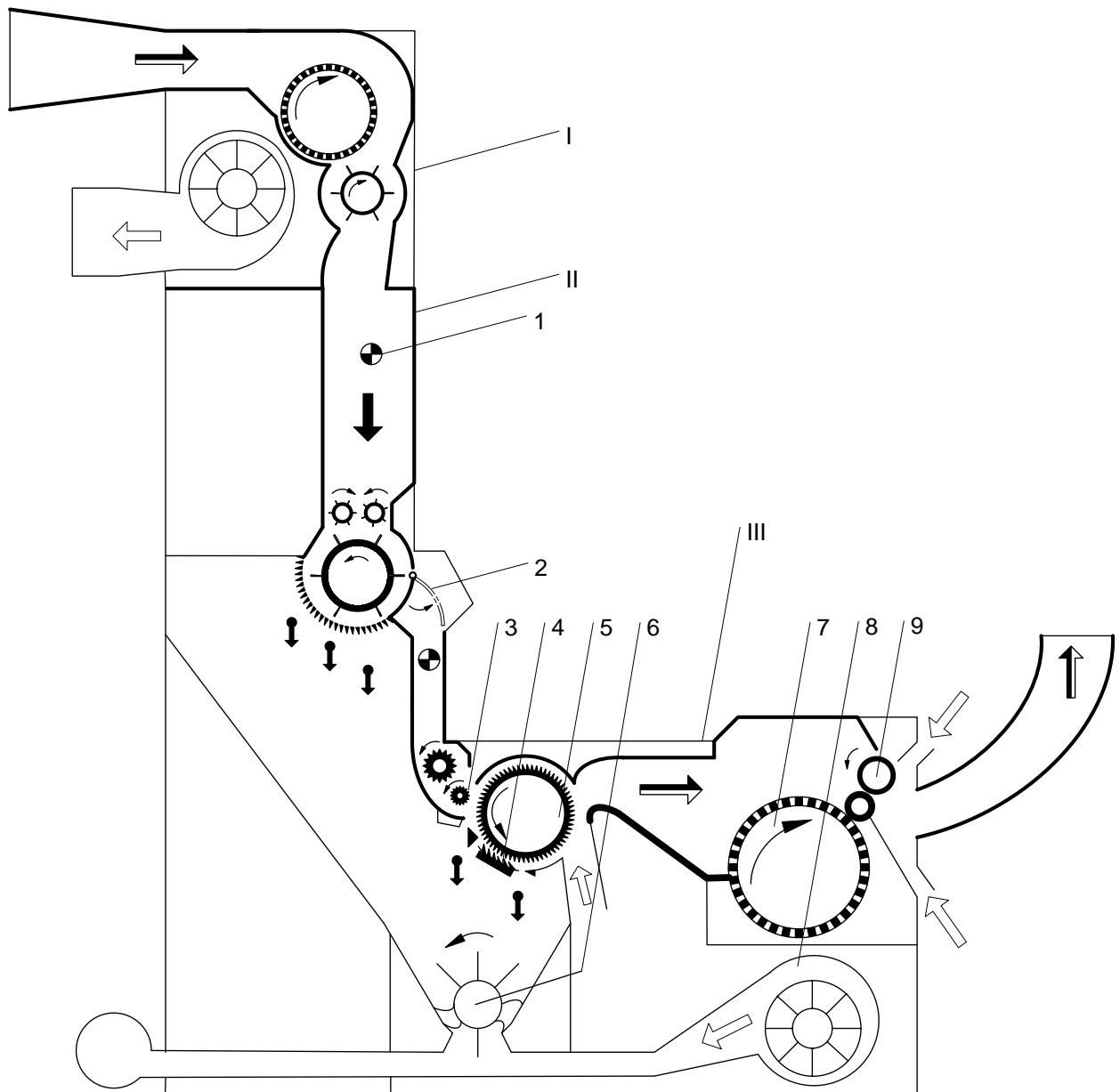


Рисунок 1.7 – Очиститель волокнистых отходов

Другим крупным производителем разрыхлительно-очистительного оборудования является фирма «Marzoli» (Италия). На рисунке 1.8 представлено устройство для очистки волокнистой массы «Marzoli» [21]. На рисунке 1.8: 1 – отбойные ножи; 2 – отражатели; 3 – колосники; 4 – узлы сбора сорных примесей и отходов.

Сорные примеси, содержащиеся в волокне, можно разделить на три основные группы [22]:

- сорные примеси, выделяющиеся при разделении и легком встряхивании клочков;
- сорные примеси, выделяющиеся при взаимодействии с колосниковой решеткой;

– пороки, прочно связанные с волокном, и мягкие пороки волокнистой массы.

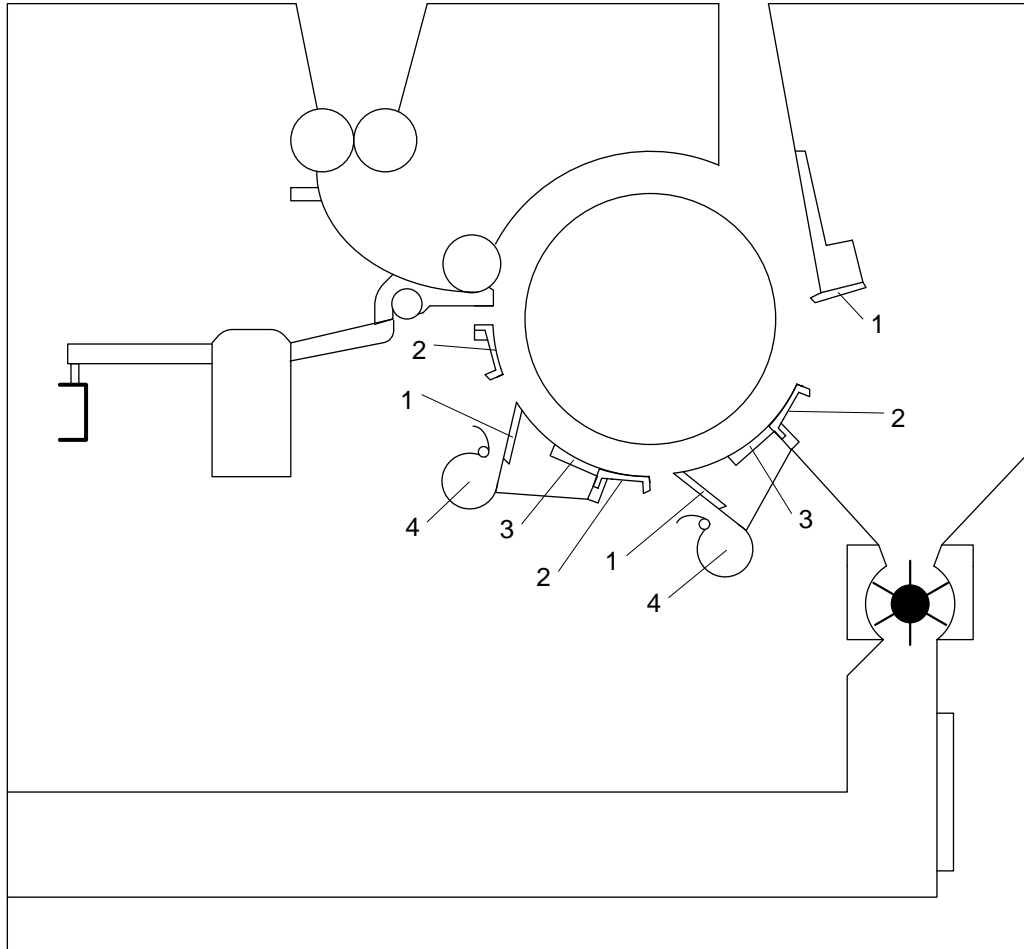


Рисунок 1.8 - Устройство для очистки волокнистой массы «Marzoli» (Италия)

Характер пороков и примесей волокон определяет их прядельную способность. Чем больше содержание пороков и сорных жестких примесей, тем меньше выход пряжи, выше засоренность и обрывность при прядении и ткачестве [23].

На рисунках 1.9 - 1.13 представлен вид отходов и выход волокна после обработки на различных очистительных машинах.



Рисунок 1.9 - Хлопчатобумажные отходы из волокноотделителей (Gin Motes)

100%



Рисунок 1.10 - Выход волокна (WILLOMAT) 60,80%



Рисунок 1.11 - Вторичные отходы (WILLOMAT) 36,70 %



Рисунок 1.12 - Выход волокна (NOVACOTONIA) 44,25%



Рисунок 1.13 - Вторичные отходы (NOVACOTONIA) 14,30%

Сравнение рисунков показывает рассортировку исходного сырья на прядомое волокно (рисунок 1.12), прядомое волокно с малым количеством сорных примесей (рисунок 1.10) и отходы, которые могут содержать в большей или меньшей степени и волокна (рисунки 1.9, 1.11, 1.13). Таким образом, процесс очистки является многостадийным, и каждая стадия имеет отличительные особенности от других стадий обработки.

1.2 Теоретические и экспериментальные исследования процессов разрыхления и очистки волокнистой массы

В работах В. А. Молитвина [24, 25] рассмотрены вопросы эффективности очистки и разрыхления клочков хлопка. Проведенные им экспериментальные исследования показали, что разрыхленность клочков в процессе обработки на разрыхлительно-очистительных машинах постоянно возрастает, что приводит к отделению сорных примесей.

Раньше на фабриках были распространены трепальные машины, поэтому в ранних работах им уделяется много внимания. Например, в работах Т. А. Фроловой [26, 27] исследуется изменение распределения длины волокон в результате трепания. Особенностью этого процесса является обработка волокна в зажатом в виде бородки состоянии. В настоящее время такая обработка считается малопродуктивной и малоэффективной. В работах Т. А. Фроловой приведены данные по распределению длины волокон, но не учитывается динамика разрыхлительно-очистительного процесса.

В диссертации О. Л. Канчавели [28] большое внимание уделяется вертикальному и горизонтальному разрыхлителям. О. Л. Канчавели построил математическую модель функционирования вертикального разрыхлителя, а также получил его передаточную функцию, весовую функцию и амплитудную характеристику.

В диссертации [29] Г. А. Хосровян разработал новые модели разрыхлителей-очистителей Р-О-1, Р-О-2, Р-О-3, провел исследование процесса движения клочков волокон по рабочей поверхности зуба гарнитуры пильчатого барабана и установил, что удерживающая и центробежная силы оказывают основное влияние на клочок волокон на зубе гарнитуры в зоне обрытой поверхности. Кроме того, Хосровяном Г. А. построена математическая модель процесса аэродинамического съема клочков волокон с зуба гарнитуры пильчатого барабана и предложена методика определения оптимальных параметров конструкции разрыхлителя, обес-

печивающих лучшие условия протекания процессов разрыхления, транспортировки и съема волокон.

А. С. Мкртумян [30, 31] провел исследования процесса поведения волокнистой смеси в шахте бункерного питателя. Им были получены следующие результаты:

- выведена зависимость плотности засоренной волокнистой смеси от плотности волокнистой составляющей, плотности сорных примесей и засоренности волокнистой смеси;

- выведено уравнение движения волокнистой смеси в шахте бункерного питателя с учетом величины ее засоренности;

- получены аналитические зависимости для различных вариантов технологического расчета процесса бункерного питания разрыхлителя-очистителя засоренной волокнистой смесью.

- получена аналитическая зависимость, связывающая величину высоты столба волокнистой смеси с геометрическими параметрами бункера, с механическими характеристиками питающей смеси, с ее засоренностью и величиной среднего давления воздуха в шахте бункерного питателя.

В диссертационной работе [32] А. С. Мкртумян разработал разрыхлитель-очиститель с многоступенчатой очисткой, который позволяет повысить эффективность очистки и уменьшить неровноту волокнистой смеси. Также создан регулятор линейной плотности для разработанного разрыхлителя-очистителя с определением граничных условий работы. Кроме того, выведена математическая модель для проектирования автоматической системы регулирования линейной плотности волокнистой массы на выходе машины.

Для описания взаимодействия клочков с рабочими органами А. Г. Хосровяном были получены следующие математические модели и уравнения [33]:

1) уравнение процесса движения клочков по рабочей поверхности зуба гарнитуры пильчатого барабана:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F}_ц + \vec{F}_тр + \vec{N} + \vec{F}_а + \vec{F}_уд \quad (1.2)$$

где $m\vec{g}$ – сила тяжести; $\vec{F}_{ц}$ – центробежная сила; $\vec{F}_{тр}$ – сила трения между клочком и рабочей гранью зуба; \vec{N} – сила нормального давления; \vec{F}_a – аэродинамическая сила; $\vec{F}_{уд}$ – удерживающая сила со стороны соседних клочков.

2) модель для расчета удерживающих сил, действующих на клочок волокон на зубе гарнитуры пильчатого барабана в зоне открытой поверхности:

$$F_{уд} = m \left\{ g(\cos \delta_{c1} + \mu \sin \delta_{c1}) + V_B^2 \left[\frac{\cos \beta - \mu \sin \beta}{R_B} - \frac{k_a g}{v_{вит}^2} - (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) \right] \right\} \quad (1.3)$$

где V_B – окружная скорость пильчатого барабана; μ – коэффициент трения между клочком волокон и рабочей гранью зуба; m – масса клочка; $v_{вит}$ – скорость витания клочка; δ – угол между $\vec{F}_{уд}$ и $m\vec{g}$; β – угол между $\vec{F}_{ц}$ и $\vec{F}_{уд}$; α – угол между \vec{F}_a и $\vec{F}_{уд}$

3) модель процесса аэродинамического съема клочков волокон с зуба гарнитуры пильчатого барабана:

$$mx = -mg(\cos \delta + \mu \sin \delta) + F_{ц}(\cos \beta - \mu \sin \beta) + F_a(\cos \alpha + \mu \sin \alpha) - F_{уд} \quad (1.4)$$

С точки зрения механики эти модели представляют интерес и позволяют проранжировать силы и оценить их влияние. Однако, использование данных моделей для непосредственных расчетов и оценок затруднительно, поскольку процесс носит вероятностный статистический характер, и все силы содержат значительную случайную составляющую.

Е. И. Громова [34-36] исследовала процесс взаимодействия волокнистой массы с колосником волокноочистительной машины. В этих работах были построены математические модели взаимодействия пряди волокна с колосником треугольного профиля с учетом скорости взаимодействия, характеристик волокна, аэродинамического сопротивления. Получено следующее уравнение движения пряди:

$$\ddot{\varphi} - \frac{2}{L} \frac{dL}{dt} \dot{\varphi} + \frac{g}{L} \sin \varphi = \frac{-Mc}{mL^2}, \quad (1.5)$$

где L – длина свободной части прядки; φ – угол поворота пряди при движении свободного конца; m – масса прядки волокна; M_c – момент силы сопротивления воздуха при вращательном движении прядки.

При этом относительная скорость движения прядки по колоснику определяется выражением:

$$\frac{dL_T}{dt} = \frac{V^2 t + Vh \operatorname{tg} \beta}{\sqrt{V^2 t^2 + 2Vh \operatorname{tg} \beta + \frac{h^2}{\cos^2 \beta}}}, \quad (1.6)$$

где L_T – текущая длина контролируемой пыльным цилиндром и колосником пряди волокна; h – величина технологической разводки между колосником и пыльным цилиндром; β – угол отклонения пряди волокна от радиального направления при вращении пыльного диска под действием сил аэродинамического сопротивления.

Кроме того, Е. И. Громовой разработана методика определения сил аэродинамического сопротивления, действующих на волокно [37]. Сила сопротивления воздуха, стремящаяся отклонить прядку волокна от радиального направления, определяется по формуле:

$$P_c = CS \frac{\rho V_g^2}{2}, \quad (1.7)$$

где C – коэффициент аэродинамического сопротивления; S – миделево сечение прядки волокна; ρ – плотность воздуха; V_g – скорость воздушного потока.

Действующая на прядки центробежная сила инерции равна:

$$P_u^u = \frac{mV^2}{(R+r)} = m\omega^2(R+r), \quad (1.8)$$

где V – линейная скорость движения центра тяжести прядки волокна; ω – угловая скорость пыльного цилиндра; R – радиус пыльного цилиндра; r – радиальная координата центра тяжести волокна.

Полученные формулы позволяют оценить скорости взаимодействия волокнистой массы с колосником, влияние воздушных потоков геометрических параметров колосников на движение клочков.

В работе [34] Е. И. Громовой предложена конструкция волоконоочистительной машины с регулируемыми параметрами пыльно-колосниковой системы, благодаря которой можно повысить эффективность очистки хлопкового и короткоштапельного льняного волокна.

В работах [38, 39] А. Ф. Плеханов провел обзор характеристик очистителей, а также расчет ожидаемого эффекта очистки, рассмотрел процессы, протекающие в наклонном очистителе ОНК-6 и трехрядном рыхлителе-очистителе. Кроме того, в этих работах приведен анализ работы машин, осуществляющих разрыхление и очистку волокнистой массы.

А. Ф. Плехановым построены модели воздействия рабочих органов очистителя на клочки волокнистой массы, благодаря чему было определено оптимальное расположение рабочих органов очистителя. В [8] рассмотрена и усовершенствована зависимость эффекта очистки волокнистой массы от различных технологических и сырьевых факторов, предложенная специалистом фирмы «Trützschler» (Германия) Ф. Лейфельдом:

$$\mathcal{E}a = M \cdot C \cdot S_g \cdot P, \quad (1.9)$$

где $\mathcal{E}a$ – абсолютный эффект очистки волокнистой массы от сорных примесей, %; M – коэффициент, зависящий от конструкции очистительных машин; C – коэффициент, зависящий от совокупности свойств материала, температурно-влажностного режима и технологических условий производства; S_g – процентное содержание сорных и жестких примесей в волокнистом материале на входе в очистительную машину; P – фактор, учитывающий производительность и загрузку очистительной линии машин.

Предложен показатель очистительной способности машины, отражающий динамику изменения эффекта очистки волокнистой массы при изменении засоренности смеси волокна на входе в машину на 1 % [8]:

$$M = \frac{\sum \mathcal{E}a}{\sum S_g} \quad (1.10)$$

Так же построена вероятностная модель взаимодействия клочков волокнистой массы с рабочими органами очистительных машин:

$$p = \frac{sm}{S} + \frac{dm}{S}, \quad (1.11)$$

где p – вероятность попадания клочка под удар ножевого барабана; s - ширина рабочей грани ножа барабана, м; m - число ножей на барабане; d - средний размер поперечного сечения клочка, м; S - рабочая ширина очистителя.

Для обеспечения большей эффективности подготовки хлопка к прядению группой авторов с участием А. Ф. Плеханова был разработан и исследован новый способ очистки волокнистого материала и устройство для его осуществления – двухрядный рыхлитель-чиститель (ДРЧ) [8, 9]. Показатель эффекта очистки волокнистой массы выражен следующим образом:

$$\varepsilon_0 = 1 - \exp(-r \cdot k) \quad (1.12)$$

где k – коэффициент, учитывающий количество возможных воздействий на волокнистую массу; r – коэффициент, характеризующий эффект очистки волокнистой массы, определяется по формуле:

$$r = \frac{b}{1+a} \quad (1.13)$$

где b – коэффициент, характеризующий объемную плотность материала; a – коэффициент характеризующий изменение объема.

С помощью модели движения волокнистой массы в рабочей камере ДРЧ было определено, что наиболее интенсивно процесс разрыхления происходит при вертикальном способе подачи волокнистой массы в рабочую камеру [40].

Д. А. Лебедев провел исследование процесса ударного взаимодействия пряди волокон с элементами колосниковой решетки круглого и плоского сечений [41]. Им было установлено, что на силу ударной нагрузки оказывает влияние профиль элемента колосниковой решетки. Применение элементов колосниковой решетки плоского сечения позволяет повысить скорость рабочего органа.

Также Д. А. Лебедевым разработаны линейная и нелинейная модели процесса ударного взаимодействия пряди волокон с элементом колосниковой решетки. Кроме того, создана модель взаимодействия волокнистого материала с дели-

тельным устройством пыльной волокноочистительной машины прямого действия.

В работах В. Г. Гончарова [42, 43] приведен анализ процессов разрыхления и очистки хлопковых волокон, определены требования к конструкциям проектируемых разрыхлительно-очистительных машин.

В диссертации Д. В. Смолина [44] предложен оптимальный состав РОА для переработки волокон хлопка разной степени засоренности, включающий в себя следующие машины: автоматический кипный рыхлитель; смеситель непрерывного действия; осевой очиститель; пылчатый очиститель; аэродинамический очиститель; распределитель по чесальным машинам.

Одним из процессов, сопровождающих обработку волокнистого материала на волокноочистительных машинах, является миграция (перемещение) сорных примесей внутри волокнистого материала [45, 46]. Условия для миграции примесей возникают при сдвигании слоев волокна под воздействием рабочих органов машин. На величину и направление перемещения сорных частиц влияют свойства волокна и самих примесей, форма примесей и их расположение в клочке волокнистого материала.

1.3 Обзор динамических моделей взаимодействия волокнистой массы с рабочими органами разрыхлительно-очистительных машин

Процессы очистки и разрыхления волокнистой массы на начальных переходах прядильных производств текстильной промышленности близки по своей физической сущности к процессам первичной обработки хлопка в хлопкоочистительной промышленности. Для этих процессов было разработано большое количество математических моделей взаимодействия рабочих органов с клочком волокнистой массы. Все эти модели основаны на уравнениях динамики и теории удара. Ниже приведены некоторые из них.

Традиционно промышленность, связанная с хлопком, делится на хлопкоочистительную и текстильную. Хлопок выращивают в основном в Средней Азии

(в Узбекистане, Таджикистане, Туркменистане и Киргизии), а так же в Казахстане и Азербайджане, и там же рационально осуществлять его первичную очистку. Поэтому хлопкоочистительные заводы строились на территории Узбекистана, Таджикистана, Туркменистана.

Первично очищенный хлопок упаковывается в кипы, после чего его транспортируют в текстильные центры, где этот хлопок поступает на переработку: кипы разделяются на клочки, которые затем подвергаются очистке уже в рамках текстильной промышленности. Основная машина при первичной очистке – это пильный или валичный джин. Целью джинирования является очистка волокон хлопка-сырца от семени, особенно собранного машинным способом, от крупного сора (ветки, сухие листья хлопчатника). В процессе обработки сор либо полностью удаляется, либо размельчается.

Вопросам очистки хлопка-сырца посвящена диссертация Р. З. Бурнашева [47]. Им было проведено теоретическое и экспериментальное исследование механической технологии процессов очистки хлопка-сырца от мелкого сора. Изучено взаимодействие частиц хлопка с рабочими органами машин.

Описанию взаимодействия клочков хлопка-сырца рабочими органами очистительных машин посвящен ряд работ [48-53]. Х. И. Иброгимов, Р. В. Корабельников определили параметры колков (число рядов колков, коэффициент трения на колках), обеспечивающих захват и удержание частиц хлопка [48]. Этими же авторами выявлены параметры движения частиц хлопка по колку: время движения частицы по колку, время схода частицы с колка, относительная скорость частиц по колку в момент схода [49].

В [51] определен комплексный показатель воздействия рабочих органов очистителя на хлопок с учетом скоростных и силовых параметров этих воздействий. Для хлопкоочистительной машины от мелкого сора типа СЧ-02 комплексный показатель определяется следующим образом:

$$K_0 = K_{\text{сo}} K \partial \leq [K_0], \quad (1.14)$$

где $K_{\text{в}0}$ – коэффициент воздействия одной колковой секции очистителя мелкого сора; $K\delta$ – коэффициент динамического воздействия; $[K_0]$ – допустимое значение комплексного показателя.

Коэффициент воздействия одной колковой секции очистителя мелкого сора определяется по формуле:

$$K_{\text{в}0} = n_{\delta} Z_{\kappa} N \tau \eta, \quad (1.15)$$

где n_{δ} – частота вращения колкового барабана, с^{-1} ; Z_{κ} – число рядов колков на барабане; N – число барабанов в машине; τ – время прохождения хлопка-сырца по одному барабану очистителя, с ; η – коэффициент, учитывающий соотношение линейных скоростей барабана и хлопка-сырца.

Коэффициент динамического воздействия рассчитывается следующим образом:

$$K\delta = \frac{1}{1 - \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\kappa}}}, \quad (1.16)$$

где $P_{\text{ср}}$ – средняя сила удара; P_{κ} – критическая сила удара.

Таким образом, комплексный показатель для очистителя мелкого сора равен:

$$K_0 = n_{\delta} Z_{\kappa} N \tau \eta \frac{1}{1 - \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\kappa}}} \leq [K_0], \quad (1.17)$$

Данный показатель может быть использован для прогнозирования качества перерабатываемого сырья при проектировании новых схем технологических цепочек очистки хлопка.

В работе [50] А. Р. Корабельников, Х. И. Иброгимов, Р. В. Корабельников, Д. А. Лебедев разработали динамическую модель взаимодействия колка с частицей волокнистого материала при очистке в не зажатом, свободном состоянии. Ниже описаны входящие в модель уравнения и выражения.

Дифференциальное уравнение движения частицы при взаимодействии с колком:

$$m_1 \frac{d^2 z_2}{dt^2} = (z_1 - z_2) C_1, \quad (1.18)$$

где m_1 – масса частицы хлопка; z_1 – координата движения колка; z_2 – координата движения частицы; C_1 – жесткость частицы.

Выражение для закона движения частицы:

$$z_2 = V_0 t - \frac{V_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t, \quad (1.19)$$

где V_0 – скорость колка; ω_0 – круговая частота собственных колебаний частицы.

Условие отделения сорных примесей от частицы:

$$m_c V_0 \omega_0 \geq Q_{cz}, \quad (1.20)$$

где m_c – масса сорных частиц; Q_{cz} – составляющая силы закрепления сорной частицы на поверхности частицы хлопка в направлении оси OZ.

Дифференциальное уравнение движения сорной частицы выглядит аналогично (1.10). Колебания частицы хлопка:

$$z = \frac{S_0}{m_i \omega_0} \sin \omega_0 t, \quad (1.21)$$

где S_0 – импульс мгновенных сил; m_i – масса летучки; ω_0 – круговая частота собственных колебаний летучки.

Импульс мгновенных сил при неупругом ударе:

$$S_0 = m_i V_0 \quad (1.22)$$

Амплитуда колебаний частицы при ударе будет:

$$z_{\max} = \frac{V_0}{\omega_0} \quad (1.23)$$

Ударная сила:

$$P_{y\partial} = \frac{m_i V_0}{\tau}, \quad (1.24)$$

где τ – время удара.

Ускорение, которое воздействует на сорную частицу, находящуюся на летучке:

$$a_{\max} = \left(\frac{d^2 z}{dt^2} \right)_{\max} = -\omega_0 V_0 \quad (1.25)$$

Максимальная сила инерции сорной частицы:

$$P_C^I = -\omega_0 V_0 m_{C_i}, \quad (1.26)$$

где m_{C_i} - масса сорных примесей в частице.

Эта модель позволяет подробно изучить механизм взаимодействия частиц хлопка с рабочими органами очистительных машин, а также условия выделения сорных примесей. Однако, полученные в этой работе оценки весьма приближительны, поскольку приведенные выше уравнения соответствуют материальной точке и не учитывают такие факторы, как статистический разброс, движение воздуха, сложность траектории движения частиц.

Для достижения наибольшего эффекта от разрыхлительно-очистительного процесса необходимо оптимальным образом подобрать кинематические параметры очистительной секции. Поэтому важной задачей является исследование динамики процесса воздействия на сорные примеси [54].

В работах [55, 56] И. Г. Хосровян, Т. Я. Красик, Г. А. Хосровян рассмотрели динамику волокнистых комплексов в процессе их взаимодействия с рабочими органами разрыхлителя, построили математическую модель для расчета движения волокнистого комплекса на колке барабана разрыхлителя. А также эти авторы вывели аналитическую зависимость на основании законов механики и аэродинамики для оптимизации геометрических параметров разрыхлителя и его технологического режима.

Д. А. Лебедев, А. Р. Корабельников, Р.В. Корабельников построили динамические и математические модели взаимодействия сорных примесей с волокном [57]. Данные модели позволяют оценить влияние на эффективность процесса очистки таких параметров системы, как скорость взаимодействия пряди волокон с поверхностью колосника, коэффициент жесткости связи сорной примеси с волокнистым материалом, сила связи сорной примеси с прядью волокон.

В результате проведенного исследования [52, 58] процесса взаимодействия колка с частицей хлопка-сырца установлено, что частицы испытывают нецентральный удар со стороны колкового барабана, что приводит к зажгучиванию. Для снижения негативного воздействия предложено применять плоские колки или использовать лопастные барабаны.

Существует два вида закрепления гарнитуры очистительных машин: жесткое и податливое. С. Н. Вихаревым, А. Р. Корабельниковым, Р. В. Корабельниковым составлены динамическая и математическая модели процесса нагружения волокон гарнитурой [59]. Установлено, что при нагружении податливой гарнитурой волокно меньше деформируется и меньше рвется, чем в случае жесткозакрепленной гарнитуры.

Также проводились исследования влияния очистителя-котонизатора на обрабатываемое волокно [60]. Установлено, что при обработке иглами, обладающими податливостью, нагружение волокна происходит в более щадящем режиме, что позволяет сохранять длину волокон и снизить число коротких волокон в конечном продукте.

Ряд работ [61, 62] посвящен процессу разрежения (разукрупнения) слоя хлопка-сырца в питателе очистителя мелкого сора. Благодаря разрежению сорные примеси оказываются на открытой поверхности волокнистых частиц, что ведет к удалению сора. В [61] проведено моделирование процесса разрежения слоя хлопка-сырца в питателе очистителя мелкого сора. Рассмотрены вопросы динамического нагружения волокнистых связей между частицами хлопка-сырца [62]. Установлено, что наибольшее влияние на процесс разрежения оказывает скорость колкового барабана.

Р. В. Корабельников и Ф. М. Сафаров рассматривали основные факторы, влияющие на процесс джинирования: частоту вращения отбойного органа, производительность джина по волокну, давление в зоне контакта ножа с джинирующим барабаном, усилия запрессовки джинирующего барабана [63]. Были получены математические модели, устанавливающие степень влияния перечисленных факторов на выходные параметры процесса джинирования.

Для оптимизации процесса дженирования был разработан джин с ускорителем вращения сырцового валика и уменьшенным объемом рабочей камеры [64, 65]. Проведенные исследования показали, что использование нового джина позволяет снизить расход электроэнергии, а также уменьшить содержание пороков и сорных примесей в волокне.

Чтобы подготовить волокна к прядению, необходимо технологическое воздействие, однако, оно может вызвать обрывы. Главными причинами обрывности волокон являются высокие напряжения в волокне, возникающие при взаимодействии с рабочими органами машин [66]. Поэтому актуальной становится задача оптимизации технологического процесса обработки волокон.

Задачу оптимизации можно сформулировать таким образом: имеется технологический переход, состоящий из машин, на которых выполняются операции с волокнами. На вход поступает поток волокнистой массы, который характеризуется определенным распределением, например, по длине волокон, по тонине, по извитости. В результате обработки закон распределения этих волокон в выходящем потоке становится отличным от начального закона. Например, длина волокон может измениться за счет обрывов части волокон.

Чтобы осуществить какую-либо обработку волокна (например, утонить продукт, выпрямить волокна), нужно подвергнуть волокна механическому воздействию. Чем сильнее это воздействие, тем эффективнее оно будет, т.е. за один переход можно добиться большего результата. Но одновременно возникает и негативный эффект от этого механического воздействия: увеличивается вероятность разрыва волокон. Поэтому с точки зрения экономии сырья постановка оптимизационной задачи может быть сформулирована так: каким образом осуществлять наибольшее механическое воздействие, чтобы потери волокна при этом не превышали допустимых величин [67]. Или наоборот: как добиться нужного уровня технологической обработки, минимизировав при этом потери.

Большое количество переходов технологических цепочек снижает качество волокна и приводит к дополнительным расходам, поэтому важной задачей является оптимизация разрыхлительно-очистительного процесса [68]. Поскольку вме-

сте с сорными примесями в отходы выделяется и часть самого волокна, то при увеличении доли отходов снижается выход продукта, что является экономически невыгодным, а при уменьшении – ухудшается качество волокна [69]. В связи с этим, остается вопрос об оптимальном выборе рациональной доли отделяемых примесей.

Экспериментальными исследованиями в области повышения качества волокнистой массы занималось множество авторов. В частности, изучение процессов разрыхления и очистки проведено А. Г. Хосровяном с целью их совершенствования и повышения их эффективности [33]. Им была разработана методика определения оптимальных параметров конструкции разрыхлителя. Были изготовлены и исследованы новые модели разрыхлителей-очистителей Р-О-1, Р-О-2, Р-О-3.

В ходе технологического воздействия на клочки волокнистой массы происходит образование хлопковой пыли и пуха из-за разрывов волокон, поэтому для повышения эффективности очистки необходимо обеспечить обеспыливание волокнистой массы [70]. Вопросами обеспыливания занимался К. Ю. Павлов в работах [70-75]. Им были разработаны и исследованы технологические операции обеспыливания волокнистого материала на машинах разрыхлительно-очистительного агрегата. Проведенные исследования показали целесообразность включения операции обеспыливания в технологический процесс разрыхления и очистки клочков волокнистого материала.

В работе С. В. Кузяковой и А. Ф. Плеханова проведена модернизация наклонного очистителя ОН-6-П, в котором отсос пыли производится вверх, за счет чего повышается интенсивность удаления сорных примесей и пыли [76].

Ф. С. Поддувалкин на основании проведенного им исследования доказал, что наиболее эффективными агрегатами являются агрегаты с чередующимися видами воздействий [77]. Использование пыльчатых очистителей снижает обрывность волокон, приводит к меньшему зажгучиванию, что в конечном итоге повышает эффективность процессов разрыхления и очистки.

Одним из путей повышения эффективности очистки волокнистой массы является технологическая операция разрежения – разукрупнения материала [78, 79]. Эта операция обеспечивает сдвиг слоев в частице волокна, что приводит к уменьшению связей сорных частиц с волокнистым материалом.

Н. С. Скуланова в диссертации [80] определила оптимальные технологические параметры машины для очистки волокна с целью получения высокой степени очистки и максимальной длины волокна.

1.4 Анализ результатов исследований статистических характеристик клочков в процессах разрыхления и очистки

Другая большая группа исследований процессов разрыхления и очистки связана с изучением статистических характеристик волокнистой массы и клочков, которые его образуют. Этими исследованиями установлено, что характеристики, описывающие свойства клочков (масса, плотность, содержание сорных примесей), имеют вероятностную природу. Разброс значений этих характеристик чрезвычайно велик относительно средних и модальных значений. Распределения этих характеристик имеют ярко выраженную асимметрию и «тяжелые хвосты». Типичными примерами такого рода характеристик являются масса клочков, объемная плотность волокнистой массы, масса сорных примесей в клочке, доля непрядомых волокон в клочке, длина и тонины волокон. В ходе процессов разрыхления и очистки форма распределений и их числовые параметры существенно изменяются. Установлено также, что эффективность процессов прямо зависит от особенностей распределения и не может быть выражена только через усредненные характеристики, поэтому исследование статистических свойств клочков волокнистой массы и их преобразование в ходе технологических процессов являлось и остается важнейшей задачей при решении проблем совершенствования этих процессов.

В таблице 1.1 приведены некоторые виды волокнистой массы и описываемые с помощью распределений его основные характеристики, которые влияют на процесс переработки материала.

Таблица 1.1 - Виды волокнистой массы и ее основные характеристик

Вид волокнистой массы	Характеристики, влияющие на переработку волокнистой массы
Волокно	Длина, протяженность, извитость, линейная плотность, разрывная нагрузка, коэффициент трения, упругость, эластичность, пластичность при деформации, гигроскопичность, электризуемость.
Кипа	Масса, распределение волокон по их основным характеристикам, плотность, неравномерность материала по плотности, засоренность, сцепленность клочков в слое
Клочки	Масса, плотность, геометрические размеры, содержание сорных примесей, сцепленность клочков и примесей с волокнами в клочке

Приведем основные результаты в области исследования распределений характеристик клочков. Одной из первых известных работ является работа Т. А. Фроловой [27], которая исследовала изменение распределения волокон по длине до и после трепального перехода.

Аналогичная работа была выполнена японскими исследователями [81-84], в которой был проведен большой объем исследований по переходам, изменению распределения волокон по длине, по содержанию жестких и сорных примесей.

Исследование по распределению клочков хлопковых волокон было проведено также испанским исследователем А. Барелла, который в своей статье [85] поместил серию распределений и определил их соответствие известным законам распределения. Было доказано, что распределение массы крупных клочков хорошо описывается логарифмически нормальным законом. По мере деления клочков модальное значение распределения приближается к нулю, а распределение практически не отличается от экспоненциального.

В фундаментальной работе 1941 года А. Н. Колмогорова [86] построена математическая модель процесса многостадийного дробления частиц и получено

предельное распределение массы частиц при числе делений, стремящимся к бесконечности. Доказано, что этим предельным распределением является логарифмически нормальное распределение независимо от начального распределения массы частиц.

С практической точки зрения важно иметь оценку скорости сходимости распределения массы частиц к предельному логарифмически нормальному распределению. Это является одной из задач данного исследования.

Одной из основных целей исследования процессов разрыхления и очистки является управление этими процессами. Главными средствами управления процессами разрыхления и очистки являются:

- геометрические параметры: величина разводки между колосниковыми решетками и колками барабанов; число, форма, длина, заостренность, количество колков; число барабанов; плотность колков (число колков на единицу площади); плотность колосниковой решетки (число колосников на единицу длины). Эти параметры определяют объем рабочего пространства.

- кинематические параметры: скорость вращения барабанов, скорость вентиляторов, влияющая на скорость движения воздуха.

Перечисление основных конструктивных элементов разрыхлительно-очистительных машин показывает, что практически отсутствуют устройства, которые пригодны для оперативного управления этим процессами.

Таким образом, существует много факторов, влияющих на эффективность процессов разрыхления и очистки клочков. Однако большинство из них не может быть использовано для оперативного и непрерывного управления этими процессами. Поэтому основной способ управления – это подбор правильных начальных установок. Отсюда следует актуальность задачи правильного подбора этих параметров в зависимости от условий обработки и режимов.

Можно было бы рассматривать вопросы управления, например, изменением скоростей барабанов, угла наклона колосниковых решеток, разводки между ними или разводки между колосниками и колками. Но разработка таких исполнительных механизмов системы управления представляла бы собой достаточно дорого-

стоящую надстройку к оборудованию и, скорее всего, была бы экономически не оправданной. Поэтому перспективным способом оптимизации можно считать оптимальный выбор заправочных параметров и подбор правильных начальных установок.

Однако отсутствие задачи оперативного управления не исключает необходимости исследования динамики процесса разрыхления. Поскольку волокнистый поток в зазоре между барабаном и колосниковой решеткой имеет случайную плотность, варьирующуюся в широких пределах, то устойчивость и стационарность этого потока, которая напрямую отражается в равномерности выходящего потока, зависит от того, какова динамика работы этих устройств. Следовательно, даже при отсутствии задачи оперативного управления, изучение статистической динамики является достаточно актуальной задачей.

1.5 Обзор балансовых динамических моделей процессов разрыхления и очистки

В работе А. Г. Севостьянова и П. А. Севостьянова [87] предложена математическая модель динамики процесса очистки и очистительного устройства. Модель построена на основе условий материального баланса входящих и выходящих потоков волокнистой массы.

Исходное уравнение модели имеет вид:

$$\frac{dM(t)}{dt} = I_x(t) - I_y(t) - I(t), \quad (1.27)$$

где I_x , I_y , I – расход потоков волокон на входе и выходе очистительного устройства и входе в угарную камеру соответственно.

В результате преобразования уравнения получено уравнение динамики системы:

$$W(p) = \frac{\Delta I_y(p)}{\Delta I_x(p)} = \frac{K}{(1 + pT)} \quad (1.28)$$

где $K = \frac{K_1}{K_1 + K_2}$, K_1 и K_2 – коэффициенты пропорциональности между приращением расхода на выходе очистительного устройства и на входе угарной камеры и резервом волокнистого материала в зоне очистки.

С помощью найденной передаточной функции установлены спектральная плотность дисперсии и корреляционная функция процесса:

$$S_y(\omega) = \frac{K^2}{2\pi(1 + \omega^2 T^2)} \quad (1.29)$$

$$R_y(\tau) = \frac{K^2}{2T} e^{-\tau/T} \quad (1.30)$$

$$D_y = \frac{K^2}{2T} \quad (1.31)$$

Рассмотрим оригинальную модель разрыхления хлопка при отборе его из бункеров питателей, предложенную проф. В. И. Будниковым и описанную в работе [87].

Расход хлопка на входе в камеру разрыхлительно-очистительной машины обозначим Q (кг/с). Время пребывания хлопка в камере, если колосниковая решетка занимает $1/2$ ее поверхности, составляет:

$$T = \frac{1}{2n}, \quad (1.32)$$

где n – скорость вращения барабана, об./с.

В процессе пребывания хлопка в камере под воздействием ударных сил рабочих органов происходит выделение сорных примесей, за счет чего меняется масса клочков хлопка. В результате процесса разрыхления происходит изменение плотности хлопка. Рассмотрим, как будет меняться масса за время пребывания в камере от $t=0$ до $t=T$. За время T в камеру поступает в среднем одна и та же масса хлопка, равная $m_0 = \frac{Q}{2n}$. В момент времени t в камере находится хлопок

массой m , плотностью ρ и объемом $V = \frac{m}{\rho}$. По истечении времени dt (в момент

$t = t + dt$), масса хлопка уменьшается $m - dm$ (dm – масса сорных примесей и пороков, выделившихся в отходы под воздействием рабочих органов). В процессе разрыхления плотность хлопка уменьшается $\rho - d\rho$, а объем хлопка – увеличивается:

$$V + dV = \frac{m - dm}{\rho - d\rho} \quad (1.33)$$

Примем условие, что относительное изменение массы хлопка пропорционально относительному изменению его объема (эффект очистки):

$$\frac{dm}{m} = \frac{dV}{aV}, \quad (1.34)$$

где a – коэффициент пропорциональности.

С помощью уравнений (1.33) и (1.34) получаем:

$$\frac{dm}{m} = \frac{d\rho}{\rho(1+a)} \quad (1.35)$$

Примем допущение, что изменение плотности хлопка за время dt пропорционально числу воздействий рабочих органов на волокнистую массу в камере:

$$\varepsilon_p(t) = \frac{d\rho}{\rho} = -bkndt, \quad (1.36)$$

где b – коэффициент пропорциональности; k – число колков на барабане; n – частота вращения барабана. Подставив (1.35) в (1.36), получим:

$$(1+a) \frac{dm}{m} = -bkndt, \quad (1.37)$$

Проинтегрировав уравнение (1.37), получим функцию изменения массы хлопка в камере:

$$m = m_0 \exp\left(-\frac{bkndt}{1+a}\right) \quad (1.38)$$

где m_0 – масса хлопка при $t = 0$.

Эффективность очистки хлопка за время t в камере равна:

$$\varepsilon_0(t) = \frac{m_0 - m}{m_0} = 1 - \exp\left(-\frac{bkndt}{1+a}\right) \quad (1.39)$$

Из полученной формулы следует экспоненциальный закон нарастания эффективности очистки хлопка с увеличением времени его пребывания в камере.

1.6 Обзор математических моделей рассортировки волокон

Анализ существующих процессов, связанных с подготовкой к прядению продуктов из природных волокон, показал, что процессы очистки и разделения волокон могут сопровождаться и другими процессами, в частности процессами рассортировки [23, 88]. Особенно эти процессы выражены при переработке шерстяных волокон.

В работе [89] Е. И. Битус, М. Б. Отыншиев, И. В. Джуриная разработали модель процесса рассортировки с учетом физико-механических свойств шерсти, вероятности разрыва волокон при чесании, скоростных режимов и особенностей конструкции гребнечесальных машин для шерсти. Здесь дифференциальная функция $\omega_{\text{нов}}(L)$ распределения волокон с учетом их разрыва получена на основе исходной функции $\omega_{\text{исх}}(L)$:

$$\omega_{\text{нов}}(L) = \omega_{\text{исх}}(L) \cdot (1 - P_{\text{раз}}(L)) + \int_{\delta}^{L_c} \omega_{\text{исх}}(L + L') P(L') dL', \quad (1.40)$$

где $P_{\text{раз}}$ – вероятность разрыва волокон, L' – передняя оторванная часть волокна; $P(L')dL$ – вероятность отрыва участка волокна находящегося в интервале dL в пределах значения L' ; δ – длина не прочесываемого участка волокнистой бородки.

Распределение волокон по их длине в гребенной ленте $\omega_{\text{г.л.}}(L)$ определяется по формуле:

$$\omega_{\text{г.л.}}(L) = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 < L < L_c - l_{\text{П}} \\ \omega_{\text{нов}}(L) \cdot P_{\text{нев}}, & \text{при } L_c - l_{\text{П}} < L < L_c, \\ \omega_{\text{нов}}(L), & \text{при } L_c < L < L_{\text{max}} \end{cases}, \quad (1.41)$$

где $P_{\text{нев}}$ – вероятность невычесывания волокон гребенным барабанчиком, определяющаяся по формуле:

$$P_{\text{нев}} = \frac{L + l_{\Pi} - L_c}{l_{\Pi}} \quad (1.42)$$

Таким образом, авторами цитируемой работы получены основные соотношения, описывающие процесс рассортировки на гребнечесальной машине.

1.7 Анализ методов изучения процессов разрыхления и очистки волокнистого сырья

Приведенный выше анализ работ по изучению процессов разрыхления и очистки хлопка и шерсти, выполненных отечественными и иностранными авторами, продемонстрировал актуальность и важность этой задачи для практических целей. С другой стороны, он показал, что проведение исследований в виде натуральных экспериментов в этой области чрезвычайно затруднено из-за их высокой трудоемкости, связанной с переработкой больших объемов засоренной волокнистой массы и большой степенью разброса показателей.

Значительные трудности в изучении процессов разрыхления и очистки вызваны тем, что волокнистая масса при взаимодействии с рабочими органами машин образует сложную систему с множеством элементов: клочки волокон, сорные примеси и пороки, рабочие органы различной конфигурации с разными законами движения. Такие свойства клочков, как размер, ориентация, форма, масса обладают случайной природой. Процессы взаимодействия клочков с рабочими органами машин имеют вероятностную природу. Эта существенно вероятностная природа процессов ограничивает возможности исследования процессов разрыхления и очистки. Как правило, приходится ограничиваться лишь средними показателями, тогда как сами процессы зависят не только от средних величин, но и от формы распределения свойств клочков.

Моделирование процессов разрыхления и очистки аналитическими методами математики возможно, однако не позволяет исследовать процесс с желаемым уровнем детализации в силу ограниченности этих методов [90]. Примером такого подхода является работа японских авторов [81-84], которые на основе экспери-

ментальных исследований построили Марковскую модель преобразования распределения массы клочков до и после машин РОА.

Несмотря на множество исследований процессов разрыхления и очистки волокнистой массы, сами процессы трудно поддаются изучению. Натурные эксперименты на машинах РОА с целью изучения распределения клочков по массе, содержанию сорных примесей и разрыхленности трудоемки и не точны, а иногда и вообще технически не осуществимы.

Подобные трудности в исследовании систем существуют и в других областях науки и техники. С появлением высокопроизводительных компьютеров были разработаны мощные компьютерные методы исследования подобных систем. Известно, что перспективы в этой области исследования послужили стимулом для развития современной вычислительной техники [91]. Использование компьютерной техники позволяет освободиться от проблем ограниченности аналитических методов и трудоемкости натурных экспериментов, а также проводить исследования методами компьютерного моделирования, которые сейчас широко применяются во всех областях исследований от фундаментальных и технических наук до социологии, истории и медицины. Поэтому для исследования процессов разрыхления и очистки оптимальным образом подходят методы компьютерного моделирования, как это показано, например, в работах П. А. Севостьянова [92, 93].

Существуют различные уровни моделей, используемых для описания процессов разрыхления и очистки:

1. Геометрические модели, где рассматриваются кинематика движения клочков волокнистой массы в зависимости от скоростей рабочих органов и прочих факторов.
2. Динамические модели, основанные на соотношениях материального баланса для волокнистых потоков в усредненных величинах.
3. Вероятностные математические модели, где рассматривается изменение распределений характеристик клочков волокнистой массы в рамках Марковской модели [81-84].

4. Статистические модели, которые основаны на методе Монте-Карло. Это компьютерные модели, как правило, не динамические. Такому виду моделирования посвящена работа Н. П. Бусленко [91].

5. Имитационные статистические модели (ИСМ), где одновременно реализуется и динамика процесса, и его статистика (вероятностная природа) [91-97]. Вопросы извлечения информации из ИСМ подробно исследованы и описаны в монографии Дж. Клейнена [98]. Компьютерные имитационные модели технологических процессов прядильного производства впервые детально разработаны в диссертации [92] и монографиях [93, 99] П. А. Севостьянова.

При построении ИСМ технологического процесса сначала описывают входящий поток волокнистой массы с помощью распределений различных его характеристик. Далее по этим распределениям генерируются случайные значения характеристик волокнистой массы, которые затем преобразовываются по определенному алгоритму, имитирующим работу моделируемой системы или ход процесса, после чего полученные значения сохраняются. Это продолжается до тех пор, пока не будет накоплена статистика по выходному распределению [87].

Для оптимизации процессов разрыхления и очистки волокнистой массы целесообразно провести эксперименты с компьютерными моделями этих процессов, показывающие, как будет изменяться эффективность этих процессов при внесении конструктивных изменений в структуру разрыхлительно-очистительного оборудования; при изменении заправочных параметров и режима работы оборудования; при изменении свойств или состава волокна.

Выводы по первой главе

1. Анализ существующих работ показал, что процессы разрыхления и очистки волокнистой массы из натуральных волокон играют определяющую роль для эффективности последующих технологических переходов и качества получаемой продукции - пряжи.

2. Натурные эксперименты при исследовании процессов разрыхления и очистки волокнистой массы являются трудоемкими, мало информативными и не всегда осуществимыми. Поэтому закономерностей, описывающих эти процессы, недостаточно для анализа и управления.

3. Аналитическое моделирование взаимодействия рабочих органов машин и клочков волокнистой массы требует задания ряда параметров, описывающих механические свойства клочков, значения которых либо неизвестны, либо известны приближенно. Модели этого класса игнорируют вероятностную природу взаимодействия и статистический характер параметров клочков и поэтому дают лишь приближенную качественную оценку рассматриваемого взаимодействия.

4. Процессы разрыхления и очистки являются вероятностными. Эта особенность затрудняет автоматическое управление и контроль этих процессов.

5. В известных исследованиях процессов очистки и разрыхления, выполненных различными авторами, использованы методы материального баланса, динамики механического взаимодействия клочков и рабочих органов, регрессионной обработки результатов натурных экспериментов. Построенные модели занимают широкий спектр от простейших статических соотношений до сложных дифференциальных и интегральных уравнений, связывающих распределения свойств волокон. Сравнительная оценка этих методов показала, что наиболее перспективным в исследовании процессов разрыхления и очистки является метод компьютерной статистической имитации, который сочетает в себе достоинства всех существующих методов моделирования и дает возможность осуществить системные исследования процессов очистки и разрыхления.

6. На основании сделанных выводов можно сформулировать цель данной диссертационной работы: разработка методов исследования процессов разъединения, разрыхления и очистки волокнистого сырья на машинах приготавливательных переходов прядильного производства с учетом статистических особенностей волокнистой массы на основе имитационного моделирования для выявления основных факторов, влияющих на динамику, эффективность и управляемость этих процессов.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАЗРЫХЛЕНИЯ И ОЧИСТКИ ПОТОКОВ ВОЛОКНИСТОЙ МАССЫ В РАЗРЫХЛИТЕЛЬНО- ОЧИСТИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТАХ

2.1 Балансовая модель движения материальных потоков в наклонных очистителях

Клочки волокнистой массы при движении по рабочим зонам наклонного очистителя транспортируются колками барабанов и многократно взаимодействуют с колосниками решеток под барабанами [33]. Моделирование этих взаимодействий зависит от необходимого уровня детализации [87, 100]. Для целей автоматизации и оптимизации процессов разрыхления и очистки достаточно считать взаимодействие клочка со всеми колосниками одной решетки однократным взаимодействием [93, 101], что позволяет упростить модель.

Обозначим скорости колковых барабанов n_j , разводки между колосниковыми решетками d_j и зазоры между колосниками решетки z_j . Индекс $j = 1, \dots, 6$ нумерует барабанные секции машины.

Потоки волокнистой массы, проходящие через машину, можно считать непрерывными [84, 85]. Для этих потоков выполняется уравнение непрерывности (баланса) потока [102, 103]

$$\frac{\partial g_i(x,t)}{\partial t} + V \frac{\partial g_i(x,t)}{\partial x} = -b_i(x,t)g_i(x,t), \quad 0 \leq x \leq L \quad i=1,2,3 \quad (2.1)$$

где $g_i(x,t)$ - линейная плотность потока i -го компонента в поперечном сечении x рабочей области в момент t ; V - скорость переноса клочков вдоль решетки от входа к выходу рабочей области; $b_i(x,t)$ - доля массы i -го компонента, выпадающая в отходы за время dt через колосники; L - длина рабочей области. Размерности этих функций $[g_i(x,t)] = \text{M L}^{-1}$; $[b_i(x,t)] = \text{T}^{-1}$.

Проинтегрируем уравнение (2.1) по x от нуля до L_k . Получим

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} + V(g_i(L,t) - g_i(0,t)) = -B_i(t)Q_i(t) \quad (2.2)$$

где
$$Q_i(t) = \int_0^L g_i(x,t)dx; \quad B_i(t)Q_i(t) = \int_0^L b_i(x,t)g_i(x,t)dx$$

Функция $Q_i(t)$ описывает массу волокон i -го компонента в рабочей области в момент t . Функция $B_i(t)$ описывает интегральную долю компонента от общей массы $Q_i(t)$, выпадающую в отходы через колосниковую решетку в момент t . Размерности этих функций $[Q_i(t)] = M$; $[B_i(t)] = T^{-1}$. Обозначим через $a_i(t)$ долю массы компонента, переходящую на следующую секцию (барабан) машины.

Запишем условия материального баланса для расхода волокнистой массы на входе и выходе рабочей зоны машины

$$\begin{aligned} Vg_i(0,t) &= V_{in}G_{in}(i,t) + (1-a_i)Vg_i(L,t-\tau) \\ V_{out}G_{out}(i,t) &= a_iVg_i(L,t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

В уравнениях учтены доля массы возвратного потока от общей массы, поступающей к выходу секции, и транспортное запаздывание, определяющееся по формуле:

$$\tau = \frac{L_b}{V}, \quad (2.4)$$

где L_b - длина дуги возврата от выхода к входу в секцию по окружности барабана.

Используя (2.3), преобразуем уравнение (2.2)

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} + B_i(t)Q_i(t) = V_{in}G_{in}(i,t) + V_{out} \frac{1-a_i}{a_i} G_{out}(i,t-\tau) - \frac{V_{out}}{a_i} G_{out}(i,t) \quad (2.5)$$

Для стационарного режима входящие в уравнение (2.5) величины не зависят от времени. В этом случае уравнение баланса материальных потоков будет выглядеть следующим образом:

$$B_iQ_i = V_{in}G_{in}(i) - V_{out}G_{out}(i) \quad (2.6)$$

Предположим, что линейная плотность потока волокнистой массы $g_i(L,t)$ на выходе пропорциональна общей массе волокон $Q_i(t)$ в рабочей области машины

$$Q_i(t) = H_iLV_{out}G_{out}(t)/V, \quad (2.7)$$

где H_i - безразмерный коэффициент пропорциональности.

Подставив (2.29) в уравнение (2.27) и проведя преобразования, получим:

$$T_k \frac{dG_{out}(i,t)}{dt} + A_i(t)G_{out}(i,t) - C_i G_{out}(i,t - \tau) = K_i G_{in}(i,t) \quad (2.8)$$

где $T_k = \frac{L_k}{V}$, $A_i(t) = B_i(t)T_k + (aH_i)^{-1}$, $E_{io} = \frac{V_{in}}{V_{out}}$, $K_i = \frac{E_{io}}{H_i}$, $C = \frac{1 - a_i}{aH_i}$

Если пренебречь зависимостью параметров B и a от времени t и массы волокон $Q(t)$ в рабочей области, то уравнение (2.8) является линейным дифференциальным уравнением первого порядка с запаздывающим аргументом. Его передаточная функция от плотности i -го компонента во входном потоке $G_{in}(i,t)$ к плотности этого компонента в выходном потоке $G_{out}(i,t)$ равна

$$W_{Ginout}(i,s) = \frac{K_i}{T_k s + A_i - C_i \exp(-s\tau)} \quad (2.9)$$

где s – оператор Лапласа.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) передаточной функции преобразования линейной плотности входящего волокнистого в линейную плотность выходящего волокнистого потока имеет вид

$$ASC(\omega) = \frac{K}{\sqrt{T^2 \omega^2 + 2CT\omega \sin(\omega\tau) + A^2 - 2AC \cos(\omega\tau) + C^2}} \quad (2.10)$$

Для графического представления функции $ASC(\omega)$ удобно записать ее в безразмерных переменных $y = \omega T$, $\theta = \tau/T$.

$$ASC(y) = \frac{K}{\sqrt{y^2 + 2Cysin(\theta \cdot y) + A^2 - 2AC \cos(\theta \cdot y) + C^2}} \quad (2.11)$$

Графики АЧХ $ASC(y)$ приведены на рисунке 2.1. Из графиков видно, что система хорошо выравняет высокочастотные и среднечастотные составляющие неравномерности входных воздействий на систему во всем физически осмысленном диапазоне коэффициентов K , A , C .

Поскольку вход и выход рабочей области колкового барабана лежат практически на противоположных концах одного диаметра D , то постоянная времени T_k и величина запаздывания τ одинаковы или почти равны друг другу. Эти величины, как и параметры A_i и C_i зависят от управляемых переменных: зазора между колос-

никами z , разводки между колками и колосниковой решеткой d и числом оборотов

барабана $N = \frac{V}{\pi D}$.

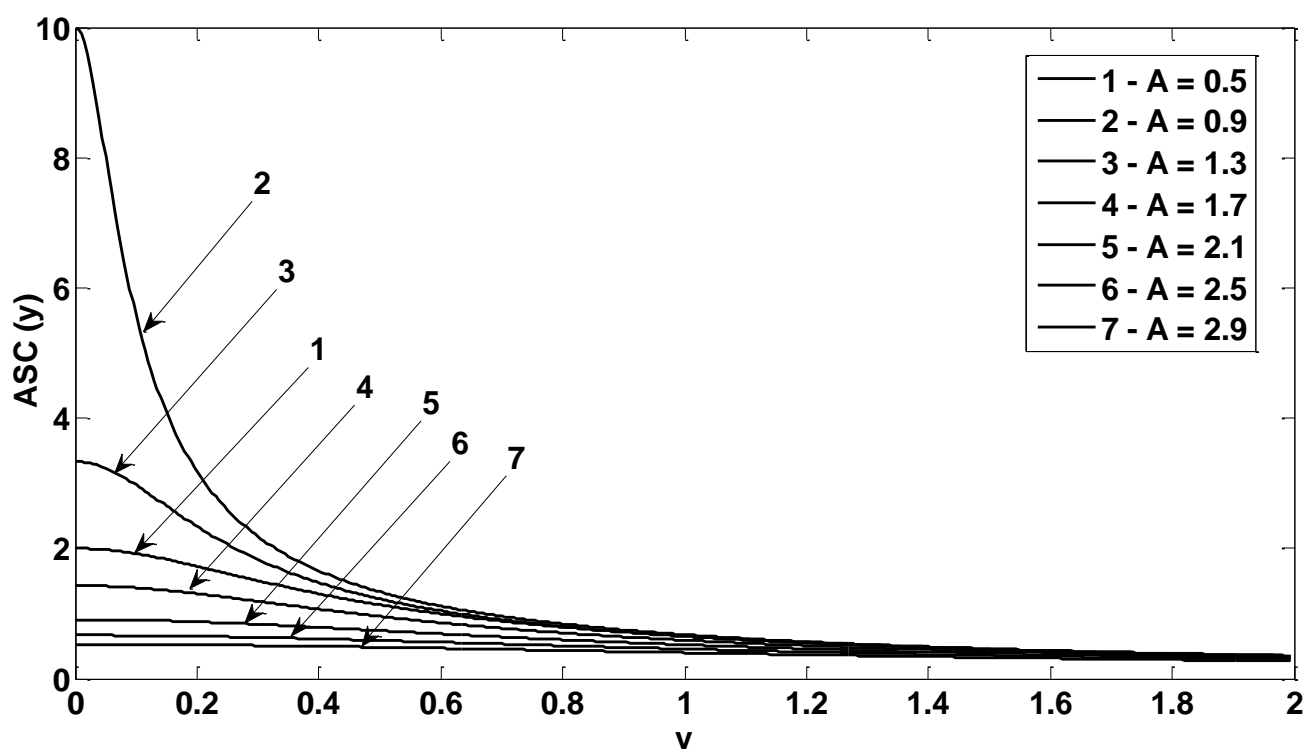


Рисунок 2.1 - Графики АЧХ передаточной функции преобразования линейной плотности входящего волокнистого в линейную плотность выходящего волокнистого потока

При малых вариациях управляемых переменных их влияние на параметры передаточной функции можно считать линейным, причем знак этой линейной зависимости легко определить из общих представлений о физике взаимодействия клочков волокнистой массы с рабочими органами машины.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработана математическая модель имитации динамики процессов разрыхления и очистки потоков волокнистой массы с учетом его компонентного состава при последовательной обработке в секциях наклонного барабанного очистителя.

Данная модель позволила установить влияние основных факторов технологического процесса - скорости барабанов, разводки между колками и колосниковой решетки, диаметром рабочих областей - и равномерностью волокнистого потока на выходе машины.

Полученная передаточная функция системы является основой для синтеза системы автоматического регулирования и обеспечения равномерности процессов разрыхления и очистки.

2.2 Преобразование распределений характеристик волокнистых потоков при разрыхлении и очистке волокнистой массы

В процессах разрыхления и очистки происходит деление материальных потоков, поступающих на вход технологического оборудования. Как правило, и линейная плотность поступающего потока, и доли, на которые разделяется этот поток, содержат случайную составляющую. В некоторых случаях деление потока является одной из основных задач процессов разрыхления и очистки, в других оно сопутствует выполнению задачи этих процессов [104]. В прядильном производстве для выработки качественной пряжи необходимо сначала отобрать из кип клочки волокнистой массы, разделить и уменьшить их плотность, отделить сорные примеси. Все эти процессы сопровождаются делением исходных клочков на более мелкие клочки. На кардочесальных аппаратах происходит разделение волокнистой массы вплоть до отдельных волокон. Сформированный волокнистый холстик разделяется на множество параллельных потоков, которые затем преобразуются в ровницу. В этих процессах происходит изменение закона распределения характеристик материального потока. Описанные процессы могут быть непрерывными или порционными. Как правило, измерению или оценке в лучшем случае поддаются распределения характеристик волокнистой массы на входе и выходе машины, осуществляющей технологический процесс.

Для прогнозирования эффективности работы машин РОА необходима математическая модель преобразования распределения длины волокон, массы клочков, плотности клочков, массы сорных примесей и т.п. [87]. Обозначим X значение одной из таких характеристик, а ее распределения на входе и выходе машины $f_0(x)$ и $f_1(x)$. При наиболее типичном для технологических процессов стационар-

ном режиме эти распределения не зависят от времени. В линейном приближении взаимосвязь между распределениями описывается соотношением [105, 106]

$$f_1(x) = \int_0^{\infty} a(x, x_1) f_0(x_1) dx_1, \quad x \geq 0 \quad (2.12)$$

В этом интегральном уравнении [107] неизвестной искомой функцией является ядро преобразования распределений $a(x, x_1)$. При этом сами распределения $f_0(x)$ и $f_1(x)$ являются неотрицательными функциями, для которых должно выполняться условие нормировки

$$f_{0,1}(x) \geq 0; \quad \int_0^{\infty} f_{0,1}(x) dx = 1 \quad (2.13)$$

Функция ядра $a(x, x_1)$ описывает долю продукта со значением характеристики x_1 , которая в ходе технологического процесса приобретает значение этой характеристики, равное x . Физически функция ядра определяет интенсивность перехода составляющих поступающего в машину потока со значением характеристики x_1 в составляющую выходящего из машины потока со значением этой характеристики, равным x .

С учетом приведенного выше условия нормировки распределений получаем общее условие нормировки для функции ядра

$$\int_0^{\infty} a(x, x_1) dx_1 = 1, \quad \text{для всех } x_1 \geq 0 \quad (2.14)$$

Возможность оценки функции ядра зависит от наличия дополнительной информации об особенностях протекания технологического процесса и моделируемого преобразования распределений в рассматриваемом процессе. Так, например, если процесс отвечает условию однородности преобразования, то интенсивность преобразования $x_1 \rightarrow x$ зависит только от разности между этими значениями $\Delta x = x_1 - x$. При этом изменения односторонни и все разности Δx одного знака, например, $\Delta x \geq 0$. В этом случае преобразование (2.12) преобразуется к виду

$$f_1(x) = \int_0^x a(x - x_1) f_0(x_1) dx_1, \quad x \geq 0 \quad (2.15)$$

Интегральное уравнение (2.14) является сверткой функций ядра и распределения $f_0(x)$. Его решение может быть найдено, например, с помощью преобразования Лапласа [108]. Изображение ядра в этом случае равно отношению изображения распределения $f_1(x)$ к изображению распределения $f_0(x)$

$$L\{a(x)\} = \frac{L\{p_1(x)\}}{L\{p_0(x)\}} \quad (2.16)$$

Здесь оператор $L\{\}$ означает преобразование по Лапласу соответствующей функции.

Оценки распределений и их аналитические аппроксимации с соответствующими изображениями по Лапласу могут быть получены по имеющимся результатам измерений и экспериментальным данным.

К сожалению, в большинстве технологических процессов упомянутое свойство однородности преобразования не соблюдается. Кроме того, оценки распределений $f_0(x)$ и $f_1(x)$ представлены сгруппированными данными. Поэтому интегральное уравнение (2.12) целесообразно переписать в дискретной форме

$$p_1(i) = \sum_{j=1}^m p_0(j)a(j,i), \quad i = 1, \dots, m \quad (2.17)$$

Здесь $p_{0,1}$ – дискретные в результате группировки распределения $f_0(x)$ и $f_1(x)$; матрица $a(j,i)$ – дискретное ядро преобразования, индексы i и j нумеруют группы значений x дискретного распределения; m – число групп, на которые при дискретизации разделяется диапазон варьирования переменной x . Дискретные распределения и матрица ядра должны удовлетворять очевидным условиям нормировки

$$\sum_{i=1}^m p_{0,1}(i) = 1; \quad p_{0,1}(i) \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; \quad \sum_{i=1}^m a(j,i) = 1, \quad j = 1, \dots, m \quad (2.18)$$

Выражение (2.17) совместно с условиями нормировки (2.18) является системой линейных уравнений для получения оценок элементов матрицы $a(j,i)$. Число уравнений и условий нормировки меньше, чем количество неизвестных. Оценку элементов матрицы можно осуществить с использованием метода наименьших квадратов, избрав в качестве критерия минимизации функционал

$$W(a) = \sum_{i=1}^m \left(p_1(i) - \sum_{j=1}^m p_0(j) a(j,i) \right)^2 \rightarrow \min_a \quad (2.19)$$

при дополнительных ограничениях (2.18). Получение оценок элементов матрицы ядра в этом случае приводит к решению системы линейных уравнений, число которых равно числу оцениваемых элементов матрицы [109, 110].

В рассматриваемых технологических процессах преобразование значений переменной x происходит в одну сторону, например, в сторону уменьшения. В этом случае количество неизвестных элементов $a(j,i)$ матрицы может быть уменьшено, поскольку для таких процессов матрица $\|a(j,i)\|$ ядра преобразования является треугольной или квазитреугольной. Это свойство матрицы позволяет также значительно упростить процедуру оценки ее элементов с применением рекуррентного алгоритма оценивания.

2.3 Статистическое моделирование деления материальных потоков в процессах разрыхления и очистки волокнистой массы

Практически всегда материальные потоки описываются числовыми показателями, которые имеют вероятностную природу. Деление потока приводит к изменению вероятностных параметров этих показателей. Знание этих изменений позволяет оптимизировать режим технологического процесса.

Однако, если изменение простейших числовых параметров, например, математических ожиданий или дисперсий, оценивается более или менее просто, то изменения законов распределения оценить аналитически в большинстве случаев сложно или невозможно. Поэтому единственным способом получения таких оценок является статистическое моделирование процесса деления [93].

Этот подход до сих пор не нашел соответствующего отражения в работах отечественных и зарубежных исследователей. Существует базовая работа А. Н. Колмогорова [86] по делению частиц. Однако в ней рассматривается лишь асимптотика идеализированного многократного процесса деления. Эта схема да-

леко не всегда адекватна реальным процессам деления. Ниже рассматриваются некоторые актуальные постановки и решения данной задачи [111-114].

Рассмотрим порцию материального потока, которая описывается величиной m . Для определенности, будем считать, что m – масса клочка в потоке волокнистой массы. Клочок подвергается многократному делению в процессах разрыхления и очистки. Однако в каждом отдельном акте деления клочок разделяется на две части с массами $m_1 = pm$ и $m_2 = (1 - p)m$ [115]. Схема деления клочка в виде вероятностного ветвящегося процесса приведена на рисунке 2.2.

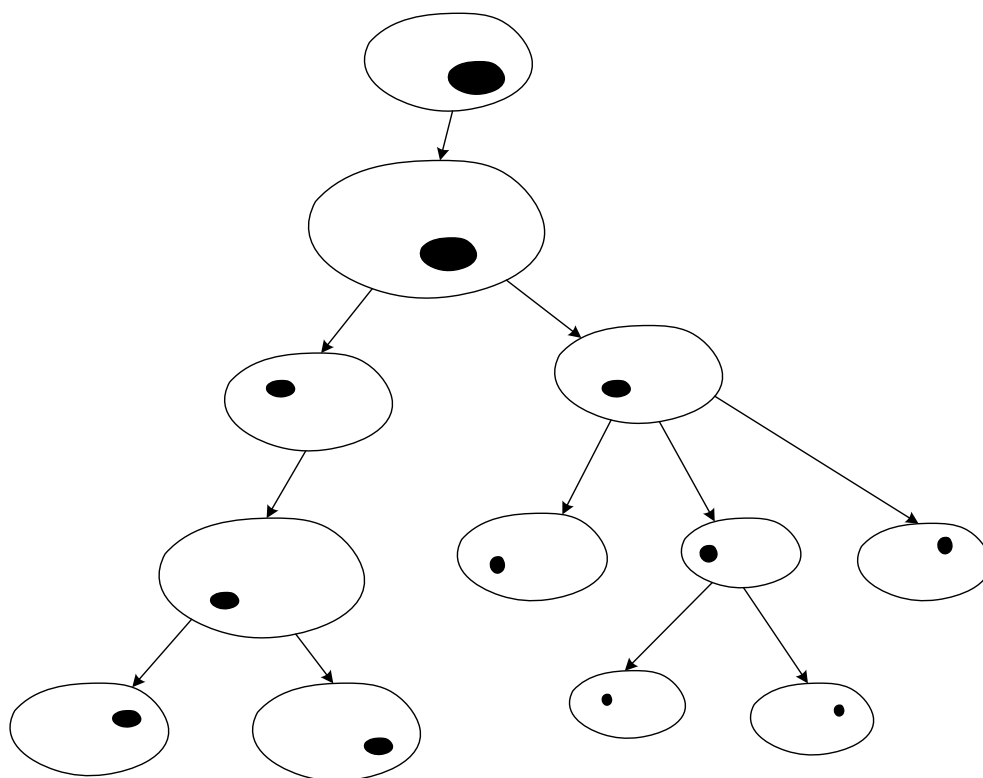


Рисунок 2.2 - Деление клочка как вероятностный ветвящийся процесс

Доля p массы исходного клочка в одной из его образовавшихся при делении частей, очевидно, лежит в пределах от нуля до единицы и, как правило, является случайной величиной, как и масса исходного клочка m . Если m и p независимы, то математические ожидания равны:

$$Mm_1 = MpMt; \quad Mm_2 = (1 - Mp)Mt \quad (2.20)$$

Для других числовых параметров случайных величин, как и для случая зависимых m и p расчетные формулы зависят от их законов распределения. Поэтому имеет смысл сразу выполнить статистическое моделирование этих случайных ве-

личин и процесса деления. Блок-схема алгоритма моделирования представлена на рисунке 2.3.

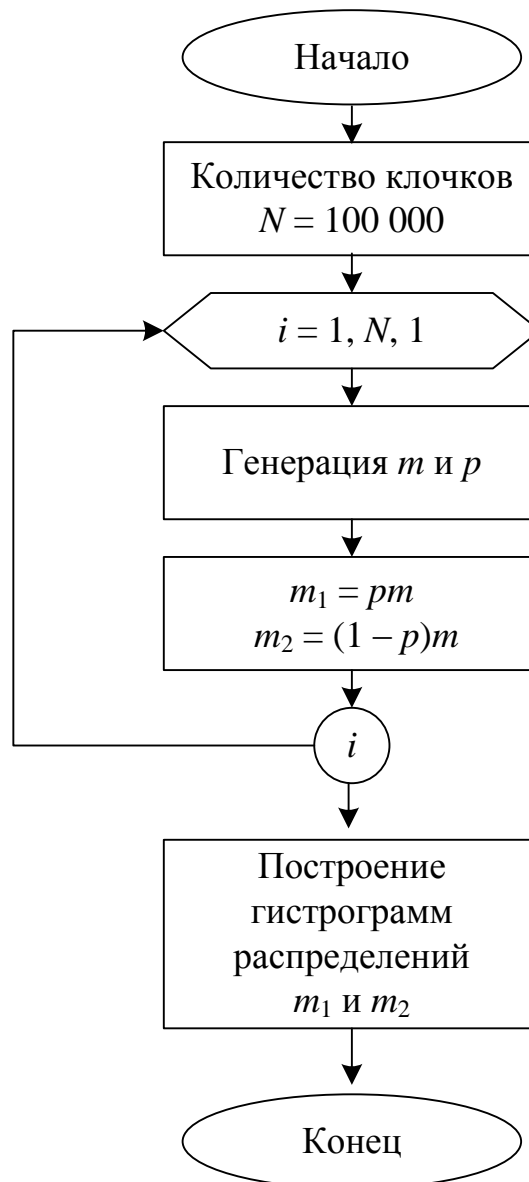


Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритма моделирования процесса деления клочков

В таблице 2.1 приведены варианты условий моделирования деления клочка на две части, причем для m и p выбраны достаточно сильно отличающиеся виды распределений $Distr_m$ и $Distr_p$: нормальное N , равномерное Un и экспоненциальное Ex . Параметры нормального и равномерного распределения для m и p подобраны так, чтобы они имели одинаковые средние и коэффициенты вариации. Тем самым в эксперименте в большей степени проявится влияние формы распределения. В каждом варианте имитировалось деление $n = 10^5$ клочков, что более

чем достаточно для получения статистически надежных оценок распределений m_1 и m_2 и их параметров.

Таблица 2.1 - План статистического эксперимента 1

Вар.	$Distr_m$	Параметры $Distr_m$	$Distr_p$	Параметры $Distr_p$
1	$N(mSr, CVm)$	$mSr = 1; CVm = 0,1$	$Un(a; b)$	$a = 0; b = 1$
2	$N(mSr, CVm)$	$mSr = 1; CVm = 0,1$	$N(pSr, CVp)$	$pSr = 0,5; CVp = 0,1$
3	$Un(Am, Bm)$	$Am = 0,83; Bm = 1,17$	$Un(a; b)$	$a = 0; b = 1$
4	$Un(Am, Bm)$	$Am = 0,83; Bm = 1,17$	$N(pSr, CVp)$	$pSr = 0,5; CVp = 0,1$
5	$Ex(mSr)$	$mSr = 1$	$Un(a; b)$	$a = 0; b = 1$
6	$Ex(mSr)$	$mSr = 1$	$N(pSr, CVp)$	$pSr = 0,5; CVp = 0,1$

На рисунке 2.4 приведены гистограммы распределений m_1 для шести рассмотренных вариантов. Гистограммы для m_2 практически такие же. Из приведенных оценок распределений видно, что при делении форма распределения меняется весьма существенно. Равномерный закон распределения долей, на которые разделяется клочок, в сочетании с нормальным распределением массы клочка приводит к трапецеидальному распределению массы клочков после деления. Только если обе величины m и p распределены по нормальному закону, такое же распределение наблюдается и у массы клочков после деления, но с другими параметрами.

При экспоненциальном распределении массы исходных клочков распределение массы клочков после деления также является экспоненциальным независимо от распределения доли p . Известно, что если распределения существенно отличаются от нормального, то в качестве параметров, описывающих среднее значение и рассеяние случайной величины, предпочтительней использовать так называемые робастные показатели, независимые от формы распределения. Так, вместо математического ожидания следует использовать медиану, а вместо среднеквадратического отклонения – интердецильный размах. Установленные существенные изменения распределения массы клочков после деления доказывают необходимость применения таких робастных показателей и требуют большой осторожности при построении выводов на основе традиционных показателей нормальной теории.

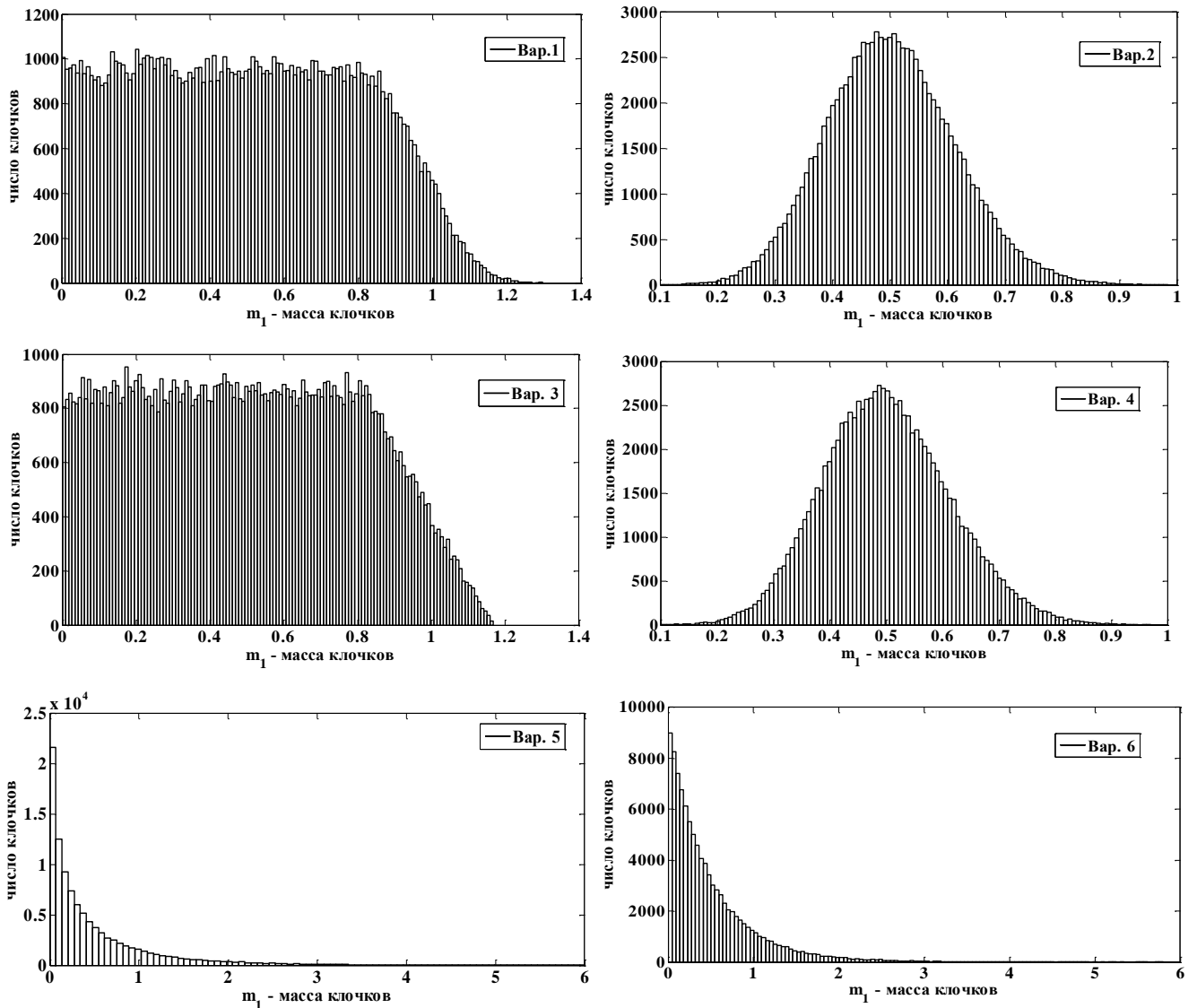


Рисунок 2.4 - Гистограммы распределений m_1

Вторая группа статистических экспериментов, связанных с имитацией процесса деления, была проведена для анализа зависимостей распределений от числа долей k , на которые разделяются элементы материального потока

$$m(i) = p(i)m, \quad p(1) + \dots + p(k) = 1, \quad p(i) \geq 0, \quad i = 1, \dots, k \quad (2.21)$$

Для проведения такого эксперимента необходимо моделировать значения $p(i)$, отвечающие условиям (2.21). Каждый конкретный набор этих значений задает координаты точки на правильном $k-1$ – мерном симплексе. Алгоритм моделирования координат точек, равномерно распределенных по площади симплекса, описан в [96]. В качестве альтернативы было использовано нормальное распределение координат с параметрами $pSr = 1 / k$ и $CVp = 0,25$.

На рисунке 2.5 приведены диаграммы рассеяния 1000 смоделированных точек при $k = 3$ для обоих вариантов. Видно, что при нормальном распределении ненормированных значений долей, на которые разделяются клочки, нормированные значения долей локализованы вокруг своих средних значений. Отметим, что, несмотря на операцию нормирования долей, распределение каждой из долей практически сохраняет форму нормального распределения.

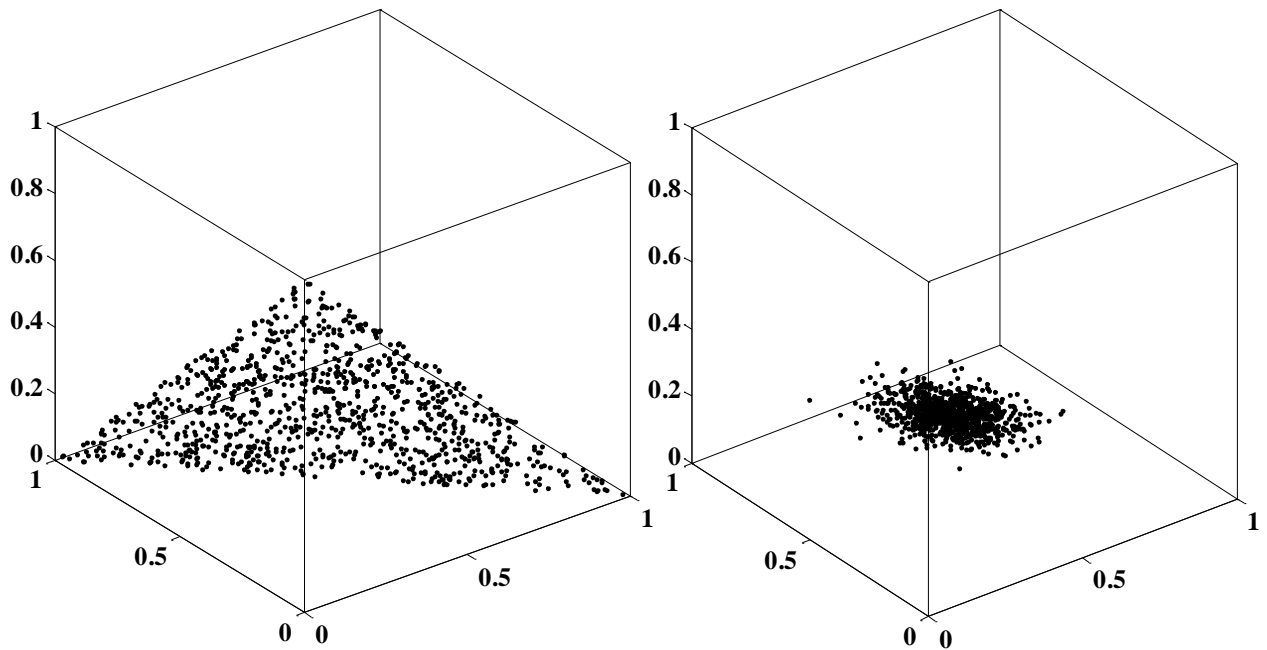


Рисунок 2.5 - Диаграммы рассеяния долей при равномерном и нормальном распределениях

План второго эксперимента приведен в таблице 2.2. В каждом из вариантов число долей, на которые разделялся клочок, было равно $k = 3, 5, 10$ и 20 .

Таблица 2.2 - План статистического эксперимента 2

Вар.	$Distr_m$	Параметры $Distr_m$	$Distr_p$
1	$N(mSr, CVm)$	$mSr = 1; CVm = 0,1$	Un
2	$N(mSr, CVm)$	$mSr = 1; CVm = 0,1$	N
3	$Un(Am, Bm)$	$Am = 0,83; Bm = 1,17$	Un
4	$Un(Am, Bg)$	$Am = 0,83; Bm = 1,17$	N

На рисунке 2.6 показано, как меняются гистограммы распределений массы клочков в зависимости от числа долей, на которые они разделяются. Гистограммы

приведены только для вариантов 1 и 2, поскольку вариант 3 практически совпадает с вариантом 1, а вариант 4 совпадает с вариантом 2.

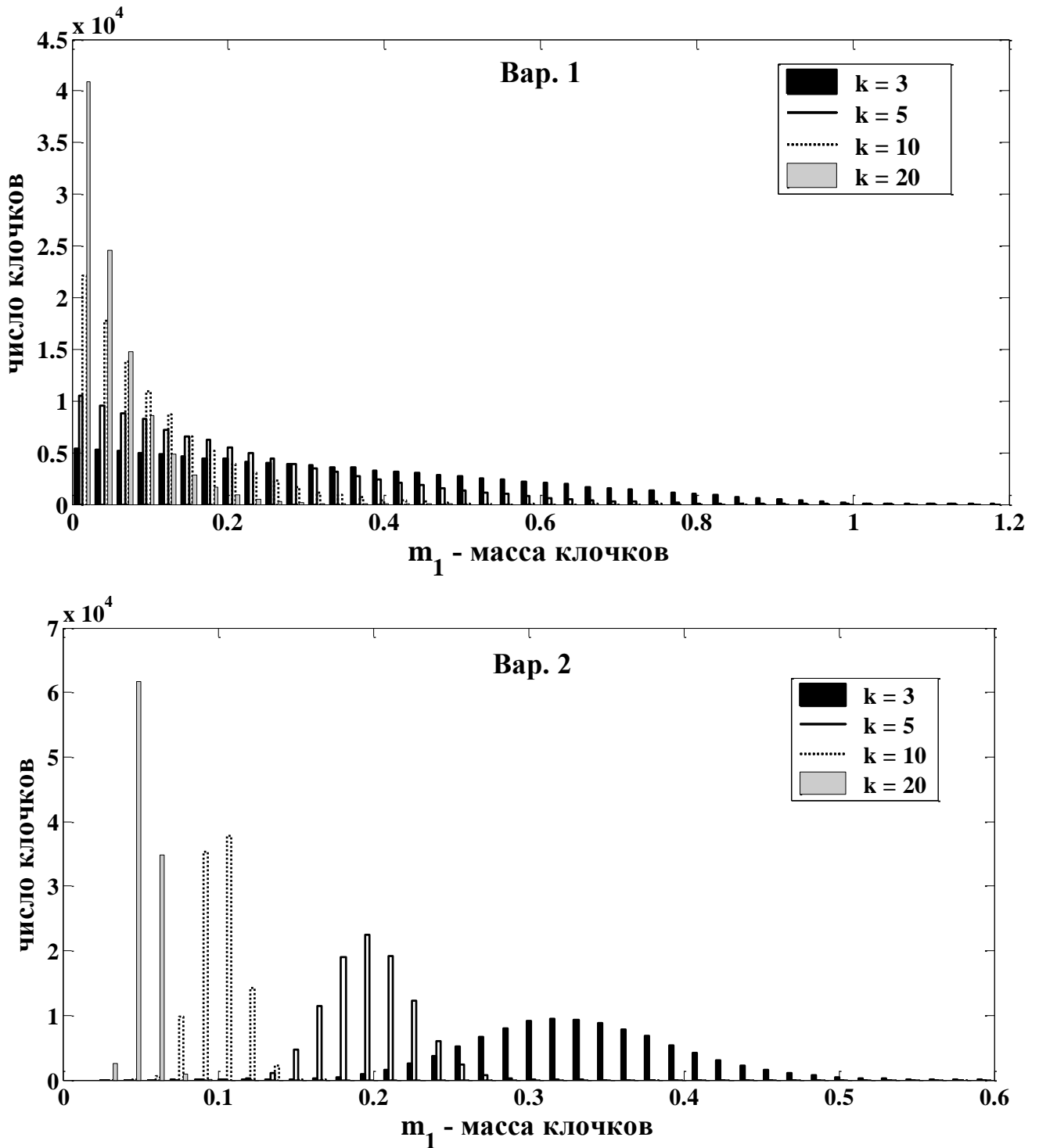


Рисунок 2.6. Гистограммы масс клочков после деления для 1-го и 2-го вариантов эксперимента в зависимости от числа делений k

Как видно из рисунка, с ростом числа долей, на которые делится клочок эффективность процессов разрыхления и очистки возрастает.

2.4 Сравнение аналитической и статистической моделей деления клочков волокнистой массы

Процессы, в которых участвуют потоки частиц, разделяющиеся и меняющие свои параметры в ходе процесса, встречаются во многих отраслях промышленности и природных явлениях. Примерами могут служить процессы дробления кусков руды, подготовки почвы к севу, подготовки пищевых ингредиентов к выпечке хлебных изделий, распад крупных молекул на более простые составляющие и ионы, каскадные ливни проникающих в земную атмосферу космических лучей и многие другие. Характерным общим эффектом, сопровождающим эти процессы, является разделение исходных частиц на несколько частиц одинакового или разного типа, сопровождающийся изменением параметров частиц.

В данной работе из всех возможных способов деления материальных потоков рассматривается деление потоков, образованных отдельными клочками волокнистой массы. При этом размеры клочков варьируются случайным образом. Клочки в потоке, хотя и могут взаимодействовать между собой, но это взаимодействие можно считать слабым. А рассматриваемый ниже процесс, заключается в делении клочков на более мелкие и изменении интегральной плотности потока за счет различной скорости подачи материала и вывода его из рабочих зон технологического оборудования.

В 1941 г. великий русский математик А. Н. Колмогоров опубликовал работу [86], в которой рассмотрел модель деления частиц. Частицы многократно разделялись на части. Масса разделяющейся частицы случайным образом распределялась между образовавшимися частицами, которые, в свою очередь, также разделялись на части. Было доказано, что в этом процессе асимптотически, после бесконечно большого числа делений, независимо от исходного распределения массы частиц, конечный набор частиц имеет массы, распределенные по логарифмически нормальному закону распределения. Эта работа А. Н. Колмогорова была развита в работах [116-119].

Проиллюстрируем этот результат на компьютерной модели [120-122]. Обозначим N число клочков, $f(m, 0)$ - распределение массы этих клочков перед началом процесса деления. Предположим, что любой клочок в каждом из актов деления разделяется на два $m = m_1 + m_2$. Доля массы образовавшегося клочка $p_1 = m_1 / m$ - случайная величина, распределенная равномерно от 0 до 1. Легко показать, что доля массы, приходящаяся на второй из образовавшихся клочков $p_2 = m_2 / m = 1 - p_1$, также распределена равномерно от 0 до 1.

После каждого этапа такого деления число клочков удваивается. Чтобы не допустить разрастания массива клочков в модели, из полученных при делении клочков случайным образом отбираем N клочков. Распределение их масс $f(m, 1)$ будет уже отличаться от исходного распределения $f(m, 0)$.

Затем описанную процедуру повторяем T раз. В результате получим набор распределений $f(m, t)$, $t = 1, \dots, T$. По ним можно отследить, насколько быстро распределения масс приближаются к предельному распределению.

Ниже приведены блок-схема алгоритма (рисунок 2.7) и процедура MATLAB, реализующая описанную схему моделирования. В ней принято $N = 10^5$, масса всех исходных клочков одна и та же, равна $m_0 = 1000$ ед. Это значит, что их распределение имеет вид дельта-функции $f(m, 0) = \delta(m - m_0)$.

```
function [mRez] = Delenie1;
N = 100000; % Число клочков
T = 6; % Число циклов деления
m0 = 1000; % Начальная масса клочков
mMas = m0 * ones( N, 1 ); % Массив начальных масс клочков
mRez = zeros( N, T + 1 ); % Массив масс клочков после каждого цикла деления
mRez(:, 1) = mMas(:, 1); % Сохранение начального массива масс клочков
for t = 1 : T % Начало циклов деления
    for j = 1 : N % Перебор всех клочков
        m = mRez( j, t ); % Масса клочков перед делением
        p1 = rand; m1 = m * p1; m2 = m - m1; % Доли и массы клочков после деления
        if rand < 0.5; % Розыгрыш занесения массы клочка в массив результатов
            mRez( j, t + 1 ) = m1; else mRez( j, t + 1 ) = m2;
        end
    end
end
```

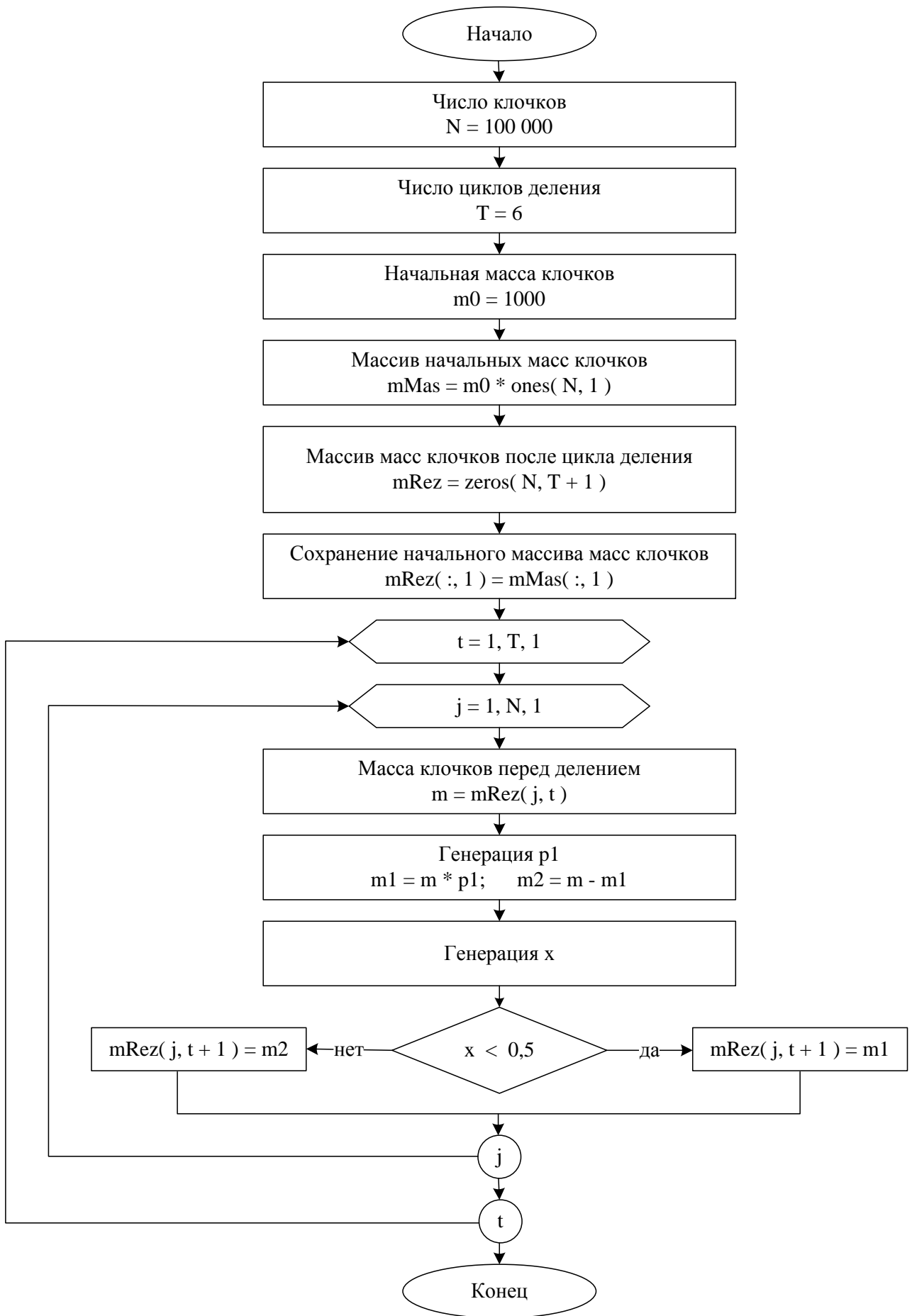


Рисунок 2.7 – Блок-схема процедуры Delenie1

Каждому этапу (циклу) деления клочков соответствует одна строка массива результатов $mRez$, содержащая значения масс половины полученных в результате деления клочков. Выбирая соответствующую строку и строя для нее гистограмму, получим оценки распределения масс до начала процесса и после каждого этапа деления. Гистограммы для начального распределения и после первого этапа очевидны: первая имеет вид дельта-функции, вторая соответствует равномерному распределению в соответствии с принятым правилом задания долей массы у образующихся при делении клочков.

На рисунке 2.8 (а, б) приведены гистограммы после второго и шестого этапов деления. Ниже на рисунке 2.8 (в) гистограммы совмещены и для большей наглядности построены в логарифмическом масштабе по оси ординат.

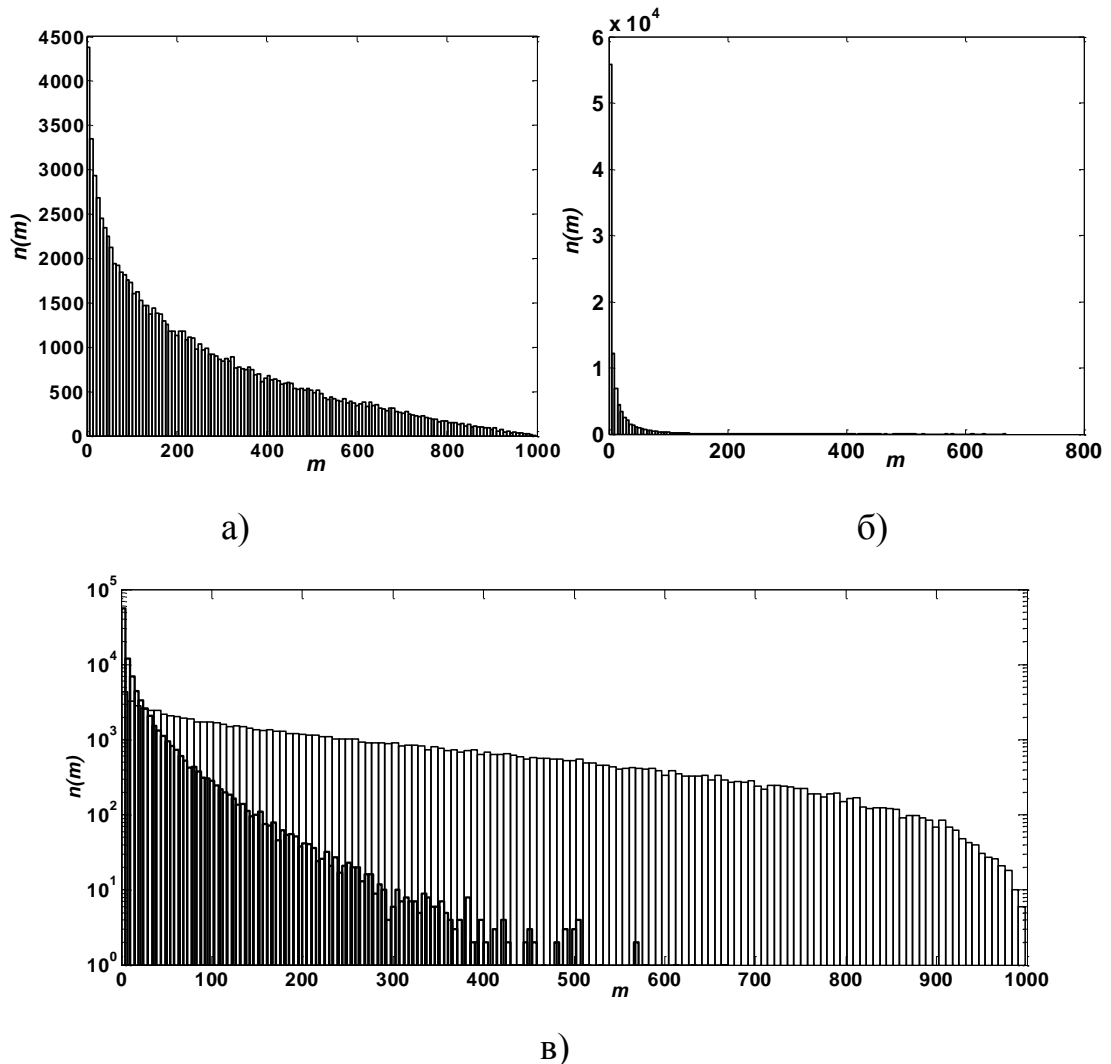


Рисунок 2.8 - Гистограммы массы клочков после второго (а) и шестого (б) этапа деления, и совмещенные в логарифмическом масштабе гистограммы

Видно, что уже после второго деления распределение клочков близко к экспоненциальному распределению. При экспоненциальном распределении в логарифмическом масштабе по оси ординат вершины гистограммы должны лежать на прямой линии. Из-за самых массивных клочков наблюдаются отличия от этого распределения.

Рассмотренная схема и реализующая ее процедура удобны для различных модификаций. Например, можно изменить распределение долей p_1 и p_2 с равномерного на бета-распределение. Это распределение при изменении двух его параметров позволяет получить широкий спектр разных вариантов (моделей) деления. Другая модификация может допускать деление клочка сразу не на два, а на большее число частей, причем это число может быть случайным.

Более сложный вариант схемы может допускать случайность самого факта разделения клочка. Это будет означать, что на каждом этапе разделяются не все клочки, а лишь часть из них, что может заметно отразиться на распределении масс, заметно утяжелив правые «хвосты» распределения.

Наконец, возможна модификация схемы, когда определяющим фактором является не число последовательных делений, а отрезок времени, в течение которого происходит случайное число делений каждого клочка. Естественно, что в итоге не только массы, но и число итоговых клочков оказывается случайным. Накапливая результаты по многим «прогонам» разных клочков, можно получить конечное распределение массы клочков и их число. Опишем подробнее алгоритм этого, более реалистичного, варианта модели.

Для прерывания процесса моделирования задаются максимальные значения конечного числа клочков N_{max} и моделируемого интервала времени T . При первом достижении одного из этих пределов моделирование прекращается.

Для заданного числа исходных клочков N_0 задаются значения массы m_0 , собранные в одномерный массив $mMas$ длиной N_0 . В приведенном примере все начальные клочки имеют одинаковую массу.

Для каждого из клочков моделируются интервалы времени до его разделения на части. В модели интервалы времени считаются распределенными по экс-

поненциальному закону со средним временем τ_{Sr} . С учетом этих интервалов вычисляются моменты времени этих событий - делений клочка на две части, - добавляя интервал к текущему значению модельного времени $tMod$. Значения $tMod$ нарастают, продвигаясь по последовательным моментам времени деления очередного клочка. Новые клочки, образовавшиеся в результате деления, включаются в массив масс клочков. При этом один из них замещает разделившийся клочок, а другой добавляется к массиву, увеличивая на единицу его длину N . Ниже приведена процедура, реализующая данный алгоритм.

```
function [ nMas, mMas, tMod, N, k ] = Delenie2;
% Задание значений параметрам модели
N0 = 1000; Nmax = 100000; T = 100; tauSr = 20; m0 = 1000; a = 1.5;
b = 1.5;
% Задание начальных значений переменным
mMas = m0 * ones( N0, 1 ); tMod = 0; N = N0; k = 0;
nMas = zeros(N0,1); % Массив счетчиков числа делений по каждому
клочку
t = tMod + exprnd( tauSr, N0, 1 ); % Массив моментов первого деления
клочков
[ tMin, jMin ] = min( t ); % Ближайший момент деления и номер разделяю-
щегося клочка
tMod = tMin; % Перенос модельного времени в момент первого деления
клочка
while (tMod < T && N < Nmax) % Проверка условия окончания моделирова-
ния
    N = length( mMas ); % Текущее значение числа моделируемых клочков
    % Генерация доли массы одной из частей делящегося клочка с исполь-
    зованием
    % бета-распределения с параметрами a и b
    p = betarnd( a, b );
    m = mMas( jMin, 1 ); m1 = p * m; m2 = m - m1; % Массы вновь образо-
    вавшихся клочков
    N = N + 1; % Увеличение общего числа клочков в массиве
    mMas( jMin, 1 ) = m1; mMas( N, 1 ) = m2; % Занесение масс клочков в
    массив
    nMas( jMin, 1 ) = nMas( jMin, 1 ) + 1; % Учет нового деления в счетчике
    nMas( N, 1 ) = 0; % Создание счетчика для нового клочка
    t( jMin, 1 ) = tMod + exprnd( tauSr ); % Моделирование моментов деле-
    ния новых клочков
    t( N, 1 ) = tMod + exprnd( tauSr );
    [ tMin, jMin ] = min( t ); % Ближайший момент деления и номер очеред-
    ного клочка
```

tMod=tMin; % Перенос модельного времени в момент очередного деления

k=k+1; % Подсчет числа делений клочков за время моделирования
end

Естественно, что вследствие наличия в алгоритме и процедуре генераторов случайных чисел каждый прогон модели дает несколько отличающиеся результаты. Пример таких данных о прогоне модели представлен в таблицах 2.3 и 2.4.

Таблица 2.3 - Параметры модели и исходные данные моделирования

№№	Обозначение	Наименование	Значение
1	N0	Начальное число клочков	1000
2	Nmax	Максимальное число клочков	100000
3	T	Моделируемый интервал времени	100
4	tauSr	Среднее время между деления	20
5	m0	Начальная масса клочков	1000
6	a, b	Параметры бета-распределения	1,5 1,5

Таблица 2.4 - Результаты моделирования

№№	Обозначение	Наименование	Значение	Min	Max
1	N	Конечное число клочков	100000	10^5	10^5
2	k	Общее число делений	99000	$99 \cdot 10^3$	$99 \cdot 10^3$
4	mMas	Массив масс клочков	<10000x1>	1,4644 e-9	1000
5	nMas	Массив счетчиков числа делений каждого клочков	<10000x1>	0	13
6	tMod	Время останова прогона	92,392	92,392	92,392

Заметим, что продолжительность одного прогона на компьютере процедуры *Delenie2* значительно (в десятки раз) превышает время выполнения на том же компьютере процедуры *Delenie1*.

Результаты моделирования показывают, что прогон модели остановился из-за достижения максимального допущенного условиями числа клочков 100000. Модельное время при этом было равно 92,392, т.е. не успело достичь заданного предельного значения 100 для моделируемого интервала. Максимальное значение массы в массиве конечных масс равно 1000, т.е. не все исходные клочки успели хотя бы один разделиться на более мелкие клочки. Вместе с тем, отметим, что за смоделированный интервал времени успели образоваться клочки с весьма ма-

лыми массами при наибольшем числе делений одного клочка 13. Минимальная масса равна $1,46 \cdot 10^{-9}$.

Полученный массив масс клочков, образовавшихся в результате процесса последовательных делений, представляет гистограмма на рисунке 2.9. Для наглядности ординаты на графике отображены в логарифмическом масштабе.

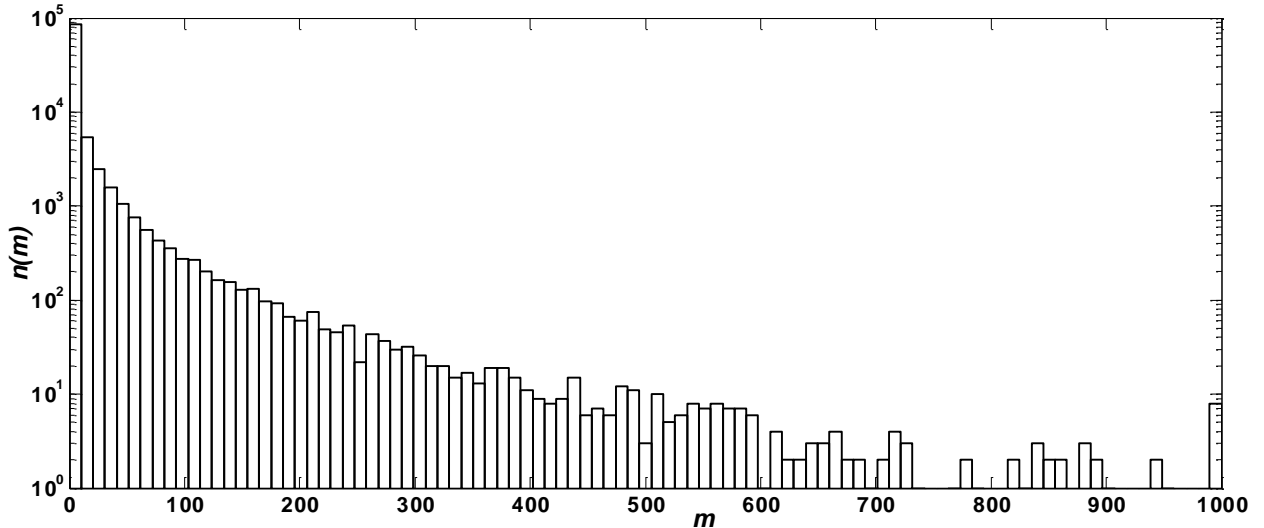


Рисунок 2.9 - Распределение числа клочков $n(m)$ по массам m

На рисунке 2.10 приведена та же гистограмма (слева) и аналогичная гистограмма, но полученная для значений параметров $a = 4$ и $b = 4$ бета-распределения, в соответствии с которым генерируются значения долей массы, на которые разделяется клочок. Во втором случае бета-распределение является более островершинным, чем в первом. Поэтому более вероятно деление клочка на примерно равные по массе части. Это видно на правой гистограмме, у которой практически отсутствуют клочки с массой свыше 750 единиц. При этом доля клочков, которые ни разу не разделялись и сохранили исходную массу 1000 единиц, практически не изменилась.

Отметим, что сделанные выводы построены на результатах одного прогона модели. Для получения статистически надежных выводов необходимо выполнить достаточное количество повторных прогонов с разными стартовыми числами для генератора псевдослучайных чисел, который используется в функциях *rand*, *exprnd* и *betarnd* процедуры. Только после таких повторных опытов (прогонов

модели) можно строить надежные выводы о влиянии вариаций тех или иных параметров на эффекты, наблюдаемые в эксперименте с моделью.

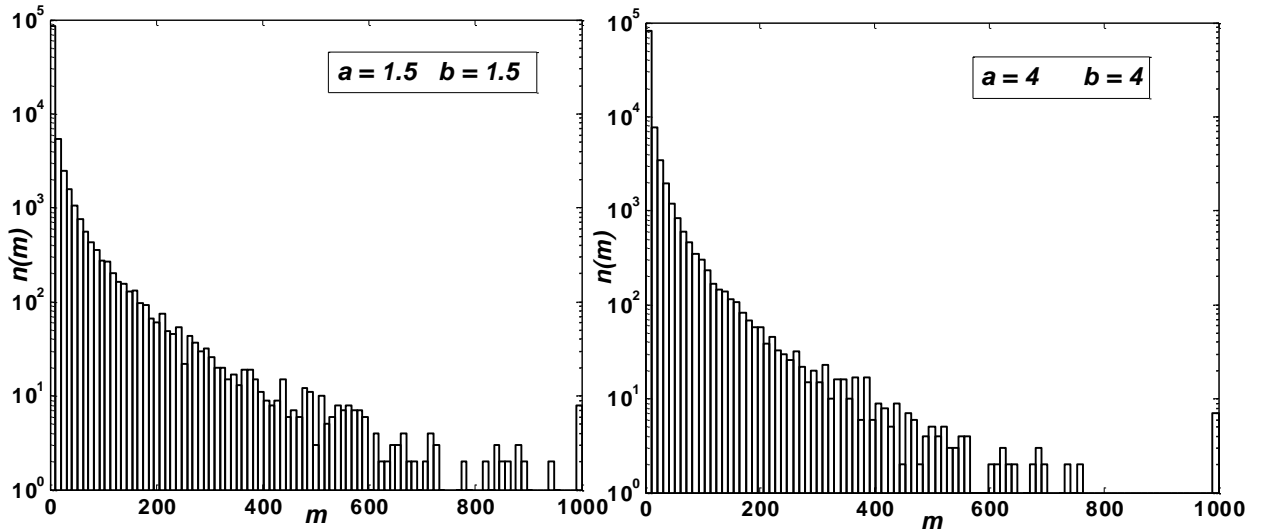


Рисунок 2.10 - Сравнение гистограмм, полученных при разных значениях параметров a и b бета-распределения

Число делений в прогоне модели, накопленное по клочкам в массиве $nMas$, представлено на рисунке 2.11.

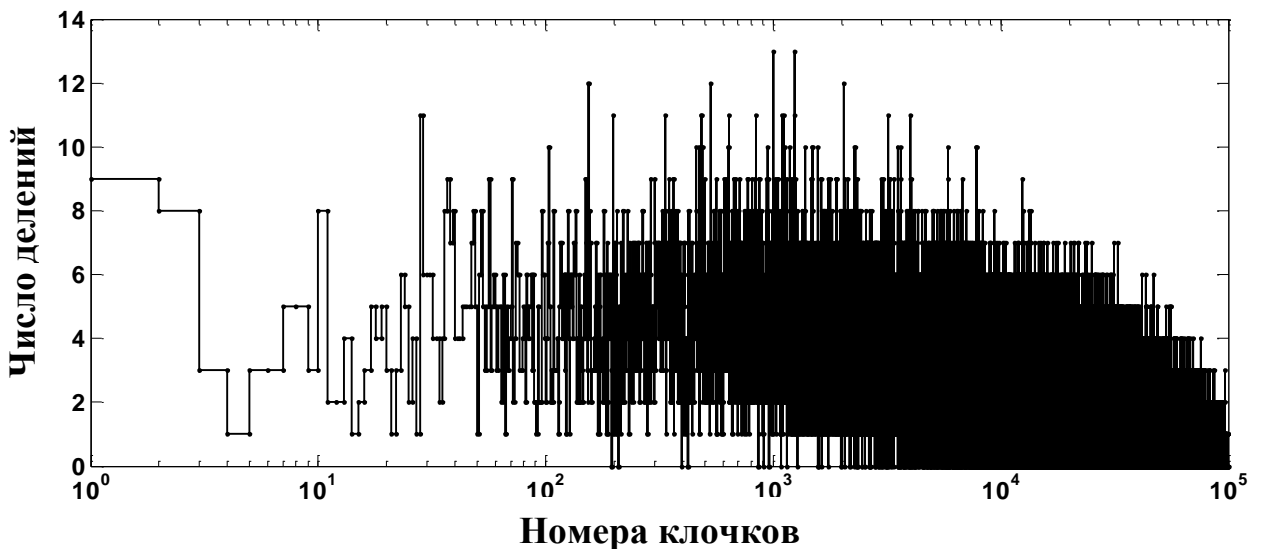


Рисунок 2.11 - Число делений начальных и вновь образовавшихся клочков

Исходные клочки на рисунке имеют номера от единицы до 10^3 . Видно, что за время моделирования не все из них подверглись делению. При наибольшем числе делений 13 большая часть клочков испытала лишь от 3 до 6 делений.

На рисунке 2.12 представлена гистограмма, показывающая распределение числа клочков по количеству делений, которые они претерпели за время моделирования.

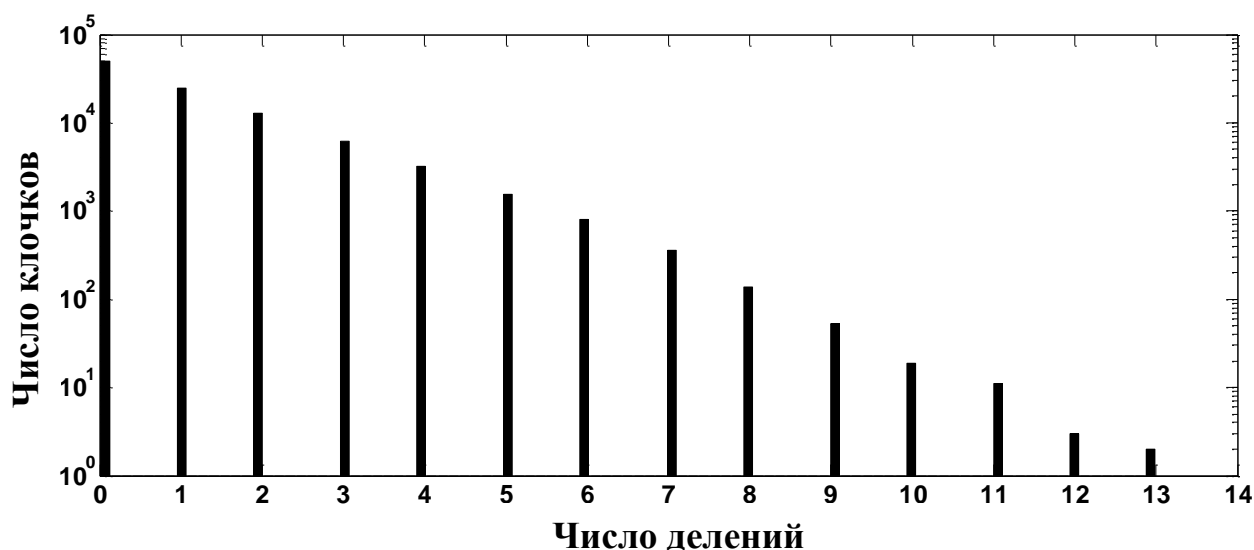


Рисунок 2.12 - Распределение числа клочков по количеству делений

В логарифмическом масштабе число клочков убывает практически линейно с ростом числа делений, что говорит об экспоненциальном убывании числа клочков с ростом числа приходящихся на них делений.

Выводы по второй главе

1. Разработана динамическая модель преобразования линейной плотности волокнистого потока с учетом компонентного состава с использованием условий материального баланса. Модель позволила изучить влияние конструктивных и кинематических параметров машин на процессы разрыхления и очистки и может быть использована для разработки системы автоматического управления процессами очистки и разрыхления волокнистой массы.

2. Установлена зависимость частотных свойств преобразования от скорости рабочих органов машины, разводки между колосниками и колками и диаметром барабанов.

3. Разработанная модель преобразования распределения характеристик волокнистого потока в технологическом процессе показала, что при исследовании процессов разрыхления и очистки важно учитывать не только стандартные числовые характеристики (математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение и т.п.), но и форму распределения массы, плотности и других характеристик

волокнистого потока, поскольку перечисленные числовые характеристики могут дать искаженную и смещенную оценку эффективности разрыхлительно-очистительного процесса.

4. Установлено, что в случае нормальных законов распределения массы исходных клочков и долей, на которые они разделяются, массы образующихся клочков также распределены по нормальному закону. Если законы распределения отличаются от нормального, что типично для реальных распределений масс клочков, то законы распределения получаемых клочков могут сильно отличаться по форме - от трапецеидального распределения до экспоненциального и логарифмически нормального распределения.

5. Для усредненных характеристик разрыхлительно-очистительного процесса модель дает те же результаты, что и уже известные аналитические модели. Но в отличие от них разработанная модель описывает так же и статистическую динамику процесса.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЫХЛЕНИЯ И ОЧИСТКИ КЛОЧКОВ

3.1 Обобщенная имитационная статистическая модель процессов разрыхления и очистки волокнистой массы

Преимуществом компьютерных моделей является возможность получения не только усредненных показателей, но и оценки влияния параметров на рассеяние значений показателей. Величины такого рассеяния, например, по массе клочков, их плотности и содержанию сорных примесей зачастую более важны для последующих технологических переходов, чем средние значения. Особенностью процесса разрыхления является малый объем информации о распределениях указанных характеристик клочков. Поэтому для использования результатов моделирования оказывается актуальной задача проверки робастности этих результатов при вариациях исходных условий.

Для исследования разрыхления и очистки клочков была разработана обобщенная модель многостадийного процесса разрыхления и очистки волокнистых клочков, находящихся в свободном состоянии. Процесс моделируется в виде последовательности переходов, на каждом из которых клочки подвергаются воздействию рабочих органов разрыхлительно-очистительных машин – колкового или ножевого барабана и колосниковой решетки. При разработке модели в качестве прототипа рассматривался многобарабанный наклонный очиститель, который широко распространен как в отечественных, так и в зарубежных поточных линиях (рисунок 1.2).

Особенностью процесса очистки волокнистой массы является его вероятностный характер. Это означает, что деление клочка на более мелкие части, выделяемые из клочка сорные примеси, изменение плотности волокнистой массы в клочке и формы клочков происходит случайным, непредсказуемым образом. При этом распределение клочков практически по любой их характеристике имеет большой разброс относительно средних значений, настолько большой, что если

ориентироваться только на средние значения, то можно получить сильно искаженные результаты. Достоинством компьютерных статистических моделей является включение в них взаимосвязей между вероятностями событий, происходящих с клочками в процессе разрыхления и очистки, и зависимостей от параметров.

Модель процессов разрыхления и очистки клочков волокнистой массы основана на представлении, что в результате каждого взаимодействия клочка с рабочими органами возможны следующие исходы:

1) деление клочка на две части с возможным выделением сорных примесей (т.е. возможной очисткой). Одновременное деление на три клочка и более считается событием практически невозможным.

2) разрыхление - клочок остается целым, но увеличивается его объем (соответственно, происходит уменьшение его плотности), масса клочка остается неизменной. При этом также могут выделяться сорные примеси.

3) зажгучивание - увеличение плотности клочка без изменения массы и выделения сорных примесей и непрядомых волокон. К зажгучиванию могут приводить разные причины, например, взаимодействие клочка с воздушным потоком и близко расположенными элементами конструкции машины, придающими клочку не только поступательное, но и вращательное движение. Причиной зажгучивания клочка также может быть его взаимодействие с другими клочками, повышенная извитость и цепкость волокон в клочке, большие размеры клочка, не соответствующие размерам той части рабочей зоны, в которой движется клочок, и в которой происходит его взаимодействие с рабочими органами машины.

На рисунке 3.1 представлен граф, отображающий связи между этими событиями, а на рисунке 3.2 события отображены в виде наглядной схемы.

Поскольку клочки находятся в свободном состоянии, то результат их взаимодействия с рабочими органами является случайным. По своей природе это сложный вероятностный процесс, который относится к классу ветвящихся процессов. В ряде работ [91, 123-125] этот класс процессов изучен с помощью Мар-

ковских цепей. Однако такой подход не позволяет учесть конструктивные и кинематические характеристики рабочих органов машины.

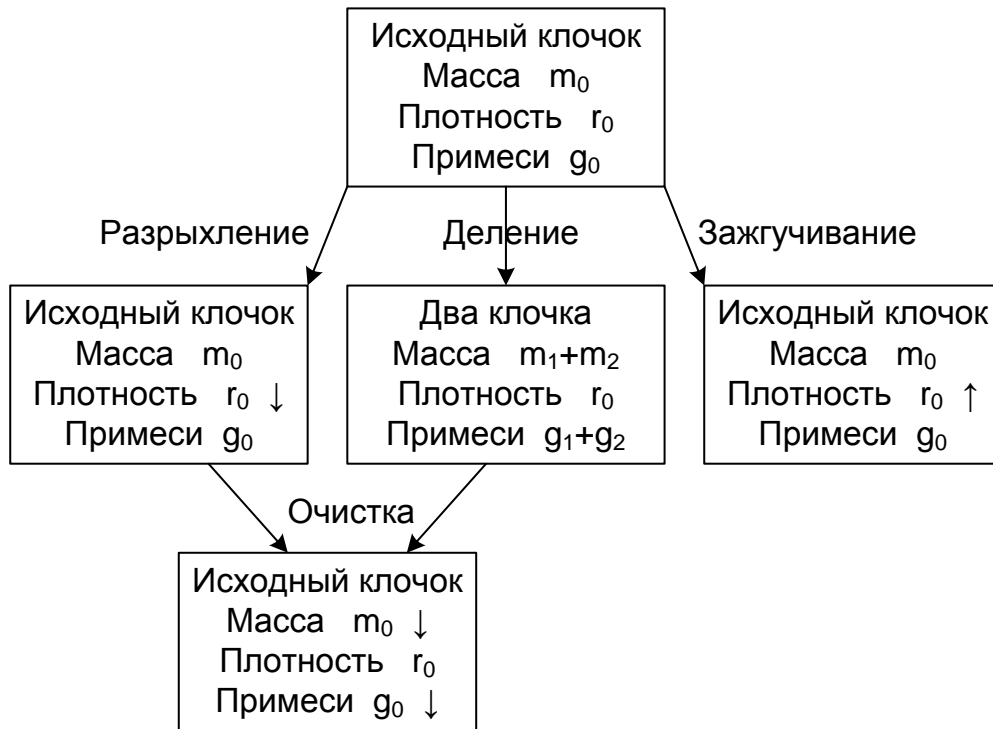


Рисунок 3.1 - Случайные события с клочками в процессе разрыхления и очистки и связи между ними

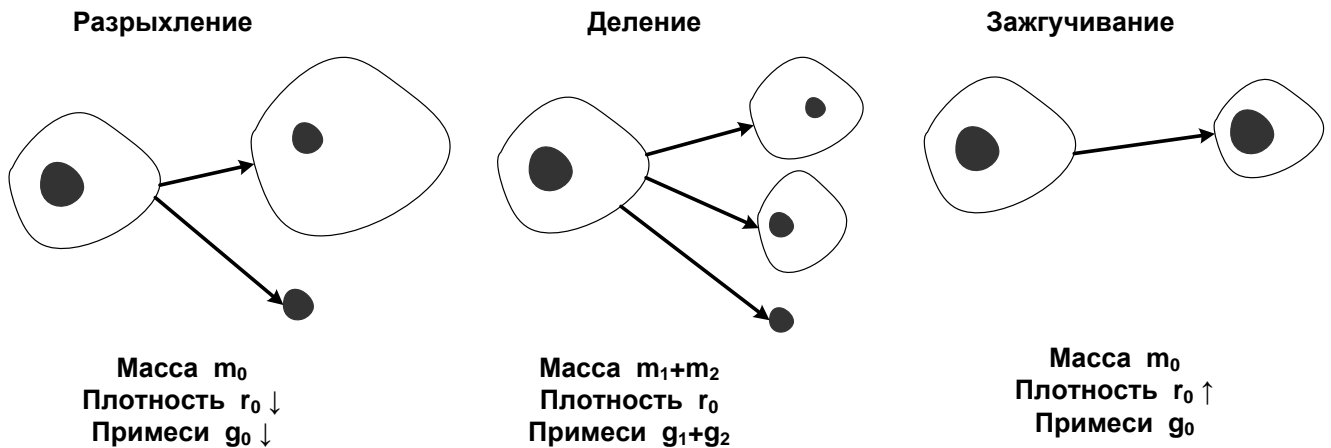


Рисунок 3.2 - Схема разрыхления, деления и зажгучивания клочков волокон

В построенной модели события, происходящие с клочком, образуют полную группу. Как известно, набор событий называется полной группой, если в результате случайного эксперимента произойдет одно и только одно из этих событий. При рассмотрении разрыхлительно-очистительного процесса клочков волокнистой массы полную группу событий составят процессы разрыхления, деления и зажгучивания.

Обозначим P_{A_i} - вероятность события A_i из полной группы событий. Алгоритм моделирования случайного события из полной группы N событий при известных вероятностях P_{A_i} сводится к следующему [126]:

1. Генерируется случайная величина x , распределенная по равномерному закону.

2. Если $x \leq \sum_{i=1}^k P_{A_i}$, $k = 1, 2, \dots, N$, то произошло событие A_k .

Для описания обобщенной модели разрыхления и очистки введем следующие обозначения: m – масса клочка; g – масса сорных примесей в клочке; r – плотность клочка; P_1, P_2, P_3 – вероятности разрыхления, деления и зажгучивания соответственно при одном взаимодействии клочка с рабочим органом машины (колками и колосниками); N – начальное количество моделируемых клочков. Считаем, что с клочком на одном шаге может происходить только одно из перечисленных выше событий: разрыхление клочка (с выделением сорных примесей); деление клочка на два (с выделением сорных примесей); зажгучивание клочка.

Алгоритм моделирования состоит из следующих этапов:

1. Задание исходных данных: N ; m ; g ; r .
2. Задание исходных значений для вероятностей P_1 и P_2 .
3. Вычисление $P_3 = 1 - (P_1 + P_2)$
4. Генерация случайного числа x .
5. Определение случайного события с очередным клочком:
 - 5.1. Если $0 \leq x \leq P_1$, то произошло разрыхление (событие A_1).
 - 5.2. Если $P_1 < x \leq P_1 + P_2$, то произошло деление (событие A_2).
 - 5.3. Если $P_1 + P_2 < x \leq 1$, то произошло зажгучивание (событие A_3).
6. Если произошло A_1 , то выполняется уменьшение g и r .
7. Если произошло A_2 , то выполняются:
 - 7.1. деление клочка на два клочка с массами m_1 и m_2 ;
 - 7.2. деление g на три части: g_1, g_2 – массы сорных примесей в двух образовавшихся в результате деления клочках, и g_3 – массу сорных примесей, выде-

лившихся в отходы;

7.3. уменьшение r_1 и r_2 .

8. Если произошло A_3 , то выполняется увеличение r .
9. Накопление данных по преобразованному и образовавшимся клочкам.
10. Повторение пп. 4 - 9 для N клочков.
11. Построение оценок распределения массы, плотности и содержания сорных примесей.
12. Пункты 4 - 11 повторяются K раз для полученных на предыдущих этапах клочков. При каждом повторении в качестве обрабатываемых клочков используются клочки и их характеристики, полученные на предыдущем этапе.

Поясним отдельные пункты алгоритма. Пункты 1 и 2 задают стартовые условия для моделирования. Пункты 4 и 5 имитируют розыгрыш случайного события (A_1 , A_2 или A_3). Пункты 6 - 8 имитируют изменения массы клочка, массы сорных примесей и плотности клочка, которые происходят по вероятностным законам.

Процедура циклически повторяется многократно для заданного числа исходных клочков. Результаты каждого шага сохраняются в массивах, что позволяет накапливать статистические данные по итогам одного этапа изменения характеристик клочков. Поскольку этапы имитации многократно повторяются с уже обработанными клочками, тем самым имитируется многостадийный процесс разрыхления и очистки вследствие многократного взаимодействия моделируемых клочков с рабочими органами машин. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3.3.

Данный алгоритм был реализован в виде процедуры в системе MATLAB. Выбор среды для программной реализации этого и других алгоритмов обусловлен удобствами и универсальностью языка программирования, большой скоростью и высокой точностью выполнения вычислений, которые обеспечиваются высококачественным компилятором и специально ориентированными на сложные научно-технические расчеты методами выполнения отдельных операций, а также наличи-

ем в системе MATLAB интегрированных в нее автоматизированных средств обработки статистических данных больших объемов.

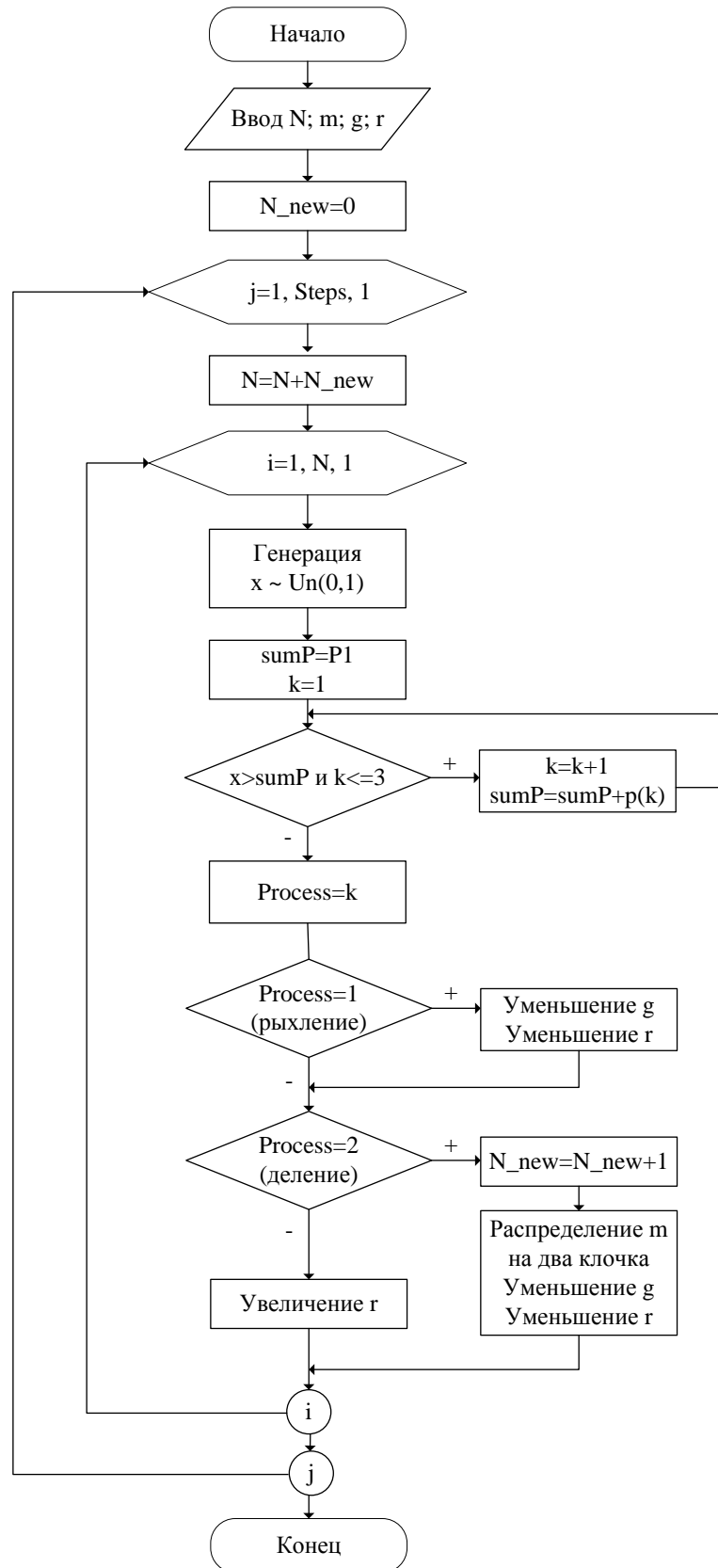


Рисунок 3.3 - Блок-схема алгоритма моделирования процессов разрыхления и очистки

Для проведения экспериментов с моделью были приняты следующие начальные значения для параметров, включенных в процедуру: масса каждого клочка 100 мг; плотность клочков 1 г/см^3 ; масса сорных примесей 5% от массы клочка. Заметим, что выбранные одинаковые начальные значения для всех моделируемых клочков позволяют более наглядно выделить эффект случайности в процессах деления, разрыхления и очистки.

Ниже приведен текст моделирующей процедуры:

```
function [m, g, r] = ModelRO;
N = 1000; Steps = 6; m = ones(N,1); g = zeros(N,1); r = ones(N,1);
g = m * 0.05;
p = zeros(N, 1); Process = zeros(N, 1); p(1) = 0.6; p(2) = 0.2;
p(3) = 1 - ( p(1) + p(2) );
N_new = 0;
for j = 1 : 1 : Steps
    N = N + N_new;
    for i = 1 : 1 : N
        x = rand; sump = p(1); k = 1;
        while (x > sumP) && (k <= 3)
            k = k + 1; sump = sump + p(k);
        end;
        Process(i) = k;
        if Process(i) == 1 g(i) = rand * g(i); r(i) = rand * r(i);
        elseif Process(i) == 2 N_new = N_new + 1;
            m_old = m(i); m(i) = rand * m(i); m(N + N_new) = m_old - m(i);
            g(i) = rand * g(i); g_old = g(i); g(N + N_new) = g(i) - g(i);
            g(N + N_new) = g_old - g(i);
            r(i) = rand * ( r(i) - r(i) / 2) + r(i) / 2; r(N + N_new) = r(i);
        else r(i) = rand + r(i); end;
    end; % for i=1:1:N
end; % for j=1:1:Steps
```

С построенной моделью был проведен ряд вычислительных статистических экспериментов. Как отмечено в главе 1, А. Н. Колмогоровым теоретически показано, что при однородном процессе многостадийного деления возникает множество частиц, распределение которых устойчиво, не зависит от исходных условий деления и соответствует логарифмически нормальному закону распределения. Однако, скорость сходимости к предельному распределению, а также чувствительность распределения к некоторым параметрам модели процесса, оставалась

неизвестной. Проверка и решение этих задач и явились целью описываемых ниже экспериментов.

3.1.1 Анализ предельного распределения массы клочков

В [86] было доказано, что при многостадийном и однородном делении частиц устанавливается предельное распределение их масс, соответствующее логарифмически нормальному закону не зависимо от исходного распределения клочков. В связи с этим в описываемом эксперименте было проведено исследование, сколько этапов K деления клочков потребуется, чтобы распределение массы клочков достигло этого предельного распределения [114, 126-129].

В этом эксперименте вероятности разрыхления, деления и зажгучивания были приняты одинаковыми и равными $P_1 = P_2 = P_3 = 1/3$. Для полученных в результате одного прогона модели данных по клочкам (число исходных клочков $N = 1000$) были определены оценки среднего (mSr) и среднеквадратического отклонения (Sm). Кроме того, были использованы оценки моды (Mo), медианы (Me) и интердецильного размаха (Wd) в качестве числовых характеристик распределений. Включение в список оцениваемых характеристик Mo , Me , Wd объясняется тем, что распределения характеристик клочков асимметричны, и традиционные числовые характеристики могут оказаться недостаточно информативными и надежными.

Для проверки соответствия оценки распределения гипотетическому логарифмически нормальному распределению использовался логарифм функции правдоподобия L [130] – один из стандартных критериев, предлагаемых в системе MATLAB. Результаты эксперимента приведены в таблице 3.1. Из таблицы видно, что, начиная с четвертого этапа деления, соответствие эмпирического распределения массы клочков логарифмически нормальному закону имеет быстро нарастающий уровень правдоподобия.

Таблица 3.1 - Приближение распределения массы к логарифмически нормальному распределению

Номер этапа K	Логарифм правдоподобия L	Среднее mSr	Среднеквадратическое отклонение Sm	Мода Mo	Медиана Me	Интердецильный размах Wd
1	-1061,27	0,881	0,327	1	0,954	0,898
2	-1111,14	0,784	0,358	1	0,556	0,969
3	-855,67	0,815	0,348	1	0,337	0,990
4	30,89	0,636	0,309	1	0,189	0,996
5	1833,77	0,529	0,278	1	0,118	0,900
6	5193,74	0,430	0,234	1	0,068	0,068

На рисунке 3.4 показано изменение значений логарифма правдоподобия L аппроксимации выборочных данных логарифмически нормальным распределением в зависимости от числа этапов разрыхления K в соответствии с таблицей 3.1. Из приведенных данных можно считать, что предельное логарифмически нормальное распределение массы клочка достигается уже на пятом этапе обработки.

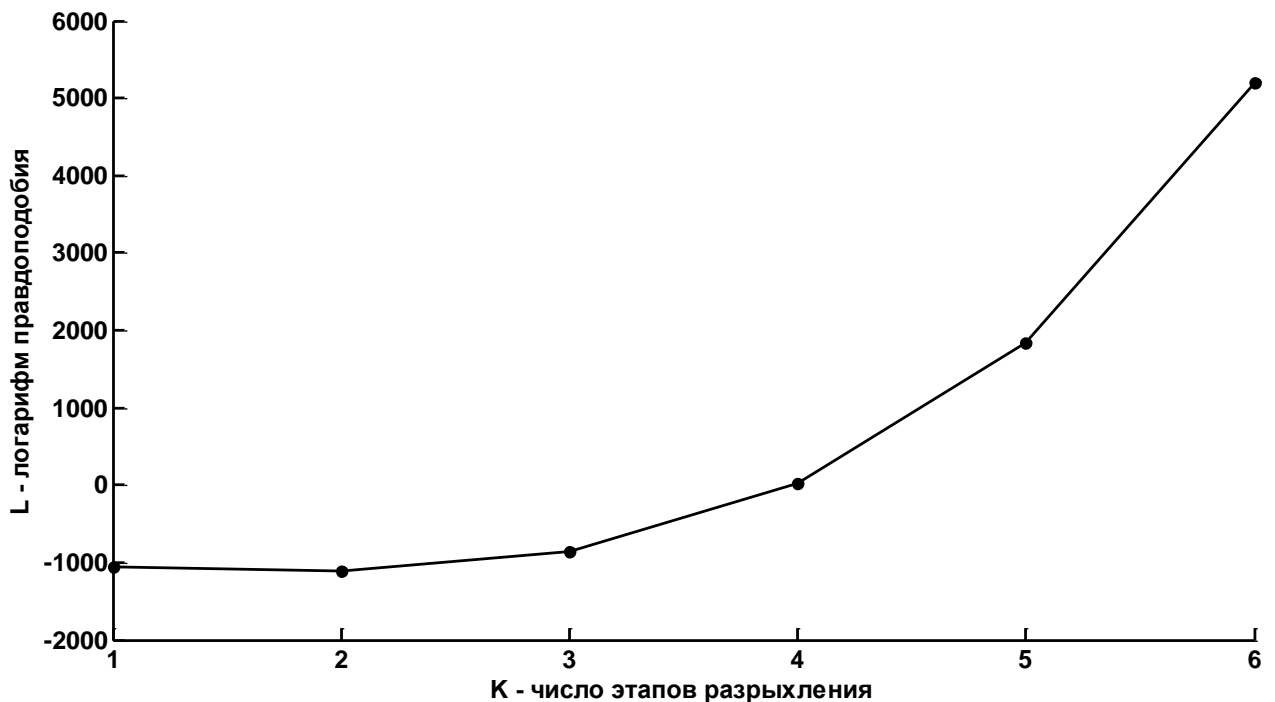


Рисунок 3.4 - Зависимость логарифма правдоподобия L от числа этапов разрыхления K

Приведенные в таблице 3.1 данные показывают, что из рассмотренных числовых показателей наиболее характерным и адекватным для описания процесса

является оценка медианы, которая меняется в наибольшем диапазоне значений и тем самым наилучшим образом отображает процесс деления.

На рисунке 3.5 представлена гистограмма распределения массы клочка, которое достигается после 6 этапов, и аппроксимирующая его кривая логарифмически нормального распределения. Данный пример показывает, что распределение массы клочков имеет ярко выраженную асимметричную форму с тяжелым правым хвостом. При этом максимум распределения либо находится на левом краю кривой, либо мало от него отличается. Такой вид распределения характерен не только для массы, но и практически для всех других числовых характеристик клочков.

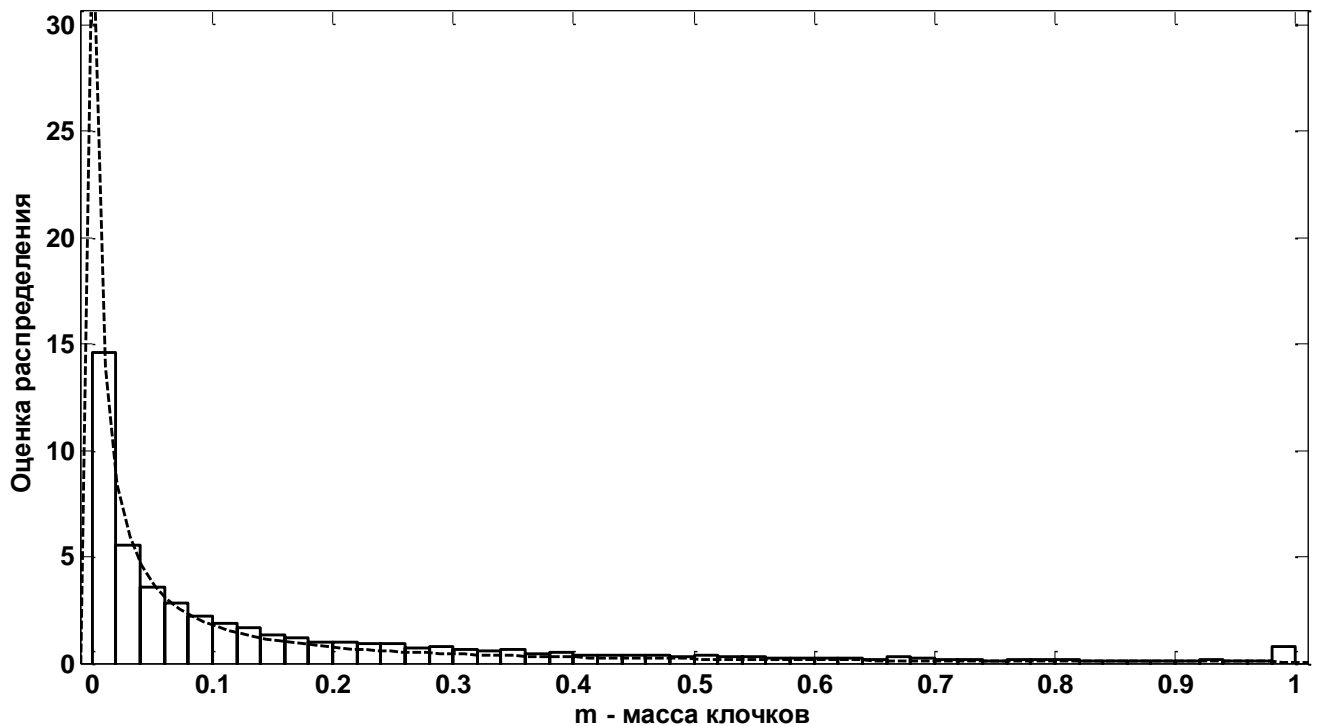


Рисунок 3.5 - Оценка распределения массы клочков m после 6 этапов разрыхления и его аппроксимация логарифмически нормальным распределением

Таким образом, в результате эксперимента установлено, что предельное распределение массы клочков достигается уже после нескольких этапов деления (4-6 этапов).

3.1.2 Зависимость распределения массы клочков от вероятностей разрыхления и деления клочков

В предыдущем эксперименте вероятности деления, разрыхления и зажгучивания были одинаковы. В реальном процессе эти вероятности могут быть не только не одинаковыми, но и изменяться на разных этапах деления. Выясним, как вариации этих вероятностей отражаются на форме распределения клочков по массе [114, 127, 131].

Для решения этой задачи с моделью нами был проведен двухфакторный эксперимент. В нем исследовалось изменение критерия – логарифма правдоподобия L для соответствия эмпирического распределения логарифмически нормальному - при варьировании вероятности разрыхления ($P_1 = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$) и числа этапов деления клочков K . Диапазон варьирования вероятности выходит за рамки практически реализуемых значений, а число этапов деления отвечает числу рабочих органов машин, наиболее распространенных на производстве. При этом вероятности деления и зажгучивания определялись выражением:

$$P_2 = P_3 = \frac{1 - P_1}{2} \quad (3.1)$$

В таблице 3.2 приведены результаты эксперимента для всех комбинаций варьируемых факторов.

Таблица 3.2 - Зависимость логарифма правдоподобия L от вероятности разрыхления P_1 и числа этапов разрыхления K

K	P_1				
	0	0,2	0,4	0,6	0,8
1	-1006,97	-1013,72	-988,21	-994,04	-550,53
2	-834,54	-997,18	-1141,48	-1185,63	-957,14
3	247,09	-449,58	-927,03	-893,99	-1149,28
4	2880,90	1414,05	-253,67	-1010,52	-1185,44
5	8870,06	3883,91	947,04	-611,29	-1298,41
6	20404,20	8614,37	2984,17	-41,27	-1203,60

Для наглядности данные, приведенные в таблице 3.2, отображены на рисунке 3.6, где показана динамика изменения L при различных значениях P_1 для раз-

ных значений K .

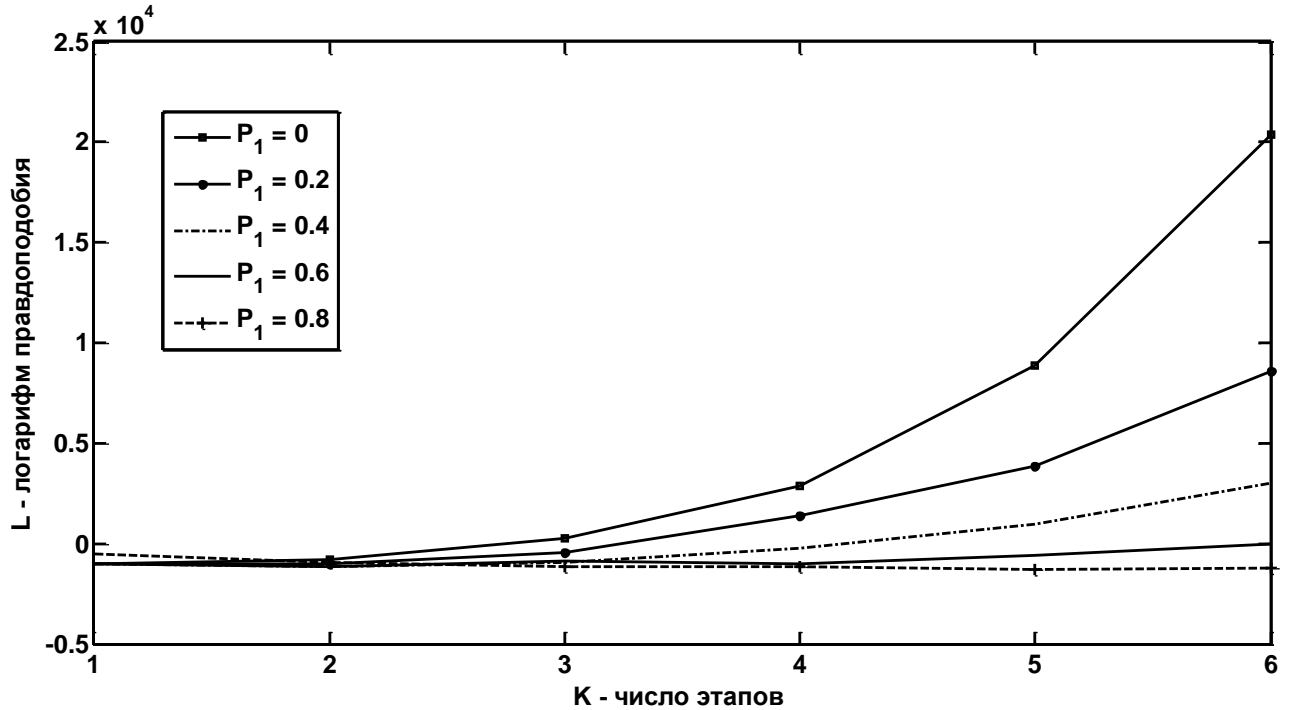


Рисунок 3.6 – Изменения логарифма правдоподобия L при вариациях вероятности разрыхления P_1

Из графика видно, что наиболее быстро распределение массы клочка приближается к логарифмически нормальному распределению при $P_1 = 0$. При $P_1 = 0,8$ логарифмически нормальное распределение не устанавливается в той области варьирования факторов, которая была использована в эксперименте. Из результатов эксперимента следует, что чем ниже вероятность разрыхления клочка и, соответственно, выше вероятность деления, тем быстрее достигается логарифмически нормальное распределение массы клочка.

3.1.3 Зависимость разрыхления и очистки от параметров процесса

Построенная модель позволила найти зависимость эффективности процессов разрыхления и очистки от параметров процесса в виде формул линейных регрессий 2-го порядка [132]. Для получения регрессионных зависимостей был построен и реализован на модели план многофакторного регрессионного эксперимента.

В соответствии с этим планом были выбраны следующие показатели эффективности процессов разрыхления и очистки: средняя масса клочка Y_1 , средняя плотность клочка Y_2 и средняя масса сорных примесей в клочке Y_3 .

В качестве варьируемых факторов выбраны вероятность разрыхления P_1 , вероятность деления P_2 и вероятность зажгучивания P_3 . Эти вероятности связаны условием нормировки, т.е. не являются независимыми, поэтому в эксперименте варьировались только два фактора P_1 и P_2 . Значения третьей вероятности (3-го фактора) были равны $P_3 = 1 - P_1 - P_2$.

В таблице 3.3 приведен план неполного двухфакторного эксперимента, состоящего из десяти опытов, а также результаты эксперимента. В этой таблице столбец 1 – номера опытов, столбцы 2 и 3 – рабочая матрица плана, в которой указаны комбинации уровней факторов в каждом из опытов. Каждый из факторов P_1 и P_2 варьировался на 4 уровнях (0,2; 0,3; 0,4; 0,6). В эксперименте одновременно отслеживались значения трех зависимых переменных Y_1 , Y_2 и Y_3 , значения которых приведены в столбцах 4 - 6. Для проверки воспроизводимости результатов каждый опыт повторялся 5 раз при фиксированной комбинации значений факторов, т.е. проводилось по 5 прогонов модели на разных массивах значений случайных чисел.

Таблица 3.3 - План и результаты эксперимента

№ опыта	План		Зависимые переменные		
	x_1	x_2	Y_1	Y_2	Y_3
1	2	3	4	5	6
1	0,2	0,2	0,345	1,349	0,00464
			0,338	1,369	0,00477
			0,332	1,301	0,00430
			0,339	1,350	0,00435
			0,337	1,353	0,00426
2	0,2	0,4	0,134	0,746	0,00080
			0,132	0,754	0,00078
			0,130	0,744	0,00075
			0,137	0,756	0,00083
			0,136	0,759	0,00080

Продолжение таблицы 3.3

1	2	3	4	5	6
3	0,2	0,6	0,061	0,376	0,00014
			0,058	0,392	0,00013
			0,060	0,398	0,00015
			0,061	0,378	0,00015
			0,060	0,386	0,00014
4	0,3	0,2	0,348	0,992	0,00312
			0,330	0,995	0,00277
			0,329	0,983	0,00292
			0,322	0,976	0,00260
			0,329	1,000	0,00285
5	0,3	0,3	0,214	0,758	0,00131
			0,205	0,741	0,00115
			0,208	0,737	0,00127
			0,203	0,732	0,00117
			0,209	0,730	0,00124
6	0,3	0,4	0,134	0,526	0,00046
			0,131	0,528	0,00052
			0,134	0,512	0,00056
			0,133	0,534	0,00053
			0,132	0,532	0,00049
7	0,4	0,2	0,340	0,724	0,00205
			0,330	0,697	0,00203
			0,330	0,720	0,00182
			0,339	0,721	0,00185
			0,335	0,745	0,00195
8	0,4	0,3	0,207	0,503	0,00072
			0,213	0,506	0,00080
			0,210	0,519	0,00077
			0,207	0,533	0,00077
			0,211	0,519	0,00086
9	0,4	0,4	0,137	0,350	0,00028
			0,131	0,353	0,00029
			0,132	0,349	0,00028
			0,134	0,351	0,00032
			0,131	0,360	0,00029
10	0,6	0,2	0,337	0,324	0,00074
			0,331	0,310	0,00081
			0,339	0,302	0,00080
			0,321	0,316	0,00075
			0,336	0,312	0,00081

Для построения регрессионной модели были вычислены значения эффектов (коэффициентов регрессии). В таблице 3.4 приведена матрица эффектов. В столбце 1 указаны номера опытов, в столбце 5 приведены значения парных взаимодействий эффектов, в столбцах 6 и 7 – квадраты эффектов.

Таблица 3.4 - Матрица эффектов плана

№ опыта	1	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2
1	2	3	4	5	6	7
1	1	0,2	0,2	0,04	0,04	0,04
2	1	0,2	0,4	0,08	0,04	0,16
3	1	0,2	0,6	0,12	0,04	0,36
4	1	0,3	0,2	0,06	0,09	0,04
5	1	0,3	0,3	0,09	0,09	0,09
6	1	0,3	0,4	0,12	0,09	0,16
7	1	0,4	0,2	0,08	0,16	0,04
8	1	0,4	0,3	0,12	0,16	0,09
9	1	0,4	0,4	0,16	0,16	0,16
10	1	0,6	0,2	0,12	0,36	0,04

Обработка результатов эксперимента производилась в соответствии с общепринятой классической методикой, изложенной в работе [126]. Для обработки данных эксперимента использовались программные средства системы MATLAB. Поэтому вся обработка велась в матричной форме.

В результате получены регрессионные зависимости:

$$Y_1 = 0,7095 - 0,1670x_1 - 2,1029x_2 + 0,2088x_1x_2 + 0,1392x_1^2 + 1,7120x_2^2 \quad (3.2)$$

$$Y_2 = 3,2074 - 5,8821x_1 - 5,6682x_2 + 5,6063x_1x_2 + 2,7471x_1^2 + 2,7000x_2^2 \quad (3.3)$$

$$Y_3 = 0,0170 - 0,0340x_1 - 0,0502x_2 + 0,0517x_1x_2 + 0,0183x_1^2 + 0,0365x_2^2 \quad (3.4)$$

Расчетные значения для проверки адекватности регрессионных зависимостей и обработка результатов эксперимента приведены в таблице 3.5. В ней столбец 1 – номера опытов; столбец 2 – среднее значение зависимой переменной по пяти прогонам; столбец 3 – дисперсия; столбец 4 – прогнозируемое значение; столбец 5 – разность среднего и прогнозируемого значений.

Таблица 3.5 - Обработка результатов эксперимента

№ опыта	\bar{Y}	$S^2 \cdot 10^4$	\hat{Y}	$\hat{Y} - \bar{Y}$
1	2	3	4	5
Y_1				
1	0,3383	0,229	0,3380	-0,0003
2	0,1338	0,095	0,1312	-0,0026
3	0,0601	0,012	0,0614	0,0013
4	0,3313	0,947	0,3324	0,0011
5	0,2077	0,185	0,2140	0,0063
6	0,1328	0,021	0,1298	-0,0030
7	0,3348	0,223	0,3296	-0,0052
8	0,2095	0,060	0,2133	0,0038
9	0,1332	0,057	0,1312	-0,0020
10	0,3319	0,483	0,3325	0,0006
Y_2				
1	1,3444	6,651	1,3394	-0,0050
2	0,7518	0,458	0,7541	0,0023
3	0,3858	0,823	0,3847	-0,0011
4	0,9893	0,932	1,0007	0,0114
5	0,7395	1,273	0,7371	-0,0024
6	0,5263	0,747	0,5275	0,0012
7	0,7213	2,884	0,7169	-0,0044
8	0,5159	1,254	0,5094	-0,0065
9	0,3525	0,177	0,3558	0,0033
10	0,3129	0,612	0,3142	0,0013
Y_3				
1	0,004465	0,0005067	0,0044087	-0,0000561
2	0,000794	0,0000085	0,0008179	0,0000243
3	0,000142	0,0000008	0,0001473	0,0000054
4	0,002858	0,0003572	0,0029567	0,0000983
5	0,001229	0,0000464	0,0013135	0,0000846
6	0,000513	0,0000141	0,0004004	-0,0001127
7	0,001937	0,0001097	0,0018697	-0,0000674
8	0,000785	0,0000261	0,0007439	-0,0000410
9	0,000292	0,0000030	0,0003481	0,0000557
10	0,000782	0,0000129	0,0007911	0,0000088

Построенные регрессионные зависимости были проверены на адекватность полученным данным по критерию Фишера. Для каждой из зависимых переменных вычислены дисперсия адекватности и дисперсия воспроизводимости:

$$S_a^2 = \frac{1}{N-k} (\bar{Y} - \hat{Y})^2; \quad S_e^2 = \frac{1}{N} S^2 \quad (3.5)$$

В результате были получены следующие значения:

$$S_{a1}^2 = 2,59 \cdot 10^{-5}; \quad S_{a2}^2 = 6,07 \cdot 10^{-5}; \quad S_{a3}^2 = 1,07 \cdot 10^{-8}$$

$$S_{e1}^2 = 2,31 \cdot 10^{-5}; \quad S_{e2}^2 = 1,58 \cdot 10^{-4}; \quad S_{e3}^2 = 1,08 \cdot 10^{-8}$$

Табличное значение критерия Фишера равно:

$$F_{табл}(\alpha = 0,05; k_1 = 10 - 6 = 4; k_2 = 10 \cdot (5 - 1) = 40) = 2,61$$

Расчетное значение критерия Фишера определяется по формуле:

$$F_{расч} = \frac{S_a^2}{S_e^2} \quad (3.6)$$

По формуле (3.7) были получены следующие результаты:

$$F_{расч1} = 1,12; \quad F_{расч2} = 0,38; \quad F_{расч3} = 0,98$$

Следовательно, модель для первого показателя Y_1 удовлетворяет всем классическим канонам проверки адекватности, поскольку для нее $F_{расч} > 1$ и при этом $F_{расч} < F_{табл}$.

Для второй и третьей модели дисперсия адекватности настолько мала, что расчетное значение критерия Фишера оказалось меньше 1. Чтобы определить причины данного результата, для Y_2 и Y_3 была рассчитана общая дисперсия выходной переменной по всем прогонам:

$$S_{общ2}^2 = 0,0944; \quad S_{общ3}^2 = 1,7 \cdot 10^{-6}$$

Таким образом, общая дисперсия, описывающая изменение зависимой переменной при варьировании факторов в эксперименте, очень большая и намного превосходит как дисперсию воспроизводимости, которая не зависит от уровней факторов, так и дисперсию адекватности. Это говорит о том, что влияние факторов на зависимые переменные весьма существенно, и они берут на себя значительную долю вариаций этих переменных. Поэтому имеет смысл более детально исследовать тип выбираемой регрессионной зависимости. Для этого были построены две альтернативные регрессии. Первая регрессия такая же, как строилась

и для показателя Y_1 , а вторая регрессия линейная 1-го порядка: $b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$. Если бы эта линейная регрессия была достаточна для описания исследуемой зависимости, то увеличение числа факторов в ней не сказалось бы заметным образом на величине дисперсии адекватности. Однако для регрессии 1-го порядка дисперсия адекватности оказалась намного больше, чем для регрессии 2-го порядка:

$$s_{a2}^2 = 0,00295 ; \quad s_{a3}^2 = 5,9 \cdot 10^{-7}$$

Отсюда следует, что добавление квадратичных эффектов и эффектов парного взаимодействия факторов в регрессионную зависимость существенно, поскольку оно значительно снижает дисперсию адекватности.

Таким образом, в результате проведенного исследования можно сделать вывод, что не только для показателя Y_1 , но и для Y_2 и Y_3 факторы являются существенными и сказываются на значениях показателя, «объясняя» значительную часть вариаций переменной. А с другой стороны выбранная регрессия оказывается достаточно полной для того, чтобы описать зависимость с хорошей точностью, которая подтверждается малой дисперсией адекватности при приемлемой дисперсии воспроизводимости.

Регрессионные зависимости (3.2), (3.3), (3.4) в области планирования наглядно представлены на рисунках 3.7, 3.8, 3.9.

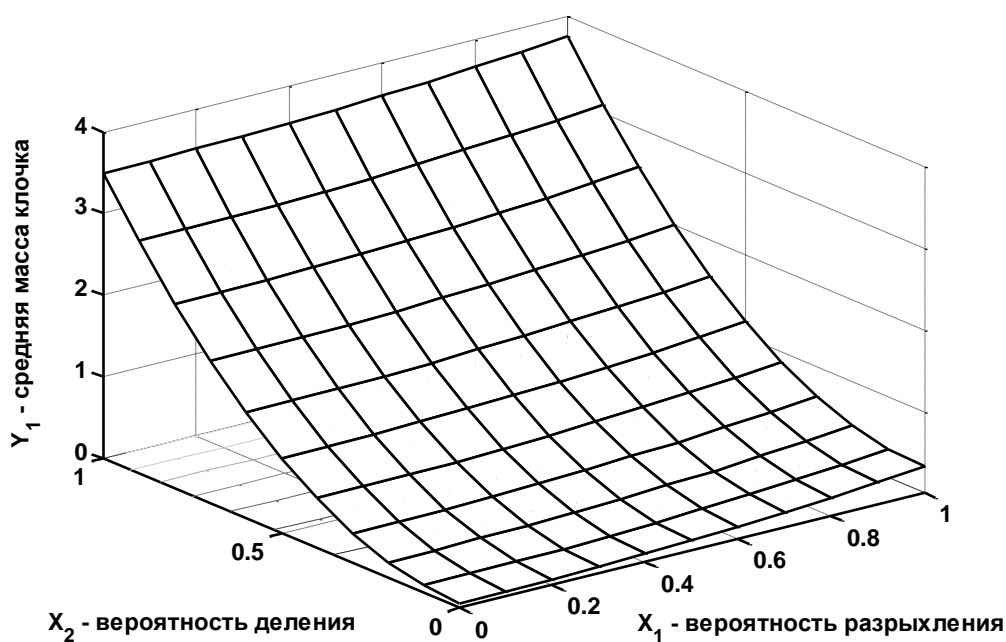


Рисунок 3.7 - Регрессия (3.2) для массы клочка

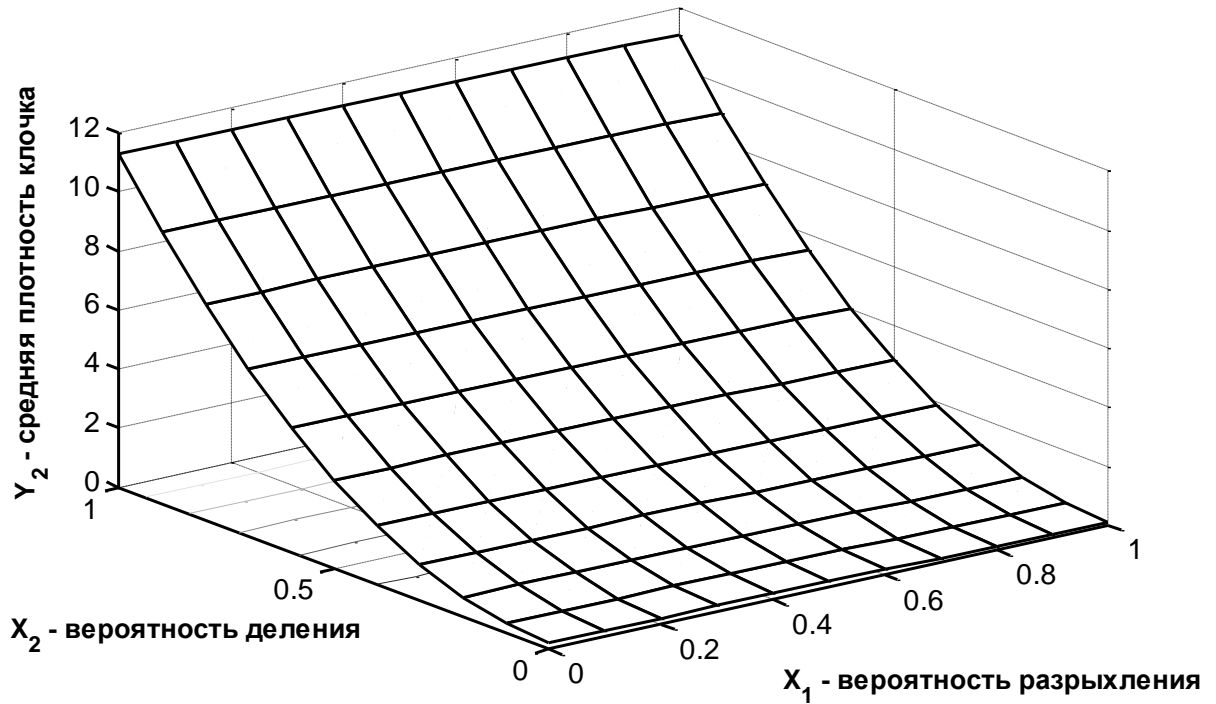


Рисунок 3.8 - Регрессия (3.3) для плотности клочка

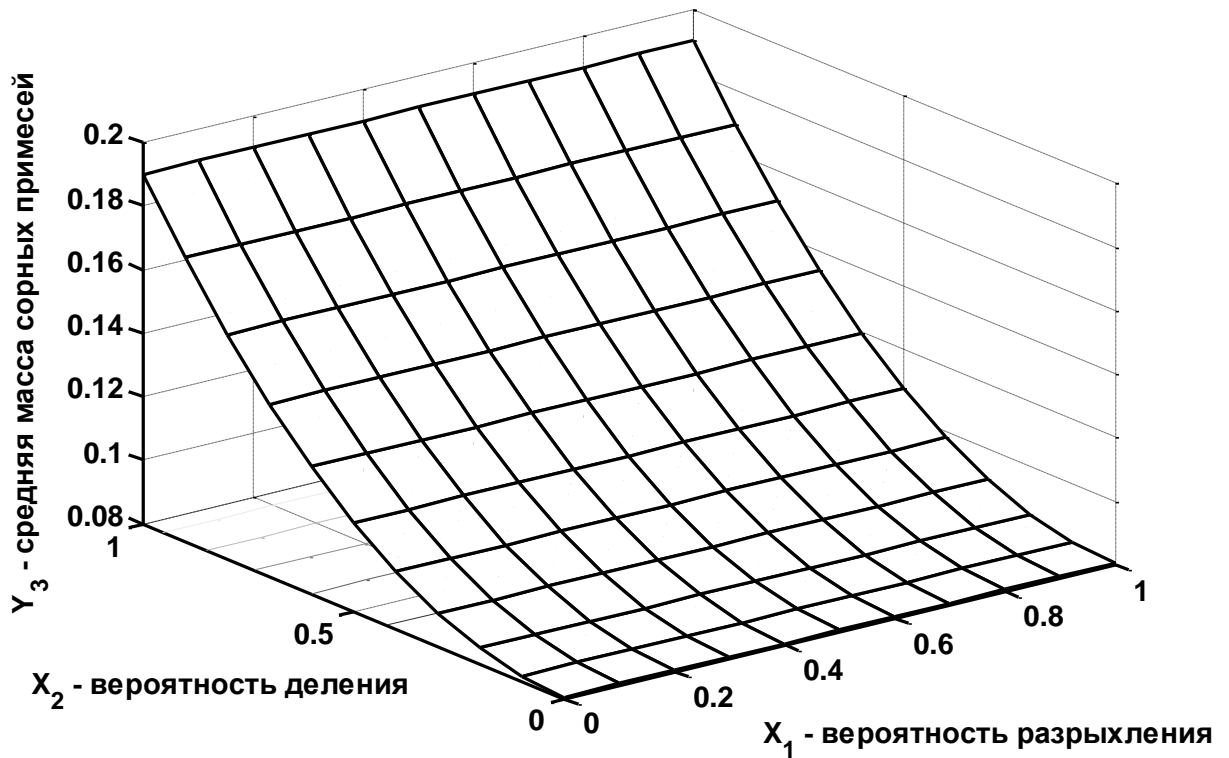


Рисунок 3.9 - Регрессия (3.4) для массы сорных примесей в клочке

По виду моделей, представленных на рисунках 3.7, 3.8, 3.9, мы можем определить, что средняя масса клочка Y_1 , средняя плотность клочка Y_2 , среднее содер-

жание сорных примесей Y_3 в значительной степени зависят от вероятности деления клочка и практически не зависят от вероятности его разрыхления.

3.2 Разработка и анализ эвристических имитационно-статистических моделей разрыхления и очистки волокнистой массы

3.2.1 Эмпирические соотношения и статистическая модель разрыхления и очистки волокнистой массы

Поскольку разрыхлительно-очистительный процесс имеет сложную вероятностную природу, закономерности изменения параметров клочка при его взаимодействии с рабочими органами неизвестны.

Исходя из общих представлений о физике процесса, можно предположить, от каких величин зависит изменение характеристик клочка, и определить характер зависимости: монотонность, направление изменения, предельные значения.

Для моделирования возможных эффектов взаимодействия клочка с рабочими органами (разрыхление, деление, зажгучивание) необходимо оценить вероятность каждого из них и в зависимости от эффекта рассчитать величину изменения соответствующей характеристики клочка [133].

Определим предельные значения для каждой из характеристик. Предельным значением массы m будем считать величину $mMax$: $0 \leq m \leq mMax$. Величина плотности r может варьировать от значения, близкого к нулю, до плотности материала волокна: $0 \leq r \leq r_f$.

Плотность клочка и, соответственно, вероятность разрыхления P_1 , будет меняться в зависимости от интенсивности его взаимодействия с рабочими органами машины, которая определяется соотношением объема клочка $V = m / r$ и объема свободного пространства между колками и колосниками V_m , а также соотношения скоростей клочка W и рабочих органов W_m . Дифференцируя равенство $m = r V$, получим $dm = V dr + r dV$. При постоянной $m = const$ дифференциал $dm = 0$. Следовательно, для каждого конкретного клочка, имеющего массу m , вы-

полняется равенство $\frac{dr}{r} = -\frac{dV}{V}$. Учитывая сказанное выше о зависимости изменений плотности клочка от соотношения его размеров и свободного пространства между колосниками и скоростями рабочих органов, для относительного изменения объема клочка запишем следующее приближенное выражение

$$\frac{dV}{V} \sim \frac{V}{V_m} \left(1 - \frac{W}{W_m} \right) \quad (3.7)$$

Объем клочка с учетом его наибольшей массы $mMax$ и наибольшей плотности, равной плотности материала волокна r_f равен $V = mMax / r_f$. С учетом приведенных соотношений относительное изменение плотности клочка (или его объема) можно выразить соотношением:

$$\frac{dr}{r} = -C_r \frac{mMax}{r_f V_m} \left(1 - \frac{W}{W_m} \right) \quad \text{или} \quad \frac{dV}{V} = C_r \frac{mMax}{r_f V_m} \left(1 - \frac{W}{W_m} \right), \quad (3.8)$$

где C_r – безразмерный коэффициент пропорциональности.

Очевидно, что вероятность разрыхления клочка тем больше, чем меньше начальный объем клочка по сравнению с объемом рабочего пространства между колосниками и барабаном V_m . Эту очевидную взаимосвязь количественно можно выразить в приближенном виде

$$\frac{dP_1}{P_1} \sim -\frac{dV}{V_m} \quad (3.9)$$

После интегрирования с учетом граничного условия $P(V = 0) = 0$ получим приближенную оценку зависимости вероятности разрыхления от объема клочка:

$$P_1 = 1 - \exp\left(-\frac{C_0 V}{V_m}\right), \quad (3.10)$$

где C_0 – безразмерный коэффициент пропорциональности.

Количество выделяющихся сорных примесей dg прямо пропорционально количеству сорных примесей в клочке и обратно пропорционально его плотности. Иными словами, чем больше в клочке примесей и чем он лучше разрыхлен, тем

больше примесей попадет в отходы. По аналогии с предыдущими зависимостями эту зависимость опишем соотношением

$$\frac{dg}{g} = C_g a \sqrt[3]{1 - \frac{r}{r_f}}, \quad (3.11)$$

где C_g – безразмерный коэффициент пропорциональности, a – показатель корня. Формула (3.11) соответствует представлению о зависимости количества выделяющих сорных примесей от плотности клочка, представленной на рисунке 3.10, построенной для $C_g = 1$.

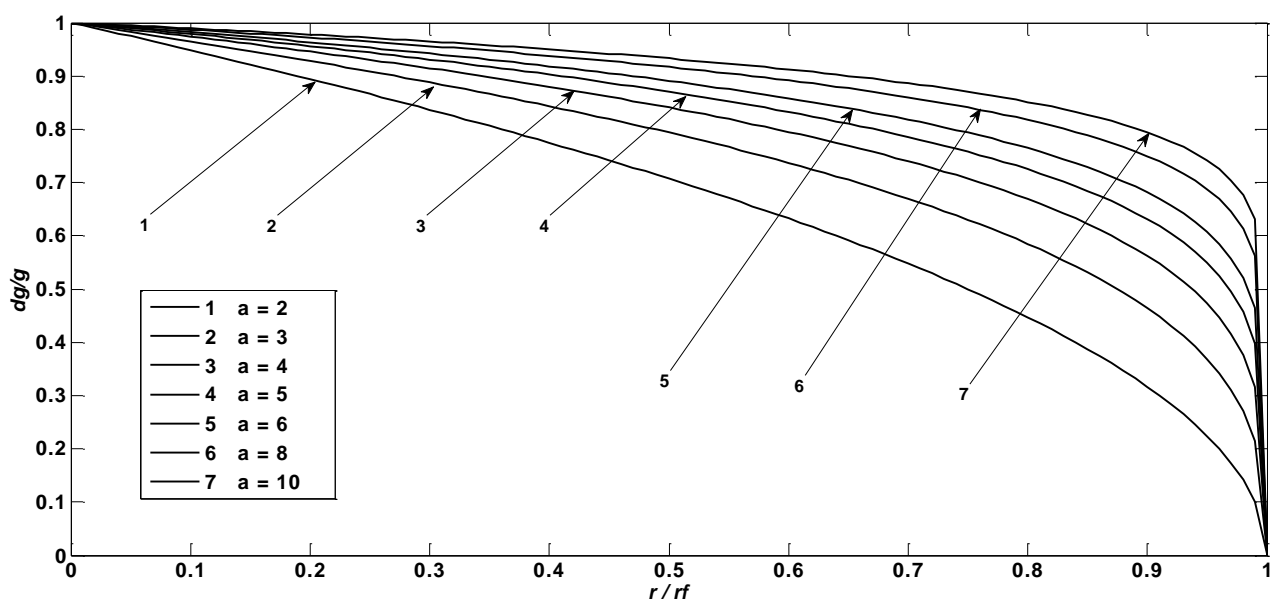


Рисунок 3.10 - Зависимость (3.11) при разных значениях показателя корня a

Деление клочка происходит в том случае, когда его плотность понижается до достаточно низкого уровня, а интенсивность воздействия достаточно высока.

Вероятность P_2 деления клочка на два зависит от плотности клочка и интенсивности воздействия: чем меньше плотность и чем сильнее воздействие, тем выше вероятность деления. В результате деления масса m и масса сорных примесей g распределяются между двумя образовавшимися клочками случайным образом. Будем считать, что деление клочка на два меньших происходит в соответствии с равномерным законом распределения $Un(0;1)$. С учетом того, что вероятность в любом случае должна быть в пределах от нуля до единицы, представим оценку вероятности P_2 и деление клочка и сорных примесей на две части в виде зависимостей:

$$P_2 = \left(1 - \frac{r}{r_f}\right) \left(1 - \frac{W}{W_m}\right); \quad m' = m - g; \quad m_1 = \xi_m m'; \quad m_2 = m' - m_1 \quad (3.12)$$

$$g_1 = \xi_g g; \quad g_2 = g - g_1; \quad \xi_m \sim Un(0;1); \quad \xi_g \sim Un(0;1)$$

При зажгучивании плотность клочка увеличивается, что усложняет выделение сорных примесей. Вероятность зажгучивания P_3 прямо пропорциональна размеру клочка и разнице в скоростях клочка и рабочих органов. Поэтому вероятность зажгучивания можно оценить следующей формулой:

$$P_3 = \begin{cases} \frac{V}{V_m}, & 0 \leq V \leq V_m \\ 1, & V > V_m \end{cases} \quad (3.13)$$

Величина нарастания плотности при зажгучивании будет оцениваться по формуле:

$$dr = C_r r \frac{mMax}{r_f V_m} \left(1 - \frac{W}{W_m}\right) \quad (3.14)$$

На основе приведенных выше зависимостей построим алгоритм, осуществляющий моделирование процессов разрыхления и очистки клочков волокнистой массы. В качестве исходных используются распределения клочков по массе $f_0(m)$, плотности $f_0(r)$ и содержанию сорных примесей $f_0(g)$, в соответствии с которыми генерируются значения характеристик.

Затем случайным образом разыгрываются произошедшие с клочками эффекты, меняющие значения характеристик. После построения оценок новых распределений, процедура повторяется, используя в качестве входных распределений, полученные на предыдущем шаге.

В модели приняты следующие начальные значения: масса каждого клочка $mMax = 100$; плотность клочков равна половине предельно большой плотности r_f ; масса сорных примесей 10% от массы клочка ($gMax = 10$); скорость клочков равна 0.7 от скорости движения колков барабана; наибольшая вероятность зажгучивания для клочка равна 0.5. На вход машины поступает 500 клочков.

Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 3.11.

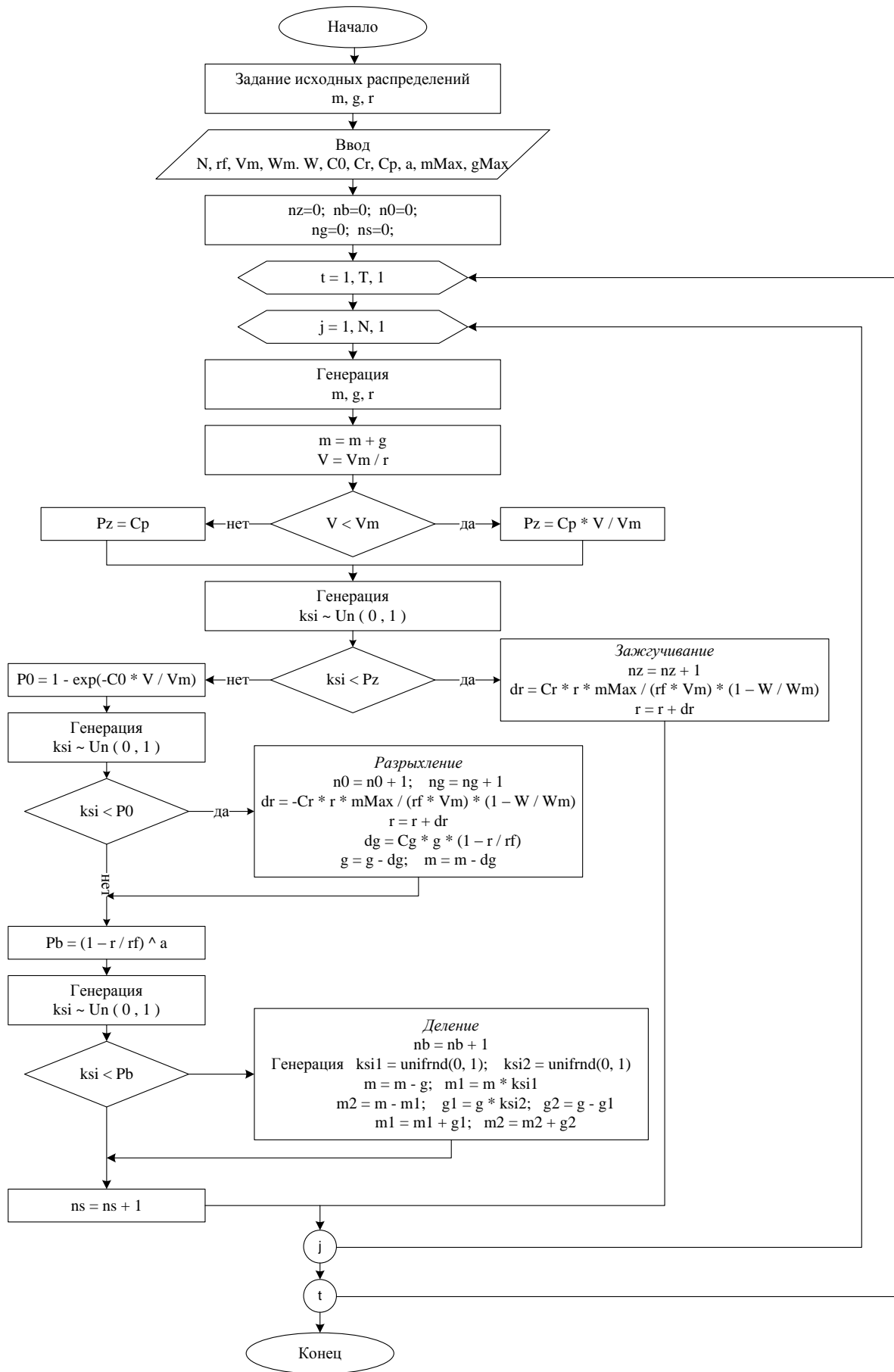


Рисунок 3.11 – Алгоритм моделирования процессов разрыхления и очистки
клочков волокнистой массы

Алгоритм реализован в виде основной программной функции Clochok и вспомогательных функций GenRaspr и NewRaspr, написанных в среде MATLAB.

```
function [fm0,fr0,fg0,n0,ng,nz,nb,ns] = Clochok;
N = 500; mf = 15; rf = 10; Vm = 12; Wm = 1; W = 0.7;
C0 = 1; Cr = 1; Cg = 1; Cz = 0.1; Cp = 0.5; a = 0.1;
nz=0; nb=0; n0=0; ng=0; ns=0;
fm0 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1]; m0 = 0; mMax = 100; % Задание ис-
ходных распределений
fg0 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1]; g0 = 0; gMax = 10;
fr0 = [0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0]; r0 = 0; rMax = rf;
sumfm = sum(fm0); sumfr = sum(fr0); sumfg = sum(fg0); % Нормирование ис-
ходных распределений
fm0 = fm0 / sumfm; fr0 = fr0 / sumfr; fg0 = fg0 / sumfg;
fm1 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]; % Задание массивов для конечных распреде-
лений
fg1 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]; fr1 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
for t = 1 : 10
    for j = 1 : N
        m = GenRaspr(fm0, mf, m0, mMax); % Генерация параметров клочка
        g = GenRaspr(fg0, mf, g0, gMax); r = GenRaspr(fr0, mf, r0, rMax);
        m = m + g; V = m / r; ind = 0;
        if V < Vm Pz = Cp * V / Vm; else Pz = Cp; end; % Задание вероятно-
сти зажгучивания
        ksi = unifrnd(0, 1);
        if ksi < Pz % Зажгучивание
            nz = nz + 1; dr = Cr * r * mMax / (rf * Vm) * (1 - W / Wm);
            r = r + dr; ind = 1;
            fm1 = NewRaspr(fm1, m, mf, m0, mMax);
            fr1 = NewRaspr(fr1, r, mf, 0, rf);
            fg1 = NewRaspr(fg1, g, mf, 0, gMax);
        end;
        if ind == 0 % Проверка, что зажгучивания не произошло
            P0 = 1 - exp(-C0 * V / Vm); ksi = unifrnd(0, 1);
            if ksi < P0 % Разрыхление
                n0 = n0 + 1; ng = ng + 1;
                dr = -Cr * r * mMax / (rf * Vm) * (1 - W / Wm); r = r + dr;
                dg = Cg * g * (1 - r / rf); g = g - dg; m = m - dg; % Занесение изме-
ненных значений параметров клочка в новые распределения
                fm1 = NewRaspr(fm1, m, mf, m0, mMax);
                fr1 = NewRaspr(fr1, r, mf, 0, rf);
                fg1 = NewRaspr(fg1, g, mf, 0, gMax); ind = 2;
            end;
            Pb = (1 - r / rf) ^ a; ksi = unifrnd(0, 1); % Задание вероятности деления
            клочка
```

```

if ksi < Pb % Деление клочка
    nb = nb + 1; ksi1 = unifrnd(0, 1); ksi2 = unifrnd(0, 1);
    m = m - g; m1 = m * ksi1;
    m2 = m - m1; g1 = g * ksi2; g2 = g - g1;
    m1 = m1 + g1; m2 = m2 + g2;
    fm1 = NewRaspr(fm1, m1, mf, m0, mMax); % Занесение измененных
значений параметров клочка в новые распределения
    fm1 = NewRaspr(fm1, m2, mf, m0, mMax); %
    fr1 = NewRaspr(fr1, r, mf, 0, rf);
    fg1 = NewRaspr(fg1, g1, mf, 0, gMax);
    fg1 = NewRaspr(fg1, g2, mf, 0, gMax); ind = 3;
end;
end
if ind == 0 % Проверка, что клочок не подвергся изменениям
    ns = ns + 1; fm1 = NewRaspr(fm1, m, mf, m0, mMax);
    fr1 = NewRaspr(fr1, r, mf, 0, rf); fg1 = NewRaspr(fg1, g, mf, 0, gMax);
end;
end;
sumfm = sum(fm1); sumfr = sum(fr1); sumfg = sum(fg1); % Нормирование ис-
ходных распределений
fm0 = fm1 / sumfm; fr0 = fr1 / sumfr; fg0 = fg1 / sumfg;
end;

Function z = GenRaspr(f, mf, a0, am);
Ff = cumsum(f); Mm = length(Ff); ksi = unifrnd(0, 1);
For k = 1 : Mm
    If ksi < Ff(k) km = k; break; end
end; da = (am - a0) / mf; z = a0 + da * (km - 1) + da * unifrnd(0, 1);

Function f = NewRaspr(f, m, mf, m0, mMax);
If m < m0 m0 = m; end; If m > mMax mMax = m; end;
dm = (mMax - m0) / mf;
for k=1:mf
    km=k; If m < m0 + dm * k km = k; break; end;
end; f(km) = f(km) + 1;

```

На рисунках 3.12, 3.13, 3.14 приведены гистограммы распределения массы клочков, плотности клочков и массы сорных примесей, полученные в результате работы программы, до разрыхления и очистки, после 10 и 30 этапов разрыхления и очистки. Значения каждой характеристики менялись от 0 до максимально возможной величины. Данные разбиты на 15 интервалов, номера которых отображе-

ны на оси абсцисс. Исходные клочки имели фиксированную массу, плотность и содержание сорных примесей.

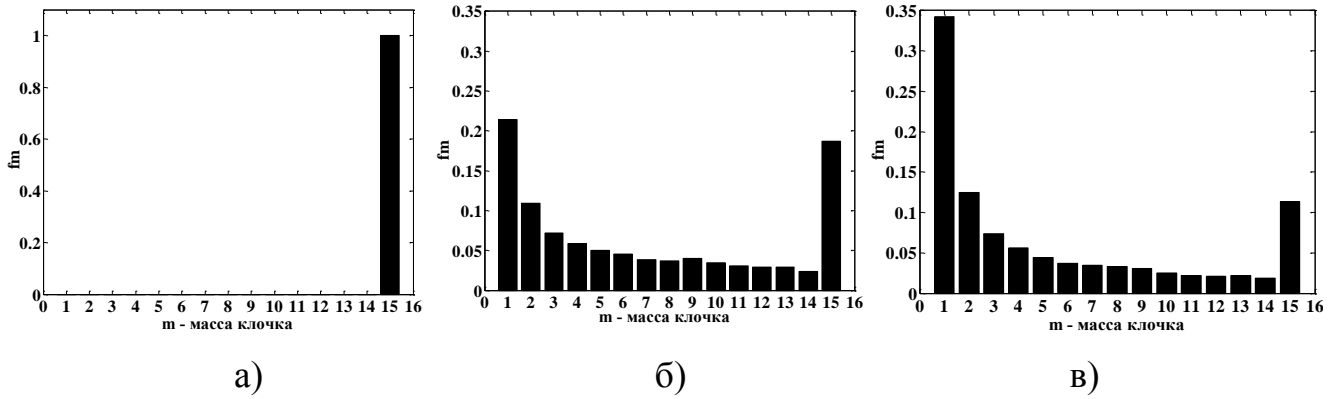


Рисунок 3.12 - Распределения массы клочка до разрыхления и очистки (а), после 10 (б) и 30 (в) этапов разрыхления и очистки

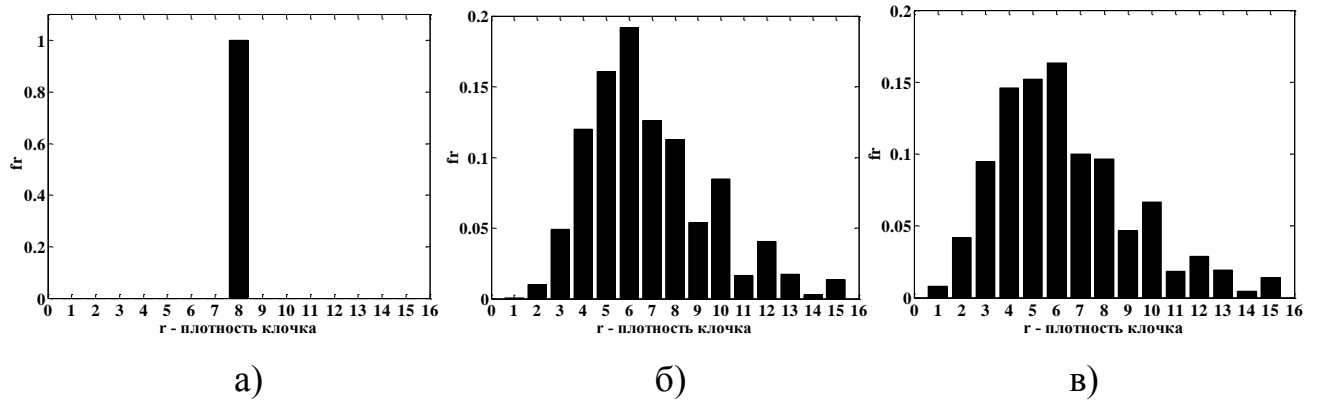


Рисунок 3.13 - Распределения плотности клочков до разрыхления и очистки (а), после 10 (б) и 30 (в) этапов разрыхления и очистки

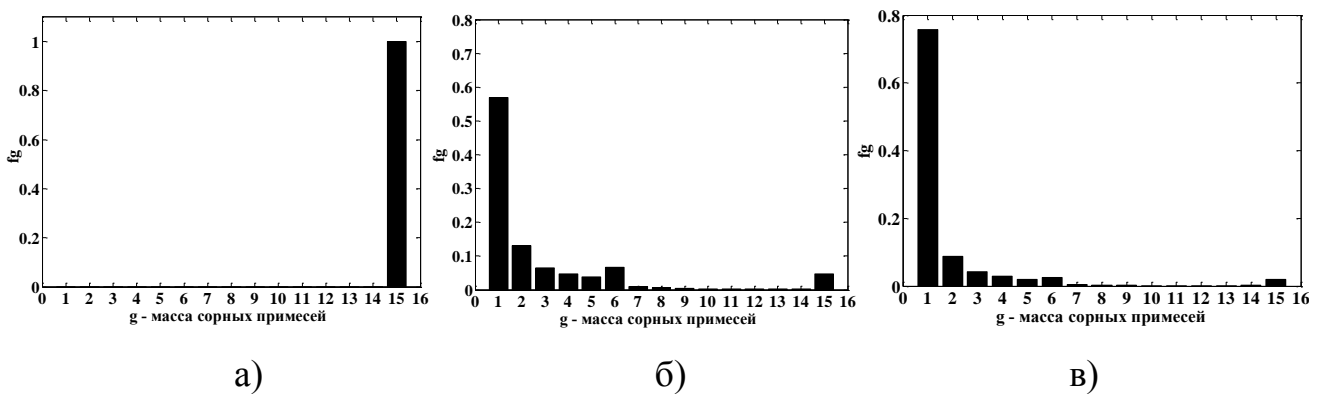


Рисунок 3.14 - Распределения массы сорных примесей до разрыхления и очистки (а), после 10 (б) и 30 (в) этапов разрыхления и очистки

Анализ рисунков показал, что если после 10 этапов разрыхления и очистки распределение меняется сильно, то увеличение числа этапов обработки до 30 не дает существенного изменения формы распределения.

3.2.2 Имитационная модель разрыхления и очистки клочков с учетом параметров рабочих камер машин разрыхлительно-очистительного агрегата

Построим имитационную статистическую модель (ИСМ) процессов разрыхления и очистки клочков, учитывающую важнейшие конструктивные геометрические и кинематические параметры рабочей области машин РОА. В этой модели будем предполагать, что процессы разрыхления и очистки клочков происходят независимо друг от друга. Каждый клочок обладает набором характеристик, являющихся случайными величинами: массой m , массой содержащихся в нем сорных примесей g , удельной плотностью ρ .

На дальнейший исход взаимодействия клочка с рабочими органами влияет множество факторов. В модели учтем степень заполнения клочками рабочей зоны, которую будем измерять величиной $\frac{\bar{V}\bar{N}}{W}$, где $\bar{V} = \frac{\bar{m}}{\rho}$ - средний объем клочка,

\bar{N} - среднее число клочков в объеме рабочей зоны W . Тогда вероятность загрузивания клочка будет прямо пропорциональна степени заполнения рабочей зоны. Величину \bar{N} можно определить по формуле:

$$\bar{N} = \frac{P\varphi}{\omega m}, \quad (3.15)$$

где P – производительность машины, φ – центральный угол сегмента колосниковой решетки, ω – угловая скорость колкового барабана, \bar{m} - средняя масса клочка.

Величину W можно оценить по формуле

$$W_{pз} = \Delta Z(r + h)b \quad (3.16)$$

где Δ – разводка между колосниками, Z – число колосников, r – разводка между колосниками и колками, h – длина колков, b – ширина рабочей зоны.

Вероятность зажгучивания будет равна:

$$P_3 = \frac{\overline{VN}}{W} \quad (3.17)$$

Степень разрыхления клочков возрастает с увеличением числа колосников и кинетической энергии клочков ε , что можно выразить следующей формулой:

$$\frac{\rho_n - \rho_k}{\rho_k} = f(Z, \varepsilon), \quad (3.18)$$

где ρ_n – начальная плотность клочка; ρ_k – конечная плотность клочка.

Значение ρ_k должно лежать в интервале $0 \leq \rho_k \leq \rho_n$. Исходя из того, что ε пропорциональна начальной массе клочка m_n и квадрату скорости колкового барабана ω , получим:

$$\rho_k = \frac{\rho_n}{1 + C_p \xi Z m_n \omega^2} \quad (3.19)$$

где C_p – коэффициент пропорциональности, определяющий степень влияния выделенных факторов; ξ – равномерно распределенная на интервале $(0;1)$ случайная величина, введенная для учета случайного характера влияния факторов Z , m_n и ω^2 .

Обозначив $E = \frac{1}{C_p}$ и приняв $\xi = 0.5$, а $Z = 1$, получим:

$$\rho_k = \frac{\rho_n}{1 + \frac{0,5 m_n \omega^2}{E}} \quad (3.20)$$

Отсюда виден физический смысл коэффициента C_p – это энергия, которой должен обладать клочок, чтобы при взаимодействии с одним колосником плотность клочка уменьшилась в два раза.

Зажгучивание приводит к увеличению плотности клочка, при этом масса остается неизменной. Максимально возможная плотность ρ_m – плотность вещества волокон.

Таким образом, предполагаемый вид зависимости ρ_k от Z и ε будет следующий:

$$\rho_k = \rho_m - \frac{\rho_m - \rho_n}{1 + C_3 Z \xi m_n \omega^2}, \quad (3.21)$$

Обозначим массу сорных примесей, выделяемых из клочка, как g_y . Эта величина будет определяться следующим выражением:

$$g_y = \xi g_n \frac{\rho_n - \rho_k}{\rho_n}, \quad (3.22)$$

где g_n – начальная масса сорных примесей в клочке.

Деление клочка на u частей становится возможным, когда плотность клочка ρ_k становится достаточно малой. Предположим, что число частей u распределено по закону Пуассона с параметром $a = \frac{\rho_n - \rho_k}{\rho_n}$. В результате будет получаться $u+1$

клочок. Массы этих клочков будут определяться по формуле:

$$m_i = m_n \frac{\xi_i}{\xi_1 + \dots + \xi_{u+1}} \quad (3.23)$$

Таким же образом будет определяться масса сорных примесей в новых клочках:

$$g_{ni} = g_n \frac{\xi_i}{\xi_1 + \dots + \xi_{u+1}} \quad (3.24)$$

Клочок может попасть в отходы, если его размер позволяет ему пройти между колосниками. Будем считать, что вероятность попадания клочка в отходы $1 - \frac{V}{\Delta^3}$ при $V \leq \Delta^3$.

С учетом вышеизложенных предположений был построен алгоритм имитационного моделирования разрыхления и очистки клочков волокнистой массы:

1. Ввод исходных данных: $k = 1, N_z = 0, N_y = 0, N_g = 0, N_p = 0$.
2. Генерация m_n, ρ_n, g_n .
3. Генерация $\xi \sim \text{Un}(0;1)$. Если $\xi \geq P_z$, то перейти к п.5.
4. «Зажгучивание клочка»: генерация $\xi \sim \text{Un}(0;1)$; вычисление ρ_k по формуле (3.21); $m_k = m_n$; $g_k = g_n$; $N_z = N_z + 1$; перейти к п.13.
5. Проверка «деления»: генерация $\xi \sim \text{Un}(0;1)$; вычисление ρ_k по формуле (3.19);

$a = (\rho_n - \rho_k) / \rho_n$; генерация $u \sim P_0(a)$; если $u > 0$, то перейти к п.8.

6. «Разрыхление и очистка»: генерация $\xi \sim \text{Un}(0;1)$ и вычисление g_y по формуле (3.22); $m_k = m_n$; $g_k = g_n - g_y$.

7. Проверка выделения клочка в отходы: $V_k = m_k / \rho_k$; генерация $\xi \sim \text{Un}(0;1)$; если $\xi < 1 - V_k / \Delta^3$ и $V_k \leq \Delta^3$, то $N_y = N_y + 1$ (клочок «выделился в отходы»); иначе $N_p = N_p + 1$ (клочок «разрыхлился»). Перейти к п. 8.

8. Для $i = 1, \dots, u+1$ выполнить генерацию $\xi_i \sim \text{Un}(0;1)$

9. Для $i = 1, \dots, u+1$ вычислить m_i по формуле (3.23).

10. Для $i = 1, \dots, u+1$ выполнить генерацию $\xi_i \sim \text{Un}(0;1)$

11. Для $i = 1, \dots, u+1$ вычислить g_n по формуле (3.24).

12. Для $i = 1, \dots, u+1$ выполнить процедуры, совпадающие с пп. 6 и 7; $N_g = N_g + 1$

13. $k = k + 1$. Если $k \leq M$, то перейти к п.2.

Блок – схема приведенного выше алгоритма представлена на рисунке 3.15.

Пояснения к алгоритму: N_z , N_y , N_g и N_p – соответственно числа клочков зажгученных, удаленных в отходы, разделившихся на более мелкие и разрыхлившихся; C_p и C_z – неизвестные параметры, которые выбираются при адаптации модели к конкретному моделируемому объекту.

Многие предположения, использованные для построения алгоритма, весьма условны, тем не менее ИСМ правильно описывает процесс, что видно по представленным на рисунке 3.16 графикам полигонов частот для m_n , ρ_n и m_k , ρ_k , полученных в результате имитации последовательного прохода волокнистой массы через три однотипные рабочие зоны [92]. На рисунке 3.16: 1 – начальное распределение, 2 – распределение после 1-й зоны разрыхления, 3 – распределение после 2-й зоны разрыхления, а) – масса клочков, б) – плотность клочков, n – номер класса полигона частот, m_i – число попаданий в класс.

Начальное распределение массы клочков равномерное, начальная плотность клочков одинакова для всех клочков. Из графиков видно, что происходит образование распределений массы и плотности клочков с сильной положительной асимметрией после обработки волокнистой массы на одной – двух рабочих зонах независимо от исходного распределения.

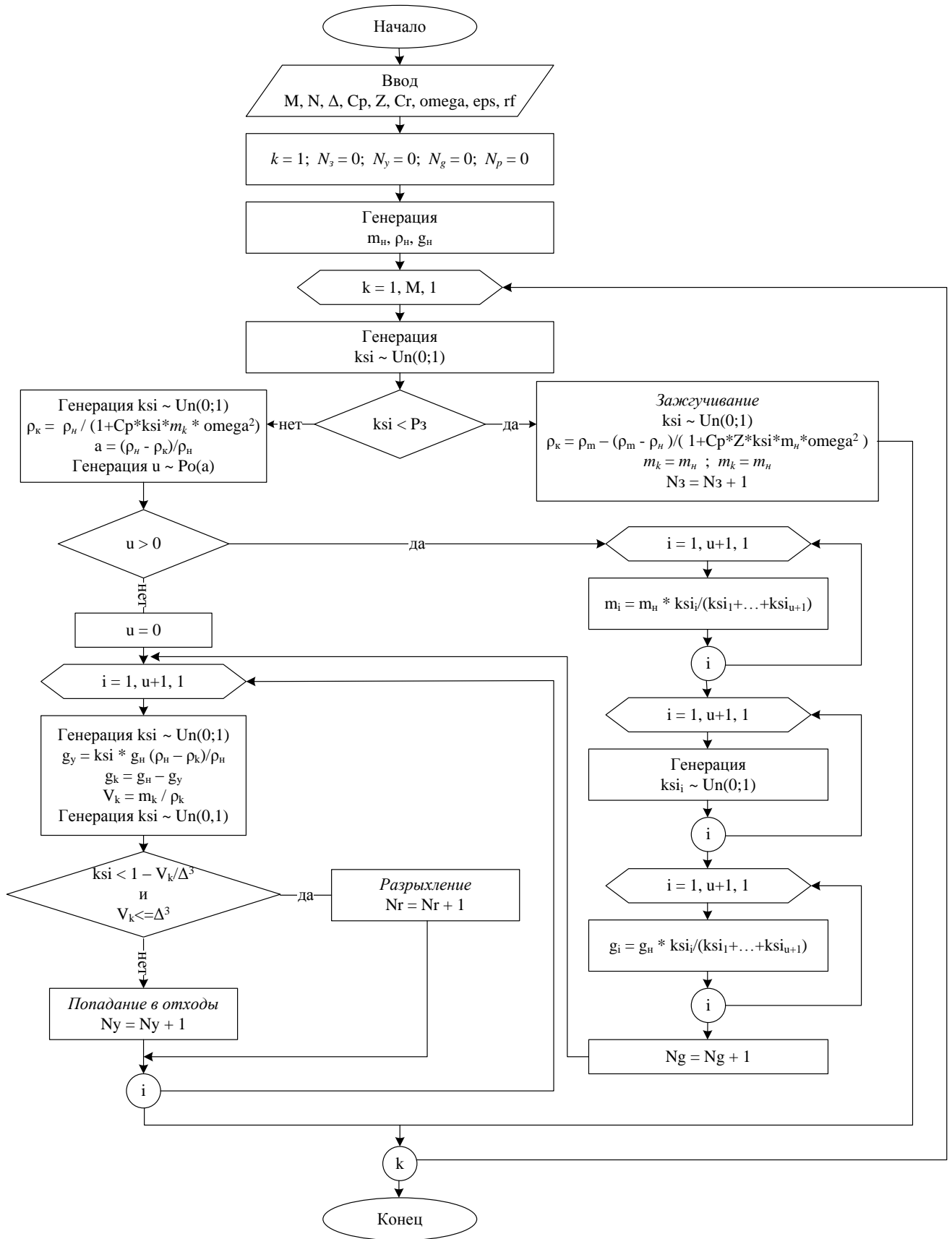


Рисунок 3.15 – Блок-схема алгоритма имитационного моделирования разрыхления и очистки клочков волокнистой массы

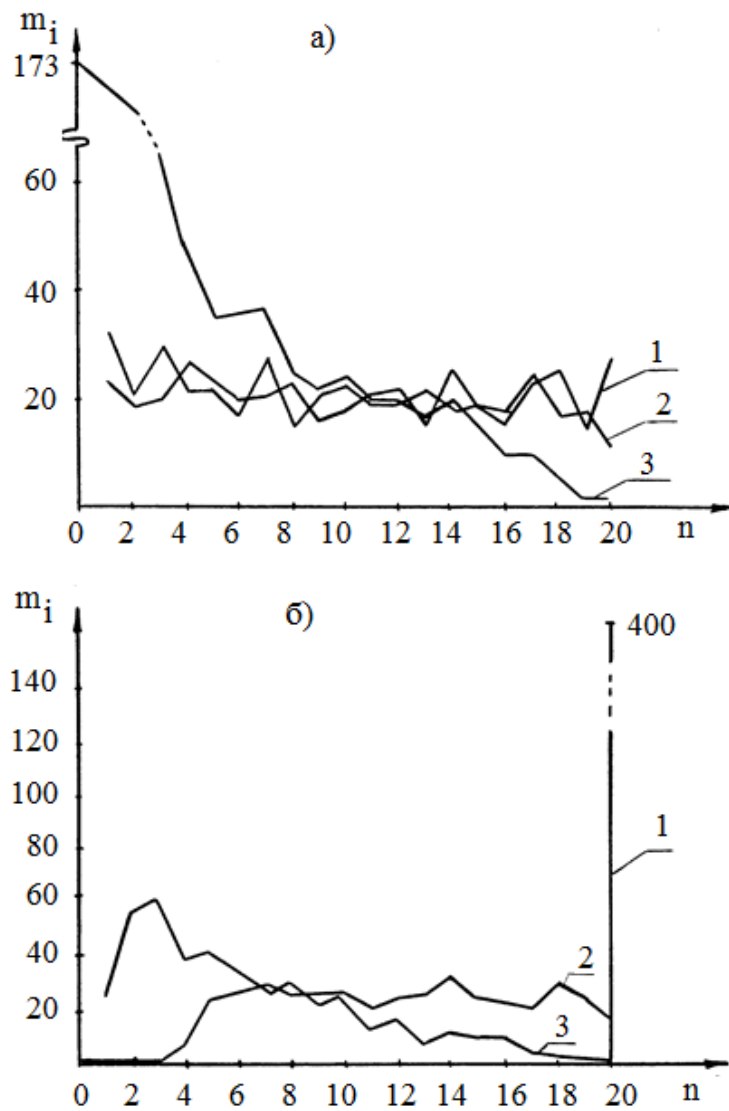


Рисунок 3.16. Графики полигонов частот для m_n, ρ_n и m_k, ρ_k

Полученные распределения соответствуют общей теории дробления частиц [134], а также данным натуральных экспериментов, проведенных в работах [53, 91, 135-137].

3.3 Многофакторный эксперимент с моделью разрыхления и очистки клочков на наклонных очистителях

3.3.1 Отсевание малозначимых факторов

На основе созданных имитационных статистических моделей построена стохастическая динамическая модель разрыхления и очистки с переменными параметрами [138]. В качестве варьируемых факторов будем рассматривать:

- коэффициенты пропорциональности C_0, C_r, C_g, C_z, C_p , входящие в формулы (3.10), (3.8), (3.11), (3.21), (3.19);
- объем свободного пространства между колками и колосниками V_m ;
- максимальную массу клочка m_{Max} ;
- максимальное содержание сорных примесей в клочке g_{Max} ;
- линейная скорость клочка W ;
- линейная скорость рабочих органов W_m ;
- число колосников на один барабан Z ;
- кинетическую энергию клочков $epps$.

В качестве показателей эффективности разрыхлительно-очистительного процесса выбраны масса клочка Y_1 , масса сорных примесей Y_2 и плотность клочка Y_3 . По массе получаемых клочков можно судить об эффективности процесса разделения исходных клочков на более мелкие. Масса выделяемых из волокнистой массы сорных примесей характеризует эффективность очистки волокнистой массы. Плотность клочка показывает его пригодность для дальнейшей переработки: чем плотность ниже, тем легче разъединять волокна в клочке на чесальных переходах и тем более качественным будет прочес.

Для выделения наиболее значимых факторов, которые влияют на выходные параметры, будем использовать метод случайного баланса [126]. Этот метод был разработан специально для отсеивания незначимых и малозначимых факторов в условиях, когда желательно ограничиться малым числом экспериментов. Метод случайного баланса использует так называемые сверхнасыщенные планы, в этих планах число варьируемых факторов больше, чем количество опытов. Поэтому построить на этой основе модель зависимости не представляется возможным, но получаемой информации достаточно, чтобы проранжировать факторы по их значимости. Несмотря на то, что исследования проводятся не в виде натуральных экспериментов, а на компьютерной модели, затраты машинного времени при ненасыщенных планах экспериментов оказываются неоправданно большими.

В таблице 3.6 приведены уровни варьируемых факторов, а в таблице 3.7 - план эксперимента. Табличные значения выражены в относительных единицах,

так же, как и приведенные выше формулы, Использование безразмерных переменных позволяет анализировать зависимости в обобщенном виде. Аналогичный прием используется в теории планирования эксперимента [139, 140].

Таблица 3.6 - Минимальные и максимальные значения варьируемых факторов

	C0	Cr	Cg	Cz	Cp	Vm	mMax	gMax	W	Wm	Z	epps
min	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	10	50	1	0,3	0,5	20	0,1
max	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	40	100	10	0,7	1,0	30	0,5

Таблица 3.7 - План эксперимента

№	C0	Cr	Cg	Cz	Cp	Vm	mMax	gMax	W	Wm	Z	epps
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	+	+	-	-	+	-	+	+	-	-	-	-
2	-	-	+	+	-	-	-	+	+	+	+	-
3	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+
4	-	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	-
5	+	-	-	-	+	+	-	+	+	+	-	+
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+
7	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+
8	+	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+
9	+	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-	-
10	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-
11	-	-	-	+	-	+	-	-	+	+	-	-
12	+	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+
13	-	+	-	+	+	+	-	-	+	+	+	+
14	-	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+
15	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-
16	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-

Для каждого опыта в эксперименте выполнялось по 5 прогонов модели. Результаты прогонов приведены в приложении А. Повторные прогоны при всех уровнях факторов дают практически не отличающиеся результаты. Поскольку объемы данных достаточно большие, то получаемые оценки являются надежными, отвечающими высокой доверительной вероятности, большей 0,98. Поэтому для дальнейшей обработки результаты прогонов можно заменить средними значениями (таблица 3.8).

Таблица 3.8. - Усредненные результаты прогонов модели по каждому опыту

№ опыта	Sr	SKO	Me	WD0109	WD025075
1	2	3	4	5	6
$m (Y_1)$					
1	74,533	31,609	96,667	9,333	9,333
2	17,213	15,682	11,667	0,000	0,000
3	91,979	14,093	96,667	0,000	0,000
4	35,255	31,995	23,333	0,133	0,067
5	42,177	11,702	48,333	8,000	4,400
6	17,948	15,965	12,333	0,667	0,400
7	21,681	15,803	18,333	6,667	4,000
8	7,802	14,590	3,333	0,000	0,000
9	77,793	29,982	96,667	0,560	0,000
10	9,178	15,980	3,333	0,000	0,000
11	18,260	15,992	12,333	0,733	0,413
12	44,162	9,261	48,333	4,800	0,000
13	38,890	14,964	48,333	0,867	0,680
14	74,555	31,975	96,667	0,933	0,933
15	33,422	17,630	44,333	0,933	0,933
16	38,033	31,500	30,000	0,600	0,000
$g (Y_2)$					
1	4,842	4,583	3,667	9,333	9,333
2	0,373	0,582	0,333	0,000	0,000
3	9,488	1,043	9,667	0,000	0,000
4	0,084	0,106	0,033	0,133	0,067
5	7,369	3,163	9,000	8,000	4,400
6	0,258	0,250	0,167	0,667	0,400
7	2,698	2,581	1,667	6,667	4,000
8	0,372	0,601	0,333	0,000	0,000
9	0,855	0,250	0,967	0,560	0,000
10	0,372	0,599	0,333	0,000	0,000
11	0,282	0,274	0,167	0,733	0,413
12	8,748	2,271	9,667	4,800	0,000
13	0,641	0,361	0,887	0,867	0,680
14	0,452	0,463	0,033	0,933	0,933
15	0,447	0,463	0,033	0,933	0,933
16	0,850	0,255	0,967	0,600	0,000
$r (Y_3)$					
1	6,411	3,412	8,067	9,333	4,533
2	0,699	1,603	0,333	0,000	0,000
3	9,657	0,133	9,667	0,000	0,000

Продолжение таблицы 3.8

1	2	3	4	5	6
4	0,552	1,082	0,333	0,000	0,000
5	8,403	2,539	9,667	6,000	0,400
6	0,776	1,859	0,333	0,000	0,000
7	0,810	2,040	0,333	0,000	0,000
8	0,622	1,367	0,333	0,000	0,000
9	9,062	0,919	9,667	2,000	0,800
10	0,702	1,550	0,333	0,000	0,000
11	1,181	1,700	0,333	2,000	0,667
12	9,665	0,056	9,667	0,000	0,000
13	8,183	3,397	9,667	9,333	0,000
14	7,861	3,582	9,667	9,333	0,400
15	7,336	3,628	9,667	9,333	3,067
16	9,665	0,059	9,667	0,000	0,000

В таблице 3.8 столбец 1 – номер опыта; столбец 2 – среднее значение; столбец 3 – СКО; столбец 4 – медиана; столбец 5 – интердецильный размах; столбец 6 – интерквартильный размах. В результате обработки данных эксперимента были получены регрессионные зависимости:

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & 40,180 - 1,983 \cdot C_0 - 9,078 \cdot Cr - 4,172 \cdot Cg - 0,045 \cdot Cz + 24,586 \cdot Cp - \\
 & - 0,805 \cdot Vm + 14,317 \cdot mMax + 0,647 \cdot gMax + 1,259 \cdot W - 3,641 \cdot Wm + \\
 & + 6,332 \cdot Z - 2,791 \cdot epps
 \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned}
 Y_2 = & 2,383 - 0,428 \cdot C_0 - 0,298 \cdot Cr - 0,631 \cdot Cg + 0,581 \cdot Cz + 1,858 \cdot Cp + \\
 & + 0,378 \cdot Vm - 0,140 \cdot mMax + 2,057 \cdot gMax + 0,379 \cdot W - 1,441 \cdot Wm - \\
 & - 0,146 \cdot Z + 0,427 \cdot epps
 \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned}
 Y_3 = & 5,099 + 1,096 \cdot C_0 - 0,132 \cdot Cr - 0,348 \cdot Cg + 0,757 \cdot Cz + 3,074 \cdot Cp - \\
 & - 0,724 \cdot Vm + 1,631 \cdot mMax - 0,828 \cdot gMax + 1,563 \cdot W + 0,157 \cdot Wm - \\
 & - 0,805 \cdot Z + 0,650 \cdot epps
 \end{aligned} \quad (3.27)$$

Из этих формул можно определить, какие параметры имеют наиболее существенное значение. Наибольшее влияние на среднее значение массы Y_1 оказывают факторы: коэффициент пропорциональности Cp , максимальное значение массы $mMax$ и коэффициент пропорциональности Cr . На среднее содержание сорных

примесей Y_2 наибольшим образом влияют факторы: максимальное содержание сорных примесей $gMax$, коэффициент пропорциональности Cp и скорость рабочих органов Wm . Для средней плотности Y_3 наиболее значительными оказались факторы: коэффициент пропорциональности Cp , максимальное значение массы $mMax$ и скорость клочка W .

3.3.2 Анализ влияния значимых факторов на эффективность разрыхления и очистки волокнистой массы

Выделение значимых факторов позволило перейти к более детальному изучению влияния этих факторов на характеристики процесса. Изучим более подробно влияние коэффициента Cp на величины Y_1 , Y_2 , Y_3 .

Коэффициент Cp по своему физическому смыслу определяет энергию, которой должен обладать клочок, чтобы при взаимодействии с одним колосником его плотность уменьшилась в два раза.

Нами был проведен эксперимент, в котором варьировались значения Cp от 0,1 до 1. Для каждого опыта эксперимента выполнено по 5 прогонов модели. Результаты эксперимента приведены в приложении А. Усредненные данные по каждому опыту представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 - Усредненные результаты прогонов модели по каждому опыту

№ опыта	Cp	\bar{Y}_1	\bar{Y}_2	\bar{Y}_3
1	0,1	30,272	1,442	4,737
2	0,2	30,367	1,509	4,895
3	0,3	30,870	1,605	5,136
4	0,4	31,525	1,690	5,364
5	0,5	31,817	1,760	5,536
6	0,6	33,040	1,860	5,787
7	0,7	33,946	1,928	5,949
8	0,8	34,989	2,103	6,213
9	0,9	35,868	2,235	6,413
10	1,0	36,672	2,380	6,678

По этим результатам построены линии тренда (рисунки 3.17, 3.18, 3.19), которые показали, что зависимость Y_1 , Y_2 , Y_3 от коэффициента Cp можно описать линейной функцией.

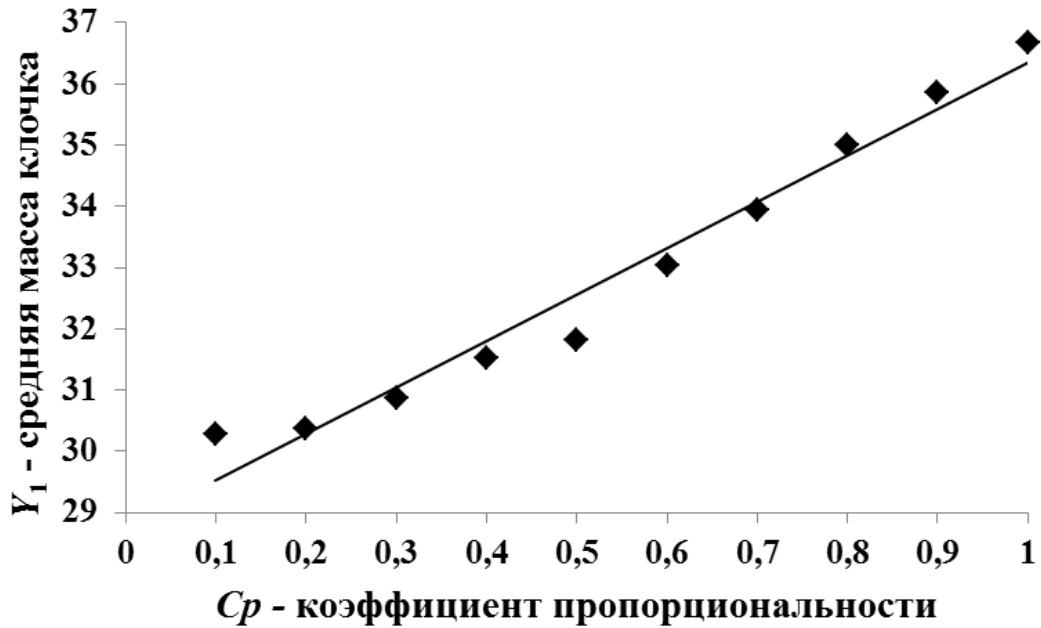


Рисунок 3.17 - Зависимость средней массы клочка Y_1 от коэффициента пропорциональности Cp

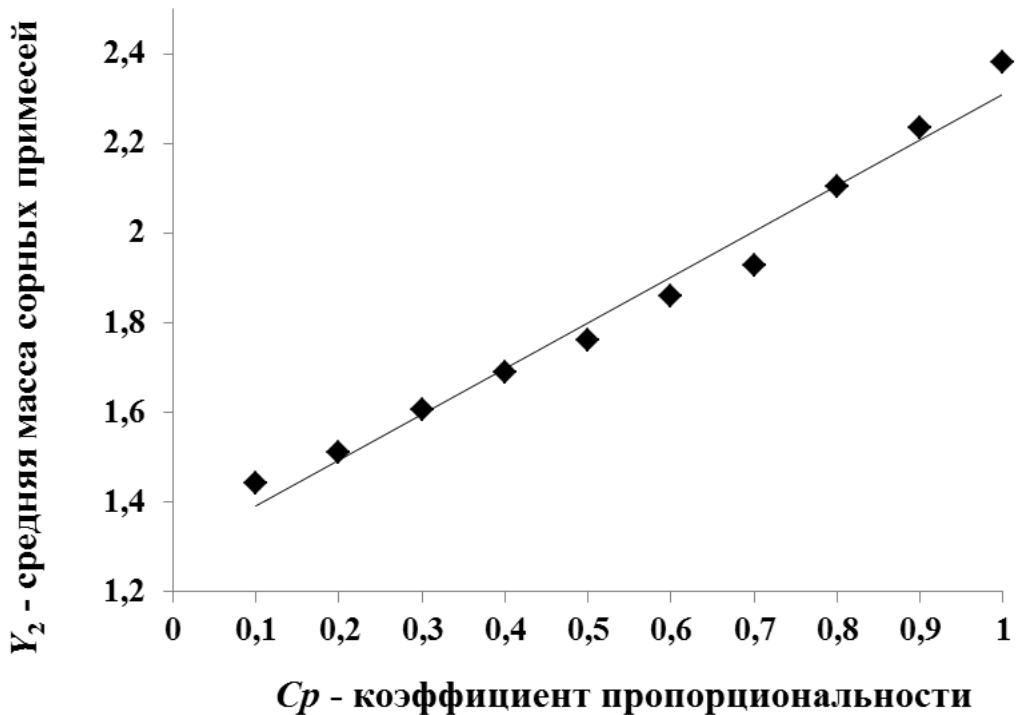


Рисунок 3.18 - Зависимость средней массы сорных примесей Y_2 от коэффициента пропорциональности Cp

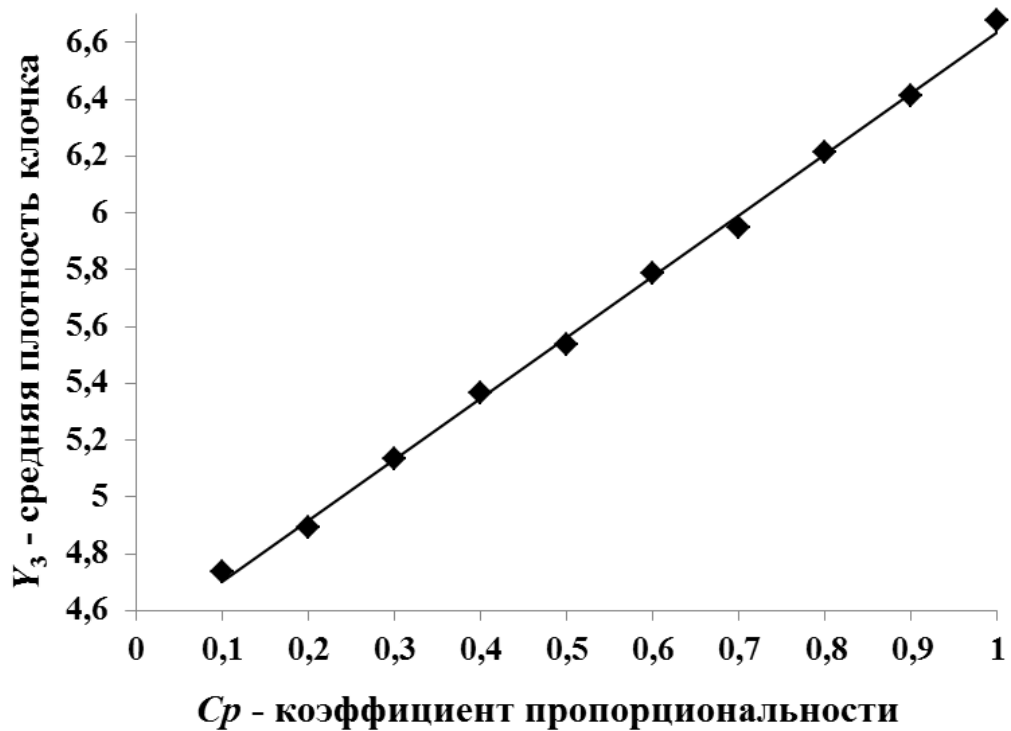


Рисунок 3.19 – Зависимость средней плотности клочка Y_3 от коэффициента пропорциональности Cp

Полученные в результате регрессионного анализа данных линейные зависимости имеют вид:

$$Y_1 = 28,764 + 7,587 \cdot Cp \quad (3.28)$$

$$Y_2 = 1,290 + 1,020 \cdot Cp \quad (3.29)$$

$$Y_3 = 4,487 + 2,151 \cdot Cp \quad (3.30)$$

Аналогичным образом исследовалось влияние максимального содержания сорных примесей $gMax$ на средние показатели клочков Y_1 , Y_2 , Y_3 . Для этого был проведен эксперимент, в котором варьировались значения $gMax$ от 5 до 50. Для каждого опыта выполнялось по 5 прогонов.

Проверка адекватности полученных регрессионных моделей по критерию Фишера выполнялась по методике, аналогичной использованной в п. 3.1.3, и показала, что выбранное число повторных прогонов достаточно для обеспечения адекватности полученных регрессионных зависимостей.

Результаты прогонов приведены в приложении А. Усредненные данные по каждому опыту представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 - Усредненные результаты
прогонов модели по каждому опыту

№	$gMax$	\bar{Y}_1	\bar{Y}_2	\bar{Y}_3
1	5	30,847	0,867	5,489
2	10	32,001	1,775	5,571
3	15	34,285	2,683	5,665
4	20	36,167	3,532	5,634
5	25	37,465	4,494	5,680
6	30	39,456	5,319	5,742
7	35	40,889	6,364	5,837
8	40	42,632	7,242	5,852
9	45	43,821	8,222	5,890
10	50	44,738	9,004	5,920

Линии тренда (рисунки 3.20, 3.21, 3.22), построенные по средним значениям массы клочка Y_1 , массы сорных примесей в клочке Y_2 , плотности Y_3 , показывают, что зависимость Y_1 , Y_2 , Y_3 от максимального содержания сорных примесей в клочке $gMax$ имеет линейный вид.

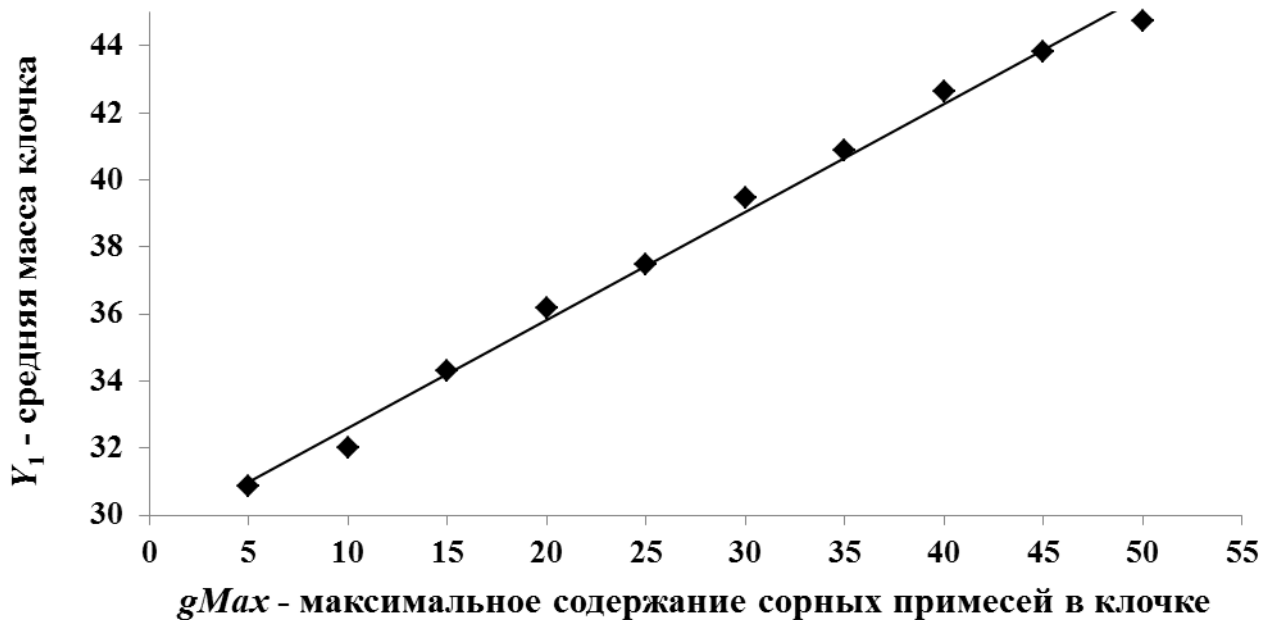


Рисунок 3.20 - Зависимость средней массы клочка Y_1 от максимального содержания сорных примесей $gMax$

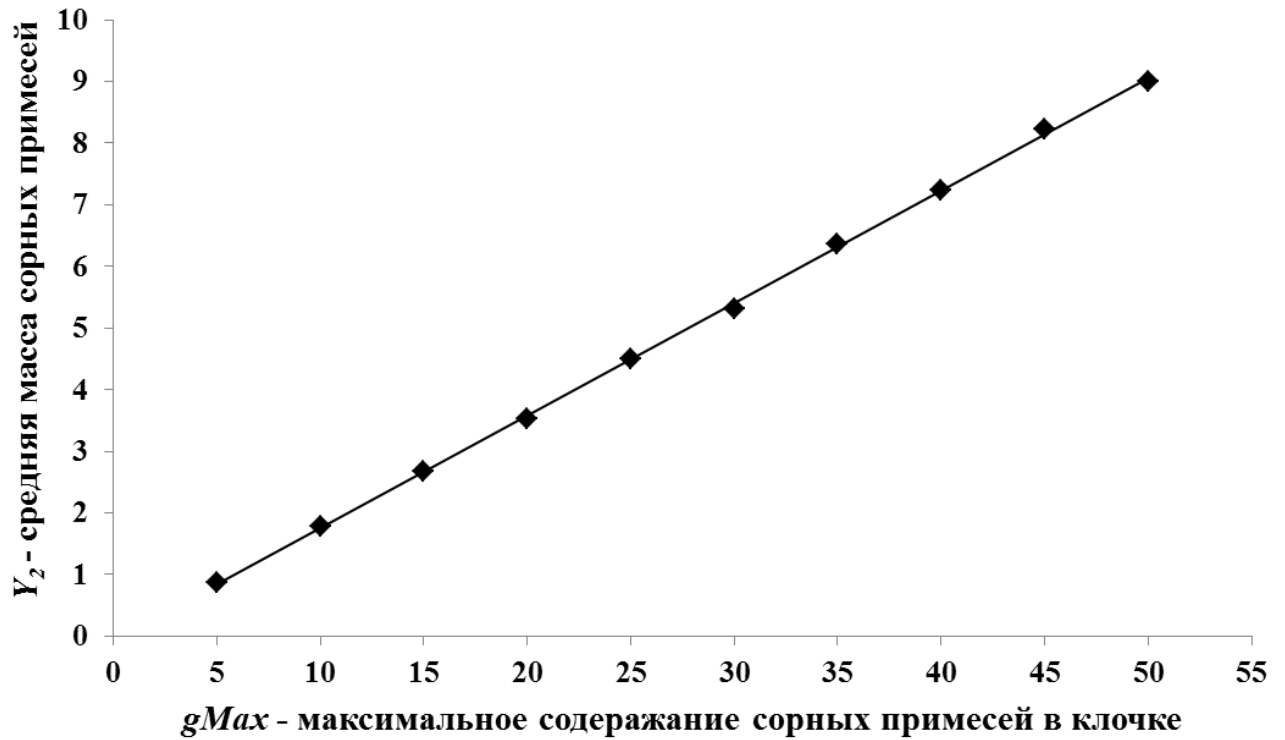


Рисунок 3.21 - Зависимость средней массы сорных примесей в клочке Y_2 от максимального содержания сорных примесей $gMax$

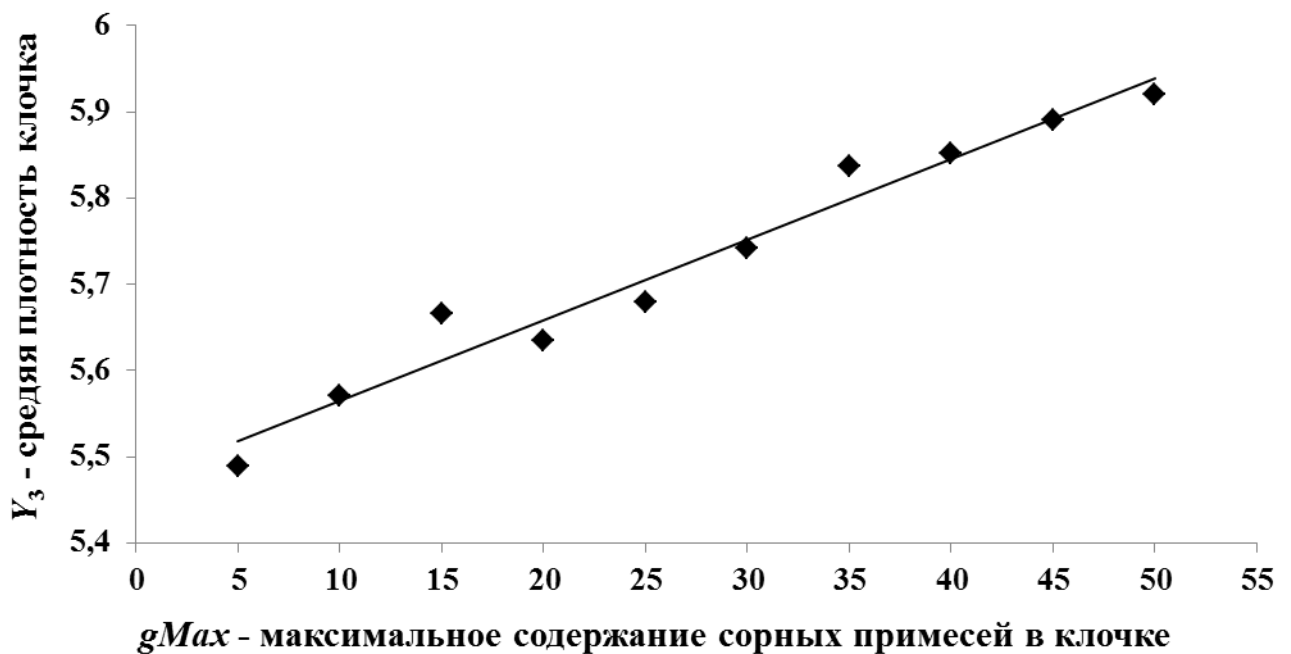


Рисунок 3.22 - Зависимость средней плотности клочка Y_3 от максимального содержания сорных примесей $gMax$

Были получены регрессионные зависимости вида:

$$Y_1 = 29,375 + 0,322 \cdot gMax \quad (3.31)$$

$$Y_2 = -0,066 + 0,182 \cdot gMax \quad (3.32)$$

$$Y_3 = 5,475 + 0,009 \cdot gMax \quad (3.33)$$

По итогам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы. Масса клочков в наибольшей степени зависит от кинетической энергии клочков. Чем выше скорость и масса клочка, тем в большей степени он подвергается разрыхлению и выделению сорных примесей. Размер клочков и их количество должно оптимальным образом соотноситься с размерами рабочей зоны. При заполнении рабочей зоны волокнистой массы степень разрыхления и очистки уменьшается. Наоборот, при разреженном потоке волокнистой массы эффективность разрыхления и очистки становится больше, но уменьшается производительность оборудования. Чем меньше масса клочков, тем меньше вероятность их взаимодействия с рабочими органами, меньше степень очистки и меньше вероятность дальнейшего разрыхления этого клочка.

Выводы по третьей главе

1. Разработаны имитационные статистические модели процессов разрыхления и очистки клочков волокнистой массы.
2. Методом компьютерного моделирования доказано, что распределение массы клочков в процессе деления сходится к логарифмически нормальному распределению независимо от исходного распределения массы и за малое число этапов деления – менее десяти шагов.
3. Установлено, что скорость перехода распределения массы клочков к предельному логарифмически нормальному распределению зависит от соотношения вероятностей разрыхления и деления клочков. А именно, чем больше вероятность деления клочка на два на определенном шаге деления, тем меньше шагов требуется для достижения предельного распределения. В дальнейшем тип распределения сохраняется, а изменяются только его параметры.

4. Анализ показал, что при изменении вероятностных характеристик процесса по мере роста степени разрыхленности клочков переход к предельному закону распределения массы может замедлиться.

5. Методом регрессионного анализа результатов компьютерных экспериментов установлено, что масса клочка, его плотность и масса сорных примесей в большей степени зависят от вероятности деления клочков волокнистой массы, чем от вероятности их разрыхления.

6. Предложены эмпирические зависимости между вероятностными характеристиками процессов разрыхления и очистки и конструктивными и кинематическими параметрами: скоростями рабочих органов и клочков, числом и разводкой колосников, объемом рабочей зоны, кинетической энергией клочков.

7. Методом случайного баланса установлено, что наибольшее влияние на среднее значение массы и плотности клочка после деления оказывает параметр C_p , связывающий эти характеристики с энергией клочка.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ШЕРСТЯНЫХ ВОЛОКОН НА ПРИГОТОВИТЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДАХ ПРЯДИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

4.1 Анализ распределений волокон шерсти по длине и тонине и их изменений

Хотя в данной диссертации основное внимание уделяется вопросам очистки и разрыхления хлопковых волокон, но эта задача является актуальной и для других природных волокон как растительного, так и животного происхождения, поскольку все эти волокна содержат непрядомые составляющие и сорных примеси разной природы. Кроме того, они бывают спутанные, образуют комплексы, которые требуют разъединения перед использованием в прядении.

Изучение вопросов подготовки к прядению этих категорий волокон показывает, что для них наряду с очисткой и разрыхлением большое значение имеют процессы рассортировки волокон по длине, тонине, прочности и другим категориям [141].

Рассмотрим эти процессы на примере шерстяных волокон. В процессах гребнечесания, которые являются завершающим этапом подготовки шерстяных волокон к прядению, комплексы разъединяются до отдельных волокон, удаляются короткие волокна и сорные примеси, а сами волокна выпрямляются. В работах [89, 142] показано, что процесс гребнечесания сопровождается значительной рассортировкой волокон, из которых часть попадает в ленту в качестве прочеса, а часть выпадает в очес, который затем может быть использован в более грубых способах переработки шерстяных волокон.

Современная приборная база позволила вывести задачи получения данных о волокнистых продуктах на новый уровень, который отличается большой информативностью получаемых данных, высокой точностью и надежностью данных. К сожалению, разработка и производство такого рода приборов требует больших затрат, поэтому, как правило, в их производстве специализируется малое число

фирм в мире. Страны, заинтересованные в получении подобной информации о волокнистых продуктах, пользуются этой приборной базой, поставляемой такими фирмами.

Представим некоторые сведения, которые удалось почерпнуть из имеющихся открытых литературных источников. При исследовании свойств шерстяных волокон, перерабатываемых по гребенной системе прядения, были проведены исследования изменения свойств этих волокон (длины, тонины, засоренности) по переходам. В работе [143] К. Э. Разумеевым получены эмпирические зависимости, характеризующие взаимосвязь между свойствами невыттой шерсти и свойствами гребенной ленты (топса) и пряжи.

На рисунках 4.1 и 4.2 отражены результаты натуральных экспериментов с продуктом из натуральной шерсти, полученные с помощью прибора HORNİK FIBERTECH «OFDA 4000» с разделением на классы [142].

Приведенные гистограммы являются типичным примером распределений свойств шерстяных волокон. Эти распределения характеризуются сильно положительной асимметрией, ненулевым модальным значением и тяжелыми правыми хвостами.

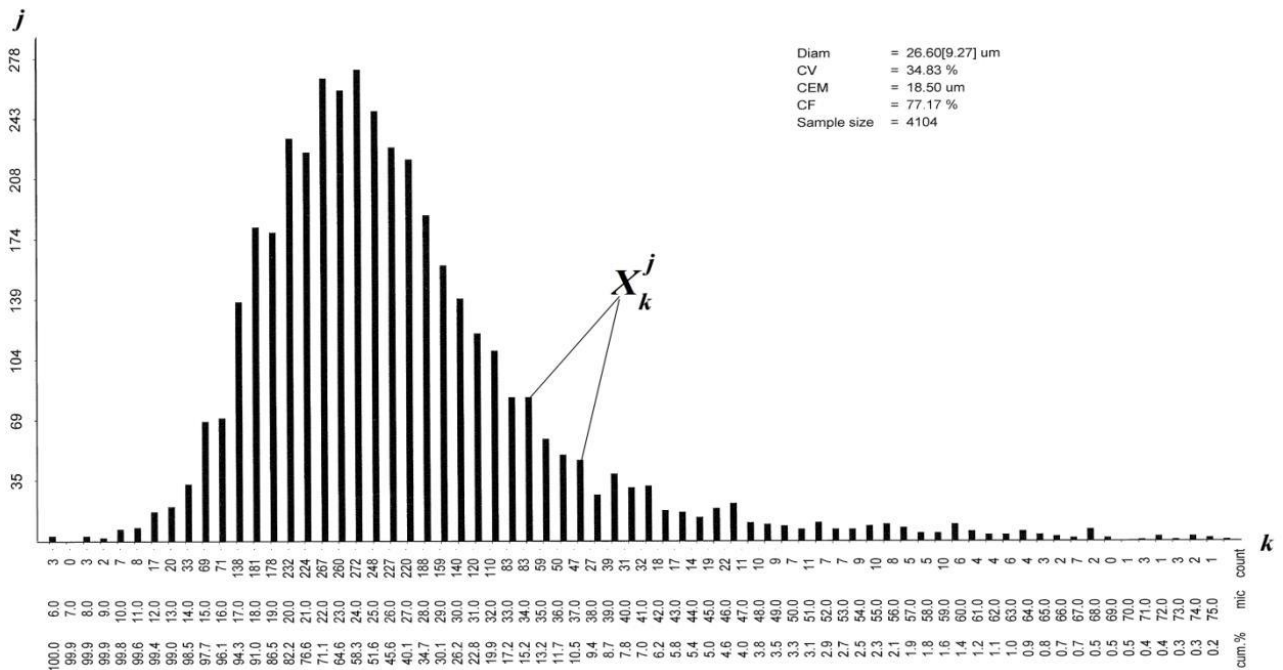


Рисунок 4.1 - Гистограмма распределения входящего продукта по тонины волокон для класса длины 90-100 мм

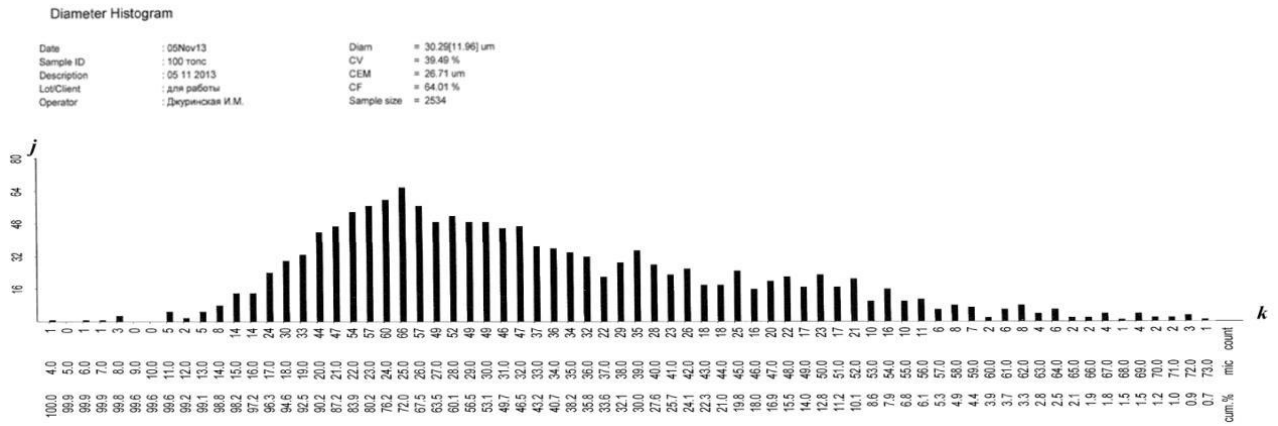


Рисунок 4.2 - Гистограмма распределения по тонине волокон в гребенной ленте

Преобразование потока волокнистой массы в любом технологическом процессе проявляется в изменении распределения характеристик волокон, например, их длины L и тонины D [144-147]. Распределение волокон $f(L)$, полученное экспериментальным путем, описывается гистограммой $pL(k)$, примеры которых приведены выше на рисунках 4.1 и 4.2. При обработке данных на компьютере или моделировании непрерывное распределение $f(L)$ также заменяют дискретным распределением по интервалам значений. В линейном приближении взаимосвязь между распределениями волокон на входе pL_1 и выходе pL_2 технологического перехода можно представить интегральным преобразованием [148, 149]:

$$pL_2(k) = \sum_{j=1}^{j_{\max}} gL(k, j) pL_1(j), \quad k = 1, \dots, k_{\max} \quad (4.1)$$

Ядро преобразования $gL(k, j)$ является математическим описанием процесса с точки зрения преобразования длины волокон L .

Обозначим M массу волокон в потоке на входе технологического перехода. В этом потоке масса волокон, имеющих в i -м интервале длин, равна $pL_1(i) M$. Обозначим долю массы волокон, перешедших в отходы, величиной $(1 - a)$. Масса волокон из i -го интервала в выходящем потоке равна $pL_2(i) a M$. Очевидно, что эти две величины для каждого класса связаны одним из трех соотношений

$$pL_1(i)M \left\{ \begin{array}{l} = \\ > \\ < \end{array} \right\} pL_2(i)aM, \quad i = 1, \dots, m \quad (4.2)$$

Равенство в (4.2) означает, что волокна этого интервала длин переходят без изменений в выходящий поток за исключением части, выпадающей в отходы. Неравенство ($>$) в (4.2) означает, что часть волокон этого интервала либо перешли в отходы в доле, превышающей среднюю долю отходов ($1 - a$), либо разорвались и перешли в меньшие по номеру i интервалы длин. Неравенство ($<$) в (4.2) означает, что часть волокон, относившихся к интервалам $j > i$, разорвались, и образовавшиеся более короткие волокна имели длину, соответствующую i -му интервалу.

Для выравнивания правой и левой частей соотношения (4.2) введем множители $b(i)$

$$b(i)pL_1(i)M = pL_2(i)aM, \quad i = 1, \dots, m \quad (4.3)$$

Их значения вычисляются по известным оценкам распределений и средней доле отходов

$$b(i) = \frac{apL_2(i)}{pL_1(i)}, \quad i = 1, \dots, m \quad (4.4)$$

Сравнивая $b(i)$ с единицей, можно сделать вывод о том, какое из перечисленных выше условий выполняется с волокнами i -го интервала.

4.2 Метод оценки распределений длины и тонины волокон шерсти с учетом их коэффициента корреляции

В исследованиях Е. И. Битуса [146, 150] и П. А. Севостьянова [151] было установлено, что при изучении изменений длины и тонины волокон на разных переходах прядильного производства необходимо учитывать взаимную корреляцию этих характеристик. Эффективным способом такого контроля корреляций является получение распределений характеристик волокон после технологического перехода в промежуточных продуктах производства [146, 152]. К сожалению, даже автоматизированные средства измерения не позволяют оценивать двумерные распределения. Поэтому был разработан метод такой оценки по одномерным распределениям и известным коэффициентам корреляции [153].

В производственном процессе изменения характеристик волокон в потоках на входе и выходе машины, например, распределения L и D волокон, взаимосвязаны. Взаимосвязь между ними является корреляционной, и в простейшем случае описывается коэффициентом корреляции r . Его значение не одинаково для разных партий волокнистой массы. Можно лишь утверждать, что, например, для волокон шерсти он положительный $0 < r < 1$ и принимает значения из середины указанного диапазона.

Исследуем изменения распределений двух коррелированных величин методом статистического моделирования [93, 145]. Значения коррелированных случайных величин l и d можно получить линейным преобразованием двух некоррелированных величин z_1 и z_2 с нулевыми средними и единичными дисперсиями

$$\begin{aligned} x_1 &= az_1 + bz_2; & x_2 &= bz_1 + az_2 \\ l &= (x_1 - mL)/\sigma L; & d &= (x_2 - mD)/\sigma D \end{aligned} \quad (4.5)$$

где mL , mD , σL и σD – средние и среднеквадратические отклонения длины и толщины. Можно показать, что если $a = \cos\theta$ и $b = \sin\theta$, то угол $\theta = 0,5 \arcsin(r)$. Это позволяет построить соответствующий алгоритм моделирования коррелированных величин с заданными средними, дисперсиями и коэффициентом корреляции r .

Для анализа использованы два модельных распределения (рисунок 4.3): экспоненциальное и равномерное, – для некоррелированных величин, и распределения их линейных преобразований при $r = 0,33$. На рисунке 4.4 приведен модельный пример для тех же распределений, но при коэффициенте корреляции 0,85. Все гистограммы были построены по одинаковым объемам выборок ($n = 3000$) и с одинаковым числом интервалов. Из полученных гистограмм следует, что даже при незначительном коэффициенте корреляции распределения заметно изменяют свою форму, особенно на «хвостах». При высокой корреляции между переменными распределения зависимых переменных могут сильно отличаться от распределений как независимых величин, так и от своих распределений, но с малым коэффициентом корреляции. Если учесть, что коэффициент корреляции между переменными может изменять значение в результате технологического

процесса, то все эти особенности поведения распределений следует учитывать при анализе распределений.

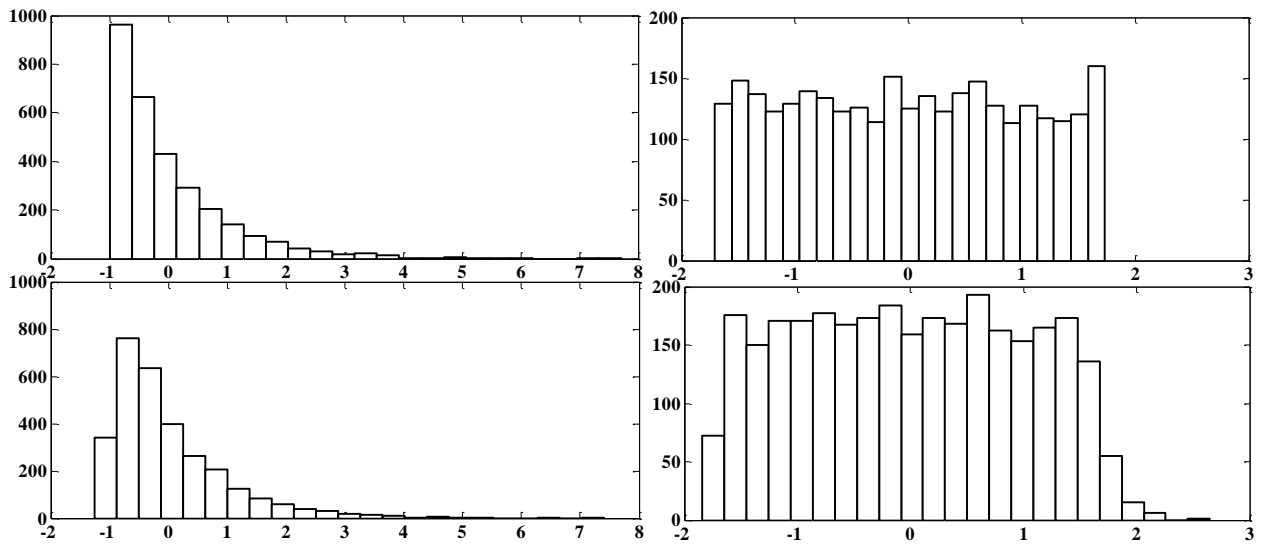


Рисунок 4.3 - Модельные распределения для некоррелированных величин и распределения их линейных преобразований при коэффициенте корреляции 0,33

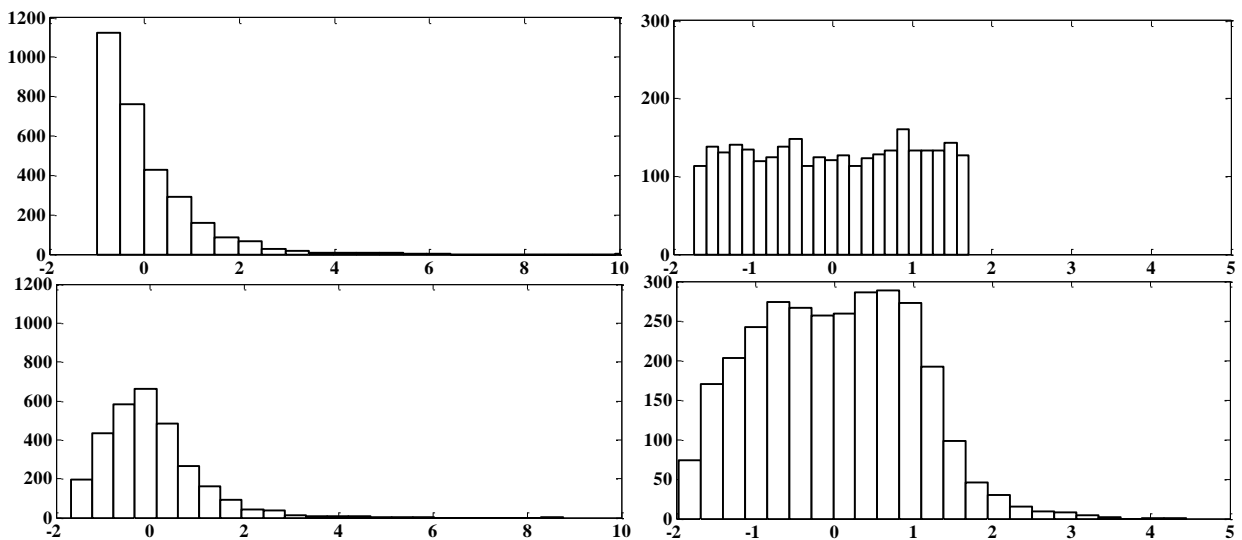


Рисунок 4.4 - Модельный пример распределений при коэффициенте корреляции 0,85

Форма кривой распределения для зависимых переменных связана не только с коэффициентом корреляции между ними, но с коэффициентом вариации и видом распределения. Чтобы подтвердить это заключение, было проведено модели-

рование с применением равномерного и нормального распределений при одинаковых средних и коэффициентах вариации. Полученные гистограммы тонины изображены на рисунках 4.5.

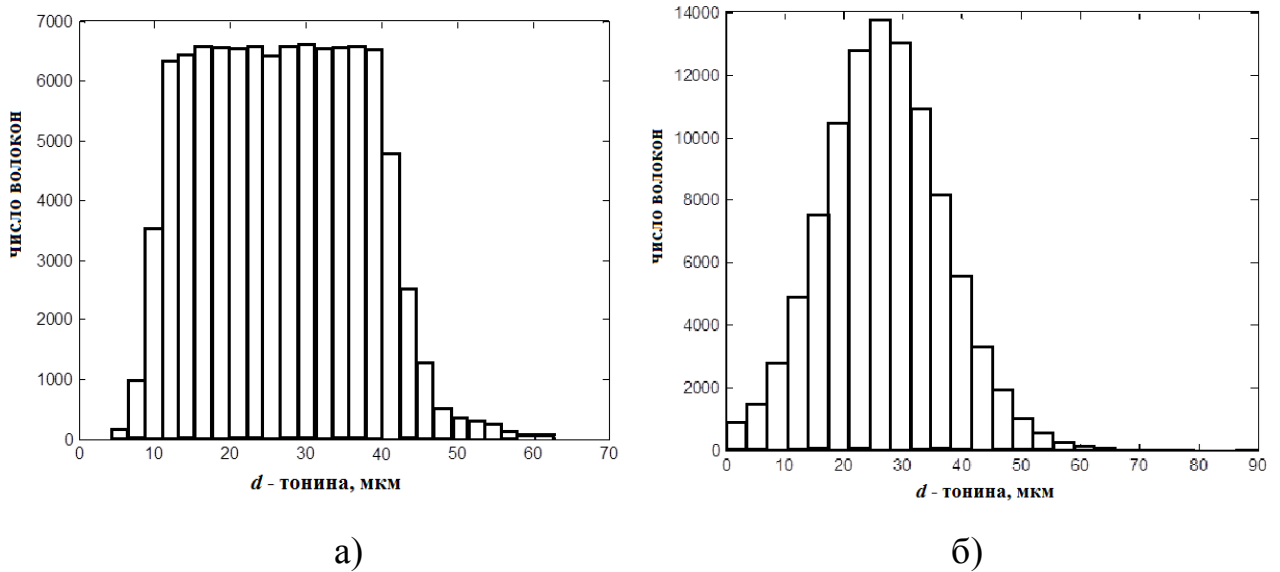


Рисунок 4.5 - Модельное распределение тонины в ленте: *а* - равномерное распределение; *б* – нормальное распределение

Построим аналогичные гистограммы при коэффициентах вариации, уменьшенных в 10 раз (рисунки 4.6 и 4.7).

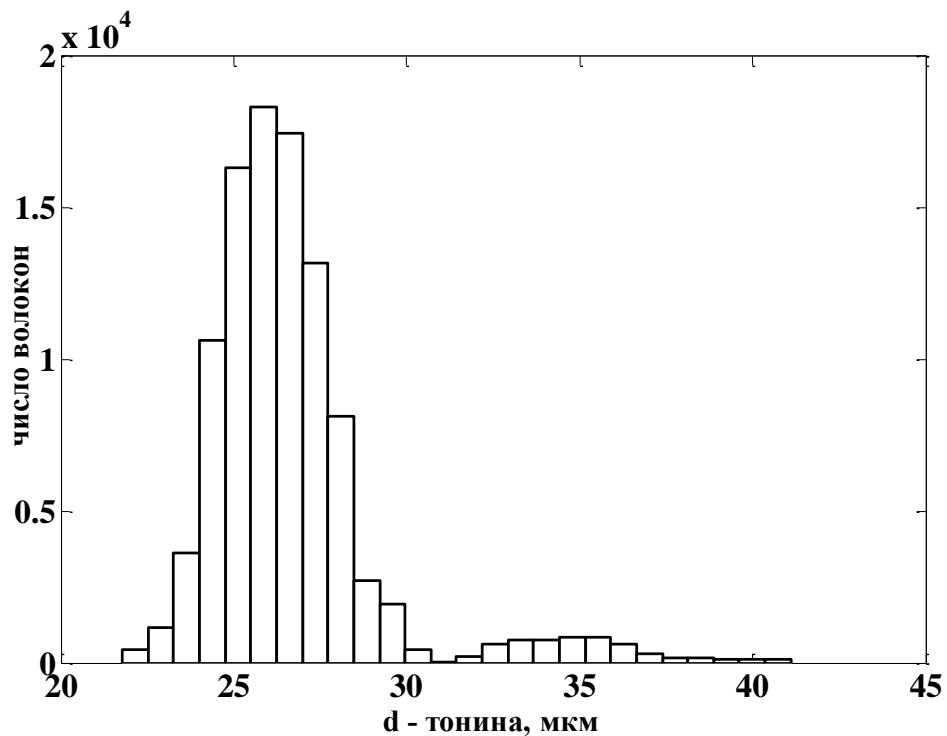


Рисунок 4.6 - Модельное распределение тонины в ленте при уменьшенном коэффициенте вариации (равномерное распределение)

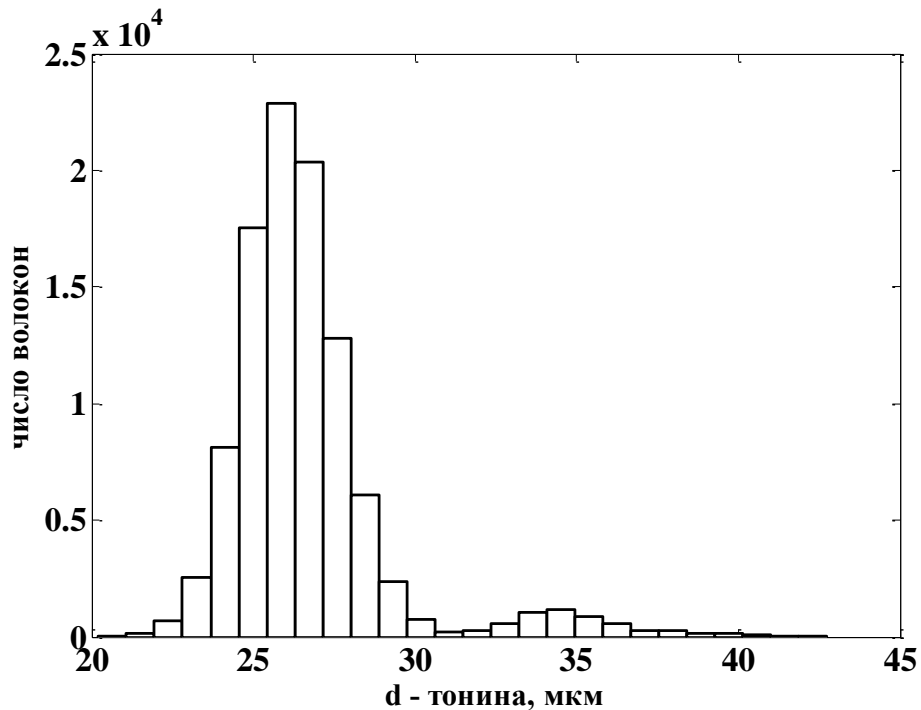


Рисунок 4.7 - Модельное распределение тонины в ленте при уменьшенном коэффициенте вариации (нормальное распределение)

Даже наиболее совершенные современные приборы не позволяют получить двумерные распределения для волокнистых продуктов. Поэтому при анализе технологического процесса следует исходить из данных, получаемых от существующих приборов и их возможностей [152].

Рассмотрим технологический план получения гребенной ленты (топса) из мериносовой шерсти, 64к, 1-2 дл.:

1. Щипально-замасливающая линия «Ronaldo»;
2. Кардочесальная машина «Thibeau» (скорость выпуска 35 м/мин, развес 32 г/м);
3. Ленточная машина «Schlumberger» CS-15 (скорость выпуска 120 м/мин, вытяжка 4,2, число сложений 4, линейная плотность ленты 28 г/м);
4. Ленточная машина «Schlumberger» CS-15 (скорость выпуска 120 м/мин, вытяжка 5,3, число сложений 5, линейная плотность ленты 30,2 г/м);
5. Ленточная машина «Schlumberger» CS-15 (скорость выпуска 120 м/мин, вытяжка 7, число сложений 5, линейная плотность ленты 18 г/м);
6. Гребнечесальная машина ERA (число сложений 24, скорость 180 уд/мин, вытяжка 7, линейная плотность ленты 24 г/м);

7. Ленточная машина «Schlumberger» CS-15 (скорость выпуска 110 м/мин, вытяжка 6,6, число сложений 5, линейная плотность ленты 25 г/м);

8. Ленточная машина «Schlumberger» CS-15 (скорость выпуска 110 м/мин, вытяжка 6,2, число сложений 6, линейная плотность ленты 24 г/м).

Данные о свойствах волокон шерсти были получены с помощью автоматического анализатора OFDA-4000 (рисунок 4.8) [154] и содержат информацию в виде одномерных распределений волокон по тонины, длине волокон и другим характеристикам. Оценки одномерных распределений выводятся анализатором в виде дискретных значений, разнесенных по интервалам, т.е. в виде гистограмм.

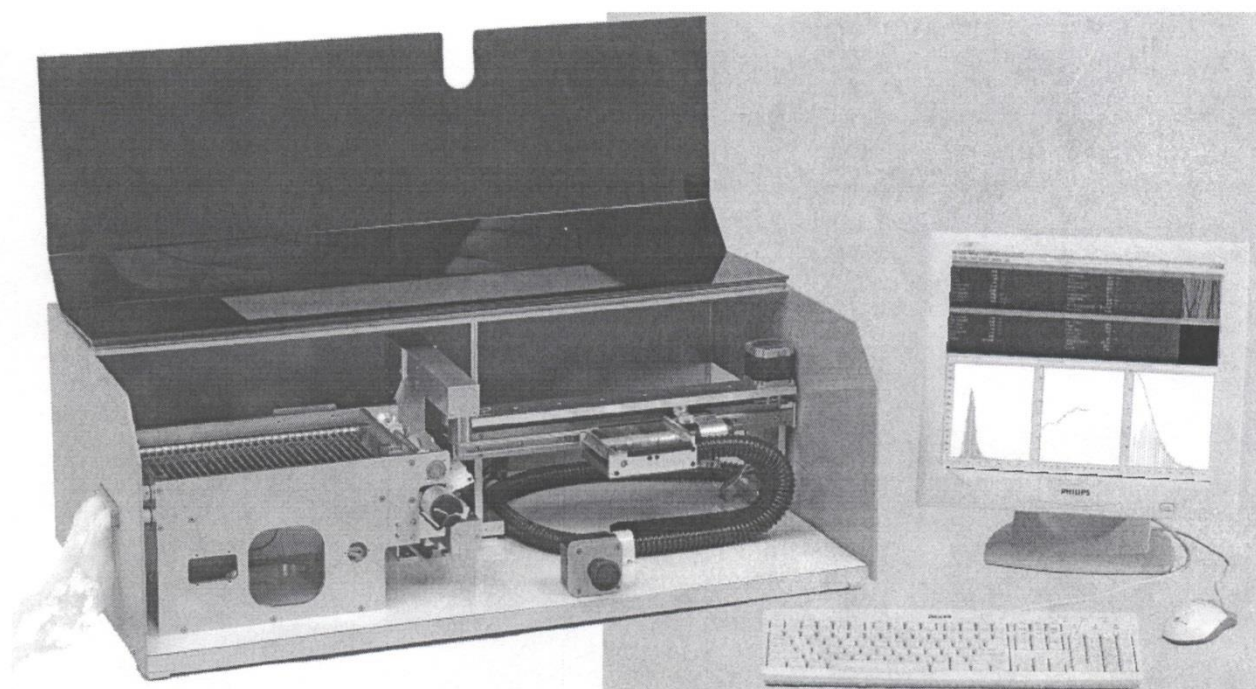


Рисунок 4.8 – Прибор OFDA 4000

В таблице 4.1 приведены такие данные для волокон шерсти после лабаза, разделенные по классам длины и тонины [150]. В таблице 4.1 столбец 1 - длина волокон; столбец 2 – масса волокон данной длины; столбец 3 – процент, который составляют волокна данной длины; столбец 4 – средний диаметр (тонины) волокон; столбец 5 - среднеквадратическое отклонение тонины; столбец 6 – коэффициент вариации тонины; столбец 7 – средняя извитость; столбец 8 - среднеквадратическое отклонение извитости; столбец 9 – процент мушек; столбец 10 – процент крупных мушек; столбец 11 – количество волокон данной длины.

Таблица 4.1 - Экспериментальные данные для волокон шерсти после лабаза

Интервал, мм	Масса, гр	%	D mean, мкм	D SD	D CV	Curve Mean	Curve SD	Blob %	Lrg Blob	Nm fbr
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0-10	0,018	1,80	29,94	14,67	49,00	62,67	64,48	1,82	0,95	628
10-20	0,015	1,50	23,79	12,12	50,95	83,25	66,75	2,32	1,30	872
20-30	0,014	1,40	25,07	13,21	52,69	84,54	74,05	2,16	1,16	686
30-40	0,017	1,70	29,07	15,68	53,94	68,38	61,21	2,16	1,24	412
40-50	0,022	2,20	32,46	15,94	49,11	60,92	64,01	2,02	1,08	582
50-60	0,021	2,10	32,17	15,67	48,71	61,55	61,83	1,84	1,00	881
60-70	0,030	3,00	25,55	12,47	48,81	77,27	70,62	2,61	1,53	1251
70-80	0,037	3,70	23,19	10,48	45,19	86,61	65,67	2,60	1,48	2868
80-90	0,042	4,20	22,32	8,95	40,10	91,02	67,08	2,56	1,49	3320
90-100	0,082	8,20	22,09	7,99	36,17	88,44	65,24	2,62	1,54	4097
100-110	0,060	6,00	22,76	8,07	35,46	83,38	63,00	2,69	1,60	4419
110-120	0,054	5,40	23,32	8,50	36,45	77,89	58,59	2,43	1,39	4040
120-130	0,061	6,10	22,84	8,43	36,91	80,58	62,24	2,29	1,32	3070
130-140	0,060	6,00	22,00	7,10	32,27	88,49	63,79	2,45	1,39	4300
140-150	0,046	4,60	22,87	8,51	37,21	88,23	68,61	2,44	1,40	3965
150-160	0,091	9,10	23,56	7,88	33,45	84,65	66,86	2,47	1,45	4439
160-170	0,053	5,30	22,16	9,27	41,83	90,54	64,38	2,46	1,41	4533
170-180	0,041	4,10	24,68	10,20	41,33	82,70	64,04	2,44	1,41	3634
180-190	0,035	3,50	25,02	10,20	40,77	84,57	65,26	2,44	1,40	3010
190-200	0,025	2,50	25,38	11,34	44,68	76,20	60,68	2,31	1,29	3950
200-210	0,024	2,40	28,66	14,00	48,85	73,96	64,44	2,39	1,37	3004
210-220	0,020	2,00	28,53	14,18	49,70	76,27	66,40	2,40	1,36	2873
220-230	0,024	2,40	33,64	16,30	48,45	60,89	58,56	1,85	1,01	2409
230-240	0,015	1,50	28,46	13,51	47,47	72,65	60,44	2,09	1,17	1662
240-250	0,009	0,90	40,23	17,95	44,62	52,60	62,34	1,37	0,70	998
250-260	0,006	0,60	36,62	17,23	47,05	56,02	63,20	1,57	0,83	575
Перхоть, мертвый волос	0,078	7,80								
Итого	1	100								

По данным таблицы 4.1 получено распределение доли числа волокон по классам длин, приведенное на рисунке 4.9.

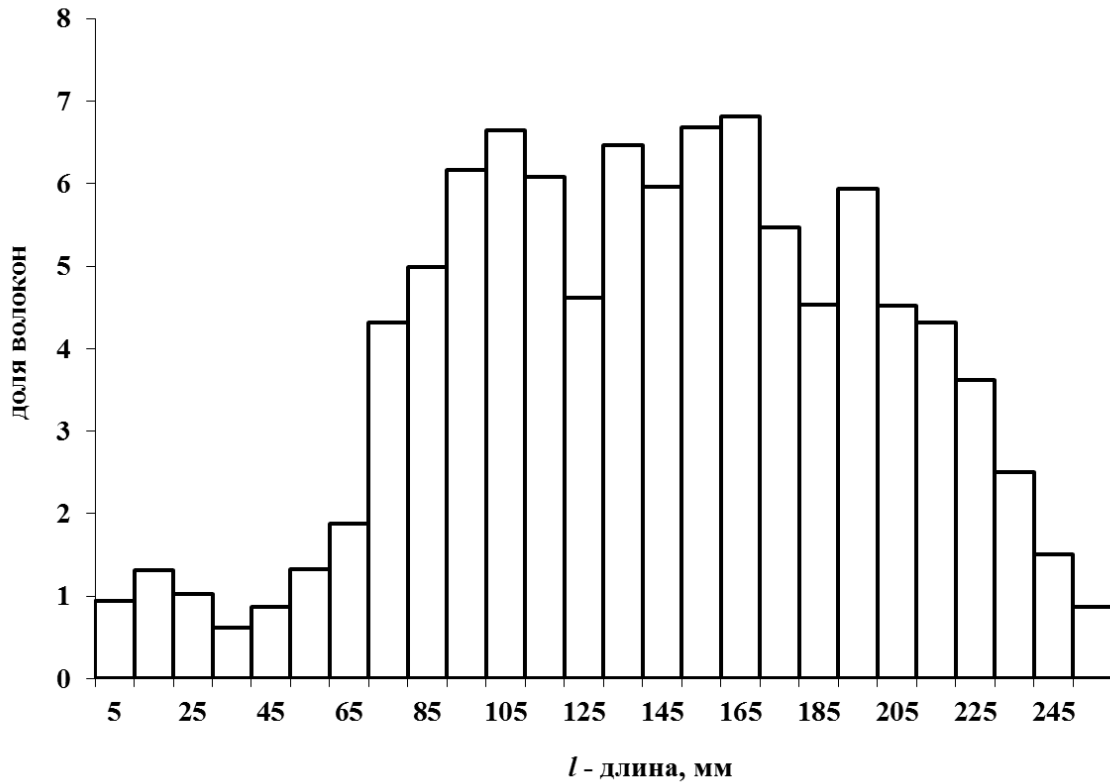


Рисунок 4.9 - Распределение доли числа волокон по классам длин (для шерсти после лабаза)

Приведенное на рисунке выборочное распределение показывает, что перерабатываемая масса шерстяных волокон отличается высокой степенью неоднородности по длине волокон, поскольку в ней присутствуют практически в равных или близких долях волокна с длиной от 70 мм до 200 мм. Очевидно, что переработка такой неоднородной шерсти требует подбора специальных технологических режимов для машин приготавливательных переходов.

4.3 Разработка алгоритма имитации одномерных и двумерных распределений по эмпирическим данным с учетом их корреляции

Для статистического моделирования на компьютере массивов случайных чисел были разработаны алгоритм и его программная реализация в системе MATLAB, которые максимально точно воспроизводили заданные гистограммами законы распределения. Затем по имеющимся гистограммам результатов натуральных

экспериментов по измерению длины и тонины волокон и известным коэффициентам корреляции вычислялись коэффициенты линейного преобразования случайных чисел, в результате которого преобразованные значения становились некоррелированными.

В соответствии с этими законами распределения моделировались массивы случайных чисел, которые затем подвергались обратному линейному преобразованию. В итоге получались числовые данные, которые представляли собой массивы случайных чисел, имевших коэффициент корреляции и одномерные распределения, совпадающие с имеющимися оценками длины и тонины волокон по натурным экспериментам.

Текст процедуры в MATLAB приведен ниже:

```
function [x,c]=UserGenerator2(n,m,p,a0,am);
%n – количество генерируемых чисел
%m - число классов моделируемого распределения
%p - ордината распределения в классе, ненормированная
%a0, am - нижняя и верхняя границы распределения
da=(am-a0)/m; c0=a0+da/2;cm=am-da/2;
x=zeros(n,1);
c=linspace(c0,cm,m);
smp=sum(p); ps=cumsum(p/smp);
for i=1:n
    z=rand;
    k=1;
    while z>ps(k)
        k=k+1;
    end;
    %k
    x(i,1)=c(1,k)-da/2+rand*da;
end;
```

Изложенная методика была опробована на экспериментальных данных, полученных для волокон шерсти после лабаза, после кардочесальной и гребнечесальной машины.

На рисунках 4.10 и 4.11 приведены примеры работы процедуры для выборочных одномерных распределений волокон шерсти по длине и тонине для образцов из лабазов.

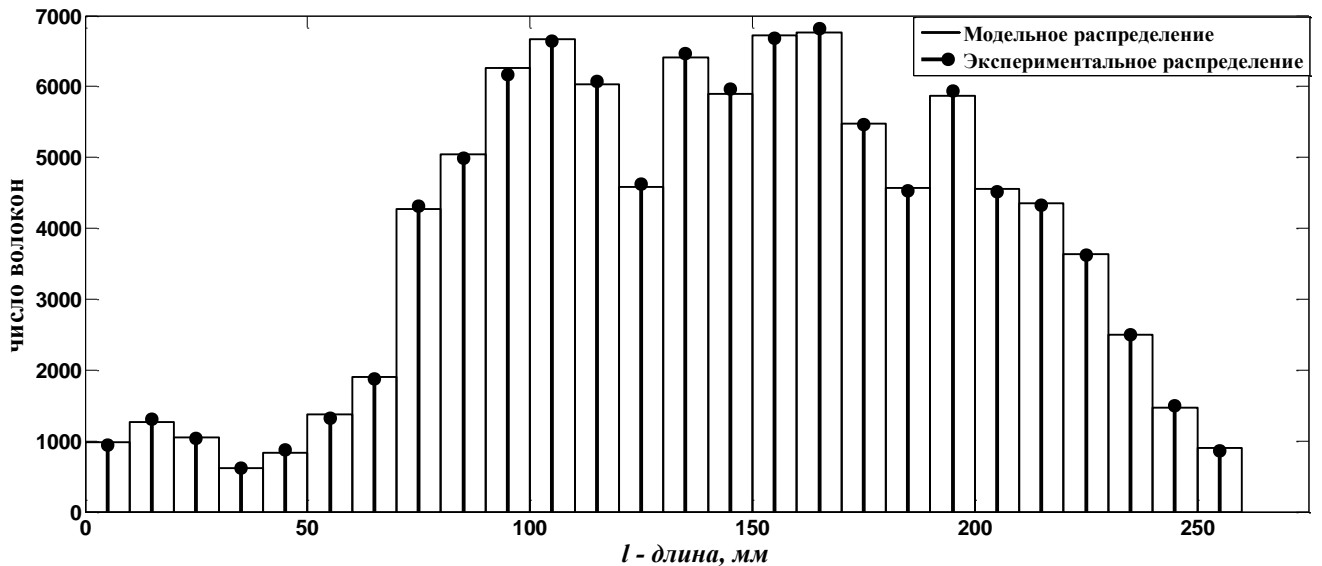


Рисунок 4.10 - Экспериментальное и модельное распределения длин волокон шерсти после лабаза

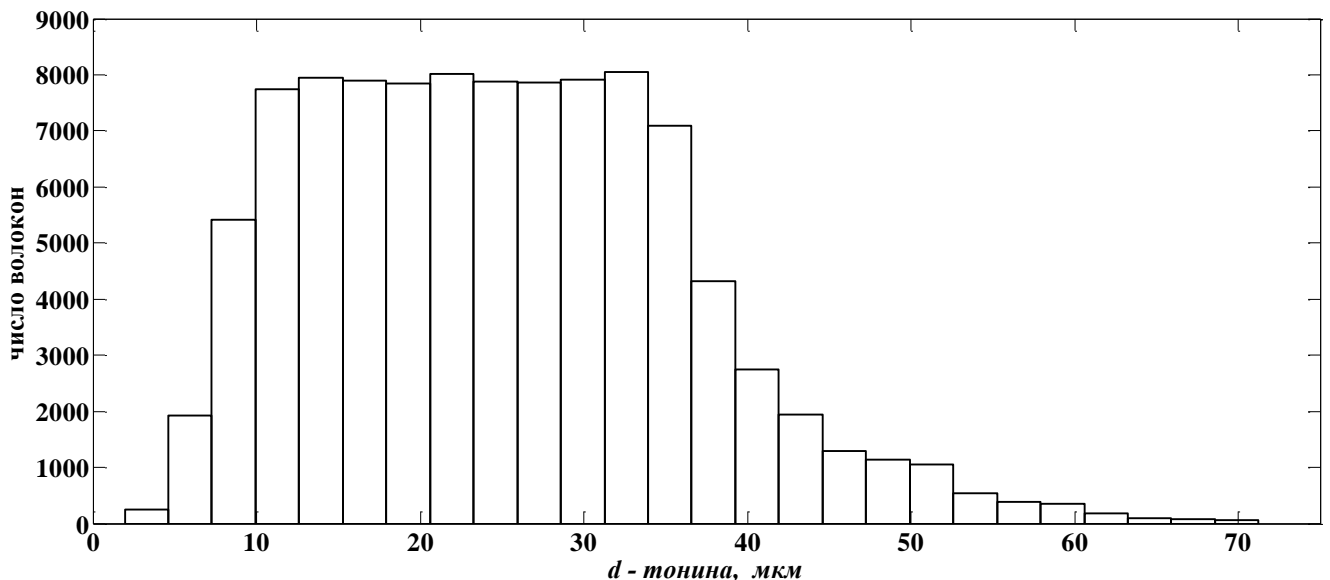


Рисунок 4.11 - Модельное распределение тонины волокон шерсти после лабаза

Видна хорошая согласованность между выборочным распределением экспериментальных данных – длин волокон и гистограммой, полученной по сгенерированной выборке 100000 моделируемых длин волокон. Эти процедуры и данные таблицы 4.1 позволили построить программную процедуру для генерации модельных выборок двумерного распределения волокон по длине и тонине.

```
function [x,c,cb]=UserGenerator3(n,m,p,a0,am,Sr,CV);
%двумерное распределение
%n - количество генерируемых чисел
%m - число классов моделируемого распределения
```

```

%p - ординаты распределения по классам, ненормированная
%a, b - нижняя и верхняя границы распределения
%Sr, CV - средние и CV в классах для 2-й величины
%b0, bm - нижняя и верхняя границы распределения 2-й величины
da=(am-a0)/m; c0=a0+da/2;cm=am-da/2;
c=linspace(c0,cm,m); x=zeros(n,2);
smp=sum(p); ps=cumsum(p/smp);
bmin=Sr.*(1-CV/100*sqrt(3)); bmax=Sr.*(1+CV/100*sqrt(3));
dcb=(bmax-bmin); b0=min(bmin); bm=max(bmax);
db=(bm-b0)/m; cb0=b0+db/2;cbm=bm-db/2;
cb=linspace(cb0,cbm,m);
for i=1:n
    z=rand;
    k=1;
    while z>ps(k)
        k=k+1;
    end;
    x(i,1)=c(1,k)-da/2+rand*da;
    x(i,2)=bmin(k,1)+rand*dcb(k,1);
end;

```

Пример работы процедуры для волокон с лабаза в виде двумерной гистограммы приведен на рисунке 4.12.

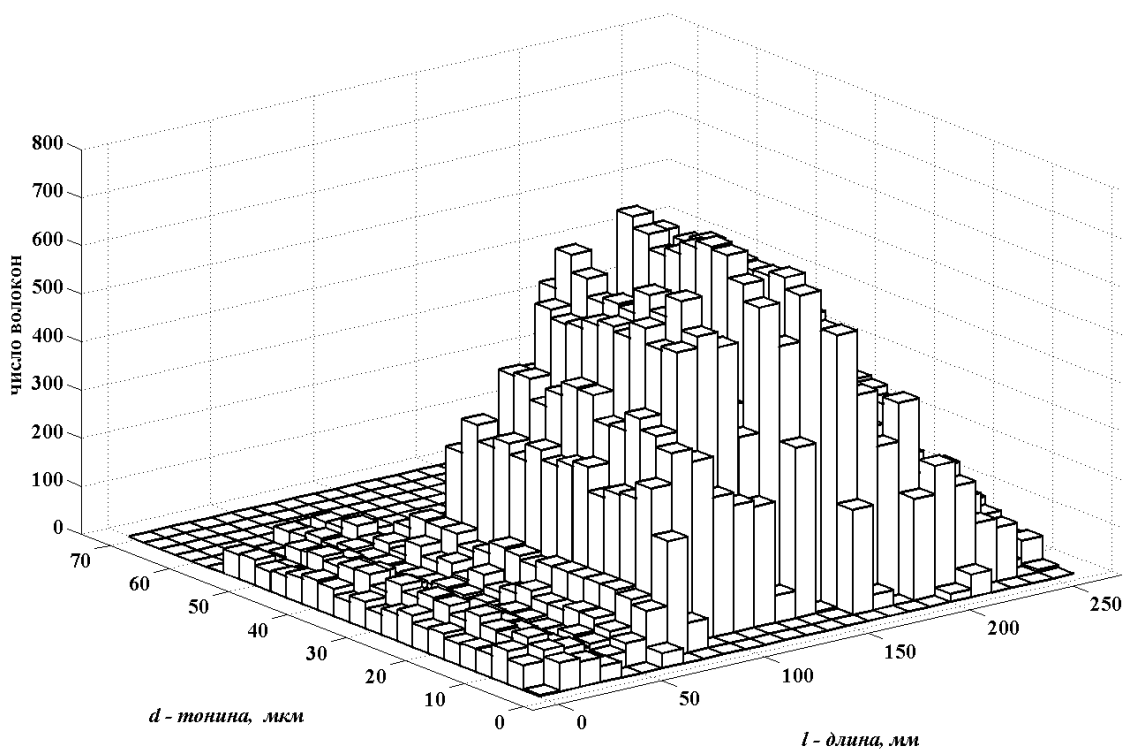


Рисунок 4.12 - Двумерное распределение длины и тонины волокон шерсти, поступившей после лабаза

Разработанные алгоритмы были применены для данных по кардной и гребенной ленте и для очеса. В таблице 4.2 приведены данные для волокон шерсти после кардочесальной машины.

Таблица 4.2 - Экспериментальные данные для волокон шерсти после кардочесальной машины

Интервал, мм	Масса, гр	%	D mean, мкм	D SD	D CV	Curve Mean	Curve SD	Blob %	Lrg Blob	Nm fbr
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0-10	0,006	1,01	28,31	13,93	49,21	72,92	64,75	1,98	1,08	1179
10-20	0,007	1,17	26,51	12,07	45,53	74,07	63,31	2,17	1,26	2069
20-30	0,023	3,86	26,02	11,01	42,31	76,80	57,51	2,32	1,34	3329
30-40	0,037	6,21	26,79	11,33	42,29	74,87	58,97	2,29	1,33	3187
40-50	0,027	4,53	26,38	10,32	39,12	75,19	60,86	2,15	1,24	3684
50-60	0,030	5,03	28,17	11,45	40,65	64,84	54,57	2,03	1,12	2140
60-70	0,041	6,88	25,97	9,79	37,70	76,11	59,37	2,43	1,40	3836
70-80	0,036	6,04	25,98	9,73	37,45	73,39	58,91	2,28	1,33	4104
80-90	0,049	8,22	25,44	8,78	34,51	75,75	56,01	2,17	1,24	3764
90-100	0,051	8,56	26,60	9,27	34,85	72,09	58,77	2,35	1,38	4104
100-110	0,033	5,54	26,96	9,71	36,02	71,51	56,96	2,23	1,31	3340
110-120	0,041	6,88	25,12	8,34	33,20	79,77	60,58	2,41	1,42	4358
120-130	0,035	5,87	26,72	9,15	34,24	71,82	55,46	2,25	1,30	3825
130-140	0,037	6,21	25,38	8,80	34,67	79,72	62,38	2,41	1,40	3630
140-150	0,029	4,87	25,10	9,05	36,06	79,75	58,87	2,22	1,28	3385
150-160	0,031	5,20	26,57	9,56	35,98	73,85	56,32	2,19	1,25	2346
160-170	0,017	2,85	28,12	10,53	37,45	67,22	55,81	2,13	1,24	2852
170-180	0,006	1,01	25,08	8,67	34,57	79,04	60,61	2,27	1,30	1753
180-190	0,010	1,68	34,12	13,13	38,48	52,57	51,13	1,51	0,79	1156
190-200	0,002	0,34	34,13	11,95	35,01	53,58	51,64	1,46	0,76	985
200-210	0,006	1,01	34,96	13,05	37,33	42,74	43,43	1,37	0,70	779
210-220	0,002	0,34	36,65	13,99	38,17	48,71	51,63	1,47	0,77	177
220-230	0,002	0,34	38,71	13,86	35,80	36,92	42,17	1,00	0,43	459
230-240	0,003	0,50	27,96	11,93	42,67	66,75	61,19	1,76	0,89	572
250-260	0,003	0,50	24,01	9,61	40,02	78,66	59,98	2,38	1,36	2615
Перхоть, мертвый волос	0,032	5,37								
Итого	0,596	100								

На рисунке 4.13 представлена зависимость коэффициента вариации по тонине от длины волокон.

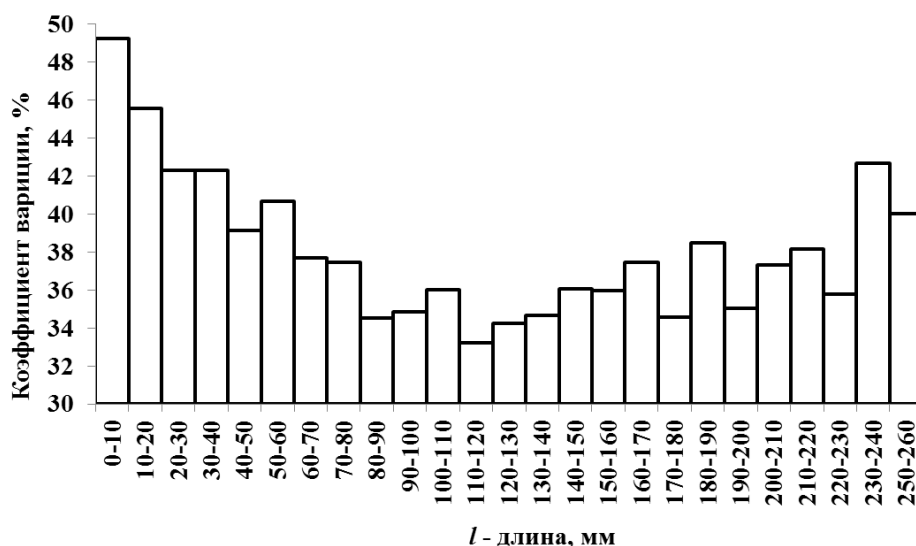


Рисунок 4.13 - Зависимость коэффициента вариации по тонины от длины волокон (после кардочесальной машины)

Результаты измерений позволили также получить оценки коэффициентов корреляции между длиной и тониной волокон. Эта информация дала возможность построить приближенные оценки двумерных распределений волокон по длине и тонины. Модельное одномерное распределение длины волокон в ленте приведено на рисунке 4.14. Одномерное распределение волокон по тонины в ленте показано на рисунке 4.15.

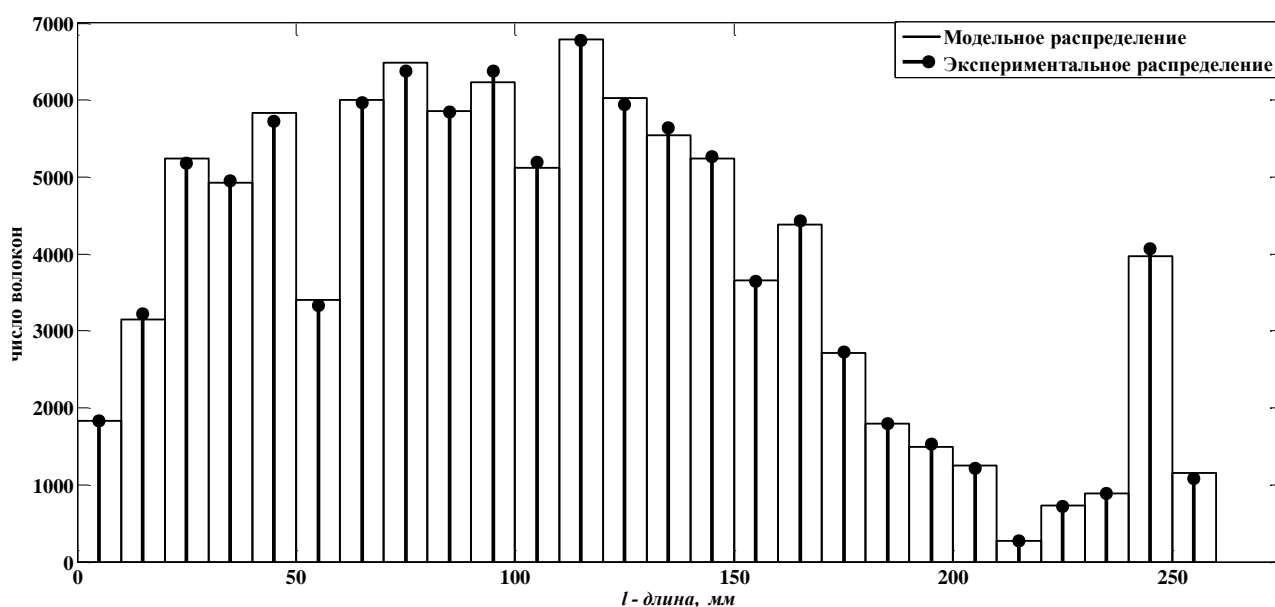


Рисунок 4.14 - Одномерное распределение длины волокон в ленте. Число волокон увеличено пропорционально модельному количеству 100 000 значений

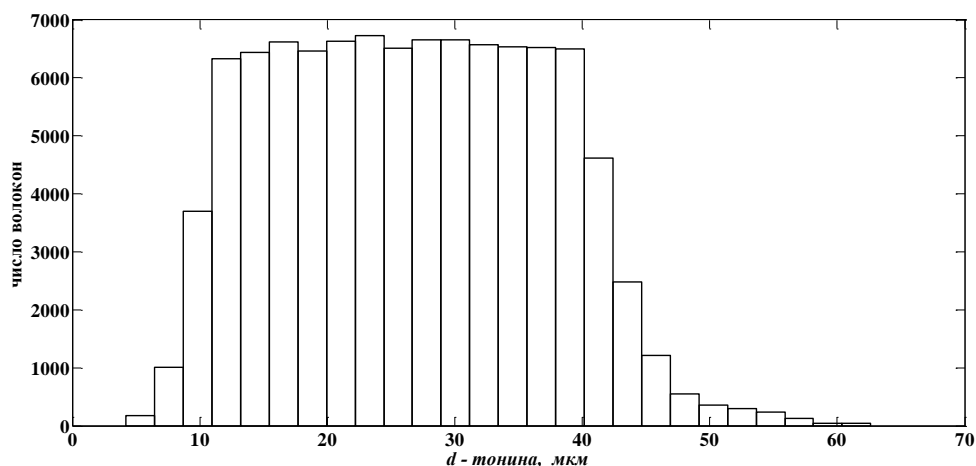


Рисунок 4.15 - Модельное распределение тонины (диаметра) в ленте
для 100 000 волокон

Пример работы алгоритма и программ, выполненных на приведенных в таблице данных, показан на рисунке 4.16 в виде двумерной гистограммы распределения длины и тонины волокон для ленты после чесальной машины. Получение таких двумерных распределений позволяет представить особенности технологического процесса для конкретного перехода, чтобы внести коррективы в настройки оборудования и повысить эффективность процесса. Это дает возможность уменьшить потери прядомых волокон и повысить выход отходов, непригодных для дальнейшей переработки по данной технологической цепочке волокон.

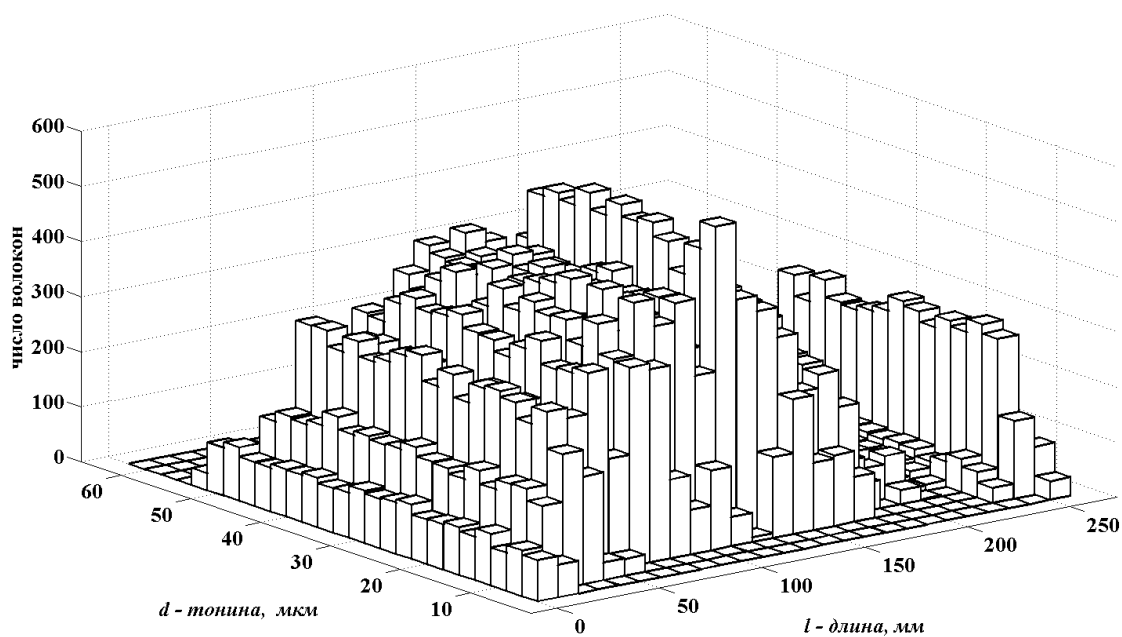


Рисунок 4.16 - Двумерное распределение длины и тонины волокон в ленте,
смоделированное по табличным данным

В таблице 4.3 приведены данные для волокон шерсти после гребнечесальной машины.

Таблица 4.3 - Экспериментальные данные для волокон шерсти после гребнечесальной машины

Интервал, мм	Масса, гр	%	D mean, мкм	D SD	D CV	Curve Mean	Curve SD	Blob %	Lrg Blob	Nm fbr
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0-10	0,003	0,65	26,81	12,76	47,59	59,91	56,05	2,46	1,37	703
10-20	0,013	2,80	27,33	13,62	49,84	57,83	52,20	2,18	1,22	1038
20-30	0,014	3,01	29,27	14,08	48,10	52,96	47,10	1,58	0,79	1073
30-40	0,021	4,52	32,16	14,96	46,52	51,10	50,44	2,15	1,18	1679
40-50	0,022	4,73	28,17	12,43	44,12	53,96	48,40	2,32	1,35	1640
50-60	0,027	5,81	29,72	13,55	45,59	48,69	43,40	1,87	1,05	1399
60-70	0,027	5,81	27,88	12,27	44,01	55,30	51,13	2,37	1,38	2994
70-80	0,025	5,38	27,64	12,02	43,49	55,13	46,43	2,42	1,40	2174
80-90	0,036	7,74	28,82	12,37	42,92	53,33	48,69	2,02	1,16	2247
90-100	0,042	9,03	30,29	11,96	39,48	48,63	41,63	1,92	1,08	2534
100-110	0,042	9,03	27,92	10,78	38,61	52,65	44,86	2,03	1,15	1343
110-120	0,038	8,17	29,49	10,89	36,93	49,75	44,73	2,36	1,35	2310
120-130	0,031	6,67	29,34	11,69	39,84	52,79	48,46	2,84	1,67	2873
130-140	0,020	4,30	31,41	12,26	39,03	42,81	40,15	1,82	1,08	2164
140-150	0,023	4,95	36,18	13,84	38,25	34,81	33,10	1,43	0,75	851
150-160	0,012	2,58	33,29	12,79	38,42	41,17	42,69	1,82	1,02	1441
160-170	0,009	1,94	33,91	14,15	41,73	35,21	35,90	1,63	0,89	1335
170-180	0,007	1,51	32,60	12,91	39,60	43,35	45,08	1,64	0,88	1194
180-190	0,004	0,86	40,10	13,92	34,71	27,48	29,19	1,31	0,70	547
190-200	0,006	1,29	28,69	12,41	43,26	52,42	48,01	2,04	1,12	2375
200-210	0,006	1,29	32,32	13,88	42,95	44,30	46,99	1,72	0,92	786
210-220	0,006	1,29	28,67	11,60	40,46	58,04	54,77	2,19	1,31	623
220-230	0,003	0,65	32,58	13,05	40,06	37,32	38,89	1,52	0,79	509
230-240	0,012	2,58	28,57	11,02	38,57	52,52	45,70	2,28	1,32	1686
250-260	0,006	1,29	23,61	10,60	44,90	61,95	59,03	1,76	0,88	700
Перхоть, мертвый волос	0,010	2,15								
Итого	0,465	100								

Оценка коэффициента корреляции для модели топса равна 0,048. При таком низком коэффициенте корреляции значения тонины и длины практически незави-

симы, и двумерное распределение может быть получено как произведение одномерных распределений.

Модельное одномерное распределение длины волокон в топсе приведено на рисунке 4.17. Одномерное распределение волокон по тонине в топсе показано на рисунке 4.18. Двумерное модельное распределение этих двух характеристик волокон в топсе изображено на рисунке 4.19.

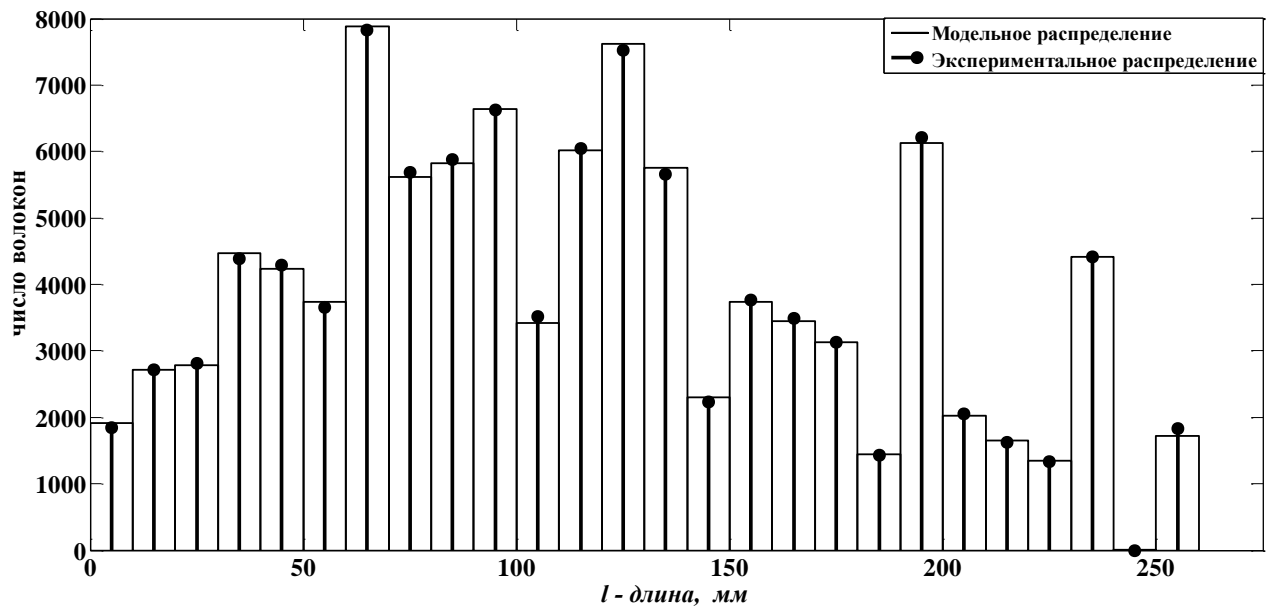


Рисунок 4.17 - Одномерное распределение длины волокон в топсе. Число волокон увеличено пропорционально модельному количеству 100 000 значений

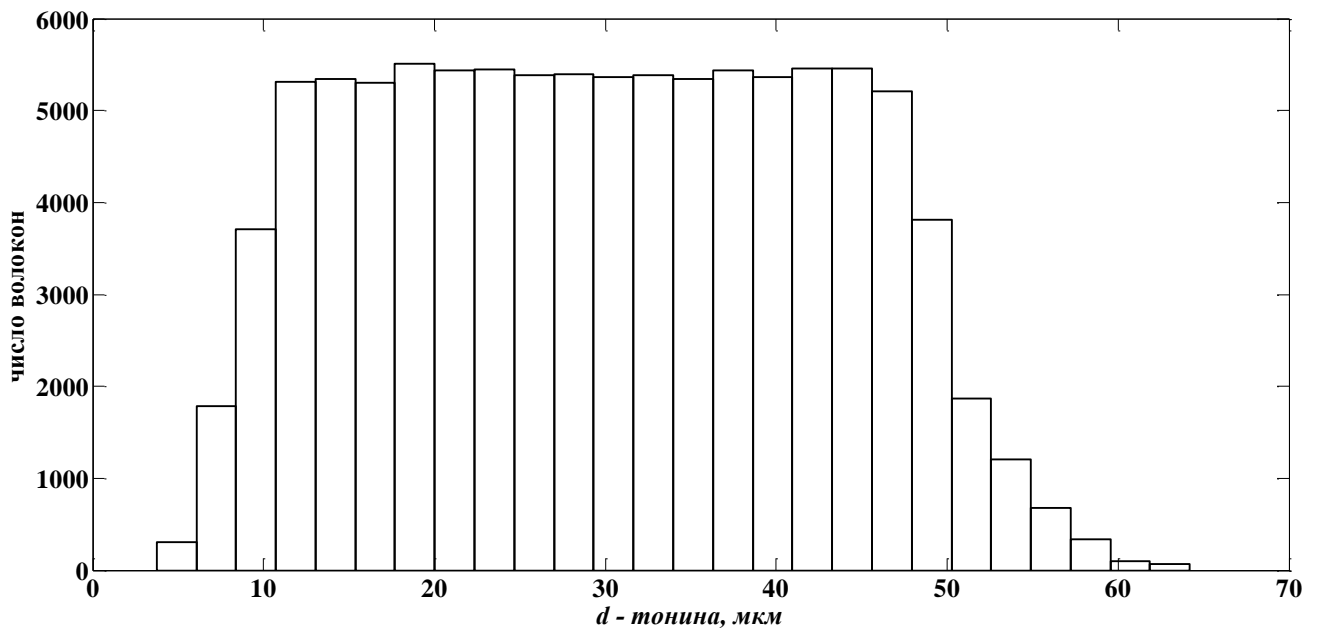


Рисунок 4.18 - Модельное распределение тонины (диаметра) в топсе для 100 000 волокон

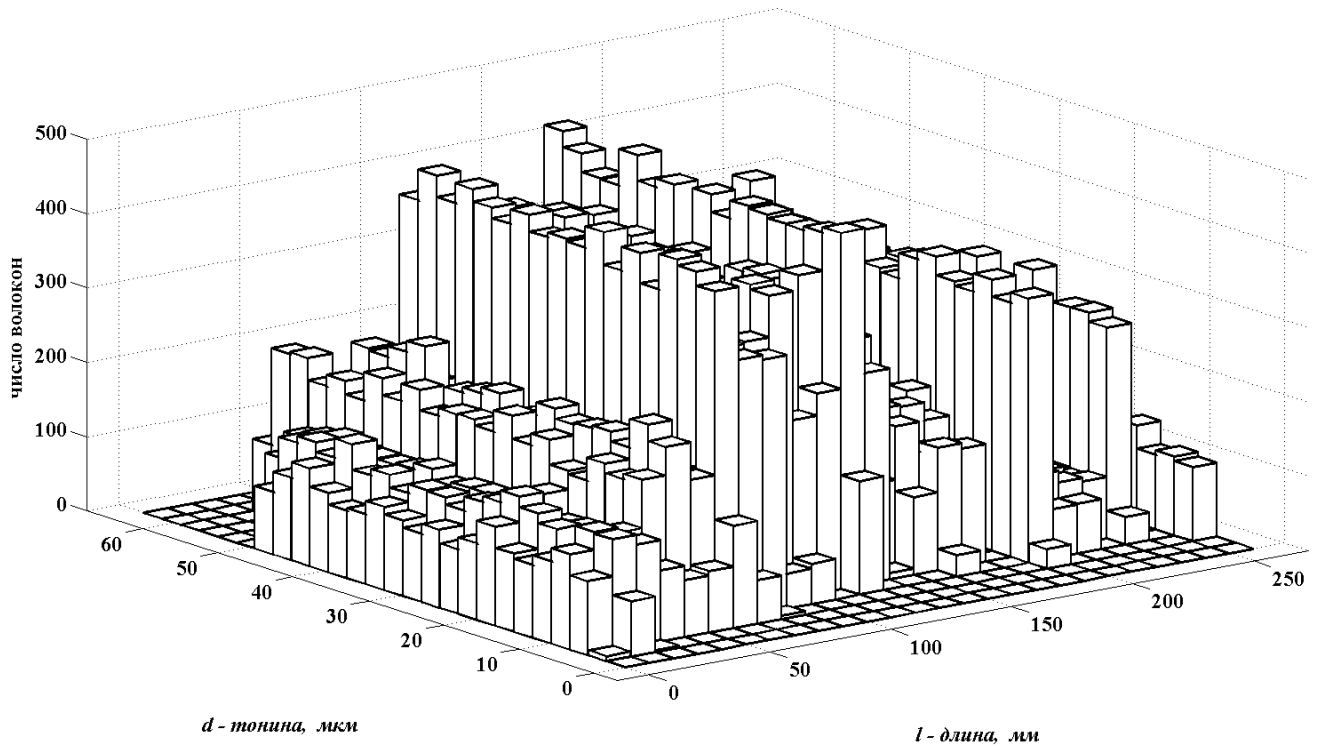


Рисунок 4.19 - Двумерное распределение длины и тонины волокон в топсе, смоделированное по табличным данным

В таблице 4.4 представлены данные для волокон шерсти в крупном очесе.

Таблица 4.4 - Экспериментальные данные для волокон шерсти в крупном очесе

Инт., мм	Масса, гр	%	D mean, мкм	D SD	D CV	Curve Mean	Curve SD	Blob %	Lrg Blob	Nm fbr
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0-10	0,040	40,00	20,50	6,89	33,61	71,74	2,39	1,33	4888	94,33
10-20	0,015	15,00	19,92	7,37	37,00	79,64	2,41	1,32	3090	94,40
20-30	0,018	18,00	20,73	7,44	35,89	70,66	2,20	1,16	2899	92,51
30-40	0,007	7,00	20,80	7,54	36,25	69,27	2,10	1,09	1725	93,04
40-50	0,009	9,00	21,65	8,92	41,20	64,40	2,03	1,04	851	89,66
50-60	0,002	2,00	23,17	10,36	44,71	68,65	2,10	1,09	663	84,16
60-70	0,001	1,00	22,17	9,45	42,63	65,60	2,12	1,11	882	37,53
90-100	0,002	2,00	28,10	14,05	50,00	66,56	1,74	0,89	337	64,99
Перхоть, мертвый волос	0,006	6,00								
Итого	0,1	100								

Как известно [146], информация о распределении волокон по длине служит основой для настройки чесальных машин с целью оптимального разделения волокон на прочес и очес. Простейшим правилом рассортировки может быть следую-

щее: волокна короче L_1 – все в очес; волокна длиннее L_2 – все в прочес. Остальные – чем ближе длина к L_1 – тем вероятнее в очес; чем ближе длина к L_2 – тем вероятнее в прочес. Примем $L_1 = 20$ мм, $L_2 = 60$ мм. На рисунках 4.20 и 4.21 приведены гистограммы длины и тонины очеса (а) и прочеса (б).

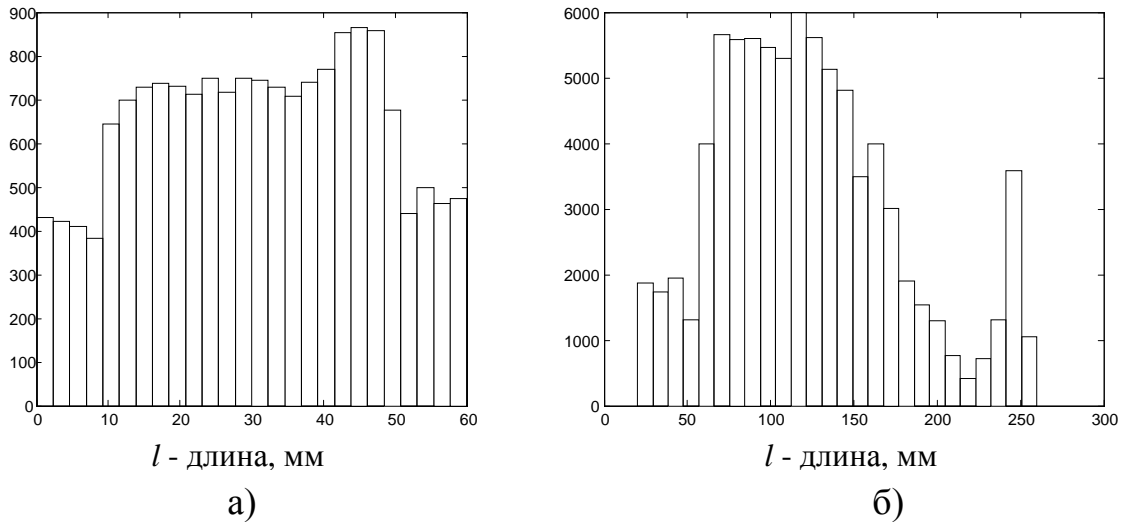


Рисунок 4.20 - Оценки распределения длин волокон в очесе (а) и прочесе (б)

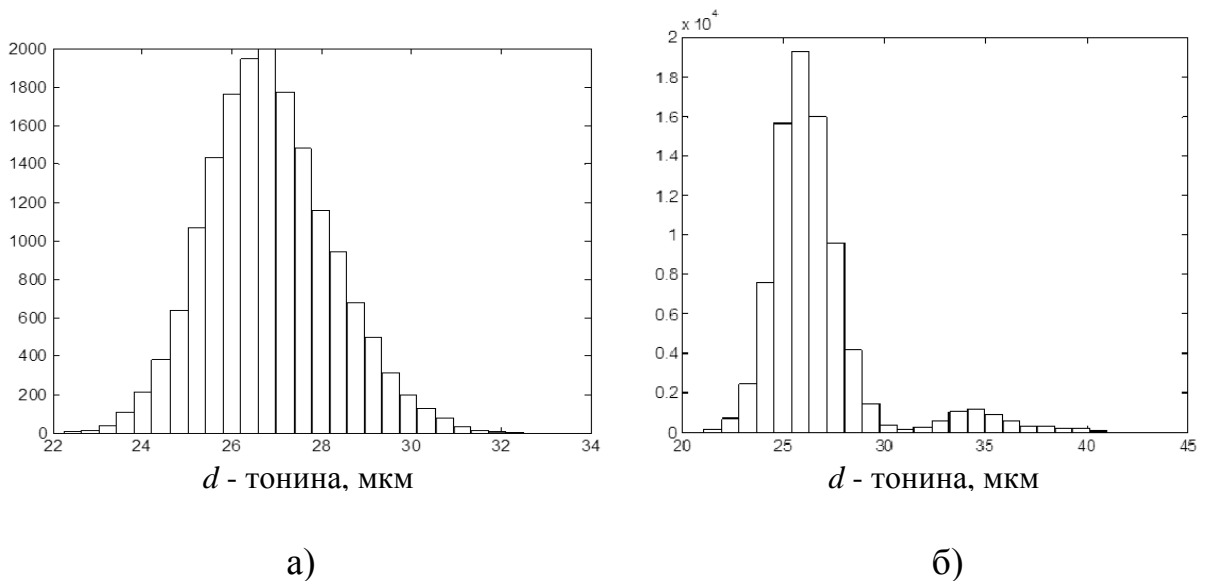


Рисунок 4.21 - Оценки распределения тонины волокон в очесе (а) и прочесе (б)

Приведенные данные по различным технологическим переходам позволили построить гистограммы, описывающие динамику изменения распределений. На рисунках 4.22 и 4.23 представлено, как изменяется распределение волокон шерсти по длине и зависимость среднего диаметра от длины волокон на разных этапах производственного процесса.

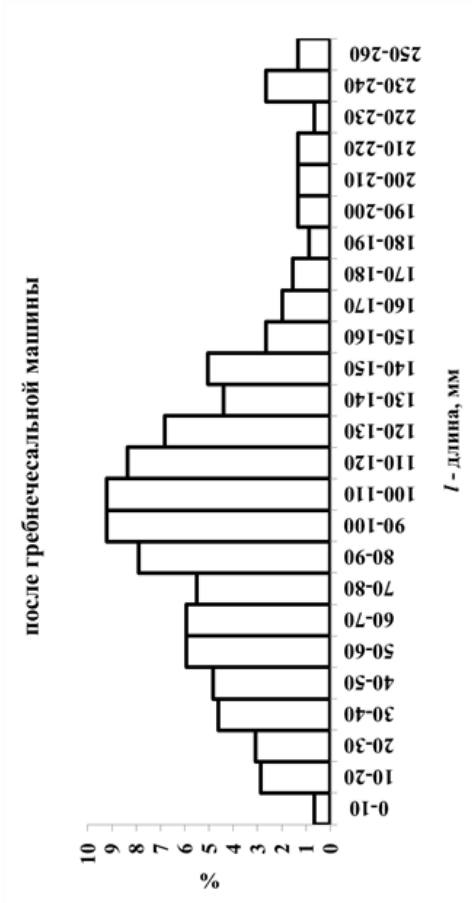
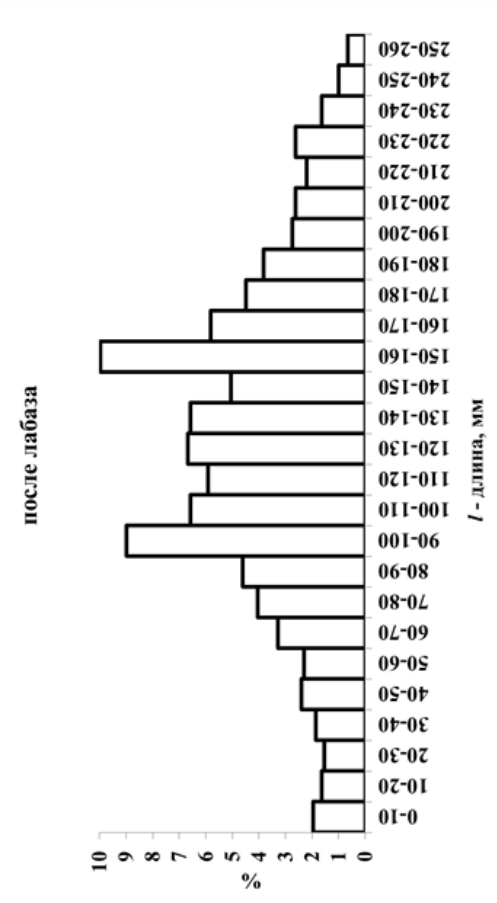
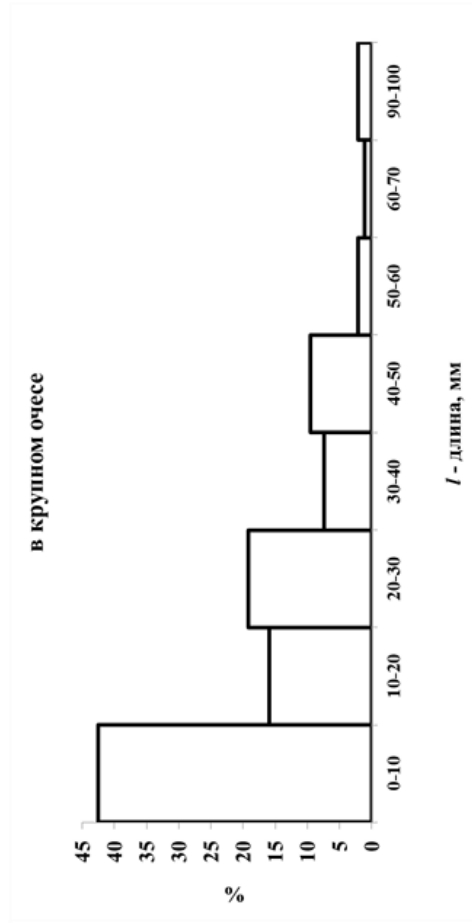
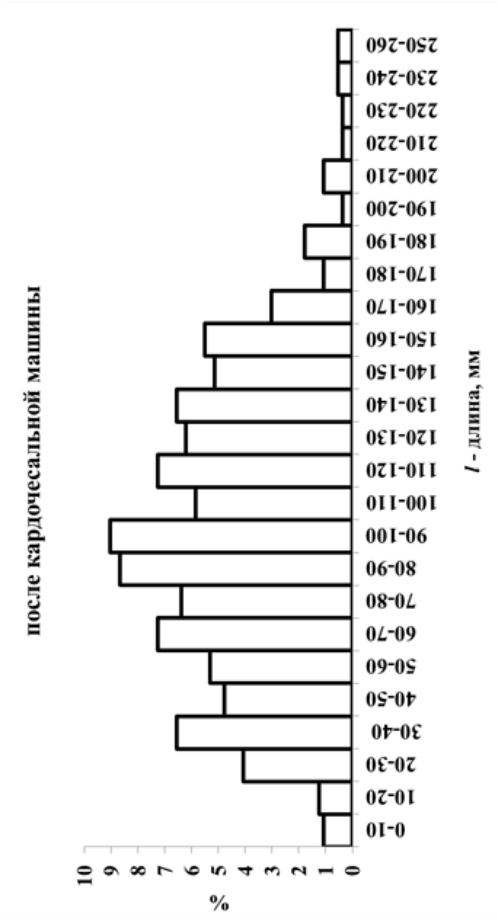


Рисунок 4.22 - Распределение волокон шерсти по длине на разных этапах производственного процесса

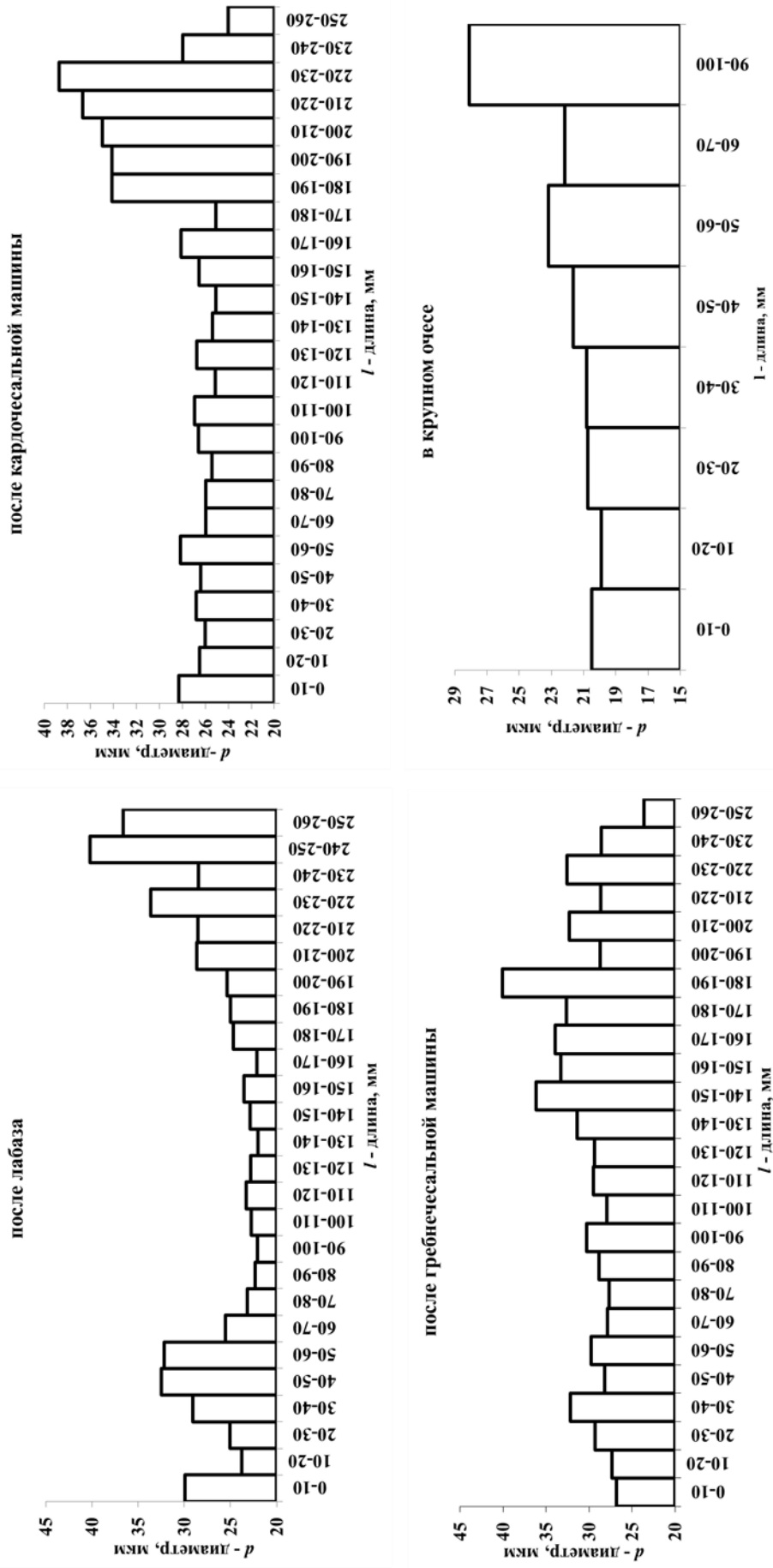


Рисунок 4.23 - Зависимость среднего диаметра от длины волокон на разных этапах производственного процесса

Приведенные гистограммы дают представление о том, как изменяются длина и тонины волокон шерсти с учетом их взаимосвязи по переходам производства.

Выводы по четвертой главе

1. Предложен критерий оценки изменения длины и тонины волокон в технологическом процессе при анализе интервалов гистограмм распределения волокон.

2. Предложены алгоритмы моделирования одномерного и двумерного распределений волокон по длине и тонине на основе эмпирических данных шерстяных волокон после лабаза, в кардной и гребенной ленте и очесе.

3. Приведены результаты обработки данных натурального эксперимента по тонине и длине волокон шерсти в топсе и ленте. С помощью разработанного алгоритма и его программной реализации получены двумерные распределения волокон, учитывающие оценку корреляции между этими характеристиками волокон. Результаты моделирования позволили получить гистограммы длин волокон при разделении волокнистого потока на прочес и очес в соответствии с принятым правилом рассортировки.

4. Алгоритмы были опробованы на реальных экспериментальных данных. Доказана информативность этих алгоритмов, позволяющих оптимизировать разводки и скоростные режимы рабочих органов кардных и гребенных чесальных машин.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МАТЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ВОЛОКНИСТЫХ ПОТОКОВ В МАШИНАХ РАЗРЫХЛИТЕЛЬНО-ОЧИСТИТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА НА ОСНОВЕ УСЛОВИЙ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА

В предыдущих главах процессы разрыхления и очистки волокнистой массы рассматривались с позиций микропроцессов, т.е. процессов, которые происходят с отдельными клочками при воздействии на них рабочих органов машины. Однако при оценке эффективности этих процессов в масштабах производства нужно знать, как они проявляются в потоках волокнистой массы, которые перерабатываются на машинах. В этих условиях вступают в силу закономерности материального баланса, и можно рассматривать потоки волокнистой массы практически как непрерывные, поскольку они состоят из огромного количества клочков. При прохождении таких потоков через машины разрыхлительно-очистительного агрегата наблюдается ряд особенностей, связанных с выделением сорных примесей, непрядомых и части прядомых волокон в отходы, с разделением потоков для возврата их на повторную обработку. Поэтому ниже мы рассматриваем особенности процессов разрыхления и очистки с позиций материального баланса и динамики машин РОА.

Одной из областей применения разработанных моделей и подходов к исследованию процессов разрыхления и очистки является использование этих моделей для целей автоматизации производства. В настоящее время одним из главных направлений развития современной техники в текстильной промышленности является их максимальное насыщение средствами автоматизации для того, чтобы снизить затраты ручного труда и повысить качество продукции. Актуальным вопросом является целесообразность создания систем управления для машин РОА, и построение моделей дает возможность произвести предварительную оценку. Для задач управления статистические модели, построенные в предыдущих главах, непригодны, поэтому в данной главе в качестве примера мы приводим разрабо-

танные модели движения материальных потоков внутри машин. В данной главе решаются две задачи. Во-первых, дается описание разработанных компьютерных моделей машин РОА на основе материального баланса и динамики этих машин. А во-вторых, на основе известных методов синтеза простейших систем управления рассмотрены возможности повышения эффективности РОА.

5.1 Статистические особенности деления волокнистых потоков

Многие производственные процессы различных областей промышленности содержат переходы, в которых происходит деление материальных потоков, поступающих на вход производственного оборудования перехода. Как правило, и поступающий поток, и доли или порции, на которые разделяется этот поток, содержат случайную составляющую.

Известно, что при сложении некоррелированных случайных величин относительная вариация суммы меньше, чем относительная вариация каждого из слагаемых [23]. Наоборот, при делении случайной величины на отдельные слагаемые относительная вариация каждого слагаемого может быть как больше, так и меньше вариации разделяемой величины. Поэтому изучение статистических особенностей деления потоков важно как с теоретической, так и с практической стороны задачи [104].

Как правило, в технологическом процессе важно обеспечить минимальную вариабельность свойств материального потока [87]. Стабильность свойств потока обеспечивает не только стабильность производства, но и является необходимым условием высокого качества продукции. Следовательно, изучение взаимосвязи между неравномерностью деления и неравномерностью материального потока является основой для создания эффективной системы управления технологическими процессами на данном переходе производственной цепочки [155].

Отметим, что деление исходного потока может быть выполнено различными образом: непрерывно, порционно, циклически, хаотически и многими другими способами [125]. Опишем некоторые из этих способов математически. Для опре-

деленности далее будем рассматривать линейную плотность материального потока и деление ее по выходящим потокам. Обозначим $g(t)$ линейную плотность потока на входе, $g_i(t)$ линейную плотность i -го потока после деления.

Рассмотрим деление потока непрерывным образом. Обозначим $a_i(t)$ долю линейной плотности исходного потока, которая ушла в i -й поток. Эта доля равна $a_i(t) = g_i(t)/g(t)$. Коэффициент вариации линейной плотности i -го потока может быть выражен через средние значения, среднеквадратические отклонения и коэффициенты вариации исходного потока и доли. Сначала запишем соотношение между плотностями и долями через абсолютные вариации относительно средних значений

$$dg_i(t) = da_i(t) \cdot g(t) + a_i(t) \cdot dg(t) \quad (5.1)$$

При нулевых вариациях доли, т.е. при $da_i(t) = 0$, относительная вариация плотности выходящего потока равна относительной вариации исходного потока:

$$\delta g_i(t) = \frac{dg_i(t)}{mg_i} = \frac{a_i(t)dg(t)}{a_i(t)mg} = \frac{dg(t)}{mg} = \delta g(t) \quad (5.2)$$

Здесь mg – среднее значение плотности исходного потока. Ниже величины с символом m означают средние величины соответствующей переменной.

Отсюда следует, что дисперсия плотности i -го потока после деления уменьшается в $a_i^2(t)$ раз, а коэффициенты вариации исходного потока и i -го потока после деления одинаковы $CVg_i(t) = CVg(t)$.

Вычислим дисперсию плотности i -го потока после деления с учетом случайных вариаций доли отделяемого потока. В этом случае

$$Dg_i(t) = mg \cdot Da_i(t) + ma_i \cdot Dg(t) + 2\sqrt{Da_i(t) \cdot Dg(t)} \cdot ma_i \cdot mg \cdot R_{ag}, \quad (5.3)$$

где R_{ag} – коэффициент корреляции между плотностью исходного потока $g(t)$ и долей отделяемого потока $g_i(t)$ в момент отделения t . Если принять, что корреляция между этими величинами отсутствует, то формула упрощается

$$Dg_i(t) = mg^2 \cdot Da_i(t) + ma_i^2 \cdot Dg(t) \quad (5.4)$$

В этом случае квадрат коэффициента вариации i -го потока после деления равен

$$CV^2 g_i(t) = \frac{Dg_i(t)}{(mg_i)^2} = \frac{Dg_i(t)}{(ma_i \cdot mg)^2} = CV^2 a_i(t) + CV^2 g(t) \quad (5.5)$$

При корреляции между плотностью исходного потока $g(t)$ и долей отделяемого потока $g_i(t)$ аналогичным образом получим

$$CV^2 g_i(t) = CV^2 a_i(t) + CV^2 g(t) + 2CVa_i(t) \cdot CVg(t) \cdot R_{ag} \quad (5.6)$$

Из этих формул следует, что при отсутствии корреляции между плотностью исходного потока и долей отделяемого потока, при $R_{ag} = 0$, неравномерность плотности отделяемого потока всегда выше, чем исходного потока.

При наличии корреляции между плотностью исходного потока и долей отделяемого потока неравномерность отделяемого потока зависит от знака коэффициента корреляции. При положительной корреляции неравномерность отделяемого потока может возрасти при $R_{ag} = 1$ до величины

$$CVg_i(t) = CVg(t) + Cva_i(t) \quad (5.7)$$

Наоборот, при отрицательных значениях R_{ag} неравномерность отделяемого потока может уменьшиться, и при $R_{ag} = -1$ достичь величины

$$CVg_i(t) = |CVg(t) - Cva_i(t)| \quad (5.8)$$

Заметим, что если в этом случае коэффициенты вариации $CVg(t)$ и $Cva_i(t)$ одинаковы, то неравномерность отделяемого потока может быть сведена до минимума (теоретически, стать равной нулю).

В отличие от непрерывного деления исходного потока на отделяемые потоки, в случае, например, порционного деления, аналитическая оценка преобразования неравномерности плотности потока при делении встречается с немалыми трудностями. Опишем формирование отделяемого i -го потока при равных по продолжительности интервала времени отделения порциях.

Обозначим T – продолжительность отбора порции из исходного потока в i -й отделяемый поток при делении исходного потока на n потоков. Моменты времени начала ts_i и конца tf_i отделения будут равны

$$ts_i = iT + nT; \quad tf_i = (i+1)T + nT \quad (5.9)$$

В результате функция, описывающая изменения плотности i -го отделяемого потока, представляет собой «склею» фрагментов функции $g(t)$, вырезанных из нее моментами времени начала ts_i и конца tf_i отделения порций.

Формально такую «склею» можно записать в виде суммы произведений функции $g(t)$ и смещенных единичных функций Хевисайда $Y(t - t_i)$, у которых скачок значения с 0 на 1 происходит в момент t_i

$$g_i(t) = \sum_n g(t)(Y(t - iT - nT) - Y(t - (i+1)T - nT)) \quad (5.10)$$

Учитывая общие формулы для дисперсии и корреляционной функции вероятностных процессов, легко убедиться, что выполнить аналитические преобразования с доведением их до конечных выражений представляет немалые трудности и вряд ли может представить интерес с учетом возможностей современных методов компьютерного моделирования [124, 125].

В отличие от аналитических преобразований разработка и программная реализация алгоритма имитации деления исходного потока для любых видов деления не представляет сложностей. Такой алгоритм включает следующие шаги:

1. Генерация вектора упорядоченных по времени значений линейной плотности исходного потока $g(t)$, $t = 0, 1, \dots, Tm$. Здесь шаг квантования времени принят равным единице $dt = 1$, а квантованное время меняется от нуля до окончания модельного времени Tm . При моделировании случайного вектора учитываются его известные или предполагаемые вероятностные и статистические характеристики неравномерности, коррелированности и частотного состава.

2. Последовательное движение по элементам вектора $g(t)$, $t = 0, 1, \dots, Tm$ и имитация значений плотности $g_i(t)$, отделяемых в i -й поток в соответствии с моделируемым видом деления потока. «Приклейка» смоделированных значений к формируемым массивам - векторам значений плотности отделяемых потоков.

3. Расчет оценок статистических характеристик модельных потоков: исходного и отделяемых. Оценка ошибок оценивания и, в случае необходимости, коррекция шага квантования времени и длины моделируемых векторов.

Данный алгоритм был реализован в виде компьютерной программы в среде MATLAB и использовался при имитации процессов разрыхления и очистки на машинах РОА.

5.2 Структура балансовой модели динамики волокнистых потоков в наклонных очистителях

Схематически модель последовательности секций машины можно представить в виде, изображенном на рисунке 5.1 [102].

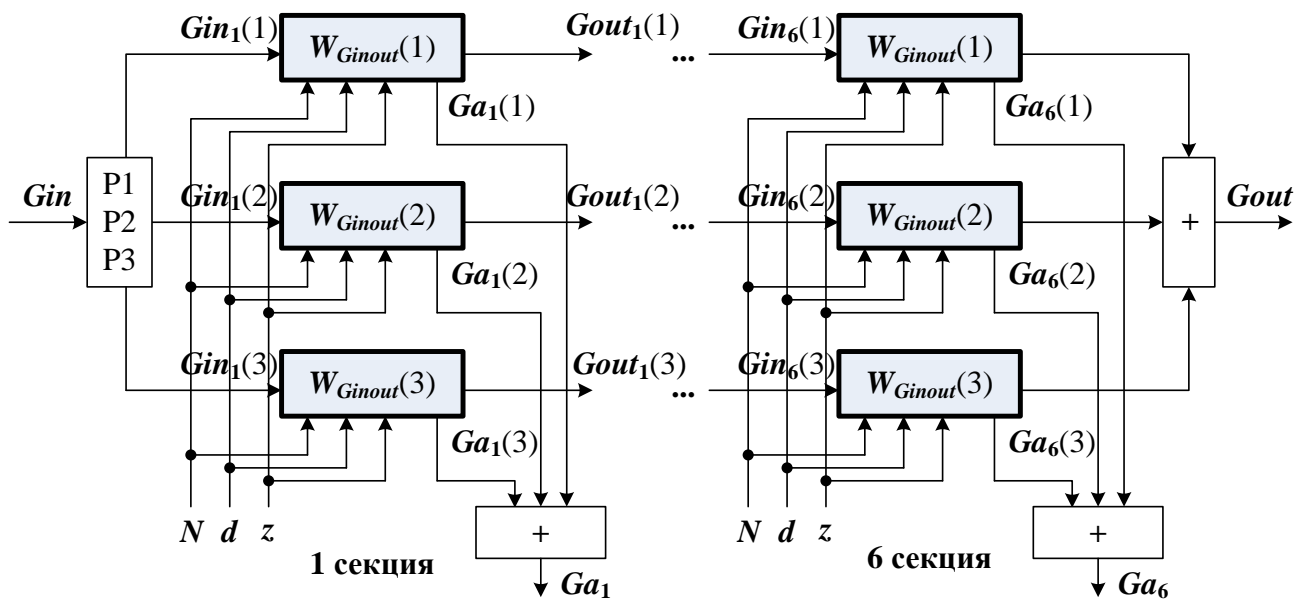


Рисунок 5.1 - Модель последовательности секций машины

На вход рабочей области 1 секции поступает поток волокнистой массы. В соответствии с долями содержащихся в нем компонентов $P1$, $P2$, $P3$ (прядомые волокна, непрядомые волокна, сорные примеси) он преобразуется согласно передаточной функции (2.9), причем параметры функции различны как для разных компонентов, так и для разных областей. Значения управляемых переменных одинаковы для всех компонентов, но могут быть разными для разных областей. Далее поток с выхода рабочей области 1 секции поступает на вход 2 секции и т.д.

Кроме выходящего из машины суммарного потока, содержащего все компоненты, имеются потоки волокнистой массы и сорных примесей - отходов на каждой секции G_a . Интенсивности этих потоков поддаются измерению и поэтому мо-

гут быть использованы в качестве контролируемых показателей эффективности работы машины.

Возмущения в работе моделируемой системы в основном связаны с вариациями в свойствах перерабатываемого сырья и постепенным изменением параметров рабочих органов из-за износа, разладок и т.п. В качестве контролируемых показателей можно использовать ограниченное количество характеристик, измеряемых со значительными погрешностями. Управление системой может осуществляться по каждой секции, но в силу взаимосвязи между секциями через проходящие сквозь них потоки управление должно также быть многосвязным.

Малые вариации величин позволяют рассматривать всю систему в линейном приближении. Отсутствие сведений о некоторых зависимостях между параметрами и характеристиками машины и процесса требуют построения системы управления, не зависящей от этой неопределенности. На основании всех этих условий и особенностей следует считать целесообразным и наиболее рациональным осуществить синтез робастной системы автоматического управления, обладающей достаточным запасом устойчивости и нечувствительности по отношению к возможным вариациям параметров и структуры системы.

На основании исследования процессов разрыхления можно сформулировать следующие основные задачи управления этими процессами.

Эффективное разрыхление и очистка клочков хлопка после кипных питателей является обязательным условием получения равномерной и чистой пряжи. Основной машиной в современной производственной цепочке, решающей эту задачу, является наклонный очиститель. Он состоит из последовательности рабочих зон «колковый барабан - колосниковая решетка», число которых доходит до шести. Барабаны вращаются от общего привода с постоянной скоростью, протаскивая клочки по колосникам. Скорость вращения барабанов не зависит от особенностей перерабатываемого материала. Оперативное управление на машине процессами очистки и разрыхления в настоящее время отсутствует.

При неправильном выборе режима работы очистителя возможны отрицательные эффекты: заполнение зазоров между колосниками, а также пространства

между колосниками и барабаном волокнистой массой; зажгучивание волокон в клочках; разрыв длинных волокон и переход в число непрядомых из-за их малой длины. Перечисленные эффекты могут возникнуть по следующим причинам:

- при поступлении в машину потока волокнистого материала большой массы;
- при малых разводках между колками и колосниковой решеткой;
- при неправильном выборе угла колосников относительно направления движения клочков;
- при неудачном выборе длины, формы и расположения колков на поверхности барабанов;
- при слишком высокой или, наоборот, слишком низкой скорости вращения барабанов.

Правильный выбор приведенных выше параметров и оперативное управление ими в ходе технологического процесса повышают эффективность очистки и разрыхления, позволяют сократить число барабанов в агрегате и снизить энергозатраты на обработку волокнистой массы.

5.3 Разработка балансовых Simulink-моделей разрыхления и очистки волокнистой массы

Оптимизация параметров технологического процесса разрыхления и очистки, а также синтез системы управления этим процессом требуют разработки динамической модели объекта [156]. Динамика взаимодействия отдельного клочка с рабочими органами машины разработана и описана в публикациях [68, 114].

Для синтеза системы управления требуется разработка соответствующей математической модели. Модель может быть построена на основе базовых уравнений сохранения материального баланса для потоков волокнистой массы. Можно выделить потоки трех видов волокнистой массы, участвующих в технологическом процессе разрыхления и очистки:

- 1) потоки прядомых волокон;

- 2) потоки непрядомых волокон (короткие, зажгученные, поврежденные);
- 3) потоки сорных примесей.

Рассмотрим уравнения материального баланса на примере потоков прядомых волокон (для всех видов потоков уравнения идентичны). Не будем учитывать распределение волокнистой массы по ширине машины, ограничившись одномерными потоками.

Схема потоков для двух последовательных барабанных секций показана на рисунке 5.2. Часть волокнистой массы, поступившей на вход (поток $G_{in}(t)$), в рабочей области секции (закрашенный сегмент) отделяется в отходы (поток $G_a(t)$). Другая часть волокнистой массы переходит в следующую секцию (поток $G_{outF}(t)$). Оставшаяся часть волокнистой массы возвращается на вход рабочей области секции (поток $G_{outB}(t)$):

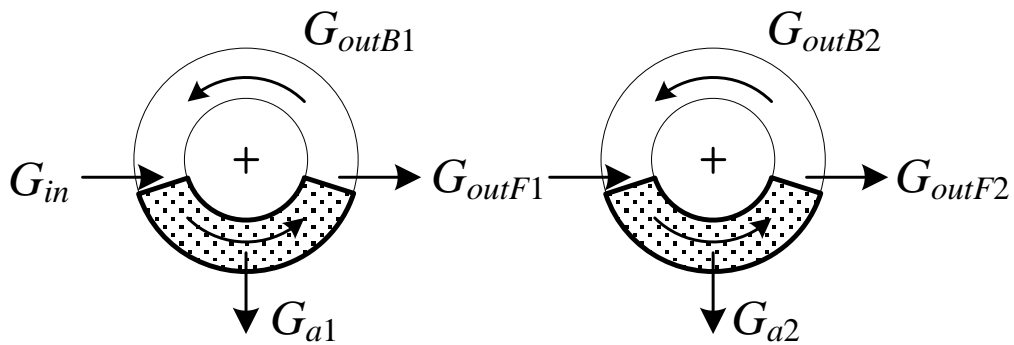


Рисунок 5.2 - Потоки волокнистой массы в двух секциях очистителя-рыхлителя

Запишем уравнение материального баланса для каждого компонента:

$$\frac{dQ(i, j, t)}{dt} = G_{in}(i, j, t - \tau) + G_{outB}(i, j, t - \theta) - G_a(i, j, t) - G_{outF}(i, j, t) \quad (5.11)$$

Здесь индекс i нумерует компоненты волокнистой массы: $i = 1$ – прядомое волокно; $i = 2$ – непрядомое волокно; $i = 3$ – сорные примеси. Индекс $j = 1, \dots, 6$ указывает номер секции. $Q(i, j, t)$ – масса i -го компонента волокнистой массы в рабочей области j -й секции. Величины транспортного запаздывания τ и θ связаны с движением волокнистой массы в пределах сегмента рабочей области и сегмента возврата $\tau = \alpha(2\pi N)^{-1}$ и $\theta = \beta(2\pi N)^{-1}$, где α и β – углы соответственно сегментов рабочей области и области возврата, причем $\alpha + \beta = 2\pi$, N – число оборотов барабана.

При непрерывном технологическом процессе система работает в стационарном режиме и изменения переменных величин во времени представляют собой малые вариации, поэтому уравнение можно применять в линеаризованной форме. Интенсивности выходящих из секции потоков зависят от объема волокнистой массы в рабочей области. Эти зависимости по тем же причинам можно приближенно считать линейными:

$$G_{outF}(t) = k_F Q(t); \quad G_{outB}(t) = k_B Q(t); \quad G_a(t) = a Q(t) \quad (5.12)$$

С учетом (5.12) преобразуем уравнение (5.11):

$$\frac{dQ(t)}{dt} + (k_F + a)Q(t) - k_B Q(t - \theta) = G_{in}(t - \tau) \quad (5.13)$$

Все входящие в уравнения (5.12) и (5.13) величины зависят от индексов i и j . Коэффициенты пропорциональности k_F , k_B и a определяют выход компонентов волокнистых потоков из общей массы материала в рабочей области секции. Эти коэффициенты зависят от параметров конфигурации и режима работы машины. В малом диапазоне варьирования параметров эти зависимости будут линейными.

Наиболее удобными с точки зрения оперативного управления процессом являются такие параметры, как скорости вращения барабанов $N(j)$, соотношения скоростей барабанов соседних секциях $E(j) = N(j+1)/N(j)$, разводка между колосниковой решеткой и колками барабана d , ширина щели между колосниками z . Кроме того, коэффициенты выхода зависят от массы компонента $Q(i, j)$ и заполнения волокнистой массой $Q(j) = Q(1, j) + Q(2, j) + Q(3, j)$ рабочей области секции барабана. Из перечисленных величин можно составить три безразмерных фактора $E(j)$, $p(i, j) = Q(i, j)/Q(j)$ и $u(j) = z(j)/d(j)$.

При непрерывном и стационарном технологическом процессе связь между этими факторами и коэффициентами выхода приближенно может быть выражена пропорциями:

$$\begin{aligned} a(1, j) &= \frac{p(1, j)z(j)N(j)}{\alpha R}; \\ a(2, j) &= p(2, j)u(j)N(j); \quad a(3, j) = p(3, j)u(j)N(j); \\ k_F(i, j) &= p(i, j)E(j)N(j); \quad k_B(i, j) = p(i, j)\frac{N(j)}{E(j)}; \quad i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (5.14)$$

Здесь R – радиус середины сегмента рабочей области. Вариации во времени плотности потока и доли компонентов волокнистой массы на входе машины передаются всем потокам.

Для стабилизации процесса и снижения этих вариаций наиболее удобным показателем, пригодным в качестве контролируемого параметра в технологической системе, является масса отходов, выделяющихся в каждой секции, т.е. интенсивности потоков:

$$W(j,t) = \sum_{i=1}^3 G_a(i, j, t) \quad (5.15)$$

Для моделирования системы в соответствии с приведенными соотношениями (5.12) и (5.15), а также уравнением (5.13) использована компьютерная реализация численного метода. Система дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом решалась методом Рунге-Кутты 4-го порядка в системе MATLAB.

Структура алгоритма моделирования динамики работы наклонного барабанного очистителя-рыхлителя приведена на рисунке 5.3. Модель была реализована в Simulink.

Маска, отражающая входные и выходные параметры и переменные модели, для одной секции машины изображена на рисунке 5.4 (а), содержимое маски – на рисунке 5.4 (б).

На рисунке 5.5 приведена модель блока, имитирующего преобразование отдельного компонента в секции.

Эти модели построены в соответствии с приведенными выше соотношениями и зависимостями (5.12) и (5.15), а также уравнением (5.13). Последовательное соединение шести моделей секций в соответствии с числом барабанов дает модель всей машины в целом. Входными величинами для модели являются трехкомпонентный поток $G_{in}(i, t)$, $i = 1, 2, 3$ и параметры $z(i, j, t)$, $d(i, j, t)$, $N(j, t)$, а выходными величинами $G_a(i, j, t)$, $G_{outF}(i, j, t)$, $W(j, t)$, которые позволяют использовать модель для синтеза системы управления.

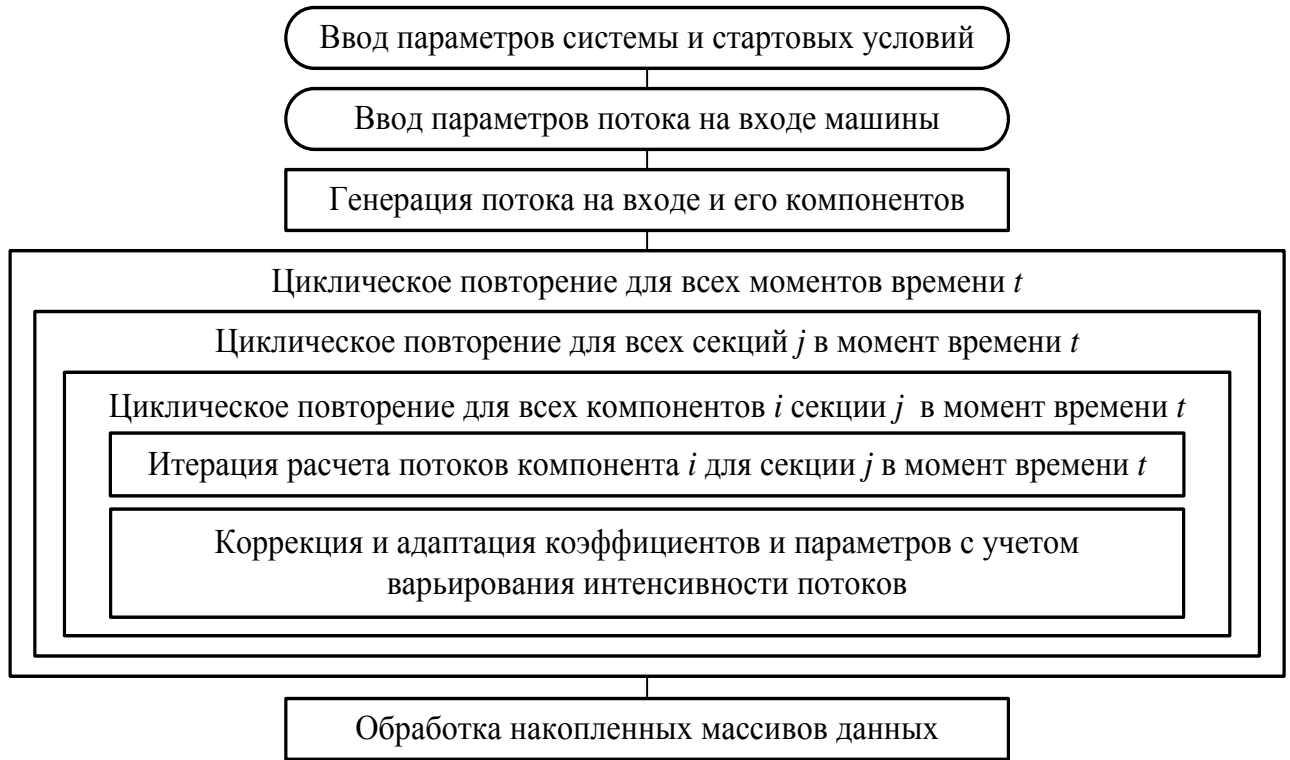


Рисунок 5.3. Структурная схема компьютерного моделирования динамики работы наклонного барабанного очистителя-рыхлителя

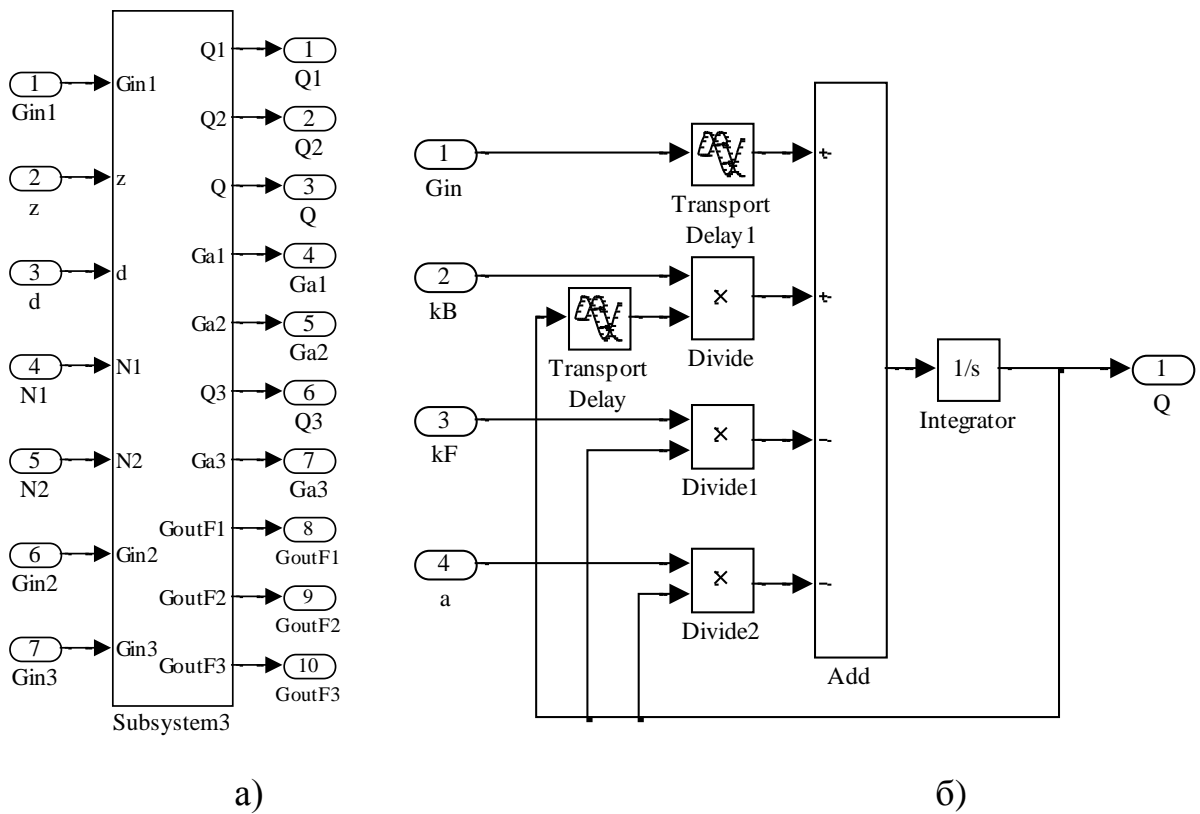


Рисунок 5.4 - Маска модели секции с перечнем входных и выходных величин (а); модель преобразования потока компонента в секции (б)

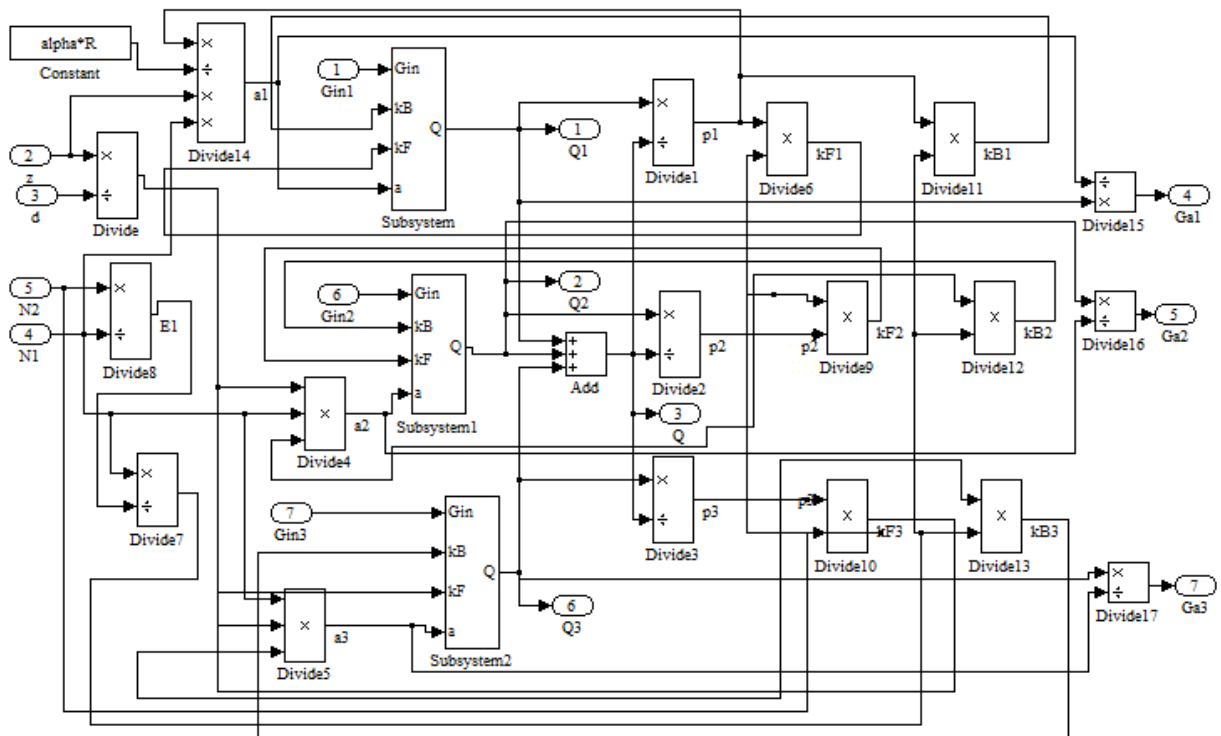


Рисунок 5.5 - Модель секции (под маской)

Снижение цен на управляемый привод делает экономически оправданным установку отдельных управляемых приводов на каждый из барабанов. Целью исследования является целесообразность такой модернизации машины с точки зрения повышения эффективности технологического процесса.

Особенностью управления в данной системе является отсутствие возможности непосредственного контроля управляемых показателей, т.е. степени разрыхления и очистки клочков на выходе машины. Единственной величиной, которую можно непрерывно измерять с помощью автоматических весов в процессе - это вес сорных примесей и волокон, выпадающих в бункеры под колосниковыми решетками. Эта величина лишь косвенно связана с контролируемыми характеристиками потока на выходе машины. С увеличением интенсивности процесса (скорости барабанов, углов наклона колосников) возрастает масса выпадающих в отходы не только сорных примесей (положительный эффект), но и прядого волокна (отрицательный эффект).

Управляемой величиной может быть скорость вращения барабанов. Вопросы построения систем автоматического регулирования с запаздыванием были рассмотрены в работах [157-159].

На рисунке 5.6 приведена структурная схема одной рабочей зоны машины [160].

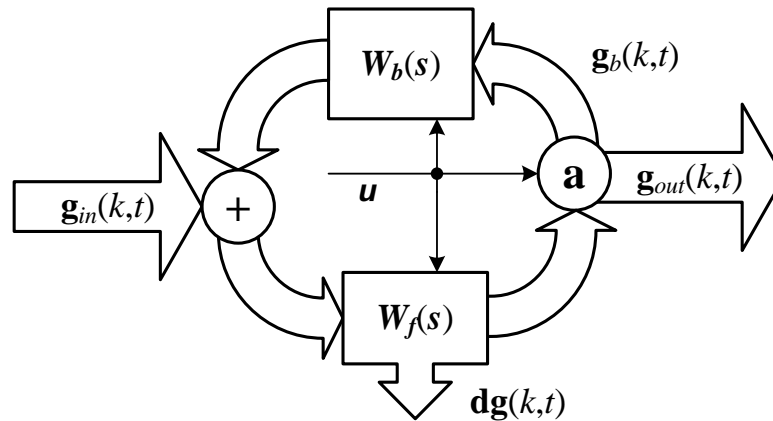


Рисунок 5.6 - Структурная схема рабочей зоны наклонного очистителя

На схеме $g_{in}(k,t)$, $g_{out}(k,t)$ - интенсивности потоков клочков на входе и выходе зоны k в момент времени t . Характеристика $g = \{g_i, i = 1,2,3\}$ - вектор из трех компонентов интенсивности потока: прядомых волокон, не прядомых волокон и сорных примесей. В производственных условиях практически невозможно осуществить отдельную идентификацию и оценку интенсивностей каждого компонента потока. Поэтому далее будем рассматривать лишь интенсивности интегрально-го потока всех его составляющих.

Динамика потоков в одной зоне машины может быть описана следующими уравнениями

$$G_1(t) = G_{in}(t) + (1 - a(t))G_2(t - \tau_2) \quad (5.16)$$

$$dG(t) = \int_{t-\tau_1}^t B(z)G_1(z)dz = b(t)G_1(t - \tau_1) \quad (5.17)$$

$$G_2(t) = (1 - b(t))G_1(t - \tau_1) \quad (5.18)$$

$$G_{out}(t) = a(t)G_2(t) \quad (5.19)$$

В этих формулах $G_{in}(t)$ и $G_{out}(t)$ - потоки клочков на входе и выходе рассматриваемой рабочей зоны машины; $a(t)$ - доля потока на выходе зоны, переходящая в следующую зону; $1 - a(t)$ - доля этого потока, возвращающаяся на вход зоны, что учтено в уравнении (5.16); $b(t)$ - доля потока, выделяющаяся в отходы; τ_1 и τ_2 -

время транспортного запаздывания при движении потока по колосниковой решетке и возврата от выхода к входу зоны.

Оценка средних значений величин, входящих в уравнения (5.16) - (5.19), приводит к следующим результатам: $a = 0.95$; $b = 0.03$; $\tau_1 = \tau_2 = 0,1$ с. При этом коэффициент вариации потока на входе зоны может достигать 30%.

На рисунке 5.7 приведена Simulink-модель зоны, построенная на основе уравнений (5.16) - (5.19) и средних значений параметров. Включение в систему управления по отклонению ПИД-регулятора с контролем потока, поступающего в отходы, при подборе оптимальных значений параметров регулятора позволяет получить приемлемый по качеству режим регулирования.

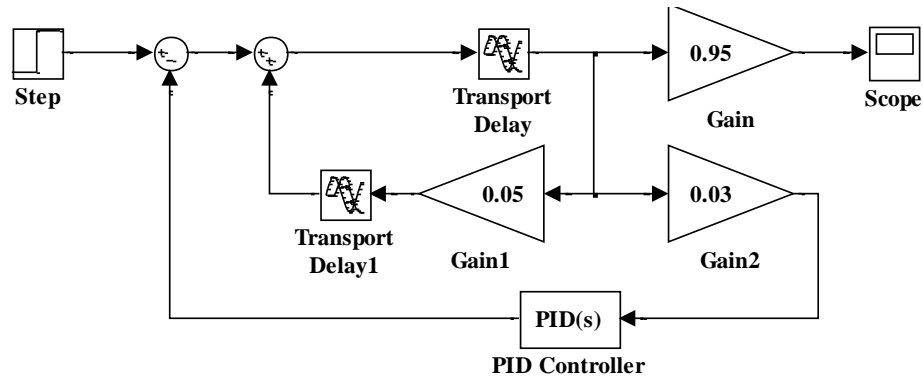


Рисунок 5.7 - Модель рабочей зоны рыхлителя

На рисунке 5.8 представлен переходный процесс по каналу $G_{in}(t) \rightarrow G_{out}(t)$.

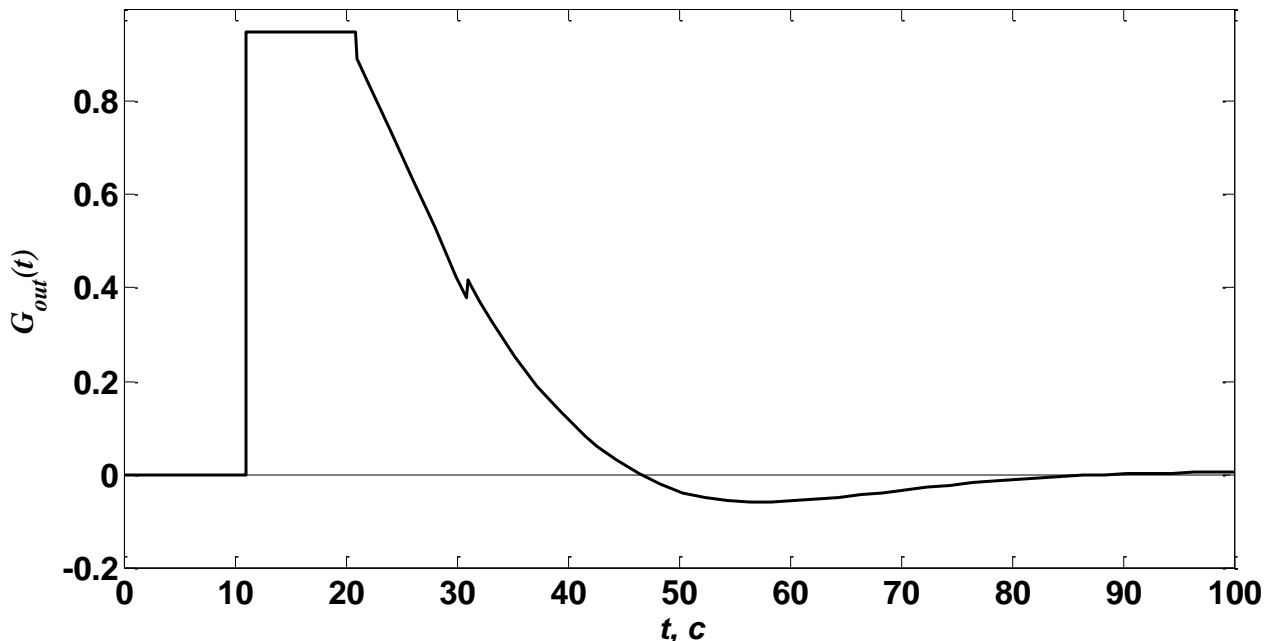


Рисунок 5.8 - Переходный процесс $G_{out}(t)$ на выходе зоны при ПИД-регуляторе

Если записать передаточную функцию ПИД-регулятора в виде

$$W_c(s) = (K_p + K_I/s + K_D s) \quad (5.20)$$

то значения параметров равны $K_p = 1,889$; $K_I = 0,97647$ и $K_D = 0$.

Непосредственно на машине поддается измерению лишь суммарная масса накопленных отходов. Поэтому величина интенсивности потока, поступающего в отходы, может быть оценена лишь путем дифференцирования этой накопленной массы отходов. Учитывая, что все потоки содержат значительную случайную составляющую, ошибка такой оценки будет весьма значительной.

Более простой и дешевый вариант системы регулирования, основанный на измерении суммарного потока отходов со всех шести зон машины и управлении потоком на входе машины с применением хорошо зарекомендовавшего себя ПИД-регулятора может быть осуществлен по схеме, Simulink-модель которой приведена на рисунке 5.9. Включенные в модель подсистемы Subsystem - Subsystem5 моделируют шесть последовательных зон обработки потока клочков и соответствуют модели зоны (без ПИД-регулятора), приведенной на рисунке 5.7. При этом регулятор в качестве сигнала рассогласования принимает вариацию суммарной интенсивности потока отходов от всех зон машины. Суммирование потоков осуществляется блоком суммирования модели.

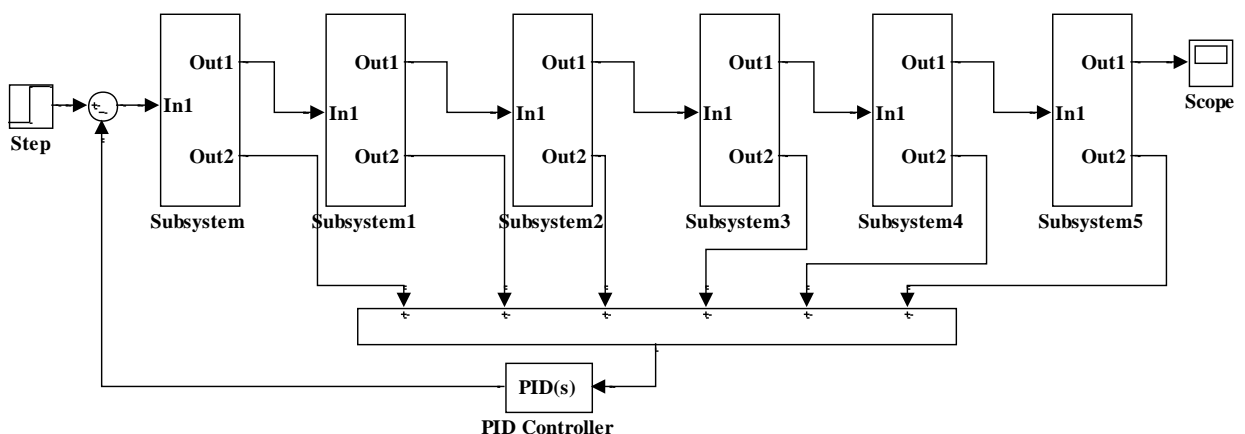


Рисунок 5.9 - Модель шестибарабанного очистителя-рыхлителя с ПИД-регулятором

На рисунке 5.10 приведен переходный процесс по каналу $G_{in}(t) \rightarrow G_{out}(t)$. Из рисунка видно, что ПИД-регулятор и в этом случае обеспечивает регулирование системы. Оптимальные настройки параметров регулятора для построенной модели равны $K_p = 1,9218$; $K_I = 0,07693$, $K_D = -66,6368$.

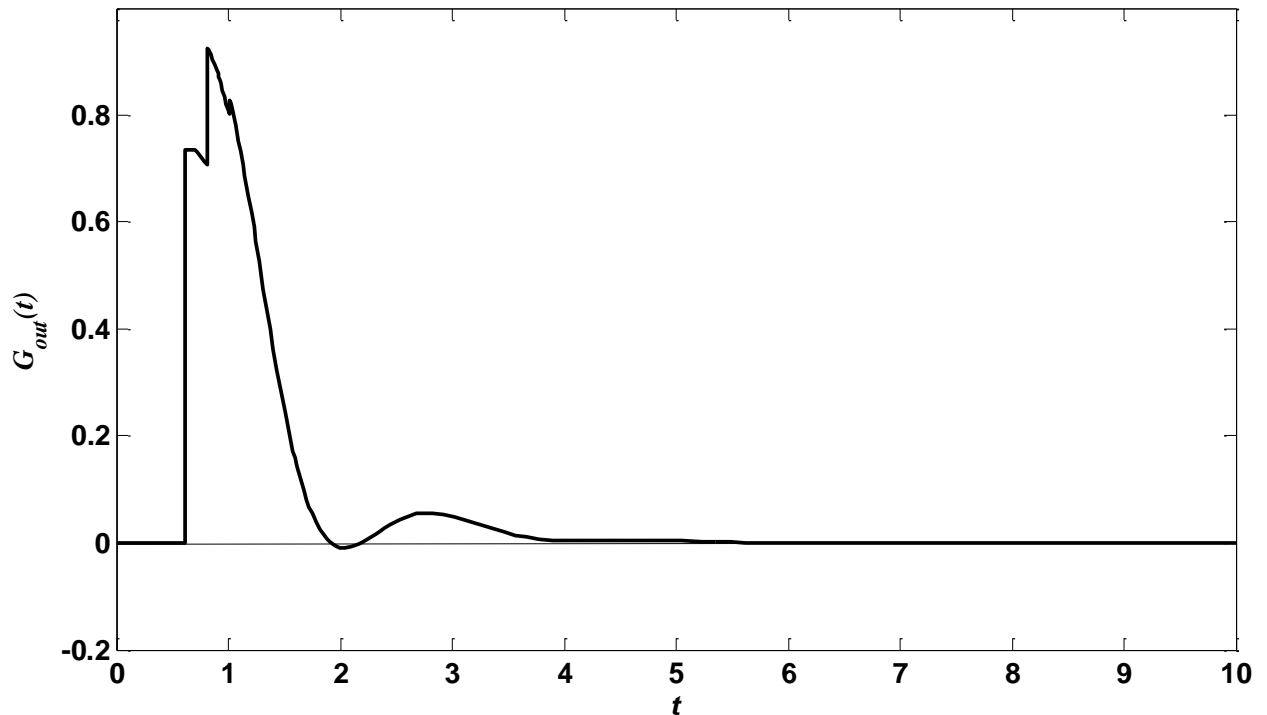


Рисунок 5.10 - Переходный процесс $G_{out}(t)$ на выходе машины при ПИД-регуляторе

Однако недостатком этой схемы регулирования является высокая чувствительность настроек регулятора к вариациям постоянных времени и времени транспортного запаздывания рабочих зон, доле отходов и возврата, а также случайным вариациям потока на входе. Поэтому имеет смысл осуществить синтез одного из вариантов, используемых для систем с запаздыванием предикторов Смита или его альтернатив [161].

В качестве примера такой системы регулирования на рисунке 5.11 приведена схема регулятора с предиктором Смита, и на рисунке 5.12 - переходные процессы по каналу $G_{in}(t) \rightarrow G_{out}(t)$ при отсутствии регулирования и при использовании регулятора. Скорость работы такого регулятора не слишком большая, но этот регулятор обладает значительно большей робастностью к перечисленным выше возмущающим факторам по сравнению с ПИД-регулятором.

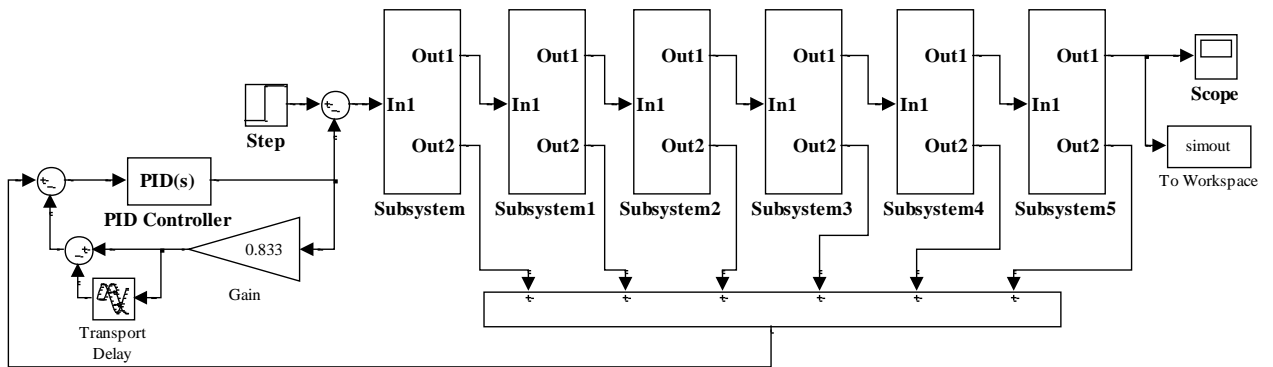


Рисунок 5.11 - Модель системы регулирования с предиктором Смита

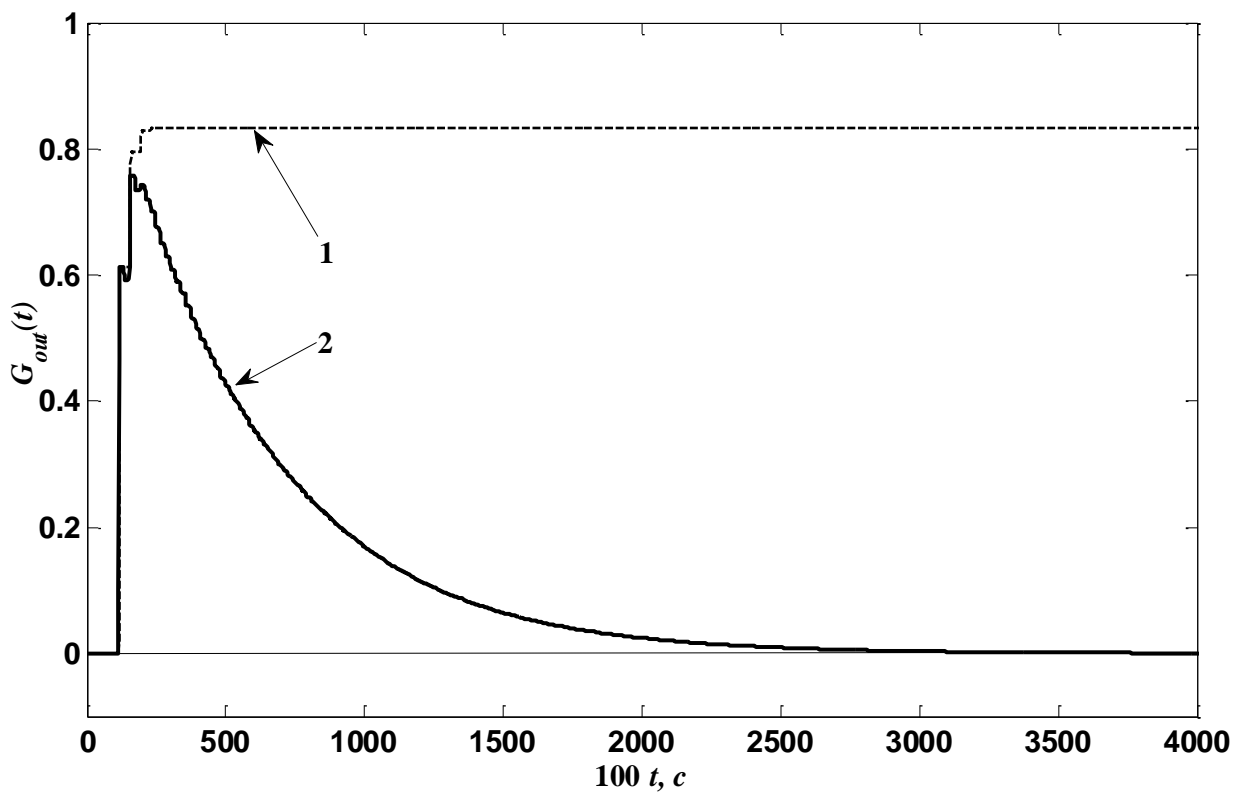


Рисунок 5.12 - Переходный процесс $G_{out}(t)$ на выходе машины при отсутствии регулирования (1) при применении предиктора Смита (2)

При синтезе систем автоматического управления производственными процессами используется ПИД-регулятор как один из наиболее популярных и зарекомендовавших себя регуляторов. Он в большинстве случаев обеспечивает удовлетворительное качество регулирования линейными и квазилинейными системами и достаточно дешевый в изготовлении.

ПИД-регулятор распространяется в виде серийных блоков, которые допускают настройку параметров, приспособлявая регулятор к конкретному производственному процессу [162]. Для управления процессами разрыхления и очистки волокнистой массой такой класс регуляторов является оптимальным, поскольку статистический характер данного процесса не позволяет ставить задачи высокоточного регулирования и не предъявляет высоких требований к скорости регулирования.

Однако в классе ПИД-регуляторов остается задача оптимального выбора его параметров. Эта задача в течение многих лет решалась различными способами и в настоящее время доведена до практически полной автоматизации, примером чего может служить, например, система оптимизации регулирования, встроенная в MATLAB. Эти системы ориентированы на определенные критерии регулирования, поэтому представляет интерес сравнение качества подбора регуляторов в зависимости от различных критериев управления [163, 164].

В качестве классического критерия, который чаще всего используется, рассмотрим интегральный среднеквадратичный критерий, который записывается в виде:

$$W_Q(K_p, T_i, K_d) = \int_0^{\infty} (y(t) - z)^2 dt \rightarrow \min_{K_p, T_i, K_d}, \quad (5.21)$$

где K_p , T_i , K_d – параметры настройки соответственно пропорционального (K_p), интегрального (T_i) и дифференциального (K_d) элементов регулятора; $y(t)$ – переходная функция системы при единичном возмущающем воздействии на вход системы.

Этот критерий хорошо учитывает свойства переходного режима на всем его протяжении, причем его структура такова, что он в наибольшей степени реагирует на большие отклонения от заданного значения $z = 0$.

В качестве альтернативных критериев рассмотрим два критерия. Интегральный критерий абсолютных разностей

$$W_A(K_p, T_i, K_d) = \int_0^{\infty} |y(t) - z| dt \rightarrow \min_{K_p, T_i, K_d}, \quad (5.22)$$

является более чувствительным к малым отклонениям по сравнению со средне-квадратическим критерием.

Минимаксный критерий

$$W_M(K_p, T_i, K_d) = \max_{0 < t < \infty} (|y(t) - z|) \rightarrow \min_{K_p, T_i, K_d} \quad (5.23)$$

обеспечивает минимизацию величины перерегулирования в системе.

Для того чтобы выполнить сравнение этих критериев, была смоделирована система управления, которая включала в себя объект, представляющий собой линейную систему с передаточной функцией второго порядка с фиксированными значениями коэффициентов, и ПИД-регулятор одноконтурной системы управления по отклонению. Начальные параметры ПИД-регулятора задавались произвольно, а для подбора оптимальных значений использовалась программа адаптивного случайного поиска.

Хотя эта программа требует достаточно большого времени для осуществления поиска оптимальных значений параметра, но зато практически исключается возможность ее «зависания» на локальных экстремумах, что возможно для этих критериев.

Одним из вариантов регулирования процессов разрыхления и очистки является регулирование за счет поддержания оптимальных скоростей барабанов. Модель процесса позволяет подобрать оптимальное соотношение скоростей, а регулятор позволяет поддерживать эти скорости.

Блок-схема алгоритма адаптивного случайного поиска представлена на рисунке 5.13.

В результате работы программы получились следующие графики, представленные на рисунках 5.14, 5.15, 5.16.

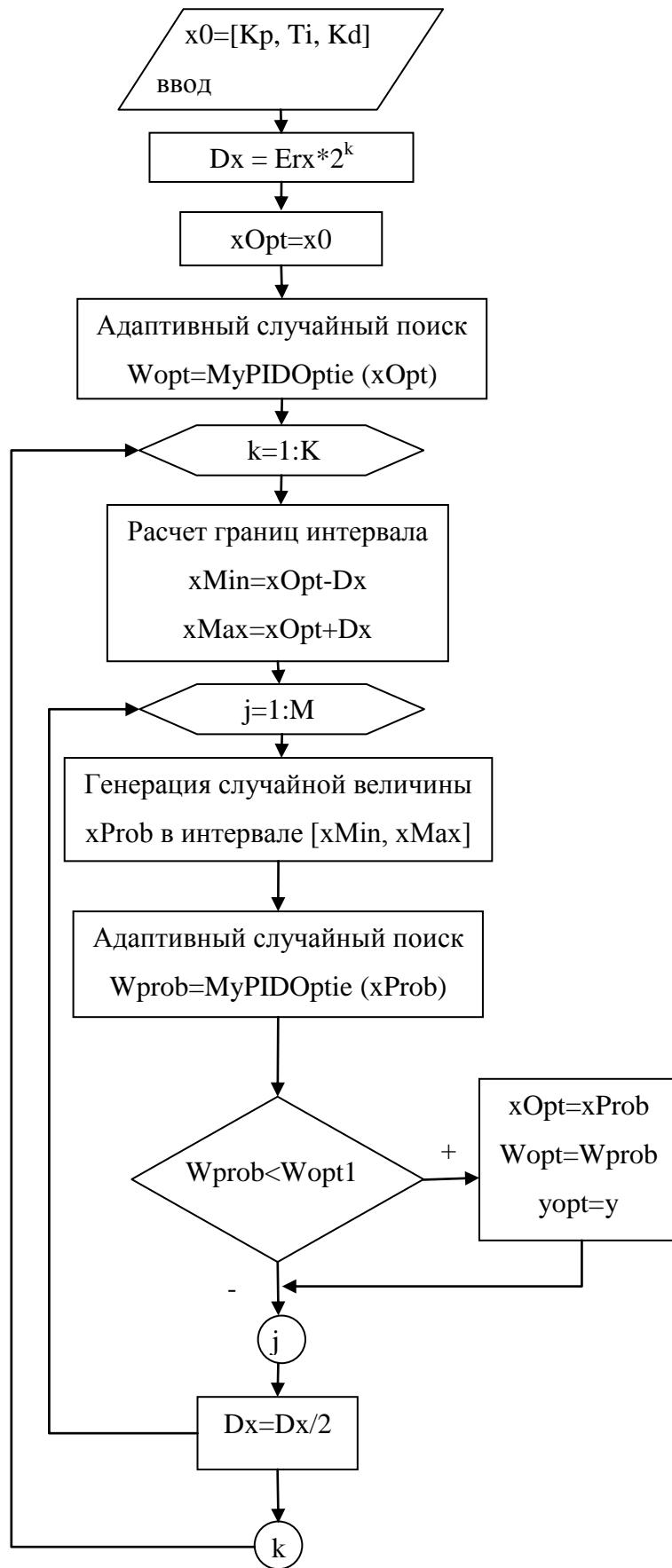


Рисунок 5.13 - Блок-схема алгоритма адаптивного случайного поиска

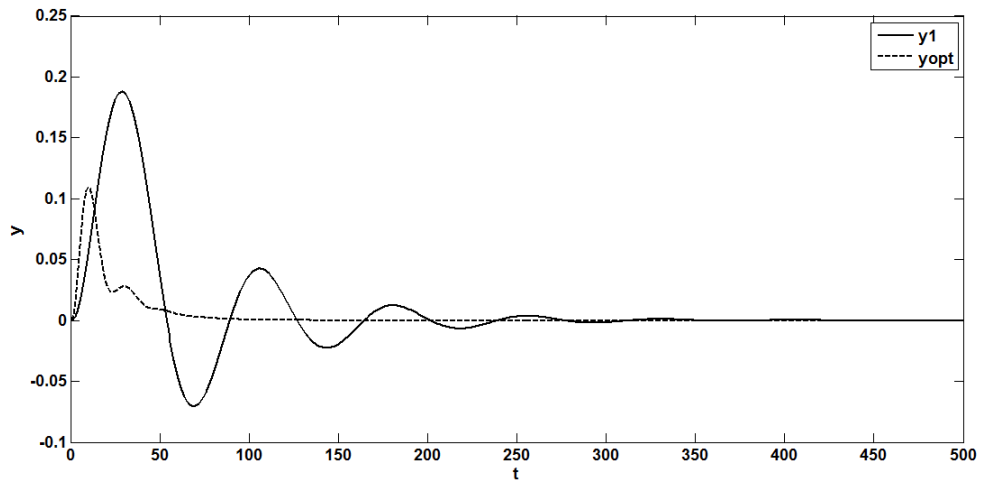


Рисунок 5.14 – Управляющий сигнал после оптимизации регулятора по квадратичному критерию

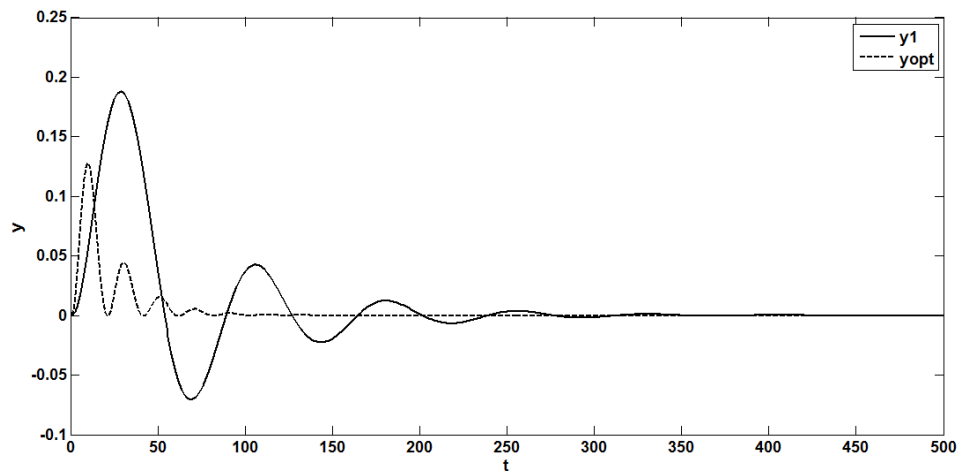


Рисунок 5.15 - Управляющий сигнал после оптимизации регулятора по критерию абсолютных разностей

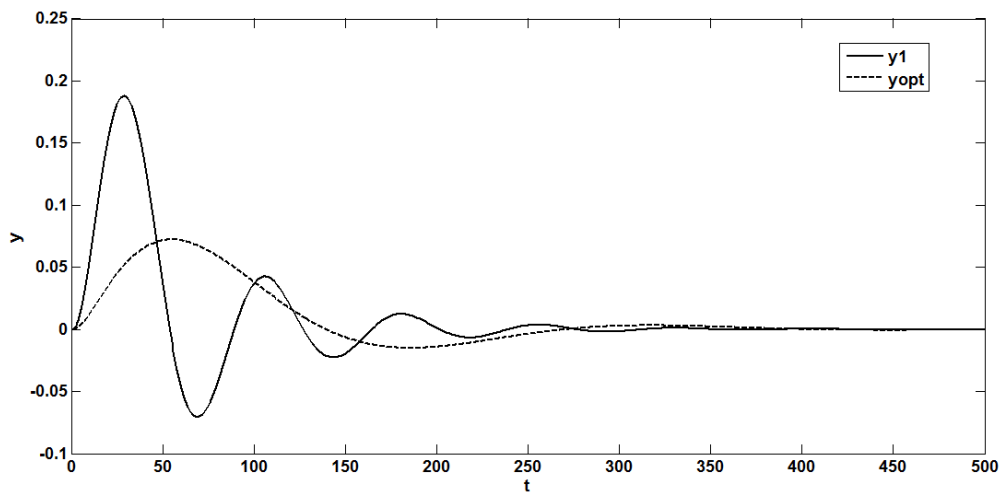


Рисунок 5.16 - Управляющий сигнал после оптимизации регулятора по минимаксному критерию

Сравнение критериев выполнено на неформальном уровне. Из графиков переходных режимов следует, что наиболее предпочтительным из трех критериев является минимаксный критерий оптимизации. По этому критерию величина перерегулирования наименьшая из трех сравниваемых вариантов при малой колебательности и примерно одинаковой продолжительности переходного процесса.

Выводы по пятой главе

1. Разработана динамическая модель многобарабанного наклонного очистителя на основе материального баланса волокнистых потоков. Модель, реализованная в Simulink-системе MATLAB, позволяет имитировать технологический процесс с учетом геометрических и кинематических параметров, управляемых переменных и контролируемых показателей эффективности процесса. Характерной чертой системы является наличие в ней большого транспортного запаздывания, что создает трудности в синтезе системы регулирования.

2. Анализ рассмотренных вариантов систем регулирования: по отдельным зонам машины; для всей машины; и системы с предиктором Смита, - показал, что наиболее перспективным с точки зрения устойчивости и экономичности является последний из перечисленных вариантов.

3. Сравнение критериев управления процессами разрыхления и очистки: интегрального среднеквадратичного критерия, интегрального критерия абсолютных разностей и минимаксного критерия, - показало, что наиболее перспективным для разработки системы управления РОА является минимаксный критерий.

4. Сравнение классических вариантов систем управления показало, что подобные системы могут существенно повысить эффективность процессов разрыхления и очистки, поэтому целесообразно ставить задачу о синтезе систем автоматического регулирования, как по зонам очистителей, так и в целом всей машины.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Анализ существующих теоретических и экспериментальных работ по исследованию процессов разрыхления и очистки волокнистой массы показал, что наибольший эффект очистки достигается при обработке клочков волокон, находящихся в свободном состоянии. Процесс носит вероятностный характер, из-за чего трудно поддается исследованию экспериментальными методами.

2. Установлено, что наиболее перспективным и мощным средством исследования подобного рода процессов являются метод компьютерной имитации.

3. Разработаны статистические модели имитации многостадийного процесса разрыхления и очистки волокнистой массы с использованием теории ветвящихся процессов. С помощью разработанных моделей найдены закономерности преобразования массы, плотности и содержания сорных примесей при разрыхлении и очистке клочков.

4. Установлено, что для эффективного разрыхления и очистки клочков важное значение имеет распределение клочков по массе и плотности. Числовые характеристики: математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, медиана, - недостаточно информативны для анализа процесса.

5. Разработана динамическая модель преобразования линейной плотности волокнистого потока с учетом его компонентного состава, и найдены зависимости очистки и разрыхления клочков от скоростей клочков, воздушных потоков, числа колосников, загруженности объема рабочей камеры.

6. Найдена зависимость спектрального состава неравномерности потока клочков по линейной плотности от скорости рабочих органов, разводки между колосниками и колками и диаметром барабанов.

7. Установлено, что очистительные устройства с числом барабанных секций от четырех до шести оптимальны для очистки и разрыхления клочков, поскольку результаты моделирования доказывают, что при таком числе рабочих секций распределение массы клочков достигает предельной, логарифмически нормальной формы.

8. Установлено, что масса и плотность клочка и масса удаляемых сорных примесей в большей степени зависят от вероятности деления, чем вероятности разрыхления, и с ростом разрыхленности клочков скорость процессов разрыхления и очистки замедляется.

9. Предложены эмпирические зависимости между характеристиками процессов разрыхления и очистки и конструктивными и кинематическими параметрами: скоростями рабочих органов и клочков, числом и разводкой колосников, объемом рабочей зоны, кинетической энергией клочков, - основанные на их асимптотических свойствах и теории размерностей величин. Проверка этих зависимостей показала их адекватность моделируемым процессам. Установлено, что наибольшее влияние на среднее значение массы и плотности клочка после деления оказывает кинетическая энергия клочка.

10. Разработаны новая методика оценки преобразования распределений характеристик волокнистых потоков по экспериментальным данным на входе и выходе технологического перехода и алгоритмы моделирования одномерного и двумерного распределений волокон по длине и тонине на основе эмпирических данных шерстяных волокон после лабаза, в кардной и гребенной ленте и очесе.

11. Получены двумерные распределения волокон шерсти, учитывающие величину корреляции между длиной и тониной волокон. Получены гистограммы длин волокон при разделении волокнистого потока на прочес и очес в соответствии с принятым правилом рассортировки.

12. Сформулированы предложения по синтезу и требования к автоматической системе управления процессами разрыхления и очистки волокнистой массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев, Ф. М. Бумагопрядильное производство. Часть 1. Трепание и чесание [Текст] / Ф. М. Дмитриев – М., 1876. - 267 с.
2. Фёдоров, С. А. Механическая технология волокнистых веществ : Бумагопрядение : Курс, чит. в Имп. Техн. уч-ще в 1901 г. [Текст] / С.А. Федоров. – М.: лит. О-ва распространения полез. книг, 1901. – 766 с.
3. Кузьмин, Л. М. Хлопкопрядение (кардное) [Текст] : Утв. ГУУЗ НКЛП СССР в качестве учебника для студентов текстильных вузов / Проф. Л. М. Кузьмин - Л.: Гизлегпром, 1938. - 668 с.
4. Владимиров, Б. М. Анализ процесса на машинах разрыхлительно-трепального агрегата [Текст] / Б. М. Владимиров. – М.: Гизлегпром, 1959. – 178 с.
5. Владимиров, Б. М. Высокоэффективный разрыхлительно-трёпальный агрегат [Текст] / Б. М. Владимиров, В. А. Молитвин // Текстильная промышленность. – 1971. - № 3. - С. 30-31.
6. Бадалов, К. И. Прядение и других текстильных волокон: учебник для сред. спец. учеб. Заведений [Текст] / К. И. Бадалов, В. В. Жоховский, Н. А. Осмин – М.: Легпромбытиздат, 1988. – 448 с. – ISBN 5-7088-0214-6.
7. Хосровян, Г. А. Теория и практика очистки и подготовки полуфабриката к прядению [Текст] / Г. А. Хосровян, Я. М. Красик; М-во общ. и проф. образования РФ, Иван. гос. текстил. акад. - Иваново : Иван. гос. текстил. акад., 1998. – 255 с. - ISBN 5-88954-041-6.
8. Плеханов, А. Ф. Разработка способов очистки волокнистых материалов и создание безотходной технологии в хлопкопрядении [Текст] : дис. ... доктора техн. наук : 05.19.03 / Плеханов Алексей Фёдорович – М., 1994. – 320 с.
9. Носкова, С. А. Разработка процессов разрыхления и очистки волокнистой массы на двухрядных разрыхлителях-чистителях [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.02 / Носкова Светлана Аркадьевна. – М., 2005. – 191 с.
10. Севостьянов, А. Г. Механическая технология текстильных материалов [Текст] : [Учеб. для вузов по технол. спец. текстил. пр-ва / А. Г. Севостьянов,

Н. А. Осьмин, В. П. Щербаков и др.]; Под ред. А. Г. Севостьянова. - М. : Легпромбытиздат, 1989. - 508 с. - ISBN 5-7088-0118-2.

11. Терентьев, В. Н. Новый наклонный очиститель для переработки угаров [Текст] / В. Н. Терентьев, А. А. Подколзин, В. Н. Кондратов // Текстильная промышленность. – 1978. - № 7.

12. Малафеев, Р. М. Машины текстильного производства : Учеб. пособие для студентов вузов [Текст] / Р. М. Малафеев, Ф. Ф. Светик. – М.: Знание : Машиностроение, 2002. - 495 с. - ISBN 5-87633-062-0.

13. Горский, Д. А. Исследование систем автоматического управления кипными питателями с верхним отбором волокна методами компьютерного моделирования [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 : защищена 20.11.2008 / Горский Дмитрий Андреевич; [Место защиты: Моск. гос. текст. ун-т им. А. Н. Косыгина]. – М., 2008. - 182 с.

14. Гаспарян, Г. Л. Моделирование систем бункерного питания кардочесальных машин и их централизованного управления [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Гаспарян Георгий Леонович; [Место защиты: Моск. гос. текст. ун-т им. А. Н. Косыгина]. - Москва, 2005. - 169 с.

15. Вахромеева, Е. Н. Исследование моделей управления запасами для систем автоматизированного управления хлопко-прядельным производством [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Вахромеева Екатерина Николаевна; [Место защиты: Моск. гос. текст. ун-т им. А.Н. Косыгина]. - Москва, 2007. – 173 с.

16. Зензинова, Ю. Б. Автоматизация методов прогнозирования эффективности процессов смешивания на смесовых и ленточных машинах [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Зензинова Юлия Борисовна; [Место защиты: Моск. гос. текст. ун-т им. А.Н. Косыгина]. - Москва, 2005. - 247 с.

17. Горячая, И. С. Автоматизация методов исследования структуры поперечных сечений двухкомпонентной пряжи [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Горячая Инна Степановна; [Место защиты: Моск. гос. текст. ун-т им. А.Н. Косыгина]. - Москва, 2001. - 290 с.

18. Подрезова, В. И. Компьютерное моделирование процессов деления потоков волокнистого материала и управление ими [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Подрезова Виктория Игоревна; [Место защиты: Моск. гос. текст. ун-т им. А. Н. Косыгина]. – М., 2008. – 150 с.

19. Терентьев, В. Н. Чиститель осевой ЧО [Текст] / В. Н. Терентьев // Текстильная промышленность – 1970. - № 6. - С. 43-46.

20. Официальный сайт фирмы Trützschler [Электронный ресурс]. - <http://www.truetzschler.de> - (Дата обращения: 11.03.2013).

21. Официальный сайт фирмы Marzoli [Электронный ресурс]. - <http://www.marzoli.com> - (Дата обращения: 05.04.2013).

22. Корабельников, Р. В. Теория и практика совершенствования очистителей волокна [Текст] : Монография / Р. В. Корабельников, А. Р. Корабельников; М-во образования Рос. Федерации. Костром. гос. технол. ун-т. - Кострома : Костром. гос. технол. ун-т, 2001. - 94 с. - ISBN 5-8285-0043-0.

23. Севостьянов, А. Г. Составление смесок и смешивание в хлопкопрядильном производстве [Текст] / А. Г. Севостьянов. – М.: Гизлегпром, 1954. - 191 с.

24. Молитвин, В. А. Изыскание средств эффективной очистки хлопка машинами разрыхлительно-трёпального агрегата на прядильных фабриках [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Молитвин Валентин Александрович. – М., 1971.

25. Молитвин, В. А. Функции процессов рыхления, смешивания, трепания и очистки хлопка [Текст] / В. А. Молитвин. – М.: Лёгкая индустрия, 1974. – 60 с.

26. Фролова, Т. А. Влияние скорости трепания на разрыхленность хлопка [Текст] / Т. А. Фролова // Текстильная промышленность. – 1952. - № 8. - С. 8-9.

27. Фролова, Т. А. Исследование влияния треплющих органов трепальных машин на подводимый слой хлопка [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Фролова Татьяна Александровна. - М., 1947.

28. Канчавели, О. Л. Исследование потоков хлопка в разрыхлительных машинах [Текст] : дис... канд. техн. наук : утв. 11.02.1971 / Канчавели Омар Леванович. - М., 1970. – 258 с.

29. Хосровян, Г. А. Разработка технологических процессов очистки и формирования полуфабрикатов в прядильном производстве с использованием воздушных потоков [Текст] : дис. ... доктора техн. наук: 05.19.03 / Хосровян Гайк Амаякович. - Иваново, 1999. - 511 с.

30. Мкртумян, А. С. Методика расчета высоты столба засоренной волокнистой смеси в шахте бункерного питателя [Текст] / А. С. Мкртумян, А. Г. Хосровян, Я. М. Красик, Г. А. Хосровян // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006. - № 2. – С. 75-78.

31. Мкртумян, А. С. Аналитическая зависимость для расчета распределения плотности волокнистого продукта по высоте [Текст] / А. С. Мкртумян, А. Г. Хосровян, Я. М. Красик, Г. А. Хосровян // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007. - № 6С. – С. 67-69.

32. Мкртумян, А. С. Разработка и исследование разрыхлителя-очистителя волокнистых материалов с многоступенчатой очисткой [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.02 / Мкртумян Альберт Сергеевич; [Место защиты: Костром. гос. технол. ун-т]. - Кострома, 2014. - 175 с.

33. Хосровян, А. Г. Совершенствование процессов разрыхления, очистки, транспортировки полуфабриката и формирования пневмомеханической пряжи с целью повышения ее качества [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.02 : защищена 13.09.2007 / Хосровян Армен Гайкович; [Место защиты: Иван. гос. текстил. акад. (ИГТА)]. - Иваново, 2007. - 288 с.

34. Громова, Е. И. Совершенствование пыльно-колосниковой системы очистителей волокна с целью повышения эффективности очистки [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Громова Екатерина Ивановна; [Место защиты: Костром. гос. технол. ун-т]. - Кострома, 2008. - 114 с.

35. Корабельников, А. Р. Процесс взаимодействия волокна с колосником треугольного профиля [Текст] / А. Р. Корабельников, Д. А. Лебедев, Е. И. Громова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006. - № 4С. – С. 41-45.

36. Корабельников, Р. В. Взаимодействие прядки волокна с колосником в процессе очистки с учетом аэродинамического сопротивления [Текст] / Р. В. Корабельников, Е. И. Громова, Д. А. Лебедев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007. - № 6С. – С. 115-118.

37. Корабельников, Р. В. Экспериментальное определение коэффициента аэродинамического сопротивления для натурального волокна [Текст] / Р. В. Корабельников, Д. А. Лебедев, Е. И. Громова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2008. - № 2. – С. 21-26.

38. Плеханов, А. Ф. Безотходная технология в пневмопрядении [Текст] / А. Ф. Плеханов. - М. : Легпромбытиздат, 1994. - 128 с. - ISBN 5-7088-0622-2.

39. Плеханов, Ф. М. Прядение: прошлое и настоящее. Курс лекций [Текст] / Ф. М. Плеханов, А. Ф. Плеханов. - Иваново, 2000. - 224 с. - ISBN 5-93016-044-9.

40. Ваховский, А. С. Модель движения волокнистой массы в рабочей камере двухрядного разрыхлителя-чистителя [Текст] / А. С. Ваховский, А. Ф. Плеханов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007. - № 3С. – С. 44-46.

41. Лебедев, Д. А. Совершенствование теории процессов и конструкции очистительной машины для хлопкового и короткоштапельного льняного волокон [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Лебедев Дмитрий Александрович - Кострома, 2004. - 176 с.

42. Гончаров, В. Г. Сокращенные системы прядения хлопка [Текст]: Производственное издание / В. Г. Гончаров. – М.: Легпромбытиздат, 1991. – 112 с. - ISBN 5-7088-0471-8.

43. Гончаров, В. Г. Прогрессивные системы прядения в хлопчатобумажной промышленности [Текст] / В. Г. Гончаров. – М.: Лёгкая индустрия, 1974. – 36 с.

44. Смолин, Д. В. Исследование, разработка и прогнозирование технологических параметров разрыхления и очистки хлопкового волокон [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.03 / Смолин Дмитрий Владимирович. – М., 1999. – 170 с.

45. Корабельников, Р. В. Теоретические предпосылки изучения процесса перемещения (миграции) инородных примесей в волокнистой массе [Текст] /

Р. В. Корабельников, А. Р. Корабельников, Д. А. Лебедев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010. - № 2. – С. 41-44.

46. Корабельников, Р. В. Условия перемещения сорных частиц в волокнистой массе [Текст] / Р. В. Корабельников, А. Р. Корабельников, Д. А. Лебедев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010. - № 4. – С. 24-28.

47. Бурнашев, Р. З. Теоретические основы технологии очистки хлопка-сырца [Текст] : дис. ... доктора техн. наук : 05.19.02 / Бурнашев Ренад Зарифович. - Ташкент, 1983. - 434 с.

48. Иброгимов, Х. И. Обеспечение условий захвата и удержания частиц хлопка-сырца колковыми рабочими органами [Текст] / Х. И. Иброгимов, Р. В. Корабельников // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2008. - № 6. – С. 27-30.

49. Иброгимов, Х. И. Параметры движения частиц хлопка-сырца по поверхности колков в очистителях мелкого сора [Текст] / Х. И. Иброгимов, Р. В. Корабельников // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009. - № 1. – С. 34-36.

50. Корабельников, А. Р. Моделирование процесса взаимодействия волокнистых частиц с рабочим органом при очистке в свободном состоянии [Текст] / А. Р. Корабельников, Х. И. Иброгимов, Р. В. Корабельников, Д. А. Лебедев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009. - № 3. – С. 18-22.

51. Корабельников, Р. В. Комплексный показатель воздействия очистителя хлопка на хлопок-сырец в процессе очистки [Текст] / Р. В. Корабельников, Х. И. Иброгимов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2008 - № 3. – С. 35-38.

52. Иброгимов, Х. И. Особенности взаимодействия колков рабочего барабана очистителя с частицами хлопка-сырца, имеющими волокнистые связи, при нецентральной ударе [Текст] / Х. И. Иброгимов, Р. В. Корабельников // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009. - № 2. – С. 16-19.

53. Корабельников, Р. В. Теоретические и экспериментальное исследование процессов и конструкций рабочих органов машин для переработки тонковолокнистого хлопка-сырца с целью повышения качества и эффективность их работы [Текст] : дис. ... доктора техн. наук / Корабельников Ростислав Васильевич. - Кострома, 1981. – 298 с.

54. Лебедев, Д. А. Нелинейная модель воздействия на сорную частицу при очистке волокна [Текст] / Д. А. Лебедев, А. Р. Корабельников, К. Е. Ширяев, Р. В. Корабельников // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009 - № 5. – С. 20-24.

55. Хосровян, И. Г. Общая теория динамики волокнистых комплексов в процессе их взаимодействия с рабочими органами разрыхлителя [Текст] / И. Г. Хосровян, Т. Я. Красик, Г. А. Хосровян // Известия вузов. Технология текстильной промышленности – 2012. - № 6 (342). – С. 194-197.

56. Хосровян, И. Г. Математическое моделирование движения волокнистого комплекса на колке барабана разрыхлителя [Текст] / И. Г. Хосровян, Т. Я. Красик, Г. А. Хосровян // Известия вузов. Технология текстильной промышленности – 2013. - № 4 (346). – С. 85-88.

57. Лебедев, Д. А. Механизм удаления сорных примесей в процессе очистки [Текст] / Д. А. Лебедев, А. Р. Корабельников, Р. В. Корабельников // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009. - № 4. – С. 27-31.

58. Корабельников, Р. В. Основы процесса заглучивания волокнистых связей частиц хлопка-сырца при нецентральной ударе колков [Текст] / Р. В. Корабельников, Х. И. Иброгимов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009. - № 4. – С. 23-27.

59. Вихарев, С. Н. Роль упругих свойств гарнитуры при взаимодействии с волокном [Текст] / С. Н. Вихарев, А. Р. Корабельников, Р. В. Корабельников // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007. - № 1С. – С. 55-58.

60. Вихарев, С. Н. Особенности нагружения волокна рабочими органами ктонизатора с учетом их упругих свойств [Текст] / С. Н. Вихарев, А. Р. Корабель-

ников, С. А. Щербинин, Р. В. Корабельников // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007. - № 3. – С. 28-31.

61. Иброгимов, Х. И. Моделирование процесса разрежения слоя хлопка-сырца в питателе очистителя мелкого сора [Текст] / Х. И. Иброгимов, Р. В. Корабельников // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2008 - № 4. – С. 34-38.

62. Корабельников, А. Р. Динамическое нагружение волокнистых связей между частицами при разрежении слоя хлопка-сырца в питателе очистителя мелкого сора [Текст] / А. Р. Корабельников, Х. И. Иброгимов, Р. В. Корабельников // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2008. - № 5. – С. 112-114.

63. Сафаров, Ф. М. Оптимизация режима джинирования нового селекционного сорта длиноволокнистого хлопка 9326-В [Текст] / Ф. М. Сафаров, Р. В. Корабельников // Известия вузов. Технология текстильной промышленности – 2006 - № 5. – с. 49-51.

64. Агзамов, М. Исследование нового джина с малогабаритной рабочей камерой [Текст] / М. Агзамов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007. - № 1. – С. 26-29.

65. Агзамов, М. Пути снижения содержания пороков в хлопковом волокне в процессе пыльного джинирования [Текст] / М. Агзамов, М. М. Агзамов, Ж. Ф. Маджидов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007. - № 3. – С. 34-37.

66. Корабельников, Р. В. Изучение причин укорачивания волокон при очистке [Текст] / Р. В. Корабельников, Д. А. Лебедев, Е. И. Громова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2008. - № 4С. – С. 37-40.

67. Разумеев, Э. И. Рациональное использование материальных ресурсов путь эффективного производства [Текст] / Э. И. Разумеев // Текстильная промышленность. - 1987. - № 3. - С. 3-6.

68. Исмадова, М. М. Влияние усовершенствованного очистительного оборудования на сорные примеси хлопкового волокна [Текст] / М. М. Исмадова,

Д. Э. Казакова, Т. А. Очиллов, Р. А. Бегманов // Молодой ученый. - 2014. - № 1. - С. 85-88.

69. Плеханов, А. Ф. Разработка и оптимизация параметров работы новых машин разрыхлительно-трёпального агрегата с целью повышения разрыхления и очистки волокнистого материала при пневмомеханическом прядении [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Плеханов Алексей Фёдорович. – М., 1989.

70. Павлов, К. Ю. Разработка технологии очистки и формирования полуфабрикатов и пряжи в пневмопрядении. Разработка технологии очистки и формирования полуфабрикатов и пряжи в пневмопрядении [Текст] : дис. ... доктора техн. наук : 05.19.02 / Павлов Кирилл Ювенальевич; [Место защиты: Иван. гос. текстил. акад.]. - Иваново, 2011. - 259 с.

71. Павлов, К. Ю. Разработка технологической операции обеспыливания на наклонном очистителе для хлопка [Текст] / К. Ю. Павлов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2008. - № 2. – С. 142-144.

72. Павлов, К. Ю. Разработка технологической операции обеспыливания на наклонном рыхлителе-очистителе [Текст] / К. Ю. Павлов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2008. - № 2С. – С. 139-140.

73. Павлов, К. Ю. Определение параметров перфорированной поверхности для обеспыливания волокнистой массы на машинах разрыхлительно-очистительного агрегата [Текст] / К. Ю. Павлов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2008. - № 4. – С. 45-48.

74. Павлов, К. Ю. Исследование обеспыливающего разрыхлительно-очистительного агрегата [Текст] / К. Ю. Павлов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2008. - № 6. – С. 34-37.

75. Павлов, К. Ю. Разработка технологической операции обеспыливания на горизонтальном рыхлителе для хлопка [Текст] / К. Ю. Павлов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009. - № 1. – С. 125-126.

76. Кузякова, С. В. Процесс обеспыливания волокнистых отходов на новом устройстве для очистки волокнистой массы на базе ОН-6-П [Текст] / С. В. Кузя-

кова, А. Ф. Плеханов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006. - № 6С. – С. 36-38.

77. Поддувалкин, Ф. С. Исследование и анализ процессов разрыхления и очистки хлопкового волокна на современных разрыхлительно-очистительных агрегатах [Текст] / Ф. С. Поддувалкин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007. - № 3. – С. 43-45.

78. Корабельников, Р. В. Теоретические аспекты процесса очистки волокна при разрежении слоев [Текст] / Р. В. Корабельников, А. Р. Корабельников, Д. А. Лебедев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009. - № 6. – С. 27-30.

79. Корабельников, А. Р. Теоретические аспекты механизма выделения сорных частиц из волокнистого материала при сдвигании слоев (разрежении) [Текст] / А. Р. Корабельников, Р. В. Корабельников, Д. А. Лебедев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010. - № 8. – С. 24-28.

80. Скуланова, Н. С. Проектирование технологии и сформированной из нетрадиционных видов сырья аппаратной шерстяной пряжи : дис. ... доктора техн. наук : 05.19.02 / Скуланова Нина Сергеевна; [Место защиты: Моск. гос. текст. ун-т им. А. Н. Косыгина]. – М., 2008. - 306 с.

81. Akami, H., Kawakami, T. A Simulation of breakage of cotton tuft by breaker. - Sen-i Gakkaishi, 1973, v.29, 2, pp. 58 – 69.

82. Akami, H., Kawakami, T. Change of size distribution of cotton tuft and evaluation of breakage. – Sen-i Gakkaishi, 1970, v.26, 11, pp. 516 – 522.

83. Akami, H., Kawakami, T. Matrix representation of blowing process in cotton spinning system. – Sen-i Gakkaishi, 1969, v.25, 2, pp.40 – 47.

84. Akami, H., Kawakami, T. Relation between size distribution of cotton tuft and unevenness of random lap. - Sen-i Gakkaishi, 1970, v.26, 11, pp. 523 – 529.

85. Barella, A., Pujol, C. Sur la Distribution Statistique du poids des Flocons en ouverture et Battage du Cotton et Fibranne. – Bulletine ITF, v/24, n/149, 617 – 635.

86. Колмогоров, А. Н. О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении [Текст] / А. Н. Колмогоров. - Докл. АН СССР - т. 31. - № 2. – 1941. - С. 99-101.

87. Севостьянов, А. Г. Моделирование технологических процессов (в текстильной промышленности) [Текст] : Учебник для вузов / А. Г. Севостьянов, П. А. Севостьянов – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 344 с.

88. Севостьянов, А. Г. Некоторые вопросы теории гребнечесания [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Севостьянов Алексей Григорьевич - М.: МТИ, 1939.

89. Битус, Е. И. Моделирование и оптимизация процесса рассортировки волокон гребенным барабанчиком при гребнечесании шерсти [Текст] / Е. И. Битус, М. Б. Отыншиев, И. В. Джуриная // Технологии XXI века в легкой промышленности - (Технологии XXI века в пищевой, перерабатывающей и легкой промышленности) - 2012. - № 6 - Часть I.

90. Sung Won Lee A Probability Model for Random Fiber Breakages. Part II: Estimation and Application, Textile Research Journal, Volume 38, Issue 6, June 1968, pp. 566–576.

91. Бусленко, Н. П. Метод статистического моделирования [Текст] / Н. П. Бусленко. – М.: Статистика, 1970. - 109 с.

92. Севостьянов, П. А. Прогнозирование характеристик и повышение эффективности исследований технологических систем прядильного производства [Текст] : дис. ... доктора техн. наук / Севостьянов Петр Алексеевич. - М., 1985. – 437 с.

93. Севостьянов, П. А. Компьютерное моделирование технологических систем и продуктов прядения [Текст] / П. А. Севостьянов. – М.: Информ–Знание, 2006. – 448 с. - ISBN 5-8032-00-98-0.

94. Shannon, R. Systems Simulation the art and science, Prentice Hall, Inc., 1975, 387 p.

95. Naylor, T. H. Computer simulation experiments with models of economic systems, Wiley, New York, 1971, 502 p.

96. Шаракшанэ, А. С. Сложные системы [Текст] : Учеб. пособие для вузов / А. С. Шаракшанэ, И. Г. Железнов, В. А. Ивницкий. – М.: Высш. школа, 1977. – 247 с.
97. Шаракшанэ, А. С. Испытания сложных систем [Текст] : Учеб. пособие для вузов / А. С. Шаракшанэ, И. Г. Железнов. – М.: Высш. школа, 1974. - 182 с.
98. Kleijnen, J. Statistical techniques in simulation, volumes I and II. Marcel Dekker Inc., New York, 1974- 1975, 775 p.
99. Севостьянов, П. А. Основы компьютерного моделирования систем [Текст] / П. А. Севостьянов, В. И. Монахов. – М.: Тисо Принт, 2016. - 361 с. - ISBN 978-5-99044852-4-2.
100. Будников, В. И. Основы прядения. Т. 2 [Текст] / В. И. Будников, И. В. Будников, В. Е. Зотиков, Н. Я. Канарский, А. П. Раков. – М.: Гизлегпром, 1945. - 312 с.
101. Семенов, А. Д. Математическая модель взаимодействия рабочих органов текстильных машин разрыхлительно-трепального агрегата с обрабатываемой средой [Текст] / А. Д. Семенов, В. В. Волков // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000. – № 3. – С. 97-99.
102. Самойлова, Т. А. Разработка математической и компьютерной модели процессов рыхления и очистки волокнистого материала в наклонных очистителях [Текст] / Т. А. Самойлова, П. А. Севостьянов, О. А. Ветрова, Н. М. Пучкова // Технологии XXI века в легкой промышленности - (Технологии XXI века в пищевой, перерабатывающей и легкой промышленности) - 2014. - № 8.
103. Самойлова, Т. А. Динамическая модель процесса рыхления и очистки хлопка [Текст] / Т. А. Самойлова, П. А. Севостьянов, В. Ю. Митрофанов // Труды Международного лектория, посвященного 30-летию кафедры «Системы автоматизированного проектирования и информационной системы» Воронежского государственного технического университета и памяти ведущих ученых в области САПР. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2014, Ч.1 – 217 с. – С. 197-199.

104. Будников, В. И. Процесс деления в механическом прядении [Текст] / В. И. Будников. – М.: Легкая индустрия, 1965. – 274 с.

105. Севостьянов, П. А. Модель преобразования распределения характеристик материальных потоков в технологических процессах [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, О. А. Ветрова, Н. М. Пучкова // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2014): сборник материалов Международной научно-технической конференции. Часть 2. – М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2014. – 256 с. – С. 114-117.

106. Севостьянов, П. А. Методы анализа результатов компьютерных экспериментов с моделями деления и очистки клочков волокнистого материала [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, Ю. Б. Зензинова // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2016): сборник материалов Международной научно-технической конференции. Часть 3. – М.: ФГБОУ ВО «МГУДТ», 2016. – 308 с. – с. 116-119.

107. Вуколов, Э. А. Сборник задач по математике для вузов. Часть 4. Методы оптимизации. Уравнения в частных производных. Интегральные уравнения: Учебное пособие / Э. А. Вуколов, А. В. Ефимов, В. Н. Земсков, А. Ф. Каракулин, В. В. Лесин, А. С. Поспелов, А. М. Терещенко. Под ред. А. В. Ефимова. - 2-е изд., перераб. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1990. - 304 с.

108. Деч, Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования [Текст] : С прил. табл., сост. Р. Гершелем / Г. Деч; пер. с 3-го нем. изд. Г. А. Вольперта; С предисл. Я. З. Цыпкина. – М.: Наука, 1971. - 288 с.

109. Севостьянов, А. Г. Оптимизация механико-технологических процессов текстильной промышленности [Текст] : [Учеб. для технол. спец. текстил. вузов] / А. Г. Севостьянов, П. А. Севостьянов. - М. : Легпромбытиздат, 1991. – 254 с. - ISBN 5-7088-0472-6.

110. Севостьянов, П. А. Математические методы обработки данных [Текст] : учебное пособие для вузов / П. А. Севостьянов. - М.: МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2004. – 256 с. - ISBN 5-8196-0056-9.

111. Севостьянов, П. А. Рассортировка клочков волокнистого материала и ее влияние на эффективность смешивания в смесовых машинах [Текст] / П. А. Севостьянов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 1985. - № 1 - С. 33-37.

112. Севостьянов, П. А. Исследование неравномерности по линейной плотности при делении потоков волокнистого материала [Текст] / П. А. Севостьянов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности – 1988. - № 2. – С. 36-40.

113. Севостьянов, П. А. Компьютерное моделирование разрыхления и очистки клочков волокон [Текст] / П. А. Севостьянов, Н. В. Минаева // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 1995. - № 4 – С. 38-41.

114. Самойлова, Т. А. Статистические аспекты моделирования рыхления клочков хлопка [Текст] / Т. А. Самойлова, П. А. Севостьянов, Д. А. Забродин, С. Г. Савельев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013. - № 1 – С. 147–150.

115. Севостьянов, П. А. Статистическая модель деления элементов материальных потоков в технологических процессах [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов // Актуальные проблемы науки в технологиях текстильной и легкой промышленности (Лен-2016) : сб. трудов Междунар. науч.-техн. конф. / Костром. гос. ун-т. – Кострома : Изд-во Костром. гос. ун-та, 2016. – 245 с. – С. 140-143.

116. Ватутин, В. А. Ветвящиеся процессы и их применения [Текст] / В. А. Ватутин. – М.: МИАН, 2008. - 107 с. - ISBN 5-98419-024-9.

117. Гришечкин, С. А. О регулярности ветвящихся процессов с несколькими типами частиц [Текст] / С. А. Гришечкин // Теория вероятности и ее применение – 1986. – Т. 31. – Вып. 2 – С. 278–289.

118. Севастьянов, Б. А. Ветвящиеся процессы [Текст] / Б. А. Севастьянов. – М.: Наука, 1971. – 436 с.

119. Harris, T. Theory of branching processes, Dover Publication, Inc., Mienola, New York, 1989, 230 p.

120. Самойлова, Т. А. Моделирование очистки и рыхления волокнистых материалов ветвящимися Марковскими процессами [Текст] / Т. А. Самойлова, В. В. Монахов, П. А. Севостьянов, К. В. Ордов // Моделирование в технике и экономике : материалы международной научно-практической конференции, Витебск, 23–24 марта 2016 года / УО «ВГТУ». – Витебск, 2016. – 557 с. – С. 158-160.

121. Самойлова, Т. А. Компьютерная модель деления частиц [Текст] / Т. А. Самойлова, В. В. Монахов, П. А. Севостьянов // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК - 2016): сб. материалов межвуз. науч.-техн. конф. аспирантов и студентов (с междунар. участием). Ч. 2. – Иваново: ИВГПУ, 2016. – 290 с. – С. 439-440.

122. Самойлова, Т. А. Использование имитационного моделирования для исследования процесса деления [Текст] / Т. А. Самойлова, В. В. Монахов, П. А. Севостьянов // Тезисы докладов 49 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО «ВГТУ». - Витебск, 2016. - 194 с. – С. 113-114.

123. Бусленко, Н. П. Математическая модель сопряжения элементов в сложной системе [Текст] / Н. П. Бусленко // Электронная техника. Серия 9. – 1972. - Вып.1(1).

124. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем [Текст] / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1968. - 355 с.

125. Бусленко, Н. П. Лекции по теории сложных систем [Текст] / Н. П. Бусленко, В. В. Калашников, И. Н. Коваленко. – М.: Сов. Радио, 1973. – 440 с.

126. Севостьянов, А. Г. Методы и средства исследования механико-технологических процессов текстильной промышленности [Текст] : учебник для студентов высших учебных заведений. – М: МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2007. – 646 с. - ISBN 5-8196-0091-6.

127. Митрофанов, В. Ю. Разработка структуры и программной реализации автоматизированной системы управления компьютерным экспериментом с имитационной статистической моделью рыхления и очистки клочков волокнистого материала с заданной точностью результатов [Текст] / В. Ю. Митрофанов,

Т. А. Самойлова, П. А. Севостьянов // Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности (ПОИСК - 2013): сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов. Часть 2. – Иваново: Текстильный институт ФГБОУ ВПО «ИВГПУ», 2013. - 252 с. – С. 187.

128. Митрофанов, В. Ю. Исследование статистической устойчивости результатов компьютерного моделирования процессов рыхления и очистки [Текст] / В. Ю. Митрофанов, Т. А. Самойлова // Современные наукоемкие технологии и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности (Прогресс – 2013) [Текст]: сборник материалов международной научно-технической конференции. Часть 1. - Иваново: Текстильный институт ИВГПУ, 2013. - 472 с. - С. 365-366.

129. Самойлова, Т. А. Автоматизированный моделирующий комплекс для исследования процессов рыхления и очистки волокон [Текст] / Т. А. Самойлова, П. А. Севостьянов // Современные наукоемкие технологии и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности (Прогресс – 2013): сборник материалов международной научно-технической конференции. Часть 2. - Иваново: Текстильный институт ИВГПУ, 2013. - 468 с. - С. 198-199.

130. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников [Текст] / А. И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006 – 816 с. - ISBN 5-9221-0707-0.

131. Самойлова, Т. А. Исследование процесса рыхления клочков хлопка [Текст] / Т. А. Самойлова, П. А. Севостьянов // Студенты и молодые ученые КГТУ — производству : материалы 64-й межвузовской научно-технической конференции молодых ученых и студентов, посвященной 80-летию Костромского государственного технологического университета. В 2 т. Т. 2. Секции 4–8 / Костромской гос. технол. ун-т. - Кострома : Изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2012. - 156 с. - С. 81-81.

132. Самойлова, Т. А. Исследование зависимостей между факторами процессов рыхления и очистки и эффективностью этих процессов методами компьютерного эксперимента [Текст] / Т. А. Самойлова, П. А. Севостьянов // Сборник

научных трудов аспирантов. Вып. 19. - М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2013. - 261 с. – С. 202–206.

133. Севостьянов, П. А. Имитационная статистическая модель рыхления и очистки волокнистого материала [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов, К. В. Ордов // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2016. - № 1 (30). – С. 54-61.

134. Зотиков, В. Е. Основы прядения волокнистых материалов [Текст] / В. Е. Зотиков, И. В. Будников, П. П. Трыков. – М.: Гизлегпром, 1959. – 508 с.

135. Земляков, В. И. О заполнении сечения комплексной нити, воспринимающей осевую растягивающую нагрузку [Текст] / В. И. Земляков, Л. Н. Попов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 1988. - № 3. - С.11-14.

136. Комаров, В. Г. Проектирование свойств льняной пряжи [Текст] / В. Г. комаров. – М.: Легкая индустрия, 1967. – 60 с.

137. Коновалов, В. В. Имитационное моделирование процесса трепания лубоволокнистого материала [Текст] / В. В. Коновалов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 1988. - № 3 - С. 23-27.

138. Самойлова, Т. А. Стохастическая модель рыхления и очистки с переменными параметрами [Текст] / Т. А. Самойлова, В. В. Монахов, П. А. Севостьянов // Студенты и молодые ученые КГТУ — производству : материалы 68-й межвузовской научно-технической конференции молодых ученых и студентов. 25–29 апреля 2016 г. В 2 т. Т. 2. Секции 4–8 / Костромской гос. технол. ун-т. — Кострома : Изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2016. - 148 с. – С. 109.

139. Адлер, Ю. П. Введение в планирование эксперимента [Текст] / Ю. П. Адлер. – М.: Металлургия, 1969. - 159 с.

140. Налимов, В. В. Теория эксперимента [Текст] / В. В. Налимов. – М: Наука, 1971. – 208 с.

141. Разумеев, Э. И. Исследование и оптимизация процесса подготовки шерсти в поточной линии для приготовления чесальной ленты [Текст] : дис. ...

канд. техн. наук / Разумеев Эдуард Иванович; [Место защиты: Московский текстильный институт]. – М., 1977.

142. Битус, Е. И. Разработка метода и моделей для прогнозирования характеристик шерстяных волокон после гребнечесания [Текст] / Е. И. Битус, Ю. А. Зуев, М. Б. Отыншиев, И. М. Джуриная // Технологии XXI века в легкой промышленности - (Технологии XXI века в пищевой, перерабатывающей и легкой промышленности) - 2014. - № 8.

143. Разумеев, К. Э. Методы проектирования шерстяной гребенной ленты и пряжи на основе инструментального определения свойств немытой шерсти [Текст] : дис. ... доктора техн. наук : 05.19.02 / Разумеев Константин Эдуардович. – М., 2003. - 327 с.

144. Винтер, Ю. М. Определение наилучшего показателя неравномерности распределения смеси волокон в тангенциальном направлении сечения пряжи методом статистического моделирования [Текст] / Ю. М. Винтер // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2014. - № 3. – С.105-109.

145. Севостьянов, П. А. Компьютерное моделирование в задачах исследования текстильных материалов и производств [Текст] / П. А. Севостьянов, Д. А. Забродин, П. Е. Дасюк. – М.: Тисо Принт, 2014. - 263 с. - ISBN 978-5-9904852-2-8.

146. Битус, Е. И. Компьютерное моделирование и оптимизация процессов формирования гребенной ленты в шерстопрядении [Текст] / Е. И. Битус. – М.: Информ-Знание, 2007. – 240 с. - ISBN 58-0320-110-3.

147. Самойлова, Т. А. Исследование динамики характеристик волокон шерсти по их распределениям при кардо- и гребнечесании [Текст] / Т. А. Самойлова, В. В. Монахов, П. А. Севостьянов // Тезисы докладов 48 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвящённой 50-летию университета / УО «ВГТУ». - Витебск, 2015. - 230 с. – С. 199-200.

148. Севостьянов, П. А. Компьютерная модель изменения характеристик волокнистого материала в технологическом процессе [Текст] / П. А. Севостьянов, К. В. Ордов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов // Известия вузов. Технология тек-

стильной промышленности. – 2016. - № 1 (361). – С. 170-174.

149. Битус, Е. И. Исследование взаимосвязи между законами распределения шерстяных волокон с использованием современных методов и компьютерных технологий [Текст] / Е. И. Битус, П. А. Севостьянов, М. Б. Отыншиев, Е. П. Терешкина Технологии XXI века в легкой промышленности - (Технологии XXI века в пищевой, перерабатывающей и легкой промышленности) - 2015. - № 9.

150. Битус, Е. И. Моделирование рассортировки волокон шерсти по длине при гребнечесании с учетом их разрыва [Текст] / Е. И. Битус // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2002. - № 6. – С.28-32.

151. Севостьянов, П. А. Компьютерные модели в механике волокнистых материалов [Текст] / П. А. Севостьянов. – М.: Тисо Принт, 2013. - 253 с. - ISBN 978-5-9904852-1-1.

152. Гусев, Б. Н. Разработка методов получения диагностической информации в прядильном производстве [Рукопись] : дис. ... доктора техн. наук : 05.19.03, 05.19.01 : защищена 28.05.1991 / Борис Николаевич Гусев. – Иваново, 1990. – 362 с.

153. Севостьянов, П. А. Компьютерное моделирование длины и тонины волокон шерсти в топсе и ленте на основе данных натуральных экспериментов [Текст] / П. А. Севостьянов, К. В. Ордов, Е. И. Битус, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015. - № 6 (360). – С. 185-188.

154. Прибор для определения тонины и длины волокон – HORNIK FIBERTECH «OFDA 4000», Швейцария, 2006.

155. Севостьянов, П. А. Статистические особенности деления материальных потоков [Текст] / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова, В. В. Монахов // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2015): сборник материалов Международной научно-технической конференции. Часть 2. – М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2015. – 328 с. – С. 246-249.

156. Самойлова, Т. А. Динамическая модель процесса рыхления и очистки волокнистого материала как объекта автоматического управления [Текст] /

Т. А. Самойлова, П. А. Севостьянов, О. А. Ветрова, В. В. Булыга // Дизайн и технологии. – 2014. - № 40 (82). – С. 73-78.

157. Громов, Ю. Ю. Системы автоматического управления с запаздыванием [Текст] / Ю. Ю. Громов, О. Г. Иванова, Н. А. Земской, А. В. Лагутин, В. М. Тютюнник. - Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2007. – 76 с. - ISBN 978-5-8265-0644-8.

158. Дралюк, Б. Н. Системы автоматического регулирования объектов с транспортным запаздыванием [Текст] / Б. Н. Дралюк, Г. В. Синайский. – М.: Энергия, 1969. – 72 с.

159. Янушевский, Р. Т. Управление объектами с запаздыванием [Текст] / Р. Т. Янушевский. – М.: Наука, 1978. – 416 с.

160. Самойлова, Т. А. Анализ задачи регулирования рыхления и очистки в наклонных очистителях [Текст] / Т. А. Самойлова, П. А. Севостьянов // Сборник научных трудов аспирантов. Вып. 20. - М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2014. - 148 с. – С. 60–66.

161. Смит, О. Дж. М.. Автоматическое регулирование [Текст] / О. Дж. М. Смит; пер. с англ. / под ред. Е.П. Попова - М.: Физматгиз, 1962. – 848 с.

162. Денисенко, В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть 1 [Текст] / В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 1. – С. 86-97.

163. Самойлова, Т. А. Сравнение критериев оптимальной настройки системы регулирования процессов рыхления и очистки [Текст] / Т. А. Самойлова, П. А. Севостьянов // Дизайн и технологии. – 2014. - № 44 (86). – С. 83-87.

164. Самойлова, Т. А. Подбор критерия оптимальной настройки системы регулирования процессов рыхления и очистки волокнистых материалов [Текст] / Т. А. Самойлова, В. Ю. Митрофанов, П. А. Севостьянов // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК - 2015): сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов с международным участием. Ч. 2. – Иваново: Иванов. гос. политехн. ун-т, 2015. – 340 с. – С. 163.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица А.1 Результаты прогонов модели обработки клочков на наклонных очистителях в многофакторном эксперименте

№ опыта	Sr	SKO	Me	WD0109	WD025075
1	2	3	4	5	6
m					
1	73,688	31,284	96,667	9,333	9,333
	75,268	31,078	96,667	9,333	9,333
	74,005	32,722	96,667	9,333	9,333
	74,829	31,641	96,667	9,333	9,333
	74,875	31,320	96,667	9,333	9,333
2	17,449	15,754	11,667	0,000	0,000
	17,013	15,641	11,667	0,000	0,000
	17,043	15,603	11,667	0,000	0,000
	17,273	15,606	11,667	0,000	0,000
	17,286	15,809	11,667	0,000	0,000
3	91,297	14,959	96,667	0,000	0,000
	91,471	14,895	96,667	0,000	0,000
	92,695	12,619	96,667	0,000	0,000
	92,860	12,839	96,667	0,000	0,000
	91,571	15,154	96,667	0,000	0,000
4	34,708	31,893	23,333	0,133	0,067
	35,656	32,106	23,333	0,133	0,067
	35,386	31,941	23,333	0,133	0,067
	35,055	31,795	23,333	0,133	0,067
	35,469	32,240	23,333	0,133	0,067
5	42,052	11,763	48,333	8,000	4,667
	42,017	11,616	48,333	8,000	4,667
	42,302	11,484	48,333	8,000	4,000
	42,136	11,754	48,333	8,000	4,000
	42,378	11,891	48,333	8,000	4,667
6	17,809	16,020	11,667	0,667	0,400
	17,910	15,885	11,667	0,667	0,400
	17,467	16,042	11,667	0,667	0,400
	18,294	15,875	15,000	0,667	0,400
	18,260	16,002	11,667	0,667	0,400
7	21,576	15,850	18,333	6,667	4,000
	21,192	15,753	18,333	6,667	4,000
	22,048	15,774	18,333	6,667	4,000
	21,986	15,736	18,333	6,667	4,000
	21,604	15,900	18,333	6,667	4,000

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6
8	7,455	14,000	3,333	0,000	0,000
	7,895	14,552	3,333	0,000	0,000
	8,081	15,579	3,333	0,000	0,000
	8,146	15,151	3,333	0,000	0,000
	7,431	13,670	3,333	0,000	0,000
9	77,455	29,997	96,667	0,600	0,000
	77,464	29,937	96,667	0,533	0,000
	77,520	29,727	96,667	0,533	0,000
	79,342	29,386	96,667	0,533	0,000
	77,185	30,861	96,667	0,600	0,000
10	9,508	16,154	3,333	0,000	0,000
	9,493	16,368	3,333	0,000	0,000
	8,563	15,237	3,333	0,000	0,000
	9,198	15,873	3,333	0,000	0,000
	9,129	16,269	3,333	0,000	0,000
11	18,213	16,006	11,667	0,733	0,400
	18,505	15,976	15,000	0,733	0,400
	17,891	15,887	11,667	0,733	0,400
	18,476	16,001	11,667	0,733	0,467
	18,215	16,090	11,667	0,733	0,400
12	44,290	9,128	48,333	5,333	0,000
	43,952	9,397	48,333	4,667	0,000
	43,932	9,490	48,333	5,333	0,000
	44,229	9,194	48,333	4,000	0,000
	44,408	9,098	48,333	4,667	0,000
13	38,207	15,566	48,333	0,867	0,733
	38,936	14,821	48,333	0,867	0,667
	39,538	14,641	48,333	0,867	0,667
	38,611	14,955	48,333	0,867	0,667
	39,159	14,839	48,333	0,867	0,667
14	75,463	31,742	96,667	0,933	0,933
	72,305	33,321	96,667	0,933	0,933
	75,152	31,219	96,667	0,933	0,933
	76,152	30,940	96,667	0,933	0,933
	73,700	32,650	96,667	0,933	0,933
15	33,686	17,387	45,000	0,933	0,933
	33,330	17,575	45,000	0,933	0,933
	32,743	17,559	38,333	0,933	0,933
	33,675	17,580	45,000	0,933	0,933
	33,678	18,047	48,333	0,933	0,933

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6
16	38,242	31,884	30,000	0,600	0,000
	38,454	31,511	30,000	0,600	0,000
	37,724	31,547	30,000	0,600	0,000
	37,847	31,337	30,000	0,600	0,000
	37,898	31,223	30,000	0,600	0,000
g					
1	4,448	4,551	0,333	9,333	9,333
	5,052	4,593	7,000	9,333	9,333
	4,734	4,596	0,333	9,333	9,333
	5,020	4,582	6,333	9,333	9,333
	4,956	4,596	4,333	9,333	9,333
2	0,371	0,572	0,333	0,000	0,000
	0,373	0,586	0,333	0,000	0,000
	0,379	0,629	0,333	0,000	0,000
	0,377	0,613	0,333	0,000	0,000
	0,364	0,510	0,333	0,000	0,000
3	9,434	1,212	9,667	0,000	0,000
	9,438	1,190	9,667	0,000	0,000
	9,532	0,905	9,667	0,000	0,000
	9,524	0,935	9,667	0,000	0,000
	9,511	0,974	9,667	0,000	0,000
4	0,081	0,096	0,033	0,133	0,067
	0,080	0,097	0,033	0,133	0,067
	0,089	0,118	0,033	0,133	0,067
	0,085	0,108	0,033	0,133	0,067
	0,084	0,110	0,033	0,133	0,067
5	7,266	3,176	9,000	8,000	4,667
	7,223	3,227	9,000	8,000	4,667
	7,577	3,078	9,000	8,000	4,000
	7,483	3,125	9,000	8,000	4,000
	7,299	3,208	9,000	8,000	4,667
6	0,259	0,248	0,167	0,667	0,400
	0,257	0,250	0,167	0,667	0,400
	0,265	0,253	0,167	0,667	0,400
	0,255	0,252	0,167	0,667	0,400
	0,253	0,248	0,167	0,667	0,400
7	2,644	2,562	1,667	6,667	4,000
	2,690	2,578	1,667	6,667	4,000
	2,774	2,617	1,667	6,667	4,000

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6
	2,687	2,575	1,667	6,667	4,000
	2,694	2,573	1,667	6,667	4,000
8	0,368	0,568	0,333	0,000	0,000
	0,379	0,649	0,333	0,000	0,000
	0,382	0,669	0,333	0,000	0,000
	0,367	0,563	0,333	0,000	0,000
	0,367	0,558	0,333	0,000	0,000
9	0,852	0,255	0,967	0,600	0,000
	0,855	0,255	0,967	0,533	0,000
	0,857	0,248	0,967	0,533	0,000
	0,860	0,239	0,967	0,533	0,000
	0,850	0,255	0,967	0,600	0,000
10	0,365	0,542	0,333	0,000	0,000
	0,373	0,600	0,333	0,000	0,000
	0,376	0,629	0,333	0,000	0,000
	0,369	0,575	0,333	0,000	0,000
	0,379	0,647	0,333	0,000	0,000
11	0,280	0,274	0,167	0,733	0,400
	0,284	0,272	0,167	0,733	0,400
	0,283	0,275	0,167	0,733	0,400
	0,291	0,274	0,167	0,733	0,467
	0,270	0,274	0,167	0,733	0,400
12	8,711	2,355	9,667	5,333	0,000
	8,740	2,246	9,667	4,667	0,000
	8,684	2,298	9,667	5,333	0,000
	8,843	2,184	9,667	4,000	0,000
	8,761	2,271	9,667	4,667	0,000
13	0,616	0,364	0,633	0,867	0,733
	0,643	0,360	0,900	0,867	0,667
	0,653	0,362	0,967	0,867	0,667
	0,646	0,360	0,967	0,867	0,667
	0,646	0,362	0,967	0,867	0,667
14	0,446	0,463	0,033	0,933	0,933
	0,427	0,461	0,033	0,933	0,933
	0,469	0,465	0,033	0,933	0,933
	0,476	0,466	0,033	0,933	0,933
	0,443	0,462	0,033	0,933	0,933
15	0,447	0,464	0,033	0,933	0,933
	0,449	0,464	0,033	0,933	0,933

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6
	0,421	0,460	0,033	0,933	0,933
	0,450	0,464	0,033	0,933	0,933
	0,465	0,465	0,033	0,933	0,933
16	0,847	0,257	0,967	0,600	0,000
	0,851	0,255	0,967	0,600	0,000
	0,850	0,256	0,967	0,600	0,000
	0,848	0,258	0,967	0,600	0,000
	0,855	0,251	0,967	0,600	0,000
r					
1	6,190	3,456	7,667	9,333	5,333
	6,499	3,387	8,333	9,333	4,000
	6,410	3,448	8,333	9,333	4,667
	6,494	3,380	8,333	9,333	4,000
	6,462	3,388	7,667	9,333	4,667
2	0,730	1,667	0,333	0,000	0,000
	0,665	1,525	0,333	0,000	0,000
	0,698	1,598	0,333	0,000	0,000
	0,705	1,626	0,333	0,000	0,000
	0,697	1,599	0,333	0,000	0,000
3	9,656	0,157	9,667	0,000	0,000
	9,658	0,136	9,667	0,000	0,000
	9,657	0,132	9,667	0,000	0,000
	9,659	0,112	9,667	0,000	0,000
	9,657	0,129	9,667	0,000	0,000
4	0,549	1,072	0,333	0,000	0,000
	0,547	1,056	0,333	0,000	0,000
	0,558	1,099	0,333	0,000	0,000
	0,555	1,102	0,333	0,000	0,000
	0,554	1,080	0,333	0,000	0,000
5	8,363	2,585	9,667	6,000	0,667
	8,334	2,605	9,667	6,000	0,667
	8,443	2,509	9,667	6,000	0,000
	8,462	2,469	9,667	6,000	0,000
	8,411	2,528	9,667	6,000	0,667
6	0,737	1,768	0,333	0,000	0,000
	0,754	1,809	0,333	0,000	0,000
	0,795	1,895	0,333	0,000	0,000
	0,815	1,949	0,333	0,000	0,000
	0,777	1,873	0,333	0,000	0,000

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6
7	0,808	2,037	0,333	0,000	0,000
	0,786	1,993	0,333	0,000	0,000
	0,816	2,051	0,333	0,000	0,000
	0,827	2,076	0,333	0,000	0,000
	0,812	2,044	0,333	0,000	0,000
8	0,610	1,333	0,333	0,000	0,000
	0,623	1,385	0,333	0,000	0,000
	0,638	1,407	0,333	0,000	0,000
	0,620	1,362	0,333	0,000	0,000
	0,617	1,349	0,333	0,000	0,000
9	9,058	0,927	9,667	2,000	0,667
	9,034	0,932	9,667	2,000	1,333
	9,055	0,917	9,667	2,000	0,667
	9,077	0,912	9,667	2,000	0,667
	9,083	0,907	9,667	2,000	0,667
10	0,669	1,459	0,333	0,000	0,000
	0,707	1,572	0,333	0,000	0,000
	0,686	1,530	0,333	0,000	0,000
	0,695	1,514	0,333	0,000	0,000
	0,753	1,676	0,333	0,000	0,000
11	1,166	1,705	0,333	2,000	0,667
	1,166	1,681	0,333	2,000	0,667
	1,175	1,715	0,333	2,000	0,667
	1,228	1,763	0,333	2,000	0,667
	1,171	1,638	0,333	2,000	0,667
12	9,665	0,034	9,667	0,000	0,000
	9,664	0,063	9,667	0,000	0,000
	9,665	0,048	9,667	0,000	0,000
	9,664	0,063	9,667	0,000	0,000
	9,664	0,070	9,667	0,000	0,000
13	8,117	3,457	9,667	9,333	0,000
	8,218	3,365	9,667	9,333	0,000
	8,214	3,373	9,667	9,333	0,000
	8,204	3,377	9,667	9,333	0,000
	8,164	3,413	9,667	9,333	0,000
14	7,831	3,599	9,667	9,333	0,667
	7,804	3,614	9,667	9,333	0,667
	7,888	3,569	9,667	9,333	0,000
	7,922	3,554	9,667	9,333	0,000
	7,862	3,576	9,667	9,333	0,667

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6
15	7,304	3,649	9,667	9,333	3,333
	7,447	3,585	9,667	9,333	2,667
	7,164	3,689	9,667	9,333	4,000
	7,438	3,578	9,667	9,333	2,667
	7,328	3,640	9,667	9,333	2,667
16	9,665	0,059	9,667	0,000	0,000
	9,665	0,067	9,667	0,000	0,000
	9,665	0,055	9,667	0,000	0,000
	9,664	0,063	9,667	0,000	0,000
	9,665	0,051	9,667	0,000	0,000

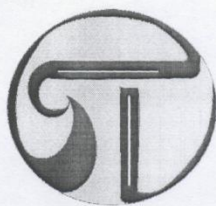
В таблице А.1: столбец 1 – номер опыта; столбец 2 – среднее значение; столбец 3 – СКО; столбец 4 – медиана; столбец 5 – интердецильный размах; столбец 6 – интерквартильный размах

Таблица А.2 Результаты прогонов модели обработки клочков на наклонных очистителях при варьировании C_p

№	C_p	Y_1	Y_2	Y_3	№	C_p	Y_1	Y_2	Y_3
1	0,1	30,316	1,425	4,662	6	0,6	33,225	1,855	5,781
		30,502	1,472	4,769			32,224	1,866	5,686
		30,986	1,441	4,777			33,232	1,888	5,821
		29,760	1,443	4,737			33,223	1,904	5,775
		29,797	1,428	4,737			33,297	1,787	5,871
2	0,2	29,926	1,534	4,929	7	0,7	33,305	1,894	5,944
		29,169	1,523	4,950			34,859	1,938	5,949
		30,289	1,516	4,850			33,442	1,934	5,893
		30,896	1,472	4,842			33,906	1,913	5,822
		31,554	1,501	4,902			34,218	1,962	6,137
3	0,3	30,802	1,648	5,151	8	0,8	35,176	2,179	6,340
		31,471	1,599	5,194			33,954	2,071	6,139
		30,980	1,544	5,069			34,591	2,024	6,113
		30,294	1,606	5,147			35,486	2,104	6,197
		30,804	1,628	5,118			35,740	2,139	6,275
4	0,4	31,258	1,649	5,352	9	0,9	35,064	2,320	6,480
		30,804	1,778	5,444			36,213	2,243	6,411
		32,594	1,636	5,303			36,383	2,202	6,445
		31,024	1,732	5,384			36,057	2,229	6,369
		31,942	1,653	5,337			35,621	2,181	6,363
5	0,5	31,714	1,799	5,716	10	1,0	36,629	2,385	6,743
		32,086	1,776	5,476			36,384	2,343	6,682
		32,059	1,736	5,467			37,680	2,391	6,722
		31,645	1,738	5,526			36,027	2,411	6,651
		31,580	1,752	5,498			36,641	2,372	6,594

Таблица А.3 Результаты прогонов модели обработки клочков на наклонных очистителях при варьировании $gMax$

№	$gMax$	Y_1	Y_2	Y_3	№	$gMax$	Y_1	Y_2	Y_3
1	5	30,297	0,893	5,536	6	30	39,573	5,459	5,812
		30,939	0,874	5,601			39,407	5,340	5,760
		30,197	0,883	5,440			39,194	5,183	5,741
		31,492	0,836	5,415			39,207	5,356	5,718
		31,312	0,850	5,453			39,902	5,255	5,677
2	10	31,561	1,822	5,601	7	35	40,712	6,247	5,880
		32,094	1,783	5,574			40,503	6,215	5,768
		32,397	1,798	5,572			39,797	6,285	5,707
		31,557	1,731	5,459			41,956	6,634	5,984
		32,394	1,742	5,649			41,478	6,439	5,846
3	15	33,796	2,554	5,591	8	40	42,835	7,091	5,825
		34,171	2,809	5,692			42,862	7,711	5,916
		35,431	2,676	5,658			42,317	7,025	5,851
		34,467	2,665	5,712			42,239	7,159	5,860
		33,562	2,712	5,674			42,905	7,223	5,809
4	20	35,666	3,577	5,624	9	45	43,741	8,101	5,799
		35,786	3,454	5,623			44,313	8,110	5,907
		36,440	3,578	5,675			43,974	8,568	6,037
		36,760	3,553	5,640			43,382	8,120	5,831
		36,185	3,497	5,608			43,694	8,210	5,877
5	25	37,913	4,552	5,748	10	50	44,032	8,847	5,927
		37,617	4,544	5,665			45,593	9,527	5,980
		37,705	4,498	5,772			45,151	9,250	6,107
		37,676	4,584	5,644			44,260	8,625	5,793
		36,412	4,291	5,570			44,655	8,771	5,793



Российская федерация
Открытое Акционерное Общество
“Пушкинский текстиль”

Тел. (495) 993-33-95
496 -53-7-73-30
Факс (495) 993-33-95

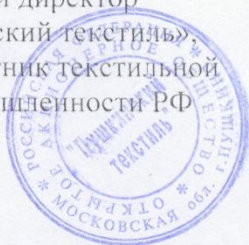
141200, Московская область, г. Пушкино,
ул. Октябрьская, 57
ИНН / КПП 5038015478 / 503801001

АКТ
о внедрении результатов
диссертационной работы
Самойловой Татьяны Алексеевны

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Самойловой Татьяны Алексеевны, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, а именно, компьютерные модели преобразования характеристик шерстяных волокон, использованы при выборе рациональных режимов обработки волокнистой массы в ОАО «Пушкинский текстиль». Модели разработаны Самойловой Т.А. под руководством д-ра техн. наук Севостьянова Петра Алексеевича.

При разработке использованы методы математического, компьютерного статистического и имитационного моделирования, математической статистики и теории вероятностных процессов, современные методы компьютерной обработки информации, методы разработки автоматизированных моделирующих комплексов, методы нелинейной динамики стохастических систем.

Исполнительный директор
ОАО «Пушкинский текстиль»,
почетный работник текстильной
и легкой промышленности РФ



Пирятинец А.В.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по

учебно-методической работе

РГУ им. А.Н. Косыгина

С.Г. Дембицкий

2016 г.



АКТ

внедрения в учебный процесс
результатов диссертационной работы
Самойловой Татьяны Алексеевны

Мы, нижеподписавшиеся, Монахов В.И., Стрельников Б.А., Ветрова О.А., составили настоящий акт о том, что результаты исследований, полученные в диссертации Самойловой Т.А., а именно, компьютерные модели технологических процессов рыхления и очистки клочков волокнистой массы, а также методы планирования экспериментов и обработки данных, внедрены в учебный процесс кафедры при разработке методических рекомендаций, учебных пособий, курсов лекций, практикумов для студентов.

Заведующий кафедрой
АСОИиУ, к.т.н.

Доцент, к.т.н.

Доцент, к.т.н.

Монахов В.И.

Стрельников Б.А.

Ветрова О.А.