

На правах рукописи
УДК 621.867.8

Очков Андрей Андреевич

СОЗДАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ РАСЧЕТА
ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ТРАНСПОРТИРОВКИ ГРАНУЛ ПОЛИЭТИЛЕНА
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ПРЕДПРИЯТИЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Специальность 2.5.10 - Гидравлические машины, вакуумная,
компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени доктора технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре вакуумной и компрессорной техники в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Официальные
оппоненты:

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»
Валюхов Сергей Георгиевич

доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
Жарковский Александр Аркадьевич

доктор технических наук
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»
Тимущев Сергей Федорович

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный
университет (национальный исследовательский
университет)»

Защита состоится 18 июня 2025 года в 14:30 на заседании
Диссертационного совета 24.2.331.22 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус «Энергомашиностроение»,
3 этаж, Конференц-зал кафедры холодильной, криогенной техники, систем
кондиционирования и жизнеобеспечения.

С диссертацией до защиты можно ознакомиться в библиотеке
МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба
направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, с. 1, ученому
секретарю диссертационного совета 24.2.331.22.

Автореферат разослан «__» 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.22
кандидат физико-математических наук



А.А. Протопопов

Актуальность работы:

В настоящее время пневматические системы транспортировки сыпучих материалов широко применяются в различных отраслях промышленности. Особо важную роль они играют в химической отрасли при транспортировке гранул полиэтилена в силу целого ряда преимуществ, таких как высокая производительность, простота обслуживания, универсальность и др. Также стоит отметить, что в 2024 году в России реализуется 15 национальных проектов, один из которых «Новые материалы и химия» направлен на развитие химической промышленности и включает несколько федеральных проектов. По оценкам Правительства РФ, к 2030 году реализация нацпроекта обеспечит прирост добавленной стоимости на 1,2 трлн рублей и в значительной степени ликвидирует зависимость от импорта.

Проводится достаточное количество научных исследований, направленных на моделирование рабочих процессов и расчет основных параметров пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена, однако, большинство из них опирается на эмпирические данные, в силу чего существующие аналитические методы расчета не могут быть использованы в широком диапазоне изменения параметров. Обращает внимание численное моделирование рабочих процессов пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена с помощью численных методов гидродинамики. Однако, в существующих работах используется большое количество допущений, значительно упрощающие математическую модель рабочего процесса, в силу чего невозможно провести расчет параметров систем транспортировки с требуемой точностью.

Несмотря на большое количество достоинств пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена, они обладают и рядом недостатков, основным из которых является образование полиэтиленовых лент в системе, снижающих эффективность процесса транспортировки гранул. Данный вопрос практически не изучен теоретически, существуют некоторые решения по выбору геометрии поворотного колена трубопровода с целью уменьшения образования полиэтиленовых лент. Однако, данные решения не обоснованы теоретически и, тем более, не являются наилучшими по выбирамому критерию. В настоящее время возникает проблема оптимизации параметров поворотных колен трубопровода с целью минимизации образования полиэтиленовых лент.

Объект исследования: пневматические системы транспортировки гранул полиэтилена.

Предмет исследования: процессы пневматической транспортировки гранул полиэтилена, оптимизация основных параметров трубопровода пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена.

Цель работы: решение задачи по оптимизации основных параметров пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена для повышения эффективности работы предприятий химической промышленности.

Задачи исследования:

1) Разработка математической модели процесса образования лент полиэтилена в колене трубопровода систем пневматической транспортировки гранул полиэтилена.

2) Разработка математической модели процесса пневматической транспортировки гранул полиэтилена.

3) Исследование влияния различных факторов на основные характеристики систем пневматической транспортировки гранул полиэтилена.

4) Разработка метода расчета оптимальных геометрических параметров колена трубопровода систем пневматической транспортировки гранул полиэтилена.

5) Подготовка практических рекомендаций по проектированию систем пневматической транспортировки гранул полиэтилена с оптимальными параметрами.

Научная новизна:

1) Разработана и верифицирована математическая модель процесса образования полиэтиленовых лент в поворотном колене трубопровода пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена.

2) Разработана и верифицирована математическая модель процесса пневматической транспортировки гранул полиэтилена.

3) Разработан метод расчета оптимальных параметров поворотного колена трубопровода пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1) Разработаны математические модели рабочих процессов, метод и программа расчета (Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ № 2024684324) оптимальных параметров пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена, что позволяет осуществлять оптимизационное проектирование подобных систем.

2) Исследовано влияние различных факторов на основные параметры пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена. Полученные результаты использовались при совершенствовании рабочих процессов, протекающих в пневматических системах транспортировки гранул полиэтилена.

3) Разработаны практические рекомендации для проектирования оптимальных конструкций пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена.

4) Результаты диссертационной работы внедрены в деятельность одного из предприятий СИБУР – рассчитаны три линии пневматической транспортировки гранул полиэтилена, выданы рекомендации по оптимизации двух линий пневматической транспортировки гранул полиэтилена, на другом из предприятий СИБУР рассчитаны четыре линии пневматической транспортировки гранул полиэтилена, спроектированы три линии пневматической транспортировки гранул полиэтилена с оптимальными параметрами; в учебный процесс кафедры вакуумной и компрессорной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Достоверность и обоснованность полученных результатов:

Достоверность результатов расчета, полученных с использованием разработанных математической модели процесса пневматической транспортировки гранул полиэтилена, математической модели процесса образования полиэтиленовых лент в колене трубопровода и метода расчета оптимальных параметров основных элементов трубопровода пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена, подтверждена верификацией, проведенной посредством сравнения результатов расчета с экспериментальными данными, а также другими результатами расчета.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1) Математическая модель процесса образования полиэтиленовых лент в колене трубопровода пневматически систем транспортировки гранул полиэтилена.

2) Математическая модель процесса пневматической транспортировки гранул полиэтилена.

3) Метод расчета оптимальных параметров колена трубопровода пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена.

4) Исследование влияния различных факторов на основные характеристики пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена, разработка практических рекомендаций по их оптимизационному проектированию.

Апробация работы:

Основные положения и результаты диссертации обсуждались:

1) на девятой Международной научно-технической конференции «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства», Омский государственный технический университет (Омск, 2019);

2) на десятой Международной научно-технической конференции «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства», Омский государственный технический университет (Омск, 2020);

3) на девятой молодежной Международной научно-практической конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность», Газпром ВНИИГАЗ (Видное, п. Развилка, 2021);

4) на заседаниях кафедры вакуумной и компрессорной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2019–2024).

Личный вклад автора:

1) Разработка математических моделей рабочих процессов и метода расчета оптимальных параметров пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена.

2) Разработка экспериментального стенда пневматической транспортировки гранул полиэтилена.

3) Организация и проведение испытаний, анализ их результатов.

4) Подготовка практических рекомендаций по оптимальному проектированию пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена.

5) Расчет основных параметров пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена на предприятиях химической промышленности.

Публикации:

По теме диссертации опубликовано 27 научных работ, в том числе 19 – в ведущих научных рецензируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации для опубликования результатов диссертационных исследований, 7 – в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus. Получено свидетельство о регистрации программы на ЭВМ.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и приложения. Работа содержит 223 страницы, 96 рисунков, 32 таблицы, 254 наименования литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена оценке современного состояния вопроса и формированию задач настоящего исследования. Пневматическая транспортировка сыпучих материалов находит применение в различных экономических отраслях, включая сельское хозяйство, химическую отрасль, фармацевтику, лакокрасочную промышленность, горнодобывающую и перерабатывающую промышленность, пищевую промышленность, металлургию, а также в производстве пластмасс и резины и в энергетическом секторе. Особо широкое применение пневматические системы транспортировки

сыпучих материалов нашли в химической промышленности, активно развивающейся в настоящее время в Российской Федерации. Химическая промышленность является важнейшим элементом почти для всех цепочек создания и снижения стоимости готовой продукции и жизненно важной частью как мировой, так и отечественной экономики, поскольку большая часть всех производимых товаров зависит от продуктов нефтегазохимии. Летом 2024 г. в нашей стране запущен специальный национальный проект «Новые материалы и химия». Планируется по итогам реализации мероприятий нового нацпроекта увеличить не менее чем на 40% (по сравнению с 2022 годом) уровень валовой добавленной стоимости химической отрасли и промышленности новых материалов, неотъемлемой частью которой являются пневматические системы транспортировки гранул полиэтилена.

В настоящее время существует достаточное количество аналитических методов расчета основных параметров пневматических систем сыпучих материалов. Они основаны на физических законах и эмпирических данных, которые позволяют учесть разные параметры, такие как скорости потока газа и частиц, рабочее давление, диаметр трубопровода и свойства транспортируемого материала. Все данные методы расчета параметров сводятся к единому алгоритму расчета: задание входных параметров расчета, вычисление необходимой производительности компрессора для обеспечения требуемого массового расхода, расчет потерь давления по длине трубопровода (на трение, на разгон и т.д.), выбор необходимого оборудования для пневматической системы транспортировки сыпучих материалов на основании результатов расчета. Подобные методы расчета параметров пневматических систем транспортировки сыпучих материалов опираются на эмпирические данные. Хотя такие подходы зачастую и обеспечивают достаточную точность в рамках рассматриваемой задачи, данные методы расчета не применимы в широком диапазоне рассматриваемых параметров.

Моделирование двухфазных потоков газ-частицы представляет собой сложный процесс, обусловленный многообразием взаимодействий между отдельными частицами, а также их взаимодействиями с окружающей средой и стенками трубопровода. При этом углубленное понимание динамического поведения потоков газ – твердое тело в рамках пневматических транспортировочных систем сыпучих материалов является ключевым аспектом для оптимального проектирования.

Моделирование с применением вычислительной гидродинамики (CFD) представляет собой один из наиболее современных инструментов для исследования сложных физических процессов, связанных с многокомпонентными потоками газов и твердых тел. В отличие от

экспериментальных методов, CFD позволяет получать данные по всему исследуемому объему. Параметры, такие как давление, скорость, распределение частиц и другие ключевые характеристики, могут быть определены в каждой точке моделируемой области. Эти преимущества делают CFD мощным инструментом для анализа и проектирования сложных систем многокомпонентных потоков. Уделено достаточное внимание численному моделированию рабочих процессов пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена с помощью численных методов гидродинамики. Однако, в существующих работах принято большое количество допущений, значительно, упрощающих математическую модель рабочего процесса, в силу чего невозможно провести расчет параметров систем транспортировки с требуемой точностью.

Несмотря на большое количество достоинств пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена, они обладают и рядом недостатков, основным из которых является образование полиэтиленовых лент в системе в процессе транспортировки гранул. Образование подобных волокон приводит не только к снижению качества и потере части транспортируемого материала, но и к нестабильной работе элементов пневматической системы из-за попадания лент в них. Данный вопрос практически не изучен теоретически. Существует единственная работа, описывающая теоретический подход к вопросу образования полиэтиленовых лент в процессе транспортировки гранул полиэтилена. Однако, она обладает целым рядом недостатков:

1. Рассматривается обособленная частица, не учитывается взаимодействие частиц между собой.
2. Частица рассматривается в статическом положении.

По результатам проведенных патентного поиска, анализа научных работ можно заключить, что один из способов уменьшения образования полиэтиленовых лент в процессе пневматической транспортировки гранул полиэтилена – использование поворотных колен трубопровода нестандартной формы. Однако, не существует теоретической базы, позволяющей обосновать выбор того или иного решения и, тем более, провести оптимизационное проектирование.

Во второй главе описаны теоретические положения в области пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена. Разработана математическая модель образования полиэтиленовых лент в поворотных участках трубопровода. Принимается, что образование полиэтиленовых лент в процессе пневматической транспортировки гранул полиэтилена происходит при следующих условиях:

1. Температура гранулы близка к температуре плавления ее материала.
2. Гранула полиэтилена движется вдоль стенки.

На основе этого была составлена расчётная схема процесса образования полиэтиленовых лент в колене трубопровода. Под коленом трубопровода в рассматриваемой работе понимается поворотный элемент трубопровода, предназначенный для изменения направления потока гранул полиэтилена, внутренняя и внешние стенки которого непрерывные, выпуклые и не имеют перегибов во всей рассматриваемой области (Рисунок 1).

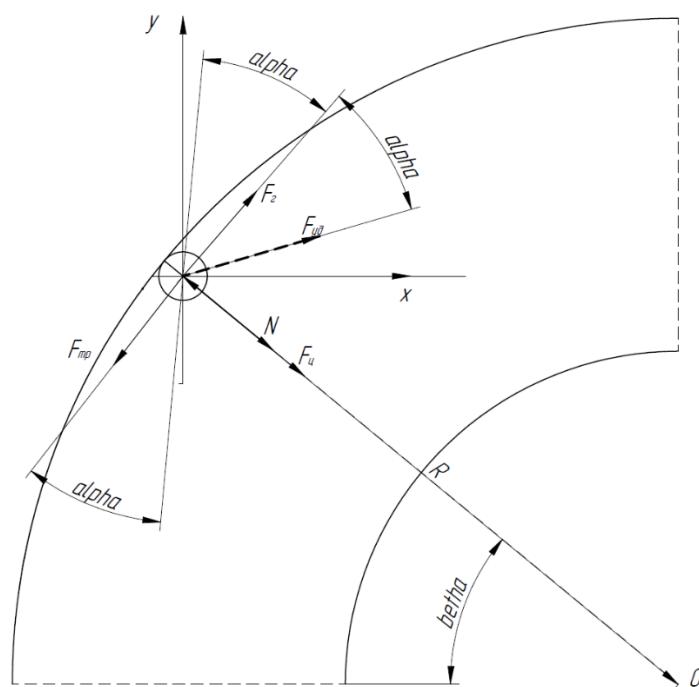


Рисунок 1. Схематичное изображение столкновения частицы со стенкой колена трубопровода:

$F_{\text{ц}}$ – центробежная сила, $F_{\text{тр}}$ – сила трения, $F_{\text{г}}$ – сила, с которой газ действует на частицу, $F_{\text{уд}}$ – сила удара, N – реакция опоры

В рассматриваемой математической модели процесса образования полиэтиленовых лент в процессе пневматической транспортировки были приняты следующие допущения:

- форма транспортируемой частицы – сфера;
- абсолютно упругое взаимодействие частиц между собой;
- зеркальный закон отражения при взаимодействии частиц со стенкой и между собой;
- процесс образования лент начинается при достижении частицей температуры, близкой к температуре ее плавления, и при движении частицы вдоль стенки (угол $\alpha = 0 \pm 2^\circ$ или $180 \pm 2^\circ$);

– изменение температуры частиц происходит при взаимодействии их между собой и со стенками трубопровода;

– векторы скоростей газа сонаправлены со стенками колена в рассматриваемом сечении, значение скорости принимается постоянным и усредненным по сечению;

– векторы скоростей частиц определяются в соответствии с законом движения сплошной среды, который указывает положение всякой частицы в любой момент времени относительно выбранной системы отсчета;

– начальная скорость частиц задается в соответствии с законом распределения Максвелла по скоростям;

– масса образующихся лент полиэтилена определяется как потеря массы частиц в процессе лентообразования;

– работа трения частицы о стенку трубопровода преобразуется в тепло.

В качестве входных параметров при расчете в математической модели процесса образования полиэтиленовых лент были приняты:

– векторы начальной скорости газа и частиц;

– материал, степень шероховатости и геометрические параметры трубопровода;

– начальные температуры частицы и газа;

– концентрация частиц в трубопроводе;

– размер и материал частицы.

В качестве выходных параметров при расчете по математической модели процесса образования полиэтиленовых лент были приняты:

– длины образовавшихся лент;

– суммарная потеря массы частиц в трубопроводе;

– векторы скоростей газа и частиц в выходном сечении колена;

– температуры газа и частиц в выходном сечении колена.

При рассмотрении процесса соударения частицы со стенкой поворотного участка трубопровода (колена), с учетом принятых допущений, можно полагать, что в начальный момент времени частица массы m движется со скоростью v_0 , направленной под углом α . При принятых допущениях в момент соударения частицы со стенкой на частицу действует равнодействующая внешних сил \vec{R} :

$$\vec{R} = \vec{N} + \vec{F}_\text{Ц} + \vec{F}_\text{тр} + \vec{F}_\text{г} + \vec{F}_\text{уд}, \quad (1)$$

где

$$\vec{F}_\text{Ц} = \frac{m_0 \cdot \vec{v}_0^2}{R}; \quad (2)$$

$$\vec{F}_\text{тр} = \mu \cdot \vec{N}; \quad (3)$$

$$\vec{F}_\text{г} = \frac{m_0 \cdot \vec{v}_0}{t}. \quad (4)$$

Считаем, что при ударе частицы о стенку нагрева не происходит, тогда частица нагревается только от трения при движении вдоль стенки трубопровода, т.е. работа от силы трения равна количеству теплоты, выделившемуся в процессе трения: $Q = A_{\text{тр}}$.

Тогда из системы уравнений сможем найти изменение температуры частицы при движении ее вдоль стенки:

$$\begin{aligned} Q &= c \cdot m_{\text{ч}} \cdot \Delta T, \\ A_{\text{тр}} &= F_{\text{тр}} \cdot l_{\text{тр}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где c – удельная теплоёмкость частицы, $l_{\text{тр}}$ – длина пути трения частицы.

При этом, длина пути трения частицы также будет и длиной образованных полиэтиленовых лент при достижении частицей температуры, близкой к температуре ее плавления.

С использованием математической модели процесса образования полиэтиленовых лент в колене трубопровода пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена разработан метод расчета оптимальных параметров пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена. При расчете геометрия поворотного колена трубопровода задается в полярной системе координат (r, θ) двумя криволинейными границами: внутренней и внешней стенками. Угол поворота колена составляет 90° , что соответствует изменению полярного угла θ от 0 до $\pi/2$ (Рисунок 2).

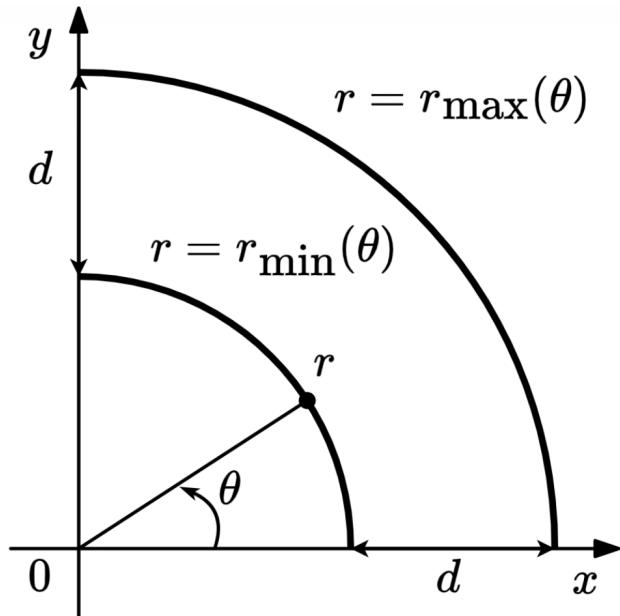


Рисунок 2. Схема поворотного колена трубопровода:
 d – диаметр входного и выходного участка колена трубопровода

Внутренняя стенка колена описывается постоянным радиусом

$$r_{\min}(\theta) = r_1, \quad (6)$$

где r_1 – радиус скругления внутренней стенки колена.

Внешняя стенка задается функциональной зависимостью

$$r_{\max}(\theta) = r_{\min}(\theta) + h(\theta) + d, \quad (7)$$

где d – диаметр трубопровода.

$$h(\theta) = \theta \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) (c_1 + c_2 \theta + c_3 \theta^2), \quad (8)$$

где c_1, c_2, c_3 – коэффициенты, определяющие форму внешней сетки.

Уравнение, описывающее внешнюю стенку, позволяет рассмотреть возможность формирования геометрий колен трубопровода во всем диапазоне изменяемых параметров с учетом того, что геометрия колена трубопровода отвечает свойству его выпуклости во всем диапазоне координат, рассматриваемых при расчете.

Полиномиальный множитель $\theta(\theta - \pi/2)$ обеспечивает гладкое сопряжение (без перегибов) рассматриваемой кривой с прямолинейными участками трубопровода при $\theta = 0$ (вход) и $\theta = \pi/2$ (выход). Такая форма полиномиального множителя была выбрана, чтобы гарантировать нулевые значения дополнительного слагаемого в этих точках, что обеспечивает сохранение диаметра d в сечениях трубопровода на входе в колено и на выходе из него.

На расчетную область накладывается квадратная сетка с шагом $\Delta x = d/10$. Определена зона генерации частиц полиэтилена, представляющая собой прямоугольник шириной $20r$ и высотой $28r$. Новые частицы генерировались в этой зоне с частотой, зависящей от времени пролета частиц через зону генерации. Новые частицы появляются, когда предыдущие покидают зону.

Целью оптимизации является расчет геометрических параметров колена трубопровода, при которых обеспечивается условие минимального образования полиэтиленовых лент. С учетом принятых допущений и основных зависимостей разработанной математической модели образования полиэтиленовых лент в поворотном колене пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена в качестве целевой функции выбрана функция δ , которая включает в себя зависимости распределения частиц по площади колена трубопровода и количества соударений частиц между собой и со стенками трубопровода. В качестве управляющих параметров были выбраны коэффициенты c_1, c_2, c_3 , характеризующие геометрию поворотного колена трубопровода, Ra – шероховатость внутренней стенки трубопровода.

Целевая функция имеет вид:

$$\delta(\theta) = \frac{N_{cc}(\theta)}{S(\theta)N_{\text{частиц}}(\theta)} + \frac{C(\theta)}{S(\theta)N_{\text{частиц}}(\theta)}, \quad (9)$$

где N_{cc} – наибольшее число столкновений в ячейке;

S – площадь расчетной области;

$N_{\text{частиц}}$ – общее число частиц;

C – максимальное количество частиц, прошедшее через ячейку, сопряженную с верхней границей колена трубопровода.

В ходе оптимизации геометрических параметров колена на геометрию расчетной области были наложены следующие ограничения, исходя из существующих рекомендаций:

Ограничение сверху:

$$h(\theta, c_1, c_2, c_3) \leq \frac{9d}{10}. \quad (10)$$

Ограничение снизу:

$$h(\theta, c_1, c_2, c_3) \geq -\frac{d}{2}. \quad (11)$$

Ограничение на координату x :

$$\left(\frac{7d}{2} + h(\theta, c_1, c_2, c_3) \right) \cos(\theta) \leq \frac{7d}{2} + \frac{16d}{100}. \quad (12)$$

Для поиска оптимальных геометрических параметров колена трубопровода c_1, c_2, c_3 применяется алгоритм перебора с использованием квазислучайной последовательности R_d , которая создаёт равномерно распределённые точки в пределах заданных границ. Для каждого набора параметров проводится симуляция 15 раз, и значения δ усредняются для оценки качества параметров. Лучшие результаты сохраняются и используются для дальнейшего анализа.

При расчете гранулы полиэтилена моделировались как окружности с радиусом r . Направление вектора начальной скорости частиц задавались по нормальному распределению с параметрами $\mu = \pi/2$ (математическое ожидание) и $\sigma = \pi/8$ (среднеквадратичное отклонение). Для того чтобы предотвратить случай, когда вектор скорости частицы будет направлен обратно потоку, было задано ограничение по направлению вектора от 0 до π . В расчётной области задано поле скоростей газа, направленное вдоль геометрии колена (Рисунок 3).

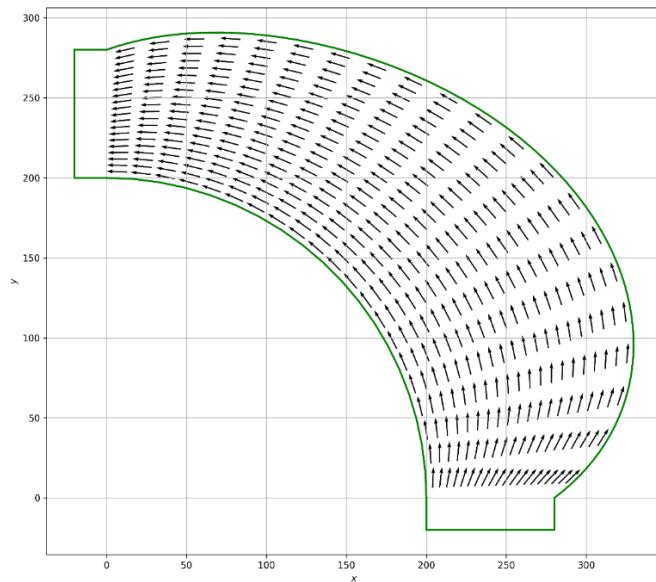


Рисунок 3. Поле скоростей газа в колене трубопровода

Разработана программа расчета оптимальных параметров основных элементов трубопровода пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена. Блок-схема представлена на Рисунке 4.

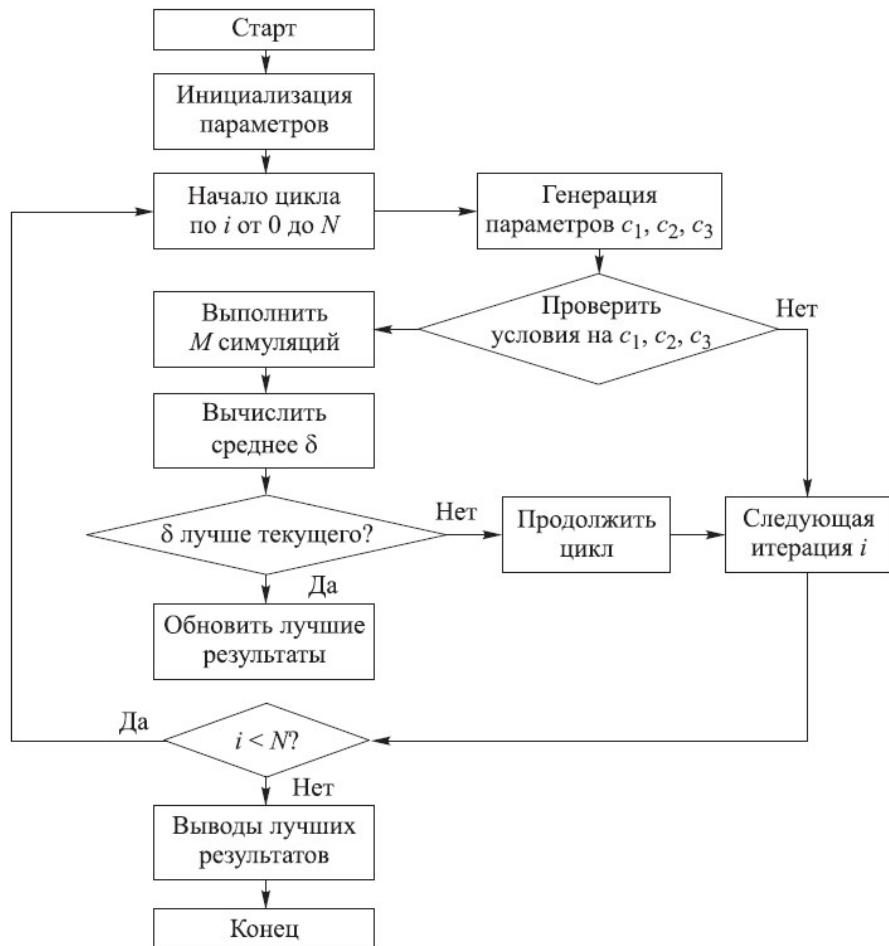


Рисунок 4. Блок-схема программы расчета оптимальных параметров

В процессе оптимизации геометрии колена трубопровода по выбранному критерию осуществлялся непрерывный расчет параметра C в ячейках области, прилегающих к верхней стенке колена, но не пересекающей его; велся подсчет количества частиц, пройденных через ячейки. В результате расчета выбиралась та ячейка, через которую прошло наибольшее количество частиц за весь процесс (Рисунок 5).

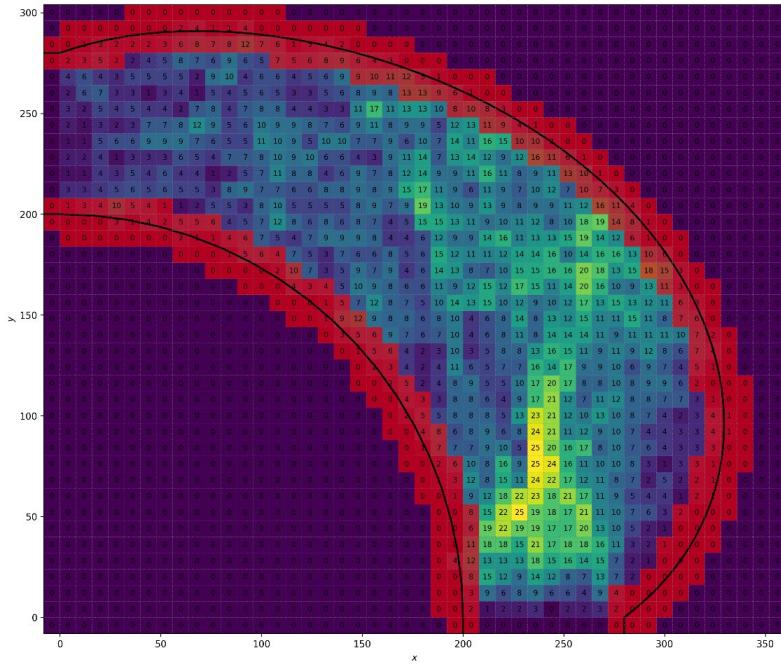


Рисунок 5. Распределение частиц за все время процесса

Для определения параметра оптимизации N_{cc} рассчитывалась ячейка, сопряженная с контуром, в области которой произошло наибольшее количество столкновений со стенкой. Оптимальное решение приведено на Рисунке 6.

Получены оптимальные параметры, обеспечивающие минимальную величину образования полиэтиленовых лент: $c_1 = -64,11$, $c_2 = 11,3$, $c_3 = -52,55$, $Ra = 5,2$.

Создана математическая модель процесса пневматической транспортировки гранул полиэтилена. При ее разработке были приняты следующие допущения:

- газ и гранулы рассматриваются как отдельные фазы, взаимодействующие между собой;
- каждая фаза однородна по свойствам;
- рабочий газ является идеальным;
- химические реакции или взаимодействия между частицами и газом не рассматриваются;
- характеристики частиц не меняются в рабочем процессе.

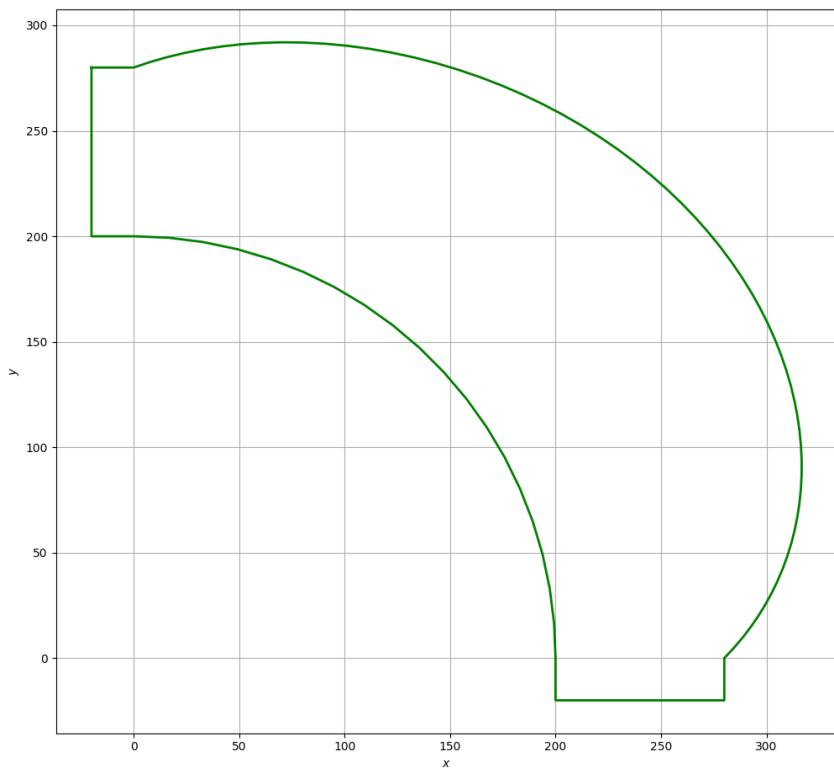


Рисунок 6. Оптимальная форма поворотного колена трубопровода

В качестве входных параметров для расчета по математической модели процесса транспортировки были приняты:

- свойства газа и гранул;
- геометрические характеристики трубопровода;
- начальные температуры, давления и скорости для газа и гранул.

В качестве выходных параметров для расчета по математической модели процесса транспортировки были приняты:

- объемные доли газа и гранул;
- скорости газа и гранул;
- температуры газа и гранул;
- давление газа.

Математическая модель процесса транспортировки гранул полиэтилена содержит следующие уравнения:

- переноса импульса для дисперсной фазы

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_d \rho_d W_{j,d}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_d \rho_d W_{j,d} W_{i,d}) = \\
 & = -\alpha_d \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial P_d}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij,d}}{\partial x_j} + \alpha_d \rho_d g_i + K_{dc} (W_{i,c} - W_{i,d});
 \end{aligned} \tag{13}$$

- переноса импульса для сплошной фазы

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_c \rho_c W_{j,c}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_c \rho_c W_{j,c} W_{i,c}) = \\
& = -\alpha_c \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij,c}}{\partial x_j} + \alpha_c \rho_c g_i + K_{cd} (W_{i,d} - W_{i,c});
\end{aligned} \tag{14}$$

– неразрывности для дисперсной фазы

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_d \rho_d) + \nabla (\alpha_d \rho_d W_d) = 0; \tag{15}$$

– неразрывности для сплошной фазы

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_c \rho_c) + \nabla (\alpha_c \rho_c W_c) = 0, \tag{16}$$

где $\tau_{ij,d}$ – тензор напряжений дисперсной фазы:

$$\tau_{ij,d} = \alpha_d \mu_d \left(\frac{\partial W_{i,d}}{\partial x_j} + \frac{\partial W_{j,d}}{\partial x_i} \right) + \left(\alpha_d v_d - \frac{2}{3} \alpha_d \mu_d \right) \delta_{ij} \frac{\partial W_{k,d}}{\partial x_k}; \tag{17}$$

μ_d и v_d – сдвиговая и объемная вязкости дисперсной фазы;

$\tau_{ij,c}$ – тензор напряжений сплошной фазы:

$$\tau_{ij,c} = \frac{2}{3} \alpha_c \rho_c k_c \delta_{ij} + \alpha_c \mu_c^{eff} \left(\frac{\partial W_{i,c}}{\partial x_j} + \frac{\partial W_{j,c}}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial W_{k,c}}{\partial x_k} \right); \tag{18}$$

α – объемная доля:

$$\alpha_c + \alpha_d = 1; \tag{19}$$

μ_c^{eff} – эффективная вязкость сплошной фазы; P – давление; ρ – плотность; W – скорость; δ – символ Кронекера; K_{cd} – коэффициент взаимодействия дисперсной и сплошной фаз; индексы d и c – дисперсная и сплошная фазы соответственно. При моделировании двухфазных потоков, основываясь на подходе Эйлера, дисперсная фаза рассматривается как псевдожидкость, для которой вводится параметр – давление твердой фазы P_d . Для расчета давления твердой фазы P_d используется уравнение

$$P_d = \alpha_d \rho_d \Theta_d (1 + 2(1 + e_d) \alpha_d g_{od}); \tag{20}$$

где Θ_d – кинетическая температура твердых частиц (пропорциональна кинетической энергии движения частиц дисперсной фазы); e_d – коэффициент релаксации частицы; g_{od} – радиальная функция распределения материала:

$$g_{od} = \left(1 - \left(\frac{\alpha_d}{\alpha_{d \max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right)^{-1}. \tag{21}$$

Коэффициент взаимодействия частиц K_{cd} , учитывающий неравномерность распределения твердой фазы и ее взаимодействие со стенками трубопровода в

зависимости от концентрации сплошной фазы, позволяет учитывать изменение сил взаимодействия в потоке при изменении ее концентрации:

– если $\alpha_c > 0,8$, то

$$K_{cd} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_d \alpha_c \rho_c (W_c - W_d)}{D} \alpha_c^{-2,65}, \quad (22)$$

где D – диаметр трубопровода; C_D – коэффициент лобового сопротивления частицы:

$$C_D = \frac{24}{\alpha_c Re_d} \left(1 + 0,15 (\alpha_c Re_d)^{0,687} \right); \quad (23)$$

– если $\alpha_c \leq 0,8$, то

$$K_{cd} = 150 \frac{\alpha_d (1 - \alpha_c) \mu_c}{\alpha_c d_d^2} + 1,75 \frac{\alpha_d \rho_c |W_d - W_c|}{d_d}, \quad (24)$$

где d_d – диаметр твердых частиц.

Сдвиговая вязкость дисперсной фазы μ_d складывается из вязкости от соударений и кинетической вязкости:

$$\mu_d = \mu_{d\,coll} + \mu_{d\,kin}, \quad (25)$$

где

$$\mu_{d\,coll} = \frac{4}{5} \alpha_d \rho_d d_d g_{od} (1 + e_d) \left(\frac{\Theta_d}{\pi} \right)^{0,5}, \quad (26)$$

$$\mu_{d\,kin} = \frac{\alpha_d \rho_d d_d \sqrt{\Theta_d \pi}}{6(3 - e_d)} \left(1 + \frac{2}{5} (1 + e_d) (3e_d - 1) g_{od} \alpha_d \right). \quad (27)$$

Объемная вязкость ν_d рассчитывается по формуле

$$\nu_d = \frac{3}{4} \alpha_d \rho_d d_d g_{od} (1 + e_d) \left(\frac{\Theta_d}{\pi} \right)^{0,5}. \quad (28)$$

Кинетическая температура Θ_d определяется из уравнения переноса для кинетической температуры:

$$\begin{aligned} & \frac{2}{3} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_c \rho_c \Theta_d) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_c \rho_c W_{j,c} \Theta_d) \right) = \\ & = \left(-P_d \delta_{ij} + \tau_{ij,d} \right) \frac{\partial W_{i,d}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{\Theta_d} \frac{\partial \Theta_d}{\partial x_j} \right) - \psi_{\Theta_d} + \phi_{\Theta_d}, \end{aligned} \quad (29)$$

где ψ_{Θ_d} – диссипация энергии столкновений:

$$\psi_{\Theta_d} = \frac{12(1 - e_d^2) g_{od} \rho_d \alpha_d^2 \Theta_d^{2/3}}{d_d \pi}; \quad (30)$$

ϕ_{Θ_d} – коэффициент переноса энергии от газа к твердой фазе:

$$\phi_{\Theta_d} = -3 K_{cd} \Theta_d; \quad (31)$$

k_{Θ_d} – коэффициент диффузии энергии гранул дисперсной фазы:

$$k_{\Theta_d} = \frac{\alpha_d \rho_d d_d \sqrt{\theta_d \pi}}{4(41-33\eta)} \left(1 + \frac{12}{5} \eta^2 (4\eta-3) g_{od} \alpha_d + \frac{16}{5\pi} (41-33\eta) g_{od} \alpha_d \eta \right),$$

$$\eta = \frac{1}{2} (1 + e_d). \quad (32)$$

Коэффициент теплообмена между фазами:

$$h_{cd} = \frac{k_c N u_d}{d_d}, \quad (33)$$

где k_c – коэффициент теплопроводности сплошной фазы; $N u_d$ – число Нуссельта, которое определяется по формуле Ранца-Маршалла:

$$N u_d = 2 + 0,6 R e_d^{1/2} P r^{1/3}, \quad (34)$$

где $P r$ – число Прандтля для сплошной среды, которое определяется по формуле:

$$P r = \frac{c_{p_c} \mu_c}{k_c}. \quad (35)$$

Для описания турбулентных свойств двухфазного потока принята $k-\varepsilon$ модель турбулентности. Для двухфазного потока записывают уравнения переноса k и ε для каждой фазы отдельно с учетом межфазного взаимодействия:

– уравнение переноса k для дисперсной фазы

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_d \rho_d k_d) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_d \rho_d W_{j,d} k_d) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_d \frac{\mu_{t,d}}{P r_{k,d}} \frac{\partial k_d}{\partial x_j} \right) + \alpha_d \rho_d (G_d - \varepsilon_d) + \\ & + K_{cd} (C_{cd} k_c - C_{dc} k_d) - K_{dc} (W_{j,c} - W_{j,d}) \frac{\mu_{t,c}}{\alpha_c P r_{k,c}} \frac{\partial \alpha_c}{\partial x_j} + \\ & + K_{cd} (W_{j,c} - W_{j,d}) \frac{\mu_{t,c}}{\alpha_c P r_{k,c}} \frac{\partial \alpha_c}{\partial x_j} + K_{cd} (W_{j,c} - W_{j,d}) \frac{\mu_{t,d}}{\alpha_d P r_{k,d}} \frac{\partial \alpha_d}{\partial x_j}; \end{aligned} \quad (36)$$

– уравнение переноса k для сплошной фазы

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_c \rho_c k_c) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_c \rho_c W_{j,c} k_c) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_c \frac{\mu_{t,c}}{P r_{k,c}} \frac{\partial k_c}{\partial x_j} \right) + \\ & + \alpha_c \rho_c (G_c - \varepsilon_c) + K_{dc} (C_{dc} k_d - C_{cd} k_c) - \\ & - K_{dc} (W_{j,d} - W_{j,c}) \frac{\mu_{t,d}}{\alpha_d P r_{k,d}} \frac{\partial \alpha_d}{\partial x_j} + K_{dc} (W_{j,d} - W_{j,c}) \frac{\mu_{t,c}}{\alpha_c P r_{k,c}} \frac{\partial \alpha_c}{\partial x_j}; \end{aligned} \quad (37)$$

– уравнение переноса ε для дисперсной фазы

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_d \rho_d \varepsilon_d) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_d \rho_d W_{j,d} \varepsilon_d) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_d \frac{\mu_{t,d}}{P r_{\varepsilon,d}} \frac{\partial \varepsilon_d}{\partial x_j} \right) +$$

$$\begin{aligned}
& + \alpha_d \rho_d \frac{\varepsilon_d}{k_d} (C_{1e} G_d - C_{2e} \varepsilon_d) + C_{3e} \frac{\varepsilon_d}{k_d} (C_{cd} k_c - C_{dc} k_d) - \\
& - C_{3e} \frac{\varepsilon_d}{k_d} K_{cd} (W_{j,c} - W_{j,d}) \frac{\mu_{t,c}}{\alpha_c Pr_{\varepsilon,c}} \frac{\partial \alpha_c}{\partial x_j} + \\
& + C_{3e} \frac{\varepsilon_d}{k_d} K_{cd} (W_{j,c} - W_{j,d}) \frac{\mu_{t,d}}{\alpha_d Pr_{\varepsilon,d}} \frac{\partial \alpha_d}{\partial x_j}; \tag{38}
\end{aligned}$$

– уравнение переноса ε для сплошной фазы

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_c \rho_c \varepsilon_c) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_c \rho_c W_{j,c} \varepsilon_c) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{t,c}}{Pr_{\varepsilon,c}} \frac{\partial \varepsilon_c}{\partial x_j} \right) + \\
& + \alpha_c \rho_c \frac{\varepsilon_c}{k_c} (C_{1e} G_c - C_{2e} \varepsilon_c) + C_{3e} \frac{\varepsilon_c}{k_c} (C_{dc} k_d - C_{cd} k_c) - \\
& - C_{3e} \frac{\varepsilon_c}{k_c} K_{dc} (W_{j,d} - W_{j,c}) \frac{\mu_{t,d}}{\alpha_d Pr_{\varepsilon,d}} \frac{\partial \alpha_d}{\partial x_j} + \\
& + C_{3e} \frac{\varepsilon_d}{k_d} K_{dc} (W_{j,d} - W_{j,c}) \frac{\mu_{t,c}}{\alpha_c Pr_{\varepsilon,c}} \frac{\partial \alpha_c}{\partial x_j}, \tag{39}
\end{aligned}$$

где C_{1e} , C_{2e} , C_{3e} , $Pr_{\varepsilon,c}$, $Pr_{\varepsilon,d}$, $Pr_{k,c}$, $Pr_{k,d}$, C_{cd} , C_{dc} – константы модели турбулентности;

$\mu_{t,d}$ – турбулентная вязкость твердой фазы:

$$\mu_{t,d} = \alpha_d C_\mu \frac{k_d^2}{\varepsilon_d}; \tag{40}$$

$\mu_{t,c}$ – турбулентная вязкость сплошной фазы:

$$\mu_{t,c} = \alpha_c C_\mu \frac{k_c^2}{\varepsilon_c}, \tag{41}$$

где C_μ – константа модели турбулентности.

Источники турбулентной кинетической энергии для сплошной и дисперсной фазы рассчитываются по формулам:

– для дисперсной фазы

$$G_d = \mu_{t,d} \left(\frac{\partial W_{i,d}}{\partial x_j} + \frac{\partial W_{j,d}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial W_{j,d}}{\partial x_i}; \tag{42}$$

– для сплошной фазы

$$G_c = \mu_{t,c} \left(\frac{\partial W_{i,c}}{\partial x_j} + \frac{\partial W_{j,c}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial W_{j,c}}{\partial x_i}. \tag{43}$$

Константы C_{dc} и C_{cd} аппроксимируются уравнениями:

$$C_{dc} = 2; \tag{44}$$

$$C_{cd} = 2 \left(\frac{\eta_{dc}}{1 + \eta_{dc}} \right), \quad (45)$$

где

$$\eta_{dc} = \frac{0,135 k_{dc} k_c}{\alpha_d \rho_d \varepsilon_c \left(\frac{\rho_d}{\rho_d} + 0,5 \right) \sqrt{1 + \xi^2 (1,8 - 1,35 \cos^2 \Theta)}}, \quad (46)$$

$$\xi = 0,11 \frac{|W_d - W_c|}{k_d^{0,5}}. \quad (47)$$

В модели плотной дискретной фазы сплошная фаза моделируется при помощи Эйлерова подхода, а дисперсная фаза рассматривается не как псевдожидкость, а как твердые сферы (т.е. деформацией частиц и внутренними течениями в них пренебрегают) малых размеров с заданной массой в пространстве. Траектории частиц вычисляются путем интегрирования сил, действующих на частицу в Лагранжевой системе координат, определяется положение, скорость, ускорение и т.д. каждой частицы с помощью второго закона Ньютона:

$$m_d \frac{d\vec{W}_d}{dt} = m_d \frac{\vec{W}_c - \vec{W}_d}{\tau_r} + m_d \frac{\vec{g}(\rho_d - \rho_c)}{\rho_d} + \vec{F}, \quad (48)$$

где τ_r – время релаксации частицы:

$$\tau_r = \frac{\rho_d d_d^2}{18 \mu_c} \frac{24}{C_D Re}. \quad (49)$$

Объемная доля дисперсной фазы вычисляется в ячейке, затем используется в уравнениях сохранения массы и импульса Эйлера:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_d \rho_d) + \nabla (\alpha_d \rho_d \vec{W}_d) &= \dot{m}_{cd} - \dot{m}_{dc}; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_d \rho_d \vec{W}_d) + \nabla (\alpha_d \rho_d \vec{W}_d \vec{W}_d) &= -\alpha_d \nabla P + \\ + \nabla (\alpha_d \mu_d (\nabla \vec{W}_d + \nabla \vec{W}_d^\top)) + \alpha_d \rho_d \vec{g} + \vec{F} + \vec{K}_{qp} (\vec{W}_c - \vec{W}_d) + \\ + \dot{m}_{cd} \vec{W}_{cd} - \dot{m}_{dc} \vec{W}_{dc} + \vec{K}_{qp} (\vec{W}_{DPM} - \vec{W}_d) + S_{DPM}, \end{aligned} \quad (51)$$

где \dot{m}_{cd} , \dot{m}_{dc} – массообмен между фазами; \vec{F} – результирующая сила, действующая на частицу; \vec{K}_{qp} – коэффициент обмена импульсом между фазами; S_{DPM} – источниковый член; \vec{W}_{DPM} – осредненная скорость частиц дискретной фазы.

Численное моделирование течения двухфазного потока в колене системы пневмотранспорта полиэтилена выполнено при помощи программного комплекса Ansys Fluent. Проведена верификация разработанной математической

модели рабочего процесса путем сравнения результатов расчета по разработанной математической модели пневматической транспортировки с результатами аналитического расчета, а также параметрами действующей линии на одном из предприятий СИБУР. Расхождение не превысило 9%.

В третьей главе описан созданный экспериментальный стенд для верификации полученных теоретических данных, принципиальная схема которого представлена на Рисунке 7.

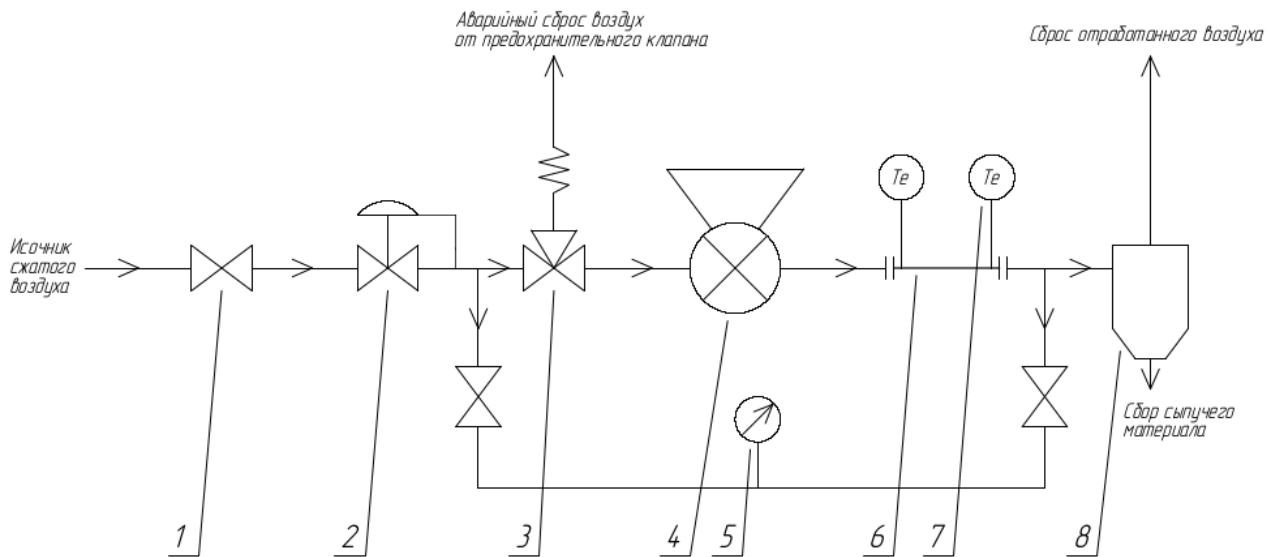


Рисунок 7. Принципиальная схема испытательного стенда:
 1 — кран шаровый, 2 — регулятор давления, 3 — предохранительный клапан,
 4 — питатель, 5 — манометр, 6 — линия пневматической транспортировки,
 7 — датчик температуры, 8 — циклон-разгрузитель

При создании экспериментального стенда были разработаны роторный питатель и циклон-разгрузитель (Рисунок 8), подобрано необходимое оборудование.



Рисунок 8. 3D-модели роторного питателя и циклона-разгрузителя

Основная цель испытаний заключается в определении количества образовавшихся полиэтиленовых лент внутри колена при пневматической

транспортировке гранул полиэтилена. Это необходимо для верификации разработанной математической модели процесса образования полиэтиленовых лент в колене трубопровода. К особенностям испытательного стенда (Рисунок 9) стоит отнести присутствующие в нем быстроразъемные соединения. Данный факт позволяет испытывать поворотные колена трубопровода различной геометрии с минимальными затратами времени, затрачиваемого на сборку/разборку элементов испытательного стенда. В контрольных точках линия пневматической транспортировки выполнена из прозрачной трубы, что позволяет осуществлять визуальный контроль за перемещением гранул полиэтилена, образованием полиэтиленовых лент, что, в свою очередь, упрощает анализ и последующие корректировки в процессе испытания.



Рисунок 9. Испытательный стенд

Разработана программа и методика испытаний, в соответствии с которой проведен эксперимент. Полученные результаты использовались при верификации математической модели образования полиэтиленовых лент в колене трубопровода. На разработанном стенде осуществлялась транспортировка гранул полиэтилена массой 50 кг. Потеря массы на образование полиэтиленовых лент – 1,95 г., что составило 0,000039%. Потеря массы транспортируемых гранул полиэтилена по данным, полученным с одного из предприятий СИБУР составила 0,000161% от общей массы, по результатам расчета с использованием разработанной математической модели процесса образования полиэтиленовых лент в колене трубопровода – 0,000068%.

Расхождение результатов расчета и эксперимента не превысило 75%, что является удовлетворительным результатом при описании подобного рабочего процесса и свидетельствует об успешной верификации разработанной математической модели рабочего процесса.

Глава 4 посвящена описанию внедрения результатов диссертационной работы в деятельность промышленных предприятий. Разработанные математические модели рабочих процессов, метод расчета оптимальных параметров основных элементов трубопровода пневматических систем транспортировки полиэтилена внедрены в деятельность промышленных предприятий СИБУР.

С применением разработанной математической модели процесса пневматической транспортировки гранул полиэтилена на одном из предприятий СИБУР проведены экспертиза четырех существующих линий пневматической транспортировки гранул полиэтилена (Рисунки 10, 11).

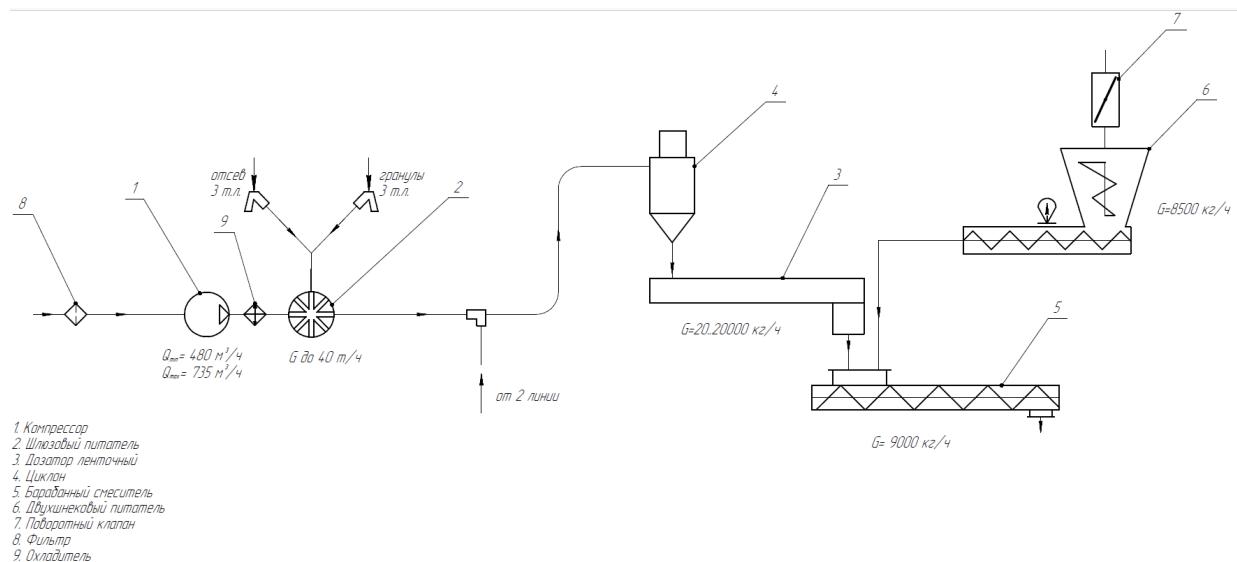


Рисунок 10. Модернизированная первая линия

Проверочные расчеты четырех существующих линий пневматической транспортировки гранул полиэтилена показали, что для увеличения массовой производительности линий необходима их модернизация. Были предложены следующие варианты:

- увеличение диаметра трубопровода линий (без замены оборудования);
- совместные замена компрессора и увеличение диаметра трубопровода рассматриваемых линий пневматической транспортировки.

С использованием разработанной математической модели процесса пневматической транспортировки гранул полиэтилена произведен расчет

параметров двух линий на увеличенную массовую производительность, а также расчет параметров новой третьей линии (Рисунок 12).

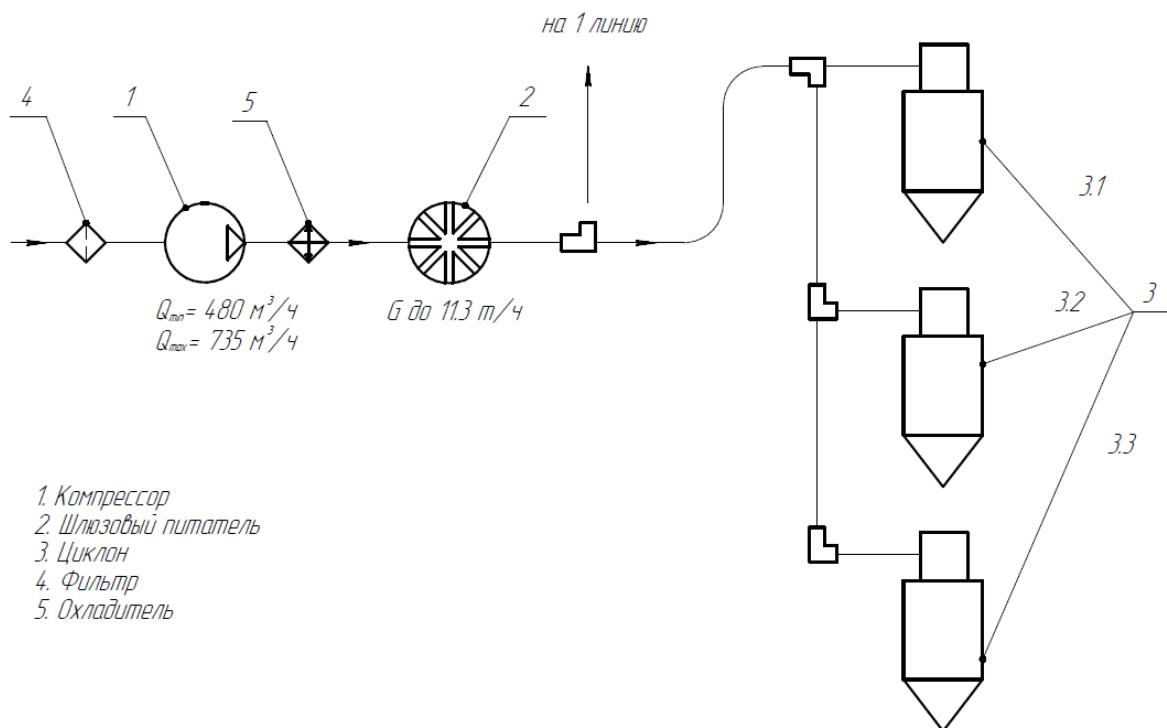
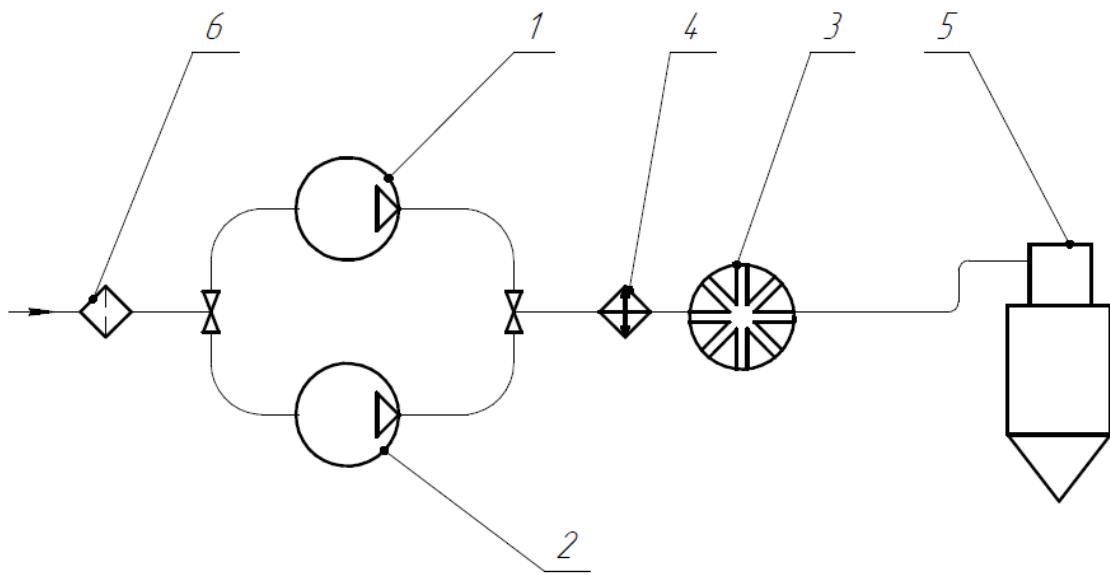


Рисунок 11. Модернизированная вторая линия



1. Компрессор
 2. Резервный компрессор
 3. Шлюзовый питатель
 4. Охладитель
 5. Циклон
 6. Фильтр

Рисунок 4.12. Схема третьей линии

В результате расчёта получены контуры распределения давления, температуры, скорости частиц внутри трубопровода (Рисунки 13–15).

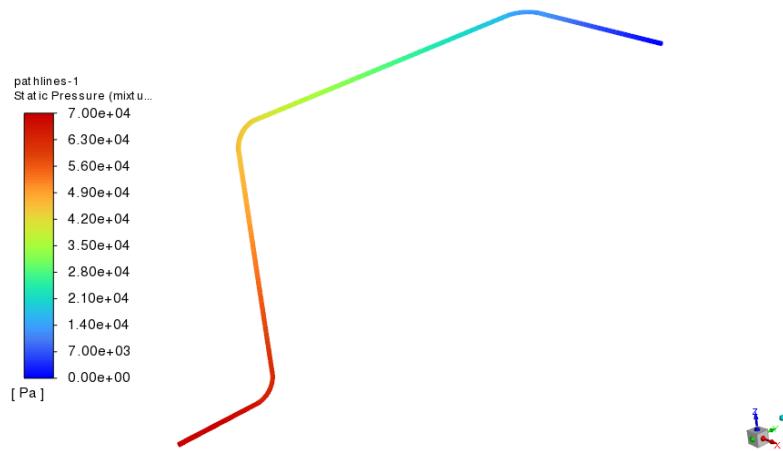


Рисунок 13. Распределение давлений газа в трубопроводе.

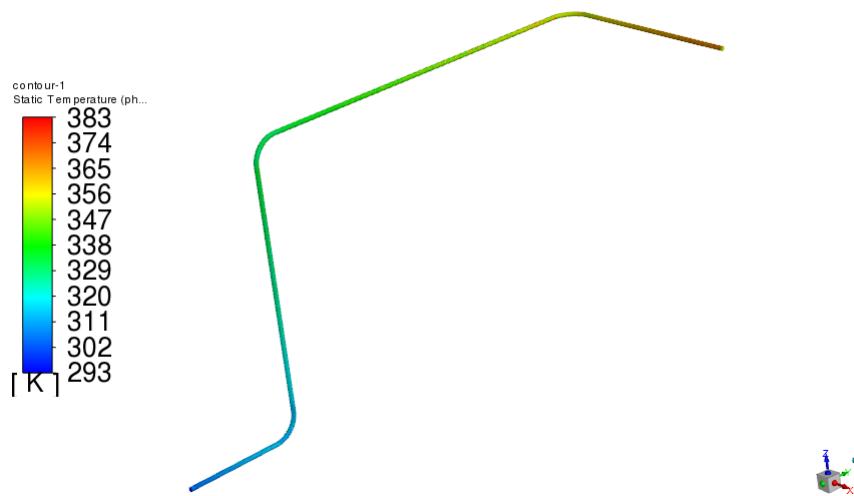


Рисунок 14. Распределение температуры газа в трубопроводе



Рисунок 15. Распределение скорости частиц
в процессе пневматической транспортировки

Теоретические положения, разработанные в диссертационной работе внедрены в деятельность одного из предприятий СИБУР. С использованием разработанной математической модели процесса пневматической транспортировки гранул полиэтилена, метода расчета оптимальных параметров основных элементов трубопровода пневматических систем гранул полиэтилена исследовано влияние различных факторов, к которым относятся: шероховатость внутренних стенок трубопровода, геометрические параметры трубопровода, а также температуры транспортируемого газа и транспортируемого материала, на основные параметры системы пневматической транспортировки гранул полиэтилена. Исследования проведены в программном комплексе Ansys путём проведения CFD расчётов.

По результатам выполненных CFD расчётов можно заключить, что скорость газа оказывает наибольшее влияние на потери давления в поворотном элементе трубопровода. На основании полученных результатов расчета основных параметров пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена построена зависимость потерь давления в поворотных участках трубопровода от скорости рабочего газа (Рисунок 16).

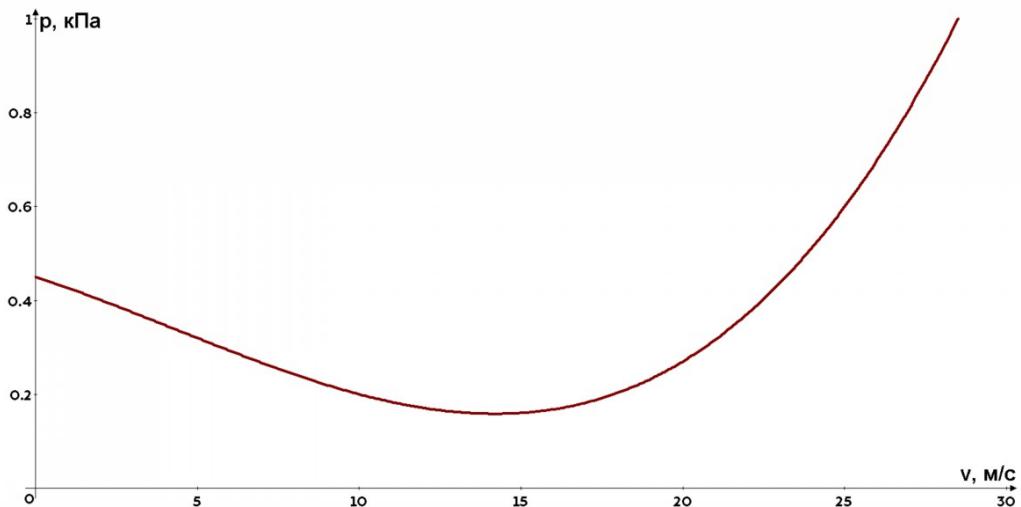


Рисунок 16. Зависимость потерь давления в поворотных участках трубопровода от скорости рабочего газа

Также с использованием разработанного метода расчета оптимальных параметров основных элементов трубопровода пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена исследована зависимость образования полиэтиленовых лент в поворотных участках трубопровода от шероховатости внутренней стенки трубопровода (Рисунок 17).

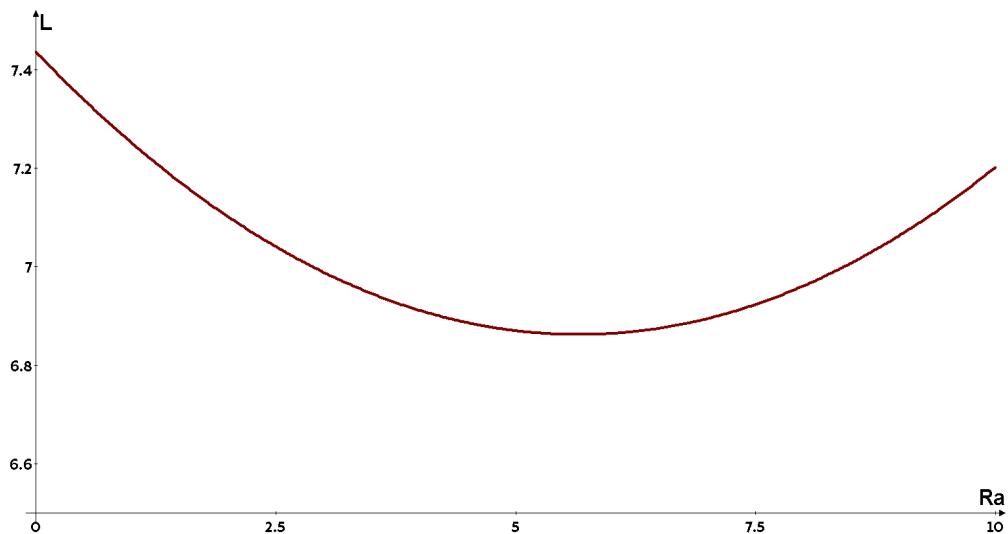


Рисунок 17. Зависимость образования полиэтиленовых лент в поворотных участках трубопровода от шероховатости внутренней стенки трубопровода.

На основании проведенных исследований получены практические рекомендации и сама методология по оптимизационному проектированию пневматических систем транспортировки гранул полиэтилена: для обеспечения минимальных потерь давления скорость выбирается в диапазоне $v = 12 \dots 17$ м/с, для обеспечения минимального образования полиэтиленовых лент шероховатость трубопровода выбирается в диапазоне $Ra = 4 \dots 7$ мкм, внешняя

стенка колена задается полиномом (8) с коэффициентами $c_1 = -64,11$, $c_2 = 11,3$, $c_3 = -52,55$.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана математическая модель процесса образования лент полиэтилена в колене трубопровода систем пневматической транспортировка, произведена верификация, расхождение результатов расчета и эксперимента не превысило 75%.

2. Разработана математическая модель процесса пневматической транспортировки полиэтилена, произведена проверка на точность посредством сравнения результатов расчета с результатами эксперимента, а также с результатами других данных. Расхождение не превысило 9%.

3. Разработан метод расчета оптимальных параметров колена трубопровода систем пневматической транспортировки гранул полиэтилена.

4. На основании созданных математических моделей рабочих процессов, метода расчета оптимальных параметров колена трубопровода даны практические рекомендации по проектированию систем пневмотранспорта гранул полиэтилена: для обеспечения минимальных потерь давления скорость выбирается в диапазоне $v = 12 \dots 17$ м/с, для обеспечения минимального образования полиэтиленовых лент шероховатость трубопровода выбирается в диапазоне $Ra = 4 \dots 7$ мкм, внешняя стенка колена задается полиномом с коэффициентами $c_1 = -64,11$, $c_2 = 11,3$, $c_3 = -52,55$.

5. Результаты диссертационной работы внедрены в деятельность предприятий СИБУР: на одном из них рассчитаны три линии пневматической транспортировки гранул полиэтилена, выданы рекомендации по оптимизации четырех линий пневматической транспортировки гранул полиэтилена, на другом из предприятий СИБУР рассчитаны три линии пневматической транспортировки гранул полиэтилена, спроектированы четыре линии пневматической транспортировки гранул полиэтилена с оптимальными параметрами.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Демихов К.Е., Очков А.А. Метод расчета оптимальной откачной характеристики турбомолекулярного вакуумного насоса // Вестник Московского государственного технического университета им.

- Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2012. № 7 (7). С. 3. (0.19 п.л. / 0.1 п.л.)
2. Исаев А.В., Очков А.А., Кряковкин В.П. К расчету суммарной поглотительной способности криоадсорбционных вакуумных насосов // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 2-2 (120). С. 28–34. (0.44 п.л. / 0.25 п.л.)
 3. Очков А.А., Исаев А.В., Прудников С.Н. Ресурс работы высоковакуумных цилиндрических криоадсорбционных насосов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 04. С. 9–20. (0.75 п.л. / 0.45 п.л.)
 4. Демихов К.Е., Очков А.А. Программное обеспечение оптимизации основных параметров турбомолекулярных вакуумных насосов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 5 (17). С. 32. (0.5 п.л. / 0.25 п.л.)
 5. Демихов К.Е., Очков А.А. Математическая модель процесса откачки газа цилиндрическим молекулярным вакуумным насосом // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 12. С. 200–209. (0.63 п.л. / 0.35 п.л.)
 6. Очков А.А., Исаев А.В., Прудников С.Н. Суммарная поглотительная способность сферических криоадсорбционных насосов // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 21 (185). С. 76–83. (0.5 п.л. / 0.2 п.л.)
 7. Демихов К.Е., Очков А.А. Определение оптимальных параметров проточной части турбомолекулярного вакуумного насоса // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2015. № 6 (105). С. 121–129. (0.56 п.л. / 0.3 п.л.)
 8. Очков А.А., Демихов К.Е. Метод расчета оптимальной откачной характеристики турбомолекулярного вакуумного насоса с комбинированной проточной частью в широком диапазоне давлений // Будущее машиностроения России. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. С. 618–620. (0.19 п.л. / 0.1 п.л.)
 9. Демихов К.Е., Очков А.А. Определение эффективного диапазона давлений газа на стороне всасывания турбомолекулярного вакуумного насоса // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2016. № 5 (110). С. 89–95. (0.44 п.л. / 0.22 п.л.)
 10. Очков А.А., Демихов К.Е. Особенности выбора форвакуумного насоса для турбомолекулярного вакуумного насоса, обеспечивающего требуемые параметры откачки // Вестник Московского государственного технического

университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2016. № 6 (111). С. 89–95. (0.44 п.л. / 0.22 п.л.)

11. Демихов К.Е., Очков А.А., Цакадзе Г.Т. Метод расчета оптимальных параметров комбинированного молекулярного вакуумного насоса // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2017. № 5 (116). С. 98–104. (0.44 п.л. / 0.15 п.л.)
12. Очков А.А., Виеру Б.Г. Моделирование колебаний полюса Земли с помощью нечеткой логики и функции Вейерштрасса // Математика и математическое моделирование. 2017. № 3. С. 1–12. (0.81 п.л. / 0.7 п.л.)
13. Демихов К.Е., Очков А.А. Универсальная математическая модель процесса откачки газа молекулярным вакуумным насосом // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2017. № 6 (117). С. 134–143. (0.63 п.л. / 0.31 п.л.)
14. Demikhov K.E., Ochkov A.A., Gordeeva U.S. Development of calculation method of main parameters of vacuum liquid transportation system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 387, No. 1. P. 012014. (0.25 п.л. / 0.15 п.л.)
15. Demikhov K.E., Ochkov A.A., Gordeeva U.S. Experimental study of a vacuum fluid transportation system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 387, No. 1. P. 012015. (0.31 п.л. / 0.15 п.л.)
16. Исследование и разработка пневматического пистолета для распыления порошка в хирургии / К.Е. Демихов, А.А. Очков, В.И. Демьяненко, [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 7 (91). С. 2. (0.63 п.л. / 0.3 п.л.)
17. Gordeeva U.S., Demikhov K.E., Ochkov A.A. Specifics of the application of mechanical vacuum pumps in vacuum distillation units used in chemical and oil and gas industries // Oil and Gas Engineering: (OGE-2019). 2019. Vol. 2141, No. 1. P. 030011. (0.25 п.л. / 0.1 п.л.)
18. Демихов К.Е., Гордеева У.С., Очков А.А. Алгоритм определения оптимального числа рабочих колес в проточной части турбомолекулярного вакуумного насоса // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2020. № 1 (130). С. 119–127. (0.56 п.л. / 0.2 п.л.)
19. Gordeeva U.S., Demikhov K.E., Ochkov A.A. Development of a calculation method of the main parameters of the multistage turbomolecular pump // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 781, No. 1. P. 012010. (0.25 п.л. / 0.1 п.л.)

20. Development of the calculation algorithm of the flow part main parameters of the ring straight-flow ejector / K. E. Demikhov, A. A. Ochkov, V. N. Kemenov, [et al.] // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2285, No. 1. P. 030011. (0.5 п.л. / 0.2 п.л.)
21. Демихов К.Е., Очков А.А. О методе расчета параметров откачки ступени диффузионного вакуумного насоса // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2021. № 2 (137). С. 85–93. (0.56 п.л. / 0.28 п.л.)
22. Очков А.А. Перспектива создания современных высоковакуумных механических насосов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2022. № 1 (140). С. 103–137. (2.19 п.л.)
23. Ochkov A.A., Hamadi M.I., Vartanyan A.E. Prospects of the pneumatic hemostatic powder delivery system use for surgical operations // American Institute of Physics Conference Series. 2023. Vol. 2549, No. 1. P. 210017. (0.31 п.л. / 0.1 п.л.)
24. Программный модуль оптимизации геометрических параметров колена трубопровода систем пневмотранспорта полиэтилена: св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ RU 2024684324 Россия / Скорняков В.М., Очков А.А., Хамади М.И.; рег. 30.09.2024; опубл. 16.10.2024.
25. Очков А.А., Годорожа С.В., Хамади М.И. Исследование процесса пневмотранспорта гранул полиэтилена в поворотных коленах трубопровода // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 11. С. 79–88. (0.63 п.л. / 0.4 п.л.)
26. Очков А.А., Скорняков В.М. Оптимизация геометрических параметров колена трубопровода в системах пневмотранспорта полиэтилена // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2024. № 4 (151). С. 82–95. (0.88 п.л. / 0.6 п.л.)
27. Очков А.А., Хамади М.И. Математическая модель процесса откачки газа многосопловым сверхзвуковым вакуумным эжектором // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 12. С. 83–92. (0.63 п.л. / 0.3 п.л.)