

На правах рукописи

РОДИОНОВ Геннадий Александрович

**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТЕ СЫПУЧИХ
МАТЕРИАЛОВ КАМЕРНЫМИ НАСОСАМИ**

Специальность: 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2014

Работа выполнена на кафедре «Теоретические основы теплотехники» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель:

БУХМИРОВ Вячеслав Викторович, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

ГАРЯЕВ Андрей Борисович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой тепломассообменных процессов и установок, ФГБОУ ВПО "Национальный исследовательский университет "МЭИ"

БАРАКОВ Александр Валентинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и промышленной теплоэнергетики, ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет"

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань

Защита состоится 30 января 2015 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, ИГЭУ, Ученый совет. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Диссертация размещена: http://ispu.ru/files/Rodionov_12-11-2014.pdf

Автореферат размещен: <http://ispu.ru/>

Автореферат разослан «__» ноября 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.064.01,

доктор технических наук, доцент



Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Экономия и повышение эффективности использования энергетических ресурсов входят в число восьми приоритетных направлений политики Российской Федерации, утвержденных Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. N 899 "Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации". Основными потребителями ТЭР являются промышленные предприятия. Реализация технологического процесса во многих отраслях промышленности требует перемещения больших объемов сыпучих материалов. При этом на долю пневмотранспорта приходится около 30% объема всех работ по транспортировке сыпучих грузов. Системы пневмотранспорта имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными средствами транспортировки сыпучих материалов: компактность, высокие гигиенические показатели, возможность полной автоматизации, возможность одновременно с транспортированием материала изменять его состояние (сушка, увлажнение и т.д.), простота обслуживания. Однако, системы пневмотранспорта обладают самыми высокими затратами энергии на тонну перемещаемого материала. В некоторых случаях данный показатель превышает энергетические затраты традиционных видов транспорта в 10-15 раз. Высокое удельное энергопотребление часто связано с ошибками на этапе проектирования установок, поскольку существующие инженерные методики расчета пневмотранспортных установок (ПТУ) не учитывают специфику различных отраслей промышленности, что приводит к снижению энергетической эффективности пневмотранспортных установок. Поэтому в настоящее время **актуальной** является проблема повышения энергетической эффективности систем пневмотранспорта при транспортировке сыпучих веществ.

Объект исследования. Системы пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих материалов с камерными насосами на промышленных предприятиях.

Предмет исследования Гидродинамика и процессы теплообмена в двухфазных потоках типа газ-твердое тело.

Целью диссертационной работы является повышение энергетической эффективности действующих и проектируемых систем

пневмотранспорта с камерными насосами на основе математического моделирования процессов гидродинамики и теплообмена в двухфазных потоках.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Проведен анализ методов расчета систем пневмотранспорта с камерными насосами (КН).

2. Выбран программно-вычислительный комплекс (ПВК), для реализации математической модели перемещения сыпучих материалов.

3. Разработана трехмерная математическая модель нестационарных процессов гидродинамики и теплообмена двухфазных потоков в камерных насосах марки «Монжус» и марки «Gemco», учитывающая изменение физических свойств воздуха.

4. Проведены промышленные эксперименты для получения данных о режимных параметрах работы пневмокамерных насосов.

5. Проверена адекватность математической модели путем сравнения результатов моделирования с результатами промышленных экспериментов.

6. Получены при помощи математического моделирования зависимости производительности пневмокамерного насоса от температуры и расхода сжатого воздуха, размера частиц, диаметра выходного патрубка.

7. Разработаны рекомендации по повышению энергетической эффективности камерных насосов.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы экспериментальные и расчетные методы исследования. В качестве расчетного метода применено математическое моделирование процессов, протекающих в системах пневмотранспорта, с реализацией на персональном компьютере при помощи программно-вычислительного комплекса ANSYS Fluent. Экспериментальное исследование систем выполнено на промышленных установках ОАО «КранЭкс» (г. Иваново) и ОАО «Бонолит - Строительные решения» (г. Старая Купавна, Московская обл.).

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика».

Соответствие диссертации формуле специальности

В соответствии с формулой специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика», «объединяющей исследования, по совершенствованию промышленных теплоэнергетических систем...»,

поиску структур и принципов действия теплотехнического оборудования, которое обеспечивает сбережение энергетических ресурсов», в диссертационной работе рассмотрены вопросы снижения потребления ТЭР при обеспечении заданной производительности в системах пневмотранспорта сыпучих материалов за счет изменения термодинамических параметров воздуха и конструкции пневмонасосов.

Соответствие диссертации области исследования специальности

Отраженные в диссертационной работе основные научные положения соответствуют пункту 1 «Разработка научных основ сбережения энергетических ресурсов в промышленных теплоэнергетических устройствах и использующих тепло системах и установках» и пункту 3 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих тепло». Совершенствование методов расчета...установок с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов» области исследования специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика». В диссертации разработана математическая трехмерная модель работы системы пневмотранспорта при помощи САЕ-системы, позволяющая рассчитывать расход воздуха на перемещение заданного количества сыпучего материала в зависимости от параметров подаваемого сжатого воздуха и конструктивных особенностей оборудования. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования систем пневмотранспорта.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель гидродинамики и теплообмена для двухфазных потоков в рабочем пространстве камерного насоса, которая учитывает нестационарность работы пневмотранспортных установок, взаимодействие газовой и твердой фаз, взаимодействие фаз со стенкой, изменение концентрации и размеров частиц, зависимость термодинамических свойств воздуха от давления и температуры.

2. Впервые получены данные об изменении режимных параметров (поля скорости, давления, температуры и концентрации) в рабочем пространстве камерных насосов марки «Монжус» и марки «Gemco» в процессе их разгрузки.

3. Получена новая информация о влиянии термодинамических параметров транспортирующей среды на работу пневмокамерного насоса. Установлено, что в процессе разгрузки камерного насоса давление и

температура сжатого воздуха изменяются в широких пределах, что существенно влияет на производительность камерного насоса.

4. В рабочем пространстве камерного насоса марки «Монжус» реализованы новые гидродинамические режимы с повышенным уровнем турбулентности за счет изменения конструкции его внутренних элементов.

Практическая ценность.

1. Разработаны практические рекомендации по повышению энергетической эффективности функционирования систем пневмотранспорта с камерными насосами за счет изменения термодинамических параметров энергоносителя и конструкции пневмонасосов.

2. Получена зависимость производительности пневмотранспортной установки от температуры сжатого воздуха, которая может быть использована при проектировании новых систем пневмотранспорта и реконструкции существующих.

3. Даны практические рекомендации по повышению энергетической эффективности работы ПТУ для ОАО «Кранэкс» (г. Иваново), ОАО «Бонолит – Строительные решения» (г. Старая Купавна, Московская обл.)

4. Выполнена реконструкция камерного насоса «Монжус» НО-324МА, позволяющая снизить расход воздуха на перемещение сыпучего материала по сравнению с базовым вариантом исполнения при сохранении производительности ПТУ. Решение о выдаче патента №2014133622/11(054288) от 10.10.2014 г.

Реализация результатов

Результаты диссертационной работы рекомендованы к использованию на промышленных предприятиях с системами пневмотранспорта сыпучих материалов, а также переданы ОАО «Кранэкс» (г. Иваново). Модернизированная конструкция пневмокамерного насоса внедрена на ОАО "Бонолит - Строительные решения» (г. Старая Купавна, Московская обл.) и ряду заинтересованных организаций.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается использованием апробированных методов математического моделирования; совпадением результатов расчета показателей работы оборудования ПТУ и экспериментальных данных в пределах допустимой погрешности; сопоставлением результатов математического моделирования с экспериментальными данными других авторов;

использованием результатов экспериментов, полученных в условиях промышленной эксплуатации оборудования с использованием стандартизированных методов и средств измерения.

Личный вклад автора

Все результаты диссертационной работы получены автором лично под руководством научного руководителя.

Автор защищает:

1. математическую модель функционирования систем пневмотранспорта сыпучих материалов с камерными насосами, основанную на осредненных уравнениях переноса энергии и импульса;
2. новую конструкцию пневмокамерного насоса, позволяющую повысить энергетическую эффективность и надежность работы системы пневмотранспорта.
3. зависимость эффективности работы пневмотранспортной системы с камерными насосами от термодинамических параметров транспортирующего агента.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы и обсуждались:

– на 12 международных конференциях: VI, VII и VIII Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» (г. Иваново, 2011; г. Санкт-Петербург, 2012; г. Москва, 2013); XIX и XX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2013 и 2014); VIII и IX Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных "Энергия" (г. Иваново, 2013 и 2014); Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электротехнологии» XV, XVI и XVII Бенардосовские чтения (г. Иваново, 2009, 2011 и 2013); V международной школе-семинаре молодых ученых и специалистов «Энергосбережение – теория и практика» (г. Москва, 2010);

– на двух всероссийских конференциях: XIX Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность (г. Томск, 2013); III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве" (ТИМ 2014, г. Екатеринбург, 2014);

– на двух региональных научно-технических конференциях: V и VII Региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия» (г. Иваново, 2010 и 2012);

– на отчетных конференциях молодых ученых ИГЭУ «Энергия инновации» и научно-практических семинарах кафедры «Теоретические основы теплотехники» ИГЭУ (Иваново, ИГЭУ, 2009 – 2014).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, списка литературы, двух приложений и содержит 161 страницу основного текста, включая иллюстративный материал.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, дана её краткая характеристика и описание структуры.

Первая глава посвящена анализу теоретических и практических разработок в области движения двухфазных потоков типа газ-сыпучий материал. Большой вклад в решение задачи описания режимов движения двухфазных потоков внесли отечественные и зарубежные ученые С.Г. Ушаков, Ю.М. Кузнецов, И.М. Разумов, В. Сигел, Р. Чандана, И.М. Горбис, К.Е. Вирт и др. Физические и математические модели движения потока воздух-дисперсный материал приведены в работах Ф.И. Франкля, Г.И. Баренблатта, Л.Г. Лойцянского, З.Р. Горбиса, А.М. Дзядзио, А.В. Шваба и др. В первой главе диссертационной работы также представлена сравнительная характеристика систем пневмотранспорта различного типа и проведен анализ существующих конструкций камерных насосов. Особое внимание уделено проблемам энергетической эффективности и надежности пневмотранспортных установок.

Анализ современного состояния вопроса показал актуальность совершенствования систем пневмотранспорта с целью сбережения энергетических ресурсов.

Во второй главе приведены результаты промышленных экспериментов на действующих пневмотранспортных системах. Исследование работы пневмотранспортных систем с камерными насосами проводилось в условиях промышленной эксплуатации на ОАО «Кранэкс» (г. Иваново) и ОАО "Бонолит - Строительные решения» (г. Старая Купавна, Московская обл.). Принципиальная схема участка пневмотранспортной системы с измерительным оборудованием приведена на рисунке 1.

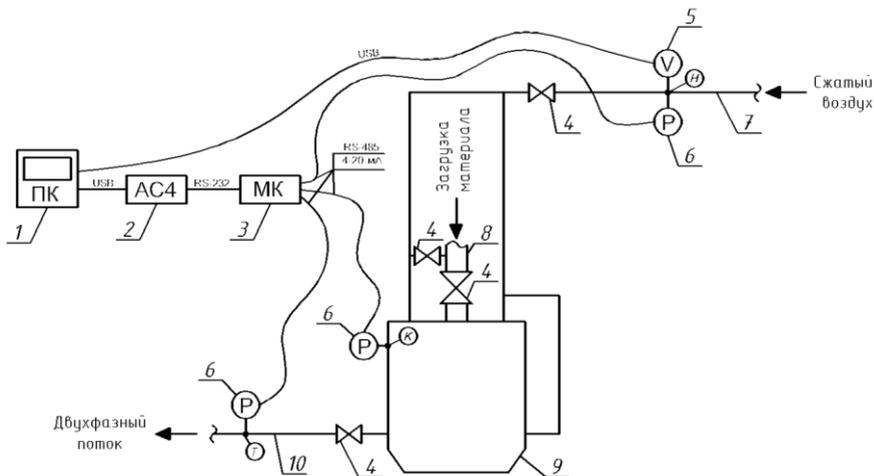


Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментального участка пневмосистемы на ОАО «Бонолит – Строительные решения»:

- 1 – персональный компьютер; 2 – автоматического преобразователя интерфейса ОвенАС4; 3 – модуля дискретного ввода-вывода Овен МК110-4ДН.4Р; 4 – запорная арматура; 5 – погружной расходомер ЕЕ 776; 6 – датчик давления Овен ПД100-ДИ1,0; 7 – трубопровод сжатого воздуха; 8 – загрузочный материалопровод; 9 – камера пневмонасоса; 10 – материалопровод

Измерение расхода и температуры сжатого воздуха выполнено при помощи погружного расходомера ЕЕ 776, а давления – при помощи датчиков давления типа Овен ПД100-ДИ1,0-171-0,5. Сбор данных выполнен при помощи модуля дискретного ввода-вывода Овен МК110-4ДН.4Р и автоматического преобразователя интерфейса Овен АС4. Окончательная обработка сигнала производилась на персональном компьютере при помощи SCADA– программного пакета, предназначенного для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления. В качестве SCADA была выбрана система OWEN PROCESS MANAGER.

В результате эксперимента получены зависимости давления в камере пневмонасоса, расхода и температуры воздуха за время разгрузки. Усредненные параметры цикла разгрузки камерного насоса приведены на рисунке 2.

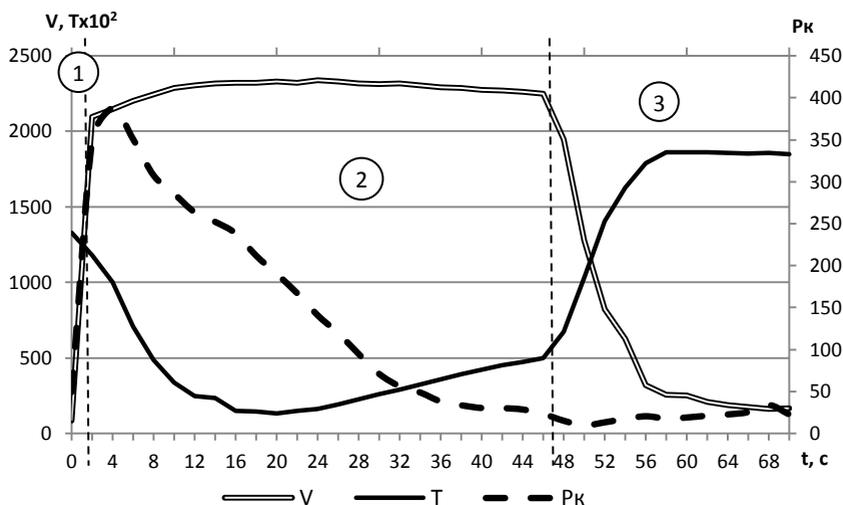


Рисунок 2 – Усредненные параметры цикла разгрузки камерного насоса:
 V – объемный расход сжатого воздуха, м³/ч; T – температура сжатого воздуха, °C;
 P_k – давление в камере монжуса, кПа

Анализ рисунка 2 показал, что в процессе разгрузки можно выделить три характерных периода. Первый период характеризуется резким увеличением расхода воздуха (его скорости) в воздухопроводе и набором давления в камере камерного насоса марки «Монжус». Продолжительность первого периода 2 - 6 с. Второй период – режим стационарной разгрузки. Давление в камере пневмонасоса монотонно снижается; расход воздуха изменяется незначительно. Во втором периоде удаляется до 90% материала. Продолжительность периода 43 - 52 с. Третий период – режим остаточной разгрузки. Характеризуется постепенным снижением расхода воздуха, транспортирующего сыпучий материал. Давление в камере пневмонасоса изменяется незначительно.

Аналогичные экспериментальные исследования были проведены на промышленном предприятии ОАО «Кранэкс» (г. Иваново), в состав пневмотранспортной системы которого входит камерный насос марки «Gemco».

Результаты экспериментов были использованы для настройки математической модели при её реализации с помощью программно-вычислительного комплекса ANSYS Fluent.

В третьей главе разработана математическая модель движения и теплообмена двухфазного потока (газ-твёрдое тело). Математическая

модель основана на уравнениях движения, сохранения энергии и массы в постановке взаимопроникающих потоков (модель Эйлера). Принято, что сыпучий материал имеет свойства псевдожидкости. Система дифференциальных уравнений имеет вид:

1. Уравнение переноса импульса для твердой фазы:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_s \rho_s w_{j,s}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\gamma_s \rho_s w_{j,s} w_{i,s}) = -\gamma_s \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial p_s}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij,s}}{\partial x_j} + \gamma_s \rho_s g_i + K_{sf}(w_{i,f} - w_{i,s}). \quad (1)$$

2. Уравнение переноса импульса флюида:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_f \rho_f w_{j,f}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\gamma_f \rho_f w_{j,f} w_{i,f}) = -\gamma_f \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij,f}}{\partial x_j} + \gamma_f \rho_f g_i + K_{fs}(w_{i,s} - w_{i,f}). \quad (2)$$

3. Уравнение неразрывности для твердой фазы:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_s \rho_s) + \nabla(\gamma_s \rho_s w_s) = 0. \quad (3)$$

4. Уравнение неразрывности для флюида:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_f \rho_f) + \nabla(\gamma_f \rho_f w_f) = 0. \quad (4)$$

5. Уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_f \rho_f h_f) + \nabla(\gamma_f \rho_f w_f h_f) = -\gamma_f \frac{\partial p_f}{\partial t} + \frac{\bar{\tau}_f}{\nabla w_f} - \nabla q_f + S_f + \alpha_{fs}(T_s - T_f)F; \quad (5)$$

где γ – объемная концентрация; h – энтальпия, Дж/кг; ρ – плотность, кг/м³; p – давление, Па; w – скорость, м/с; τ – тензор напряжений, Н/м²; K – коэффициент взаимодействия фаз; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); S – источниковый член, Вт; q – тепловой поток, Вт; F – площадь поверхности теплообмена; индексы s и f – твердая фаза и флюид соответственно.

Для описания турбулентных свойств потока была принята k - ε модель турбулентности. Для учета сил межфазного взаимодействия использован коэффициент K , расчетная формула для которого выбирается в зависимости от концентрации твердой фазы.

Решение системы уравнений (1) – (5) было выполнено в ППК Ansys методом конечных элементов, поэтому для определения параметров работы камерного насоса была построена расчетная сетка. В результате тестовых расчетов была сгенерирована расчетная сетка со следующими характеристиками:

- количество элементов – 1302097;
- количество узлов – 1425245;
- ортогональное качество – 0,96127.

Адекватность математической модели проверена сравнением результатов расчета потерь давления при движении двухфазного потока с данными, опубликованными в работе Ч. Ратнаяке (рисунок 3, 4), и результатами промышленного эксперимента (рисунок 5, 6).

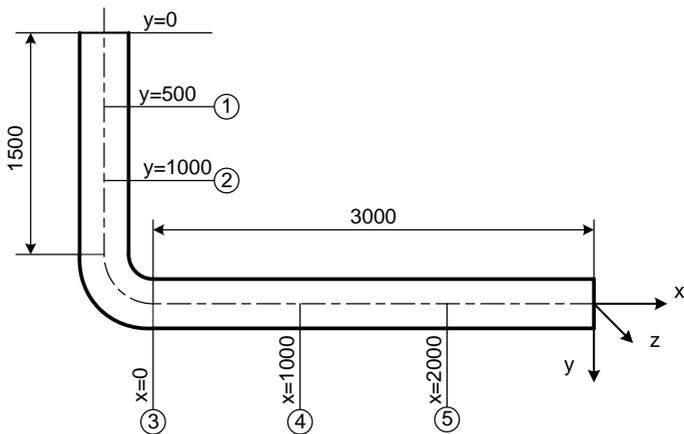


Рисунок 3 – Экспериментальный участок трубы

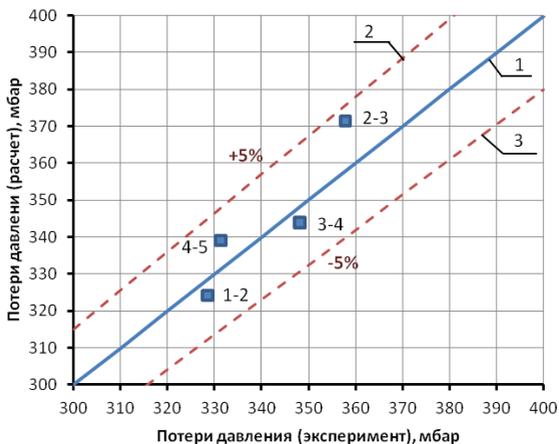


Рисунок 4 – Потери давления по длине трубы (сравнение данных расчета и эксперимента)

Погрешность расчета потерь давления в трубе с коленом составила менее 5% (см. рисунок 4).

На рисунках 5 и 6 приведены результаты расчета на математической модели и данные промышленных экспериментов по определению давления в камере пневмонасосов, выполненных на ОАО «Кранэкс» и ОАО «Бонолит – Строительные решения».

Средняя погрешность математического моделирования составила не более 12%, что свидетельствует об адекватности математической модели движения двухфазного потока.

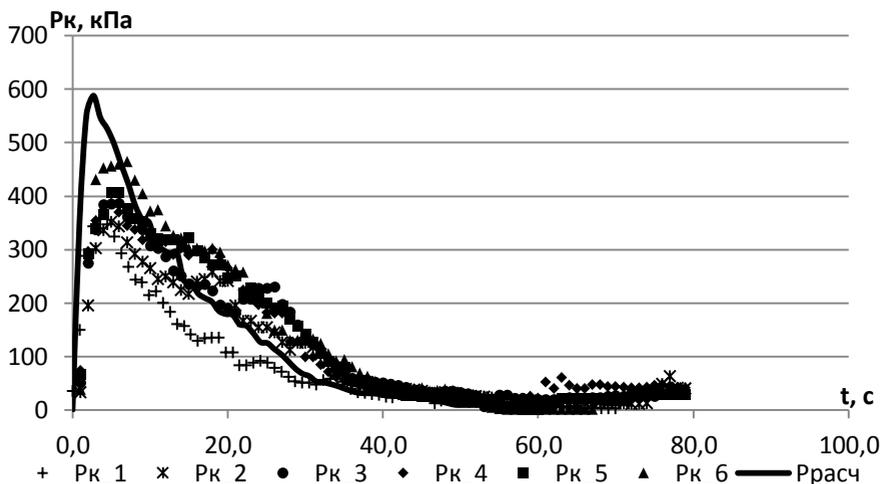


Рисунок 5 – Давление в камере насоса марки «Монжук»:

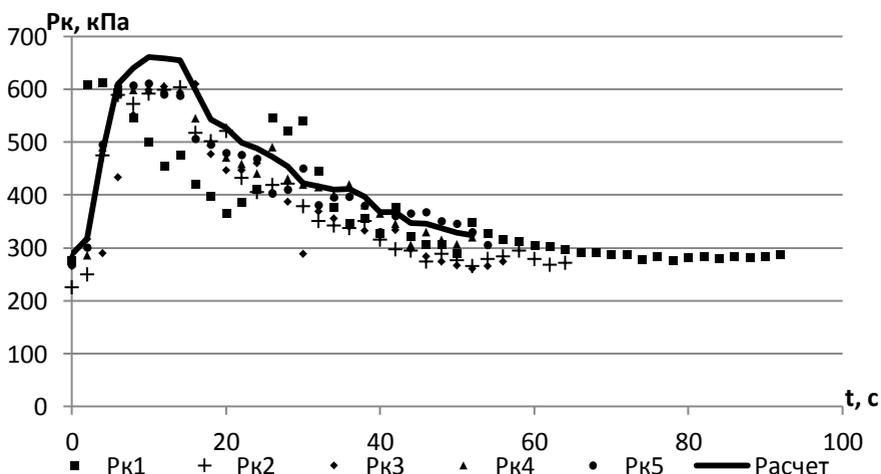


Рисунок 6 – Давление в камере насоса марки «Гемсо»:

В четвертой главе при помощи математической модели, реализованной в ПБК ANSYS Fluent, получены зависимости режимных характеристик системы пневмотранспорта (потери давления, расход сжатого воздуха, производительность) от конструкции пневмонасоса и температуры сжатого воздуха.

Для дополнительной турбулизации и изменения направления разгрузки была выполнена реконструкция камерного насоса марки «Монжус» НО-324МА (изменено количество патрубков подачи сжатого воздуха, их размер и конфигурация; увеличен диаметр разгрузочного патрубка), которая привела к повышению энергетической эффективности и надежности работы ПТУ.

Расчет показал увеличение производительности камерного насоса после модернизации в 2,34 раза, что было подтверждено в результате проведения промышленных экспериментов (рисунок 7).

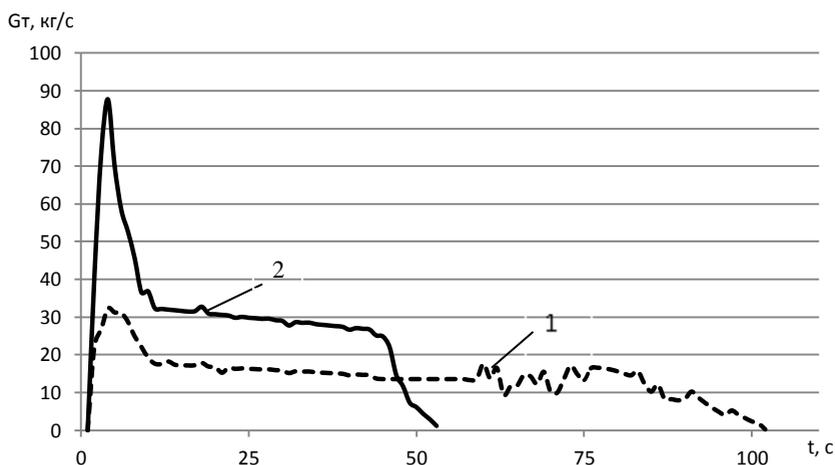


Рисунок 7 – Массовый расход сыпучего материала за камерным насосом:
1 – до реконструкции, 2 – после реконструкции

Анализ рисунка 7 показывает, что продолжительность разгрузки камерного насоса после реконструкции уменьшилась практически в два раза. Удельный расход воздуха на перемещение одной тонны материала уменьшился с 26,07 м³/т до 20,27 м³/т (на 29%).

Зависимость производительности камерного насоса от температуры сжатого воздуха приведена на рисунке 8. Из анализа рисунка 8 следует, что повышение температуры сжатого воздуха до 90 – 100⁰С приводит к увеличению производительности камерного насоса на 18 – 21%.

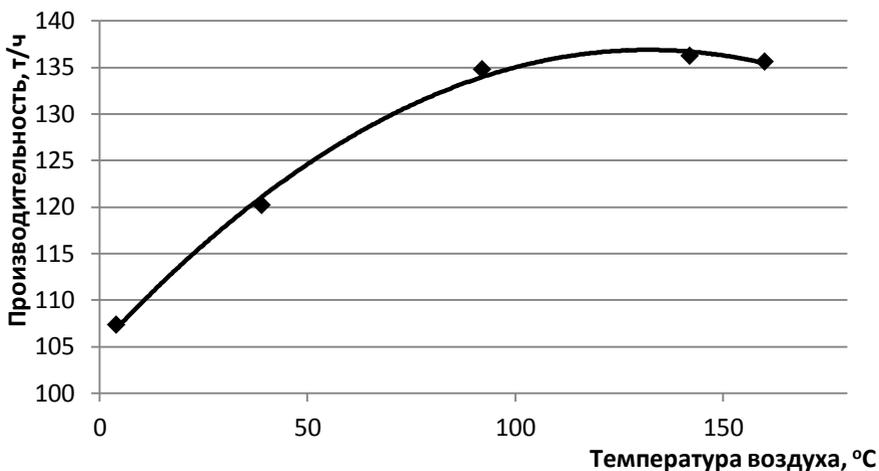


Рисунок 8 – Влияние температуры сжатого воздуха на производительность камерного насоса марки «Монжус»

В заключении четвертой главы приведен расчет повышения энергетической эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) при реконструкции камерного насоса (таблица 1).

Таблица 1 – Экономические показатели реконструкции камерного насоса марки «Монжус» НО-324МА

Наименование показателей	ед. изм.	до реконструкции	после реконструкции
Удельный расход сжатого воздуха на перемещение извести	м ³ /т	26,07	20,27
Годовой расход сжатого воздуха	м ³	1 237 863,51	962 258,76
Годовой расход электроэнергии на выработку сжатого воздуха	МВт·ч	164,635	127,98
Финансовые затраты на выработку сжатого воздуха	тыс. руб.	543,026	422,124
Экономия финансовых средств от реализации мероприятия	тыс. руб.	–	120,902

Таким образом, реконструкция камерного насоса привела к уменьшению финансовых затрат на выработку сжатого воздуха на 22%. Простой срок окупаемости мероприятия составил 0,13года.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные выводы, теоретически и практически значимые результаты работы:

1. Получены уникальные экспериментальные данные об изменении режимных параметров (расход, температура и давление сжатого воздуха) цикла разгрузки пневмокамерных насосов марки «Монжус» и марки «Gemco» в производственных условиях.

2. Результаты экспериментального исследования камерных насосов использованы для наладки режимов работы пневмотранспортных систем и модернизации конструкции пневмотранспортных установок.

3. Разработана математическая модель движения двухфазных потоков сыпучих материалов с учетом взаимодействия частиц, неравномерности заполнения материалопровода, теплообмена между фазами и турбулентности потока.

4. Адекватность математической модели проверена путем сравнения расчета основных параметров работы камерного насоса с экспериментом. Среднее отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышает 12%, что говорит об адекватности математической модели.

5. Выполнена реконструкция камерного насоса марки «Монжус». Производительность камерного насоса после реконструкции увеличилась в 2,34 раза.

6. На основе математического моделирования были выполнены расчеты влияния диаметра частиц, температуры сжатого воздуха, диаметра выходного патрубка, расхода сжатого воздуха на производительность пневмокамерных насосов для определения рациональных параметров их работы.

7. Доказано, что увеличение температуры сжатого воздуха до 90 – 100 °С приведет к увеличению производительности камерных насосов на 18 – 21%.

8. Доказана экономическая эффективность реконструкции одного камерного насоса марки «Монжус». Годовая экономия денежных средств составила 120,902 тыс. руб.

9. Результаты диссертационной работы внедрены на промышленном предприятии ОАО «Бонолит – Строительные решения» (г. Старая-Купавна, Московская обл.).

10. Результаты диссертационной работы переданы ОАО «Кранэкс» (г. Иваново) и ряду заинтересованных организаций для наладки камерных насосов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

1. Бухмиров, В.В. Система пневмотранспорта как объект исследования / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов** // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – Череповец: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет». – №1. – С.20 – 25.
2. Бухмиров, В.В. Математическое моделирование работы камерного насоса / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов** // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/113-11719>.
3. Бухмиров, В.В. Математическое моделирование двухфазных потоков в установках пневмотранспорта мелкодисперсных материалов / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов** // Вестник ИГЭУ. – Иваново: ИГЭУ, 2013. - №5. – С. 24-28.

Публикации в других изданиях

4. Бухмиров, В.В. Особенности пневмотранспорта при транспортировке сыпучих материалов / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов** // Материалы V Регион. науч.-тех. конф. студентов и аспирантов «Энергия-2010». – Иваново: ИГЭУ. – Т.1. – С. 101 – 103.
5. Бухмиров, В.В. Энергосбережение при пневмотранспорте сыпучих материалов / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов** // Труды V Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов «Энергосбережение – теория и практика». – М.: МЭИ, 2010. – С. 33-35.
6. Бухмиров, В.В. Модели двухфазных потоков в системах пневмотранспорта / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов** // Сборник научных трудов Междунар. науч.-тех. конф. "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, 2011. – Теплоэнергетика. – С. 163 – 164.

7. Бухмиров, В.В. Пути повышения энергоэффективности систем пневмотранспорта / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов**, М.В. Пророкова // Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. «Повышение эффективности энергетического оборудования» (ENERGY-2011). – Иваново: ИГЭУ, 2011. – С. 223 –226.
8. Бухмиров, В.В. Применение ANSYS FLUENT для моделирования пневмокамерного насоса / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов** // Материалы VII Регион. науч.-тех. конф. студентов и аспирантов «Энергия-2012». – Иваново: ИГЭУ, 2012. – Т.8. – С. 62 – 65.
9. Бухмиров, В.В. Выбор метода расчёта двухфазных потоков в системах пневмотранспорта / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов** // Материалы Регион. науч.-тех. конф. студентов и аспирантов «Энергия-2012». – Иваново: ИГЭУ, 2012. – Т.1. – С. 159 – 161.
10. Бухмиров, В.В. Методы математического описания систем пневмотранспорта / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов** // Материалы VII Междунар. науч.-тех. конф. «Повышение эффективности энергетического оборудования» (ENERGY-2012). – СПб, 2012. – Т.2. – С.144 – 147.
11. Бухмиров, В.В. Повышение энергетической эффективности пневмотранспортных систем / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов** // Материалы отчетной конференции молодых ученых ИГЭУ «Энергия инновации – 2012». – Иваново: ИГЭУ, 2013. – Т. 1. – С. 48 – 52.
12. Бухмиров, В.В. Моделирование пневмокамерного насоса в ANSYSFLUENT / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов** // Тезисы докладов XIX Междунар. науч.-тех. конф. студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика". В 4 томах. – М: МЭИ, 2013. – Т.4. – С. 197
13. Бухмиров, В.В. Сравнительная характеристика систем пневмотранспорта / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов**// Материалы VIII Междунар. науч.-тех. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных "Энергия-2013. В 7 т. –Иваново: ИГЭУ, 2013. – Т.1. – С.79 – 80.
14. Бухмиров, В.В. Сравнительный анализ систем пневмотранспорта / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов** // Материалы Междунар. науч.-тех.

- конф. "Состояние и перспективы развития электротехнологии" XVII Бенардосовские чтения. – Иваново: ИГЭУ, 2013. – Т.2. – С.150 – 153.
15. Бухмиров, В.В. Особенности математического моделирования двухфазных потоков высокой концентрации / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов** // Материалы XIX Всерос. науч.-тех. конф. «Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность»: материалы трудов / Томский политехнический университет, 4-6 декабря 2013 – Томск: Изд-во ООО «Скан», 2013. Т. I. – С. 295-297.
16. Бухмиров, В.В. Повышение энергоэффективности систем пневмотранспорта методами математического моделирования / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов** // Тезисы докладов XX Междунар. науч.-тех. конф. студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика". В 4 томах. – М: МЭИ, 2014. – Т.3. – С. 186 – 187.
17. Бухмиров, В.В. Экспериментальное исследование работы камерного насоса «Монжус» / В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов** // Материалы IX Междунар. науч.-тех. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных "Энергия-2014. В 7 т. – Иваново: ИГЭУ, 2014. – Т.1. Ч.2 – С.59 – 63.
18. Бухмиров, В.В. Исследование работы систем пневмотранспорта с камерными насосами // В.В. Бухмиров, **Г.А. Родионов** // Материалы III Всерос. науч.-практ. конф. «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2014): материалы конференции; URL: http://vlavrov.professorjournal.ru/c/document_library/get_file?uuid=c80593c3-86c5-45bf-80e1-823f6d7cfcfc&groupId=44972

РОДИОНОВ ГЕННАДИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТЕ СЫПУЧИХ
МАТЕРИАЛОВ КАМЕРНЫМИ НАСОСАМИ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 26.11.2014. Формат 60/84 ^{1/16}
Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16
Тираж 100 экз. Заказ № 124.
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.