

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТИРОВАНИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

К. А. Мухопад, В. П. Тарасов

*Приводится описание экспериментального стенда для исследований нестационарных процессов пневмотранспортирования сыпучих материалов, обсуждаются результаты проведенных экспериментов, проводится их сравнение с параметрами работы нагнетательной пневмотранспортной установки, полученными в результате компьютерного расчета по ранее разработанной физико-математической модели. Оборудование стенда позволяет изменять широкий круг параметров, влияющих на процесс пневмотранспортирования: длину и конфигурацию трассы, производительность по транспортируемому материалу, расход воздуха, объем и сопротивление воздухоподводящего оборудования. Кроме того, на стенде можно имитировать и регистрировать с помощью измерительных средств различные возмущения по производительности, изменять характеристики воздуходувных машин и приемно-питающих устройств, а также использовать для транспортирования материалы с различными физико-механическими свойствами. Приборы и средства измерений стенда позволяют регистрировать в непрерывном режиме и передавать информацию на ЭВМ об основных параметрах работы пневмотранспортной установки (производительности по материалу, расходе воздуха и избыточном давлении в элементах системы). Проведенные экспериментальные исследования подтверждают необходимость учета нестационарных процессов при расчете и проектировании систем пневмотранспорта сыпучих материалов, т.к. изменения основных параметров пневмотранспортной установки – избыточного давления и расхода воздуха, при работе на нестационарных режимах могут существенно (в разы) отличаться от их расчетных значений на стационарных. Результаты компьютерного моделирования с учетом нестационарных процессов при пневмотранспортировании в достаточной для практического применения степени согласуются с экспериментальными данными.*

*Ключевые слова: пневматический транспорт, воздух, сыпучие материалы, нестационарные процессы, экспериментальный стенд, производительность, избыточное давление, объемный расход, возмущения, эксперименты, модель.*

### ВВЕДЕНИЕ

Пневматический транспорт сыпучих материалов, благодаря целому ряду достоинств перед другими способами транспортирования, уже более 100 лет широко используется в различных сферах человеческой деятельности. Пневмотранспортные установки (ПТУ) компактны, относительно просты по устройству, они легко вписываются в технологический процесс, оказывают минимальное влияние на окружающую среду и человека; практически отсутствует потеря перемещаемого продукта; имеется возможность сочетать транспортирование материалов с другими технологическими процессами. Однако, несмотря на многочисленные достоинства, внедрение пневмотранспортных установок на предприятиях связано с рядом проблем. Прежде всего, это высокий удельный расход энергии, который, например, на предприятиях пищевой и химической промышленности в 1,5 – 4 раза превы-

шает соответствующий показатель у механических видов транспорта. Объяснить повышенную энергоемкость ПТУ можно стремлением проектировщиков обеспечить устойчивую работу установок за счет увеличения скорости воздуха в материалопроводе. Это, кроме повышения энергозатрат, увеличивает вероятность повреждения перемещаемого материала, приводит к повышенному износу материалопровода, уменьшает срок эксплуатации пневмотранспортного оборудования, увеличивает количество вредных выбросов в атмосферу.

Уменьшение расхода электроэнергии и обеспечение стабильной работы ПТУ – это две взаимосвязанные задачи, которые возникли вместе с появлением пневмотранспорта как способа перемещения сыпучих материалов и штучных грузов. Эта проблема продолжает остро стоять, несмотря на определенные результаты, достигнутые учеными,

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТИРОВАНИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

конструкторами и эксплуатационниками, работающими в этой области.

Одной из основных причин завышения скоростей воздуха и повышенного потребления энергии установками пневматического транспорта является несовершенство используемых методик его расчета и проектирования. Существующие методики расчета, как правило, основываются на многочисленных эмпирических зависимостях. Это, в свою очередь, объясняется тем, что многие математические модели, описывающие работу систем пневмотранспорта, не учитывают переходные и неустановившиеся процессы, считая процесс пневмотранспортирования сыпучих материалов стационарным. Однако пренебрежение не стационарностью процесса пневмотранспортирования на практике может привести к серьезным проблемам уже на стадии пуска ПТУ.

В [1] на основе континуальной теории движения двухфазных сред предложена физико-математическая модель нагнетательной ПТУ с учетом ее работы в переходных и неустановившихся режимах. Основной целью настоящей работы является установление адекватности предложенной модели в лабораторных условиях. Ранее результаты численного решения рассматривались в работе [2]. Но объем проведенных исследований и ограниченность изменяемых в них параметров оставляют повод для некоторых сомнений. В частности, не подтверждено соответствие теоретических и экспериментальных значений параметров пневмотранспортирования при возмущениях производительности по материалу.

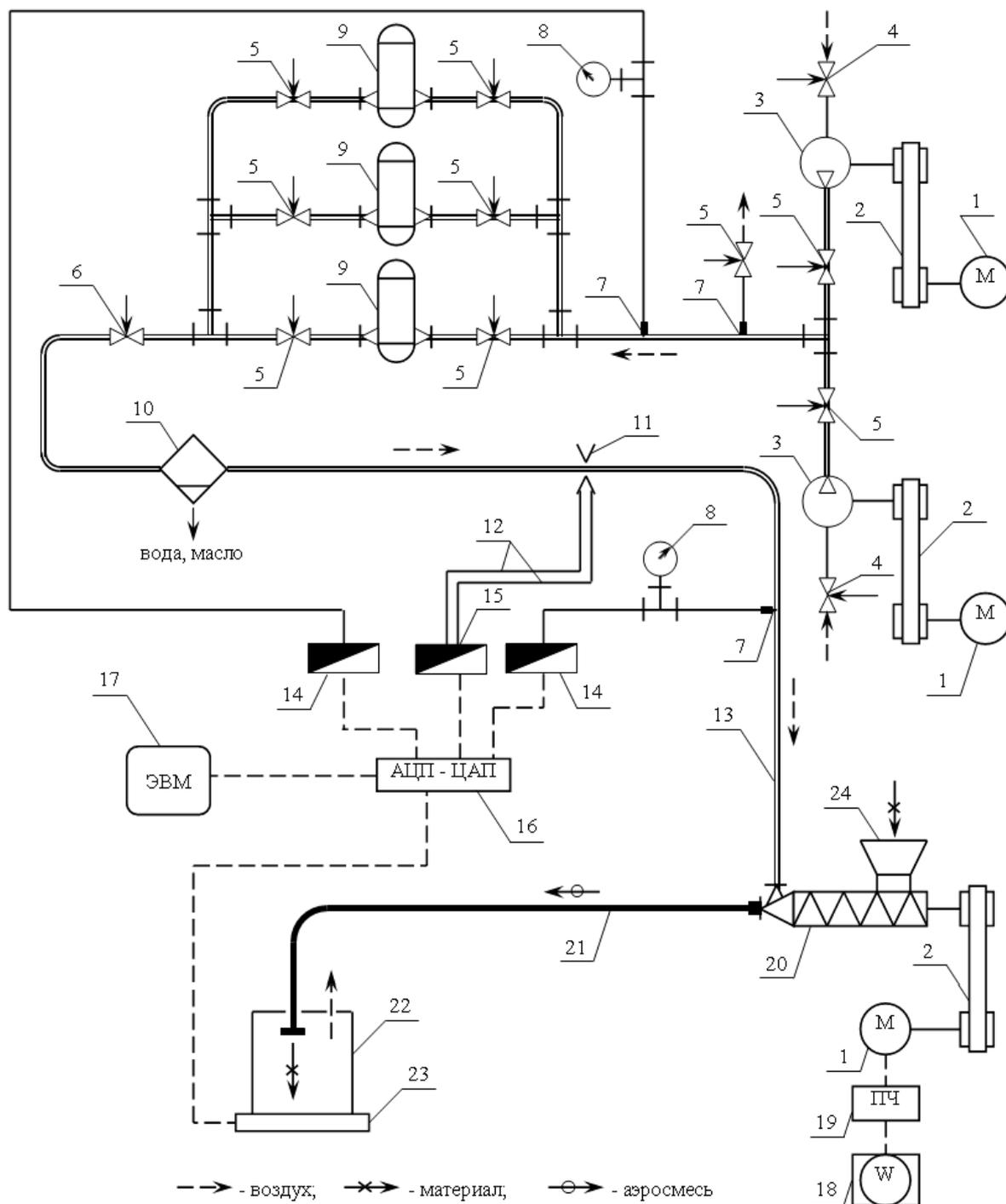
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Для подтверждения соответствия теоретических значений параметров экспериментальным на базе лаборатории пневмотранспорта и пылеулавливания АлтГТУ им. И.И. Ползунова в ранее разработанный экспериментальный стенд [3 – 5] (в его конструкцию и методику проведения опытов) внесен ряд изменений, позволяющих выполнить эту задачу. Схема стенда представлена на рис. 1.

Оборудование стенда позволяет моделировать различные режимы работы пневмотранспортной установки (в том числе нестационарные и переходные), а средства измерений стенда – фиксировать в непрерывном режиме изменение основных параметров пневмотранспортирования (расход воздуха, избыточное давление, производительность установки по материалу).

В качестве воздушодувных машин на стенде используются компрессоры 3, обеспечивающие получение различных расходов воздуха в широком диапазоне избыточного давления, а в сочетании с регулирующими вентилями 4 и 5 – изменять основную гидравлическую характеристику воздушодувной машины. На воздуховоде 13 располагается измерительный участок, с установленными на нем диафрагмой 11 и датчиком давления 14. Материалопровод представляет собой набор резиноканевых рукавов и металлических труб с внутренним диаметром 38 мм, длина которого может варьироваться в пределах от 10 до 100 м. В качестве приемно-питающего устройства 20 могут использоваться шнековые, шлюзовые и камерные питатели, обеспечивающие подачу материала в материалопровод 21. Загрузка сыпучего материала в питатель осуществляется из бункера 24. В качестве разгрузителя применяется фильтр-отделитель 22, установленный на тензометрические весы 23, что позволяет получать в непрерывном режиме информацию о производительности ПТУ.

Регистрация параметров пневмотранспортирования на экспериментальном стенде производилась с помощью ЭВМ 17 и комплекса измерительных средств. Производительность определялась с помощью тензометрических платформенных весов CAS DB-II-150, обеспечивающих измерение массы до 150 кг. Конструктивное исполнение этих весов позволяет подключать их к плате АЦП-ЦАП на персональном компьютере и выводить данные на монитор или записывать их в память компьютера. Для измерения расхода воздуха используется сужающее устройство - стандартная диафрагма в комплекте с датчиком разности давлений. Диафрагма 11 камерная стандартная ДКС-0,6-50-1 изготовлена в соответствии с ГОСТ 8.586 – 2005. Она обеспечивает измерение расхода воздуха в широком диапазоне его изменения при давлении в трубопроводе до 0,6 МПа. Для преобразования разности давлений, фиксируемых на диафрагме, в токовый сигнал служат преобразователи разности давлений 15 «Сапфир-22ДД». Величина избыточного давления в материалопроводе и в установке измеряется датчиками давления 14 МП-2,5, а визуально фиксируется образцовыми манометрами 8. Показания измерительных приборов передаются на персональный компьютер через плату 16 АЦП-ЦАП L-154, подключенную к ISA порту ЭВМ. Для визуализации контроля параметров пневмотранспортной установки применяется программный продукт PowerGraph.



1 – электродвигатель; 2 – ременная передача; 3 – компрессор; 4, 5, 6 – регулирующие вентили; 7 – штуцер; 8 – манометр; 9 – ресивер; 10 – влагомаслоотделитель; 11 – диафрагма; 12 – резиновые шланги; 13 – воздухопровод; 14 – датчик давления МП; 15 – преобразователь разности давлений «Сапфир-22ДД»; 16 – плата АЦП-ЦАП; 17 – ЭВМ; 18 – ваттметр; 19 – преобразователь частоты; 20 – приемно-питающее устройство; 21 – материалопровод; 22 – фильтр-отделитель; 23 – тензометрические весы; 24 – загрузочный бункер

Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда

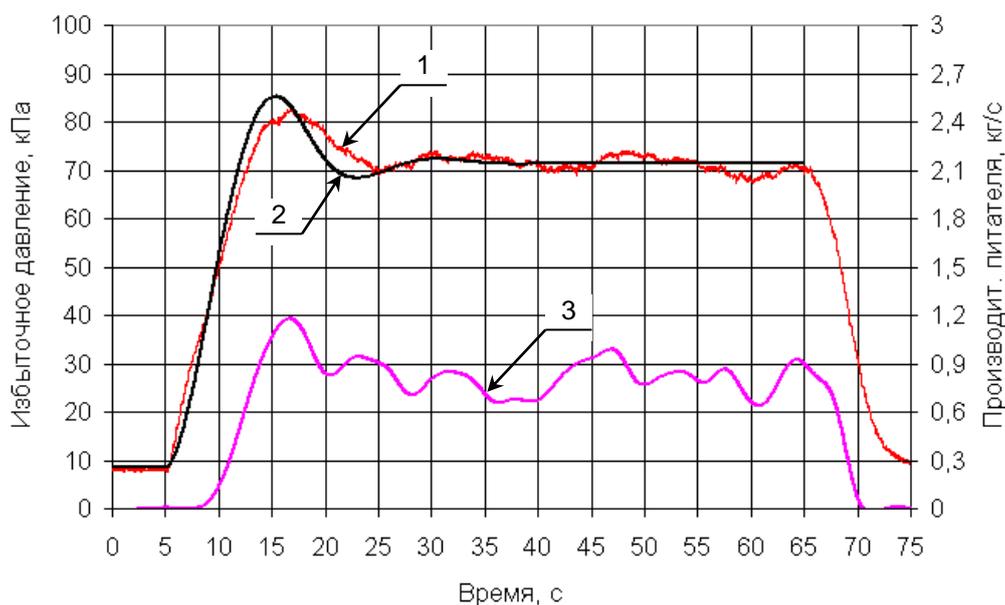
## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПНЕВОТРАНСПОРТИРОВАНИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Стенд позволяет изменять широкий круг параметров, влияющих на процесс пневмотранспортирования: длину и конфигурацию трассы (набором стальных трубопроводов и резиноканевых рукавов), производительность по транспортируемому материалу (подачей материала питателем), расход воздуха (производительностью компрессоров, изменяя сопротивления всасывания и количество работающих компрессоров), объем воздухоподводящего оборудования и его сопротивление (за счет замены ресивера и изменения сопротивления дросселя б). Кроме того, на стенде можно имитировать: различные возмущения по производительности (дополнительной подачей материала в питатель или изменением частоты вращения его основного рабочего органа), характеристики приемно-питающих устройств (типом питателя, частотой вращения основного рабочего органа, размерами и соотношением размеров основных рабочих органов), а также использовать для транспортирования материалы с различными физико-механическими свойствами.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Ниже приводятся и анализируются результаты некоторых экспериментов, в которых моделировали равномерную и неравномерную подачу продукта в материалопровод, сравниваются опытные данные с расчетными значениями, полученными по модели [1].

Сведения о влиянии равномерности подачи материала важны для оценки устойчивости процесса, а необходимость их учета диктуется практическим наличием этого явления. Обеспечить на практике равномерную подачу материала в трубопровод не удастся. Неравномерность в подаче материала характерна для большинства практических случаев работы ПТУ. Причины появления возмущений обсуждались ранее, например, в [3, 6]. В экспериментах возмущения в подаче материала достигались путем изменения частоты вращения основного рабочего органа питателя с помощью преобразователя частоты 19 или подачей дополнительного количества продукта в смесительную камеру питателя.



1 – избыточное давление (эксперимент); 2 – избыточное давление (модель);  
3 – производительность (на выходе из материалопровода)

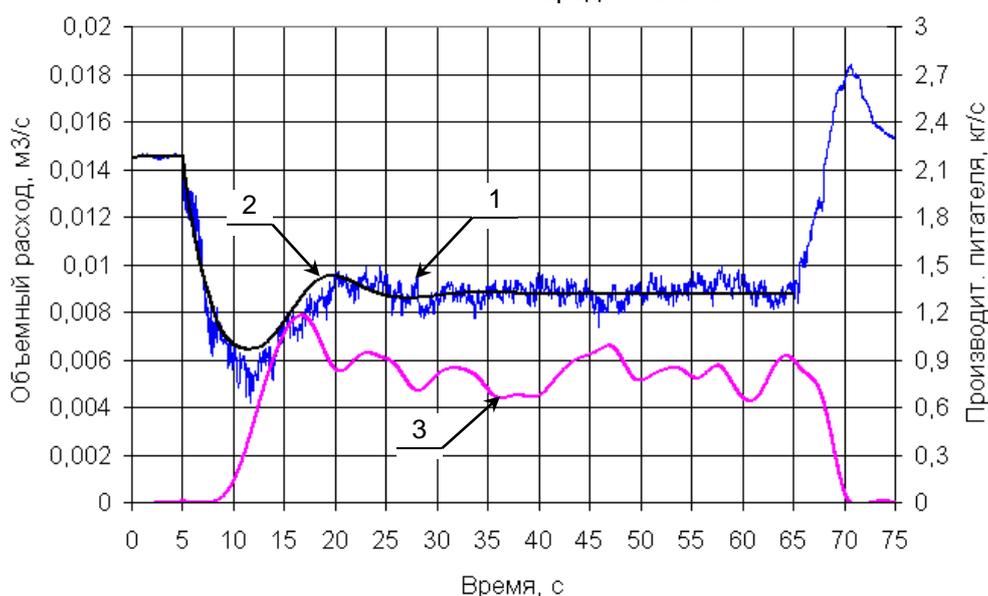
Рисунок 2 – Диаграммы изменения избыточного давления и производительности по материалу без дополнительных возмущений

На рис. 2, 3 и 5, 6 представлены характерные диаграммы изменения основных параметров процесса пневмотранспортирования (избыточного давления, объемного расхода воз-

духа в начале материалопровода и производительности), полученные в процессе пневмотранспортирования муки на стенде и расчетные значения по программе [7] при тех же

исходных данных. При этом, на рис. 2 и 3 приведены диаграммы изменения параметров пневмотранспортирования без дополнительного возмущения по производительности, а на рис. 5 и 6 – диаграммы, отражающие существенные колебания в подаче, вызванные, например, работой предшествующего оборудования. Диаграммы охватывают временной диапазон работы ПТУ, в котором можно выделить 3 этапа. Первый этап – переходный, включающий пуск компрессора и выход на стационарный режим на чистом воздухе (от 0 до 5 секунды); пуск питателя (с 5 секунды) и его выход на установившийся режим. Второй этап – установившийся, характер изменения параметров процесса становится относительно постоянным (в эксперименте на рис. 2 и 3 примерно с 25 по 65 секунду, а в эксперименте на рис. 5 и 6 примерно с 18 по 47 секунду). Третий этап – переходный: выключение питателя, опорожнение материалопровода и остановка компрессора (в опыте на рис. 2 и 3 после 65 секунды, а в опыте на рис. 5 и 6

после 47 секунды). В реальных системах пневматического транспорта первый этап длится относительно непродолжительное время. Однако пренебрегать им и исключать его из анализа нельзя. В случае нарушения устойчивости работы ПТУ на этом этапе (что на практике часто происходит), реализация последующего процесса без проведения специальных работ становится невозможной. Это объясняется тем, что система пневматического транспортирования не является самовосстанавливающейся. Второй этап в реальных условиях занимает подавляющее время работы ПТУ. Третий этап, также, как и первый, занимает непродолжительное время. С практической точки зрения этот этап интересен только в плане определения времени опорожнения материалопровода и момента отключения компрессора. Численные значения расхода воздуха и избыточного давления получали путем непосредственного пересчета показаний преобразователя перепада давления на диафрагме и преобразователя давления, установленного перед питателем.



1 – объемный расход воздуха (эксперимент); 2 – объемный расход воздуха (модель); 3 – производительность (на выходе из материалопровода)

Рисунок 3 – Диаграммы изменения расхода воздуха и производительности по материалу без дополнительных возмущений

Результаты представленных на рисунках экспериментов выполнены при следующих условиях. Производительность по материалу  $G_m \approx 0,8$  (кг/с); в качестве воздуходувной машины использовался компрессор с основной характеристикой  $G_{вм} \approx 0,0189 = \text{const}$  (кг/с); питатель – винтовой, у которого практически не

было утечек в условиях проведения эксперимента; объем воздухоподводящего оборудования  $V = 0,05$  (м³); длина трассы транспортирования  $L = 24$  (м). Соответственно в программу расчета закладывались исходные данные, соответствующие условиям эксперимента. Производительность установки опре-

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПНЕВОТРАНСПОРТИРОВАНИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

делялась путем численного дифференцирования данных изменения массы материала, находящегося на тензометрических весах, после удаления «шума».

Характерные причины и последствия изменения расхода (скорости) воздуха и давления при относительно равномерной подаче, включая пуск и остановку питателя (рис. 2 и 3) анализировались ранее, например, в [6]. На

рис. 2 и 3 сопоставлены диаграммы изменения избыточного давления (линии 1 и 2 на рис. 2) и объемного расхода воздуха (линии 1 и 2 на рис. 3) при практически равномерной подаче материала, полученные в ходе эксперимента и в результате численного решения. Количественно отклонение результатов моделирования от экспериментальных данных представлено графически на рис. 4.

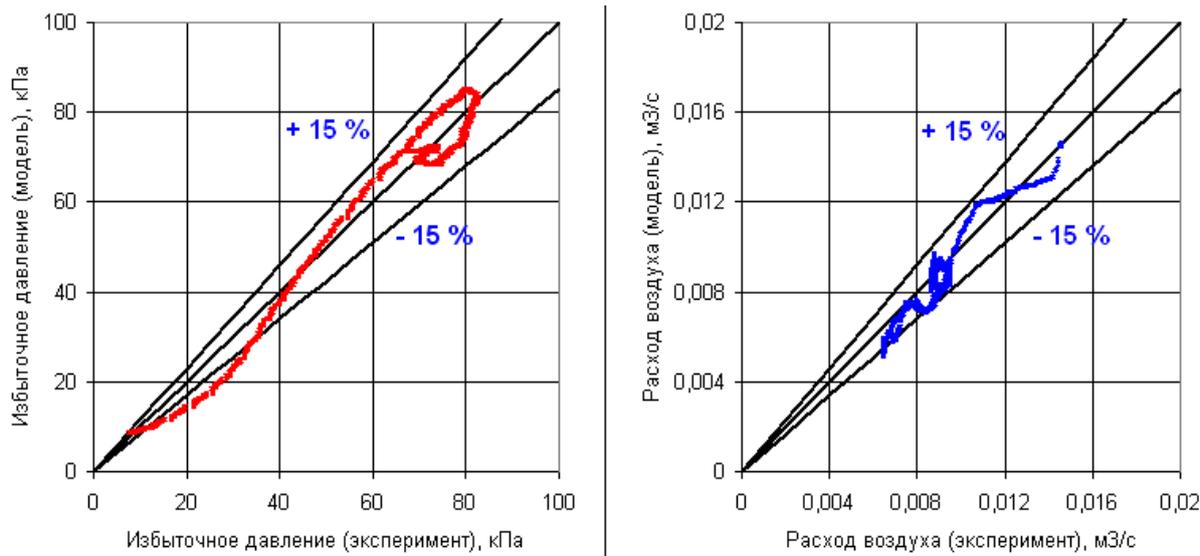
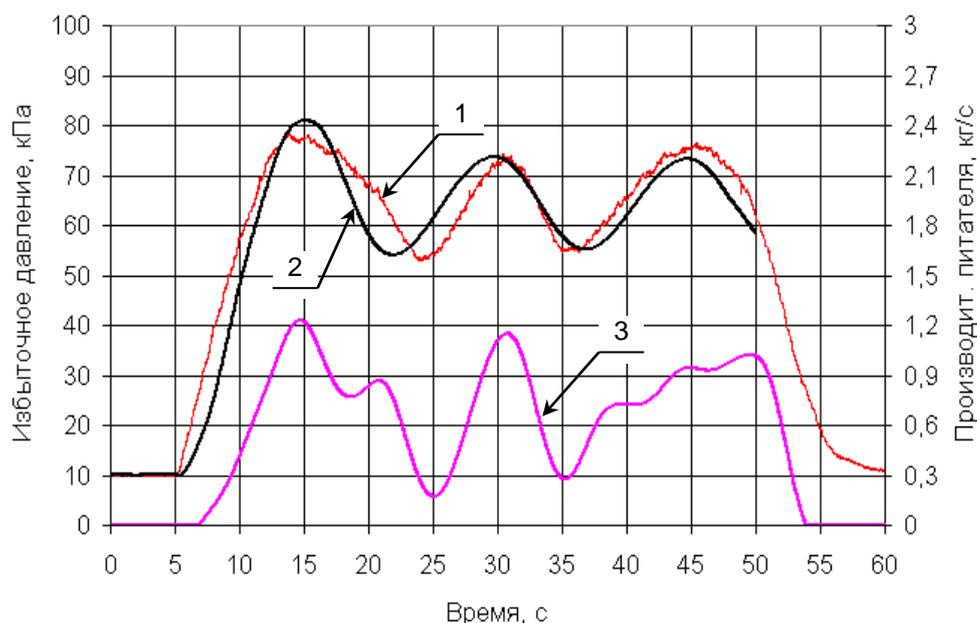


Рисунок 4 – Абсолютные отклонения результатов моделирования от экспериментальных данных без дополнительных возмущений производительности питателя

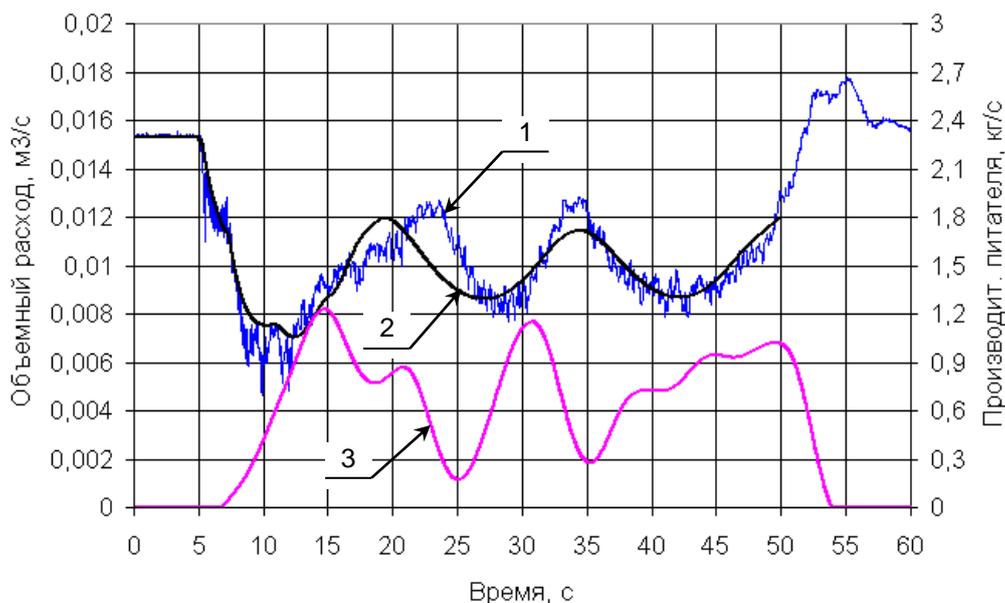


1 – избыточное давление (эксперимент); 2 – избыточное давление (модель);  
3 – производительность питателя

Рисунок 5 – Диаграммы изменения избыточного давления и производительности по материалу с учетом дополнительных возмущений

Возмущения в подаче материала в материалопровод (рис. 5 и 6) приводят к более существенным колебаниям расхода (скорости) воздуха и давления не только при пуске питателя, но и в установившемся режиме его работы. Причем колебания расхода (скорости) воздуха и избыточного давления синхронны с

колебаниями производительности, но сдвинуты по фазе. Это является следствием аналогичных, ранее изложенных в [6], причин, происходящих при пуске и остановке ПТУ. Экспериментальные исследования, в которых получены аналогичные результаты, проводились другими исследователями, например, [8].



1 – объемный расход воздуха (эксперимент); 2 – объемный расход воздуха (модель); 3 – производительность питателя

Рисунок 6 – Диаграммы изменения расхода воздуха и производительности по материалу с учетом дополнительных возмущений

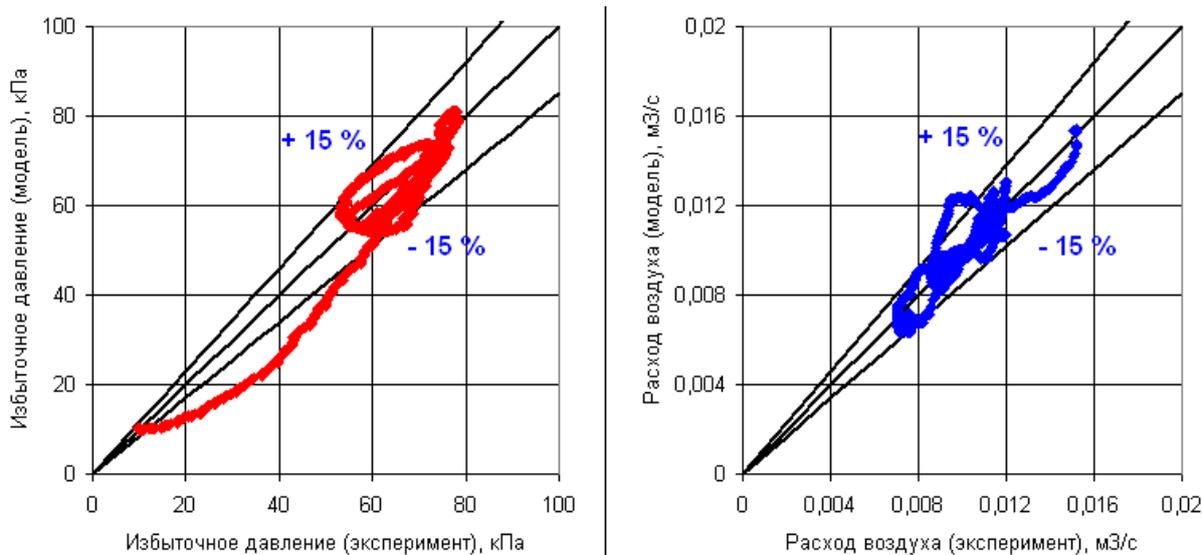


Рисунок 7 – Абсолютные отклонения результатов моделирования от экспериментальных данных с учетом дополнительных возмущений производительности питателя

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТИРОВАНИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

На рис. 5 и 6 сопоставлены диаграммы изменения избыточного давления (линии 1 и 2 на рис. 5) и объемного расхода воздуха (линии 1 и 2 на рис. 6) при практически равномерной подаче материала, полученные в ходе эксперимента и в результате численного решения. Количественно отклонение результатов моделирования от экспериментальных данных представлено графически на рис. 7.

В общем (как при относительно равномерной подаче, так и при значительных ее возмущениях) результаты экспериментальных исследований хорошо согласуются с физической сущностью происходящих явлений и с моделью. Отличия экспериментальных и теоретических значений параметров редко превышают 15 % (рис. 4 и 7). Только в периоды, когда градиенты изменения параметров очень большие, а абсолютные значения самих параметров малые, погрешность становится больше. Для систем пневматического транспорта погрешность 15 – 25 % считается вполне приемлемой.

### ВЫВОДЫ

Анализ опытных данных и их сравнение с расчетными значениями позволяет сделать некоторые выводы:

1) результаты экспериментальных исследований соответствуют физической сущности происходящих при пневмотранспортировании явлений, в том числе имеющих место в переходные и неустойчивые периоды работы ПТУ;

2) выполненные экспериментальные исследования вполне удовлетворительно как качественно, так и количественно подтверждают результаты расчета параметров процесса по ранее предложенной физико-математической модели.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов, В. П. Элементы теории работы однотрубной пневмотранспортной установки / В. П. Тарасов // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 2005. – № 5-6. – С. 82 – 85.

2. Мухопад, К. А. Анализ работы однотрубной нагнетающей пневмотранспортной установки / К. А. Мухопад, А. В. Яковлев, В. П. Тарасов, К. Б. Кошелёв // Вестн. КрасГАУ. – Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2007. – № 6. – С. 184 – 191.

3. Тарасов, В. П. Совершенствование работы нагнетающих пневмотранспортных установок: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / М.: Московский ордена трудового красного знамени технологический институт пищевой промышленности, 1986. – 259 с.

4. Тарасов, В. П. Стенд для исследования характеристик оборудования и параметров работы пневмотранспортных установок / В. П. Тарасов, О. Л. Левин, Л. Б. Зейналова // Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы техники и технологии пищевых производств». – Барнаул, 2001. – С. 67–68.

5. Тарасов, В. П. Интенсификация движения муки в отводах пневмотранспортных установок / В. П. Тарасов, А. В. Тарасов // Ползуновский вестник. – 2014. – №4. – Т.2. – С. 16–19.

6. Тарасов, В. П. Анализ явлений в нагнетающей пневмотранспортной установке / В. П. Тарасов // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств: материалы XVIII международной научно-практической конференции. – Барнаул, 2017. – С. 236 – 239.

7. Мухопад, К. А. Расчет пневмотранспортной установки / К. А. Мухопад, А. В. Яковлев, К. Б. Кошелёв, В. П. Тарасов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012616372, 2012.

8. Analysis of gas-solids feeding and slug formation in low-velocity pneumatic conveying / J. Li, S.S. Pandiella, C. Webb, T. Dyakowski et al. // Particulate Science and Technology. – 2003. – Vol. 21. – P. 57-73.

**Мухопад Константин Алексеевич** – старший преподаватель кафедры «Теоретическая механика и механика машин» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46, e-mail: [mka01@yandex.ru](mailto:mka01@yandex.ru), тел. 8(913) 0220144.

**Тарасов Владимир Петрович** – к.т.н., профессор кафедры «Машины и аппараты пищевых производств» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46, e-mail: [mapp.tar@mail.ru](mailto:mapp.tar@mail.ru), тел. 8(3852) 29-07-43.