

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУХОДУВНОЙ МАШИНЫ НА ПРОЦЕСС ПНЕВОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

В. П. Тарасов, К. А. Мухопад

Пневматический способ транспортирования – перспективный вид транспорта для многих сыпучих материалов, он широко используется в том числе и в пищевой промышленности, например, для транспорта муки, сахарного песка, крахмала, зерна и продуктов его переработки. Воздуходувная машина является основным источником гидравлической энергии в пневмотранспортных установках, а ее характеристика во многом определяет режимы работы систем пневмотранспорта. По результатам проведенного численного эксперимента, выполненного по ранее предложенной и апробированной физико-математической модели, описывающей работу пневмотранспортной установки, и компьютерной программе расчета, анализируется влияние характеристики воздуходувной машины на параметры процесса пневмотранспортирования. При этом считается, что параметры процесса изменяются не только по длине трассы транспортирования, но и во времени. Пневмотранспортная установка представлена в виде системы взаимовлияющего оборудования, а при ее работе имеют место дестабилизирующие факторы – возмущения, вызванные неравномерностью подачи транспортируемого материала из приемно-питающего устройства в материалопровод. Моделируемое возмущение представляло собой кратковременное повышение производительности пневмотранспортной установки. Сравнение параметров работы проводилось для двух систем пневматического транспорта муки, воздуходувные машины которых имели различные характеристики, но обеспечивали одинаковые условия работы на стационарных режимах. Результаты проведенного компьютерного моделирования позволили установить степень влияния основной гидравлической характеристики воздуходувной машины на параметры работы пневмотранспортной установки. Подтверждено предположение о том, что устойчивость процесса пневмотранспортирования будет обеспечиваться в большей степени при прочих равных условиях, если пневмотранспортная установка будет укомплектована воздуходувной машиной с «жесткой» (крутой) характеристикой.

Ключевые слова: пищевая промышленность, пневматический транспорт, воздуходувная машина, нестационарные процессы, гидравлическая характеристика, возмущения, моделирование, устойчивость, производительность, избыточное давление, скорость воздуха.

ВВЕДЕНИЕ

В пищевой промышленности для транспортирования зернистых и порошковых материалов широко используется пневматический способ транспортирования. С его помощью транспортируют муку, зерно, комбикорма, сахарный песок, крахмал и многие другие продукты питания на расстояния до 1000 м по самым сложным трассам. Наиболее существенным недостатком пневматического способа транспортирования, сдерживающим его применение, является неустойчивость его работы [1–5, 9]. Выполненные ранее теоретические и экспериментальные исследования [1–3] позволили определить причины появления неустойчивости и установить влияние различного оборудования на это. К числу основных причин нарушения устойчивости ра-

боты пневмотранспортной установки относится неравномерность подачи материала, а к наиболее влияющему на процесс пневмотранспортирования оборудованию относится источник гидравлической энергии – воздуходувная машина. Влияние воздуходувной машины на процесс пневматического транспортирования, в частности на его устойчивость, отмечается во многих работах, например в [4, 5]. Однако имеющиеся сведения о количественной стороне такого влияния неоднозначны и крайне ограничены. Это прежде всего связано с тем, что к изучению процесса пневмотранспортирования подходят с позиций его стационарности. Поэтому практическое применение результатов этих работ при оценке устойчивости и разработке пневмотранспортных установок не дает ощутимых результатов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУХОДУВНОЙ МАШИНЫ НА ПРОЦЕСС ПНЕВОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Основываясь на континуальном подходе и учитывая нестационарность процесса пневмотранспортирования, в [6] изложена математическая модель работы пневмотранспортной установки, позволяющая рассчитывать параметры процесса как в установившихся, так и в переходных периодах с учетом характеристик применяемого оборудования, в том числе и основной характеристики воздуходувной машины. Поскольку математическая модель представляет довольно сложную систему дифференциальных и алгебраических уравнений, то была разработана компьютерная программа расчета [7], что дает возможность рассчитывать и анализировать изменения параметров процесса как во времени, так и по длине трассы транспортирования. Здесь на основании численного эксперимента предпринимается попытка проанализировать влияние характеристики воздуходувных машин на параметры процесса пневмотранспортирования. В качестве образца для сравнения принимается пневмотранспортная установка для транспортирования муки с внутренним диаметром материалопровода 40 мм и длиной 100 м. Возмущение имитируется путем кратковременного повышения производительности установки.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

На рисунках 1–4 представлены результаты численного эксперимента для нагнетающей пневмотранспортной установки, где в качестве воздуходувной машины используется компрессор с основной гидравлической характеристикой, имеющей вид

$$G_{\text{вм}} = A_0 + A_1 \cdot P_{\text{вм}}, \quad (1)$$

где $G_{\text{вм}}$ – массовый расход (производительность) воздуходувной машины, кг/с; A_0 – коэффициент, характеризующий величину производительности воздуходувной машины при отсутствии избыточного давления $P_{\text{вм}}$ в нагнетающей трубке, кг/с; A_1 – коэффициент, характеризующий «жесткость» (степень влияния избыточного давления на производительность) характеристики, кг/(с·Па); $P_{\text{вм}}$ – избыточное давление, создаваемое воздуходувной машиной, Па. Обоснование аналитического вида гидравлической характеристики воздуходувных машин предложено в [8].

Рассматривается работа двух пневмотранспортных установок, укомплектованных воздуходувными машинами, гидравлические характеристики которых отличаются коэффициентами A_0 и A_1 , но обеспечивают одинаковые

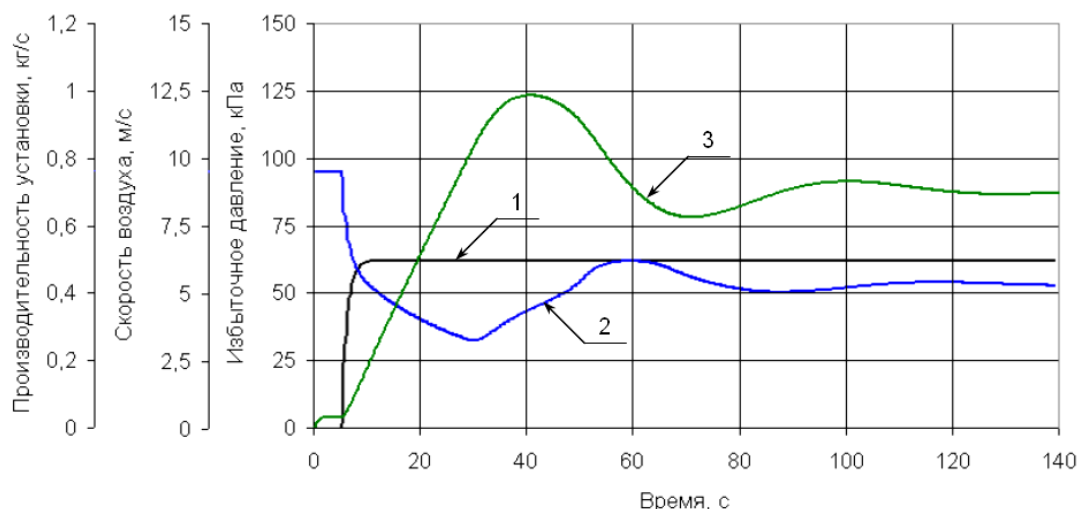
условия работы на установившемся режиме.

На рисунках 1 и 2 по результатам выполненного численного эксперимента приведены диаграммы изменения основных параметров пневмотранспортной установки (ПТУ) № 1, укомплектованной воздуходувной машиной с крутой («жесткой») характеристикой, у которой $A_0 = 0,015$ кг/с, $A_1 = -10^{-8}$ кг/(с·Па), и ПТУ № 2, где воздуходувная машина имеет менее «жесткую» гидравлическую характеристику с коэффициентами $A_0 = 0,0229$ кг/с и $A_1 = -10^{-7}$ кг/(с·Па).

В работе установок можно выделить два периода: переходный и установившийся. Под переходным периодом понимается время, в течение которого осуществляется пуск воздуходувной машины и питателя, а также время заполнения материалопровода транспортируемым материалом. Установившимся периодом будет считаться такой режим пневмотранспортирования, когда изменение его основных параметров практически не происходит, а возмущения несут установившийся или случайный характер.

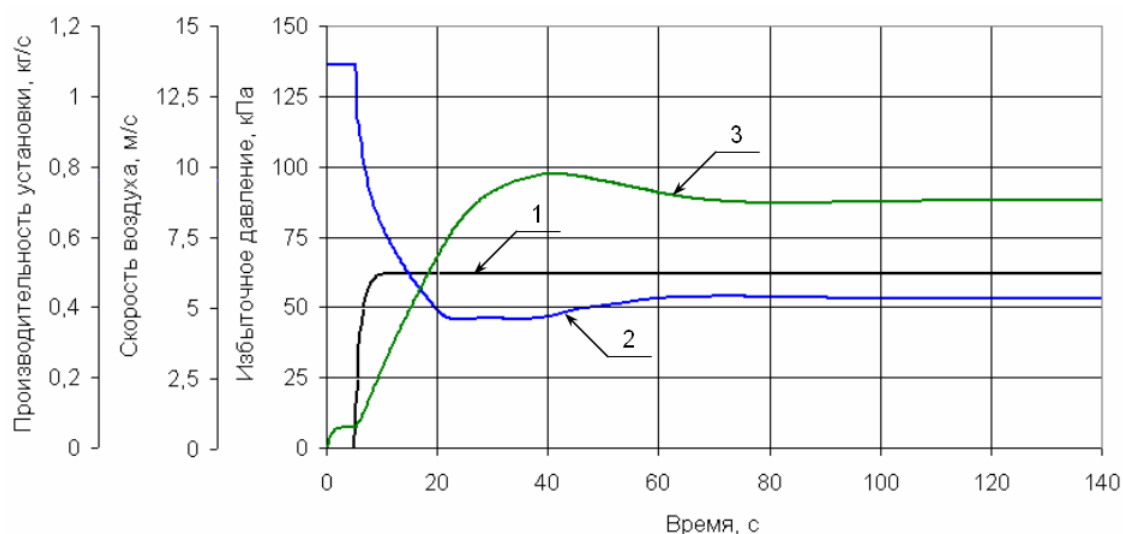
В свою очередь, в переходном периоде можно выделить два этапа. На первом этапе запускается воздуходувная машина ($t = 0$) и стабилизируется ее производительность ($t \leq 5$ с). На втором этапе после включения питателя ($t = 5$ с) устанавливается подача материала, загружается материалопровод и стабилизируется режим транспортирования. Для пневмотранспортной установки, укомплектованной воздуходувной машиной с коэффициентами характеристики $A_0 = 0,015$ кг/с и $A_1 = -10^{-8}$ кг/(с·Па), переходный период длится с момента включения воздуходувной машины ($t = 0$) до момента стабилизации основных параметров ($t \approx 140$ с). Первый этап первого периода начинается с момента включения воздуходувной машины ($t = 0$) до момента стабилизации скорости воздуха в материалопроводе и избыточного давления ($t = 5$ с), а второй этап – с момента включения питателя ($t = 5$ с) до момента стабилизации параметров процесса (для ПТУ № 1 – $t \approx 140$ с, а для ПТУ № 2 – $t \approx 110$ с). Установившемуся режиму работы ПТУ соответствуют скорость воздуха на входе в материалопровод, равная 5,4 м/с, и избыточное давление 86 кПа.

Во втором, установившемся периоде имитировалось возмущение в виде кратковременного (продолжительностью 20 с) повышения производительности питателя (на 0,5 кг/с).



1 – производительность пневмотранспортной установки; 2 – скорость воздуха на входе в материалопровод; 3 – избыточное давление, создаваемое воздуходувной машиной

Рисунок 1 – Диаграммы изменения основных параметров ПТУ № 1



1 – производительность пневмотранспортной установки; 2 – скорость воздуха на входе в материалопровод; 3 – избыточное давление, создаваемое воздуходувной машиной

Рисунок 2 – Диаграммы изменения основных параметров ПТУ № 2

Как свидетельствуют результаты численного эксперимента, на втором этапе первого периода (после включения питателя) основные оказывающие влияние на устойчивость процесса параметры (скорость воздуха и избыточное давление в начале материалопровода) существенно изменяются. При этом в ПТУ № 1, укомплектованной воздуходувной машиной с более «жесткой» характеристикой, скорость воздуха снизилась в меньшей степени, чем в ПТУ № 2. Избыточное давление в начале материалопровода в этот период в обеих установках превышало его значения

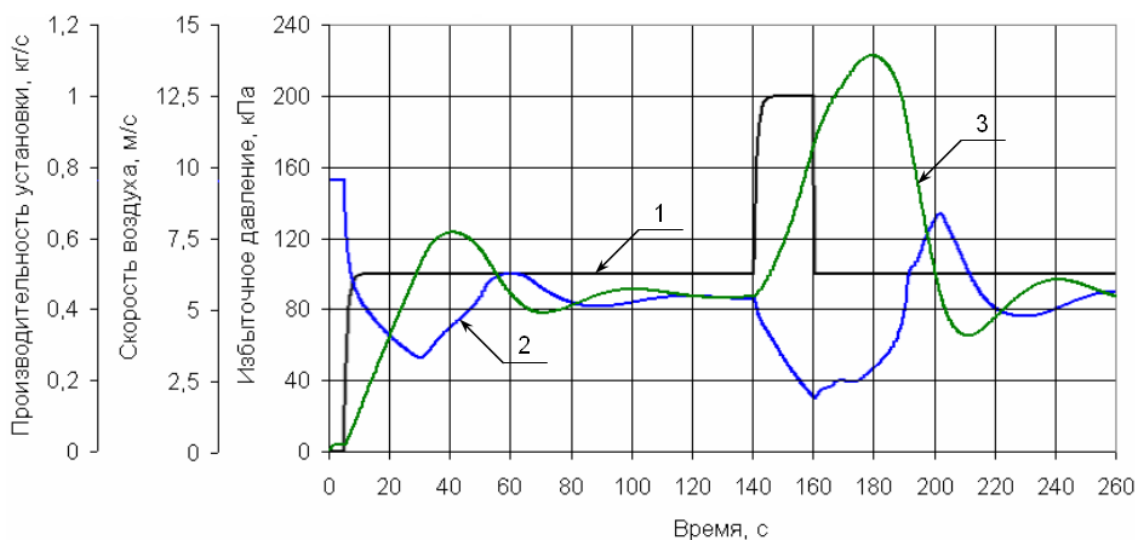
в установившемся периоде. Причем в ПТУ № 1 давление поднималось до большей величины, чем в ПТУ № 2. Причины, вызывающие эти явления, подробно обсуждались в [1–3]. Гораздо более существенные изменения давления и скорости воздуха в ПТУ № 1 с более «жесткой» характеристикой объясняются ее меньшим первоначальным энергетическим потенциалом (меньшим значением коэффициента A_0).

Возмущение (кратковременное повышение производительности) в установившемся периоде в ПТУ № 1 вызвало значительные

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУХОДУВНОЙ МАШИНЫ НА ПРОЦЕСС ПНЕВОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

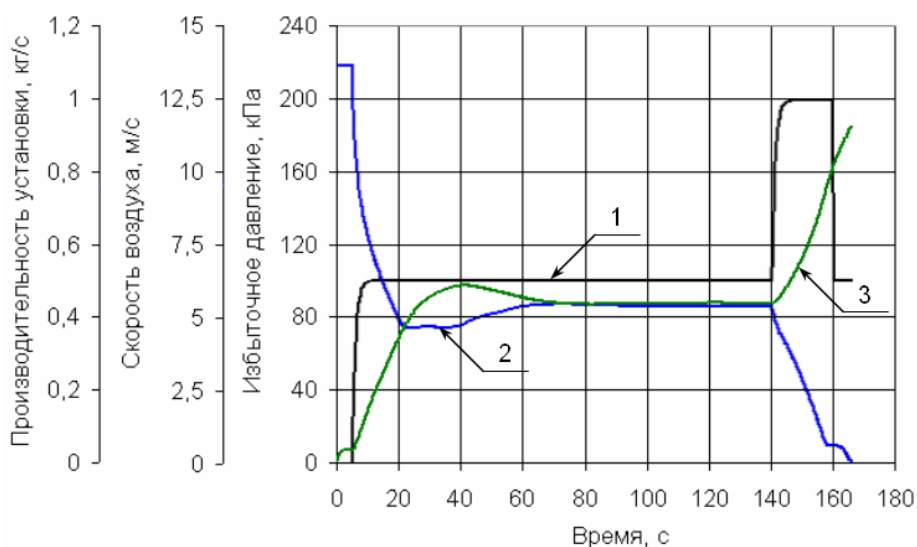
колебания параметров процесса – давление в начале материалопровода увеличивалось до 222 кПа, а скорость воздуха снижалась до 2 м/с (рисунок 3). Несмотря на достаточно большое по амплитуде возмущение производительности (двукратное увеличение), устойчивость процесса пневмотранспортирования сохранилась, параметры процесса после сня-

тия возмущения вышли на прежний до возмущения уровень. В то же время аналогичное возмущение в ПТУ № 2 привело к необратимым явлениям (прекращению процесса пневмотранспортирования) – скорость воздуха в материалопроводе упала до нуля, а давление продолжило монотонно увеличиваться (рисунок 4).



1 – производительность пневмотранспортной установки; 2 – скорость воздуха на входе в материалопровод; 3 – избыточное давление, создаваемое воздуходувной машиной

Рисунок 3 – Диаграммы изменения основных параметров ПТУ № 1 при наличии возмущения по производительности



1 – производительность пневмотранспортной установки; 2 – скорость воздуха на входе в материалопровод; 3 – избыточное давление, создаваемое воздуходувной машиной

Рисунок 4 – Диаграммы изменения основных параметров ПТУ № 2 при наличии возмущения по производительности

В целом, изменения основных параметров пневмотранспортирования – скорости воздуха и избыточного давления, наблюдаемые при моделировании работы пневмотранспортных установок, снабженных воздухоудувными машинами с различными характеристиками, соответствуют физической сущности процесса.

ВЫВОДЫ

Таким образом, выполненные численные эксперименты на математической модели нагнетающей пневмотранспортной установки позволили установить:

- соответствие происходящих при пневмотранспортировании явлений их физической сущности (подтверждены ранее выдвинутые гипотезы, выполненные теоретические и экспериментальные исследования);
- использование воздухоудувных машин с более «жесткой» (крутой) характеристикой является предпочтительным, т. к. возможно осуществлять процесс пневматического транспортирования с пониженными скоростями воздуха, а значит, с меньшими затратами энергии, обеспечивая при этом устойчивость работы системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Зуев, Ф. Г. Совершенствование процесса нагнетающих пневмотранспортных установок / Ф. Г. Зуев, В. П. Коцюба, В. П. Тарасов // Интенсификация подъемно-транспортных и строительных процессов: сборник трудов национальной научно-технической конференции. – Казанлык, Болгария, 1988. – С. 12.
3. 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.

4. Володин, Н. П. Снижение энергоемкости мельничных пневмотранспортных установок / Н. П. Володин и др. – М. : Колос, 1978. – 224 с.

5. Гусев, М. В. Снижение энергоемкости процесса транспортирования зернопродуктов в мельничных пневмотранспортных установках: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / М. : ВНИИЗ, 1983. – 233 с.

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

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

8. Тарасов, В. П. Совершенствование основных гидравлических характеристик воздухоудувных машин / В. П. Тарасов // Ползуновский вестник. – 2017. – № 2. – С. 54 – 58.

9. Effect of the basic properties of granular materials on the characteristics of low-velocity pneumatic transport / V. A. Smolovik, A. T. Roslyak // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2007. – Vol. 41, N 6. – P. 827 – 830.

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: tarpp.tar@mail.ru, тел. 8(3852) 29-07-43.

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, тел. 8(913) 0220144.