

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЕМНО-ПИТАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПНЕВМОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

К.А. Мухопад, В.П. Тарасов

На основе ранее предложенной физико-математической модели однотрубной пневмотранспортной установки проанализировано влияние характеристик приемно-питающих устройств на устойчивость пневмотранспортирования сыпучих материалов. Определены основные факторы, которые следует учитывать при оценке устойчивости установок пневмотранспорта.

Ключевые слова: пневмотранспорт, пневмотранспортная установка, переходный режим, устойчивость, приемно-питающее устройство.

При расчете и проектировании пневмотранспортных установок (ПТУ) принимаются во внимание далеко не все параметры, оказывающие значительное влияние на режим транспортирования. Как правило, в применяемых методиках расчета не учитывается переходный процесс, обусловленный загрузкой материала в трубопровод. В то же время, именно период пуска ПТУ представляется наиболее опасным в смысле нарушения устойчивости работы и закупорки трубопровода. Процесс загрузки в основном определяется приемно-питающим устройством или предшествующим оборудованием. Используемые в системах пневмотранспорта приемно-питающие устройства (питатели) многообразны и по конструктивному исполнению и по принципу подачи сыпучего материала в трубопровод. Питатели каждого типа имеют свои достоинства и недостатки. Работу некоторых питающих устройств в [2] предложено описывать следующей характеристикой

$$G_m = G_0 \cdot (1 - e^{-\alpha\tau}) + \Delta G_1 \cdot \sin(k\tau) + \Delta G_2(\tau), \quad (1)$$

где G_m – производительность питателя, кг/с;

G_0 – номинальная производительность, кг/с;

α – параметр, характеризующий задержку при пуске питателя, рад/с;

τ – время, с;

ΔG_1 – амплитуда колебаний производительности питателя, кг/с;

k – циклическая частота колебаний производительности питателя, с⁻¹;

$\Delta G_2(\tau)$ – изменение производительности, носящее случайный характер, кг/с.

Уравнение (1) характеризует работу питателей как непрерывного, так и периодического действия.

Исходя из сущности происходящих при пуске питателя явлений, можно предположить, что на величину коэффициента α влияет большое количество факторов, в том числе инерционные свойства подвижных частей питателя, установленная мощность электродвигателя, свойства транспортируемого материала, вид питающего устройства, способ и условия загрузки (подачи) материала в питатель, величина противодавления и др. В настоящей статье не ставится задача определения круга этих факторов и степени их влияния. Ниже предпринимается лишь попытка оценить влияние коэффициента α на устойчивость работы ПТУ во время пуска питателя и подачи материала в трубопровод. При этом считается, что процесс загрузки происходит монотонно без периодических и случайных колебаний производительности (второе и третье слагаемые в уравнении (1) принимаются равными нулю).

Временной интервал $0 < \tau < \tau_{ном}$ принимается за переходный период работы питателя. Время $\tau_{ном}$ соответствует моменту, когда производительность питателя достигает 99 % своей номинальной величины ($G_m = 0,99 \cdot G_0$). На рис. 1 влияние коэффициента α на время выхода питателя на установившийся режим представлено в виде диаграммы. Весь диапазон значений коэффициента α по степени его влияния на $\tau_{ном}$ можно разбить на 3 участка. При $\alpha \leq 0,5$ рад/с даже незначительное изменение α приводит к существенному увеличению $\tau_{ном}$. При этом само время выхода питателя на установившийся режим может составлять десятки, и даже сотни секунд. При $\alpha > 2$ рад/с его влияние на время $\tau_{ном}$ не существенно, а величина времени $\tau_{ном}$ не превышает 2 секунд. При $0,5$ рад/с $< \alpha \leq 2$

рад/с наблюдается умеренное влияние коэффициента α , при этом время $\tau_{\text{НОМ}}$ меняется от 2 до 10 с.

Из-за сложности и многообразия происходящих при пневмотранспорте явлений условия устойчивости работы ПТУ пока не сформулированы. Чаще всего в качестве критерия устойчивости принимается некая критическая скорость воздуха, $v_{\text{кр}}^B$, ниже которой происходит закупорка материалопровода. Однако это условие не является единственным и достаточным. Необходимо учитывать и другие факторы, например, соответствие максимального давления возможностям воздуходувной машины, в том числе и в переходные периоды работы ПТУ. В качестве одного из критериев обеспечения устойчивости может служить условие, сформулированное в [3], которое основано на положении о том, что локальная объемная концентрация материала σ в аэросмеси в любом месте материалопровода не может превышать эту величину в свободной насыпи $\sigma_{\text{нас}}$.

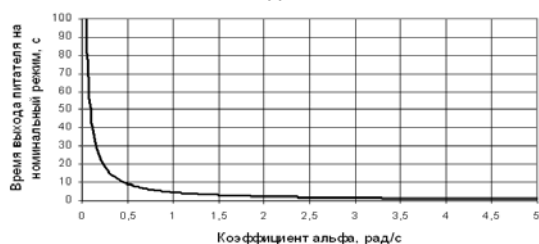


Рисунок 1 – Изменение времени $\tau_{\text{НОМ}}$ выхода питателя на номинальный режим работы в зависимости от коэффициента α

Для оценки влияния переходных режимов работы питателя на устойчивость процесса пневмотранспорта предлагается использовать безразмерный коэффициент падения скорости воздуха

$$k_v = v_{\text{min}}^B / v_{\text{стац}}^B, \quad (2)$$

где v_{min}^B – минимальное значение скорости воздуха в начале материалопровода на стадии загрузки материала, м/с;

$v_{\text{стац}}^B$ – скорость воздуха в начале материалопровода на стационарном режиме транспортирования, м/с.

Границей устойчивости будем считать некий допустимый коэффициент $[k_v]$

$$[k_v] = v_{\text{кр}}^B / v_{\text{стац}}^B. \quad (3)$$

Ниже, используя физико-математическую модель однотрубной пневмотранспортной установки [1, 2], предпринимается попытка выявить влияние характеристики питающего устройства на устойчивость пневмотранспорта на стадии загрузки материала в трубопровод. Рассматривается однотрубная нагнетающая ПТУ производительностью 10 т/ч с длиной материалопровода 100 м и диаметром 0,1 м; транспортируемый материал – мука (плотность частиц муки 1400 кг/м³, диаметр частиц 10⁻⁴ м).

Результаты теоретических и экспериментальных исследований [1 – 5] позволяют утверждать, что к числу наиболее значимых факторов, влияющих на устойчивость работы ПТУ в период пуска, относятся производительность воздуходувной машины (ВМ) и объем воздухоподводящего оборудования (ВПО). В связи с этим вычислительный эксперимент проводился при различных производительностях ВМ и объемах ВПО. В таблице 1 приведены значения исходных параметров для численного моделирования. В численном эксперименте использовалась ВМ с «жесткой» характеристикой.

Таблица 1 – Матрица численного эксперимента

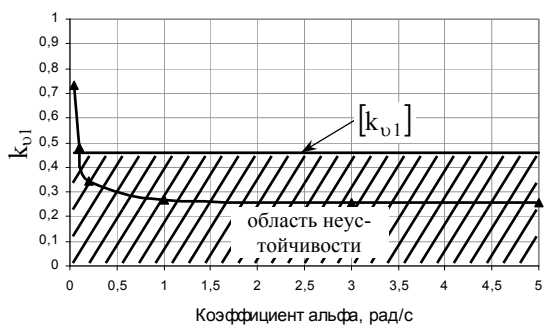
№	Производительность ВМ, кг/с	Скорость воздуха на входе в материалопровод при стационарном режиме транспортирования, м/с	Объем ВПО, м ³	Коэффициент α , рад/с
	А	Б	В	Г
1	0,1	6,57	0,05	0,05
2	0,2	12,6	0,2	0,1
3			0,5	0,2
4			0,8	1
5			1	3
6			1,2	5
7			1,5	

На рисунке 2 представлены графики, полученные в ходе численного эксперимента, в

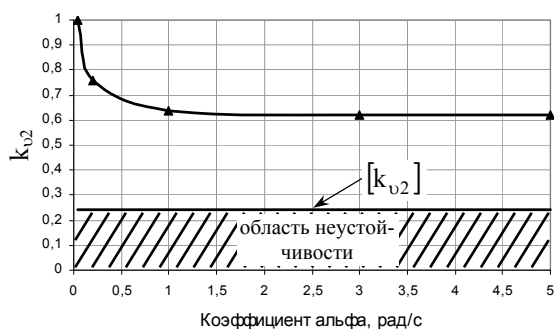
котором были задействованы ячейки матрицы (таблица 1): А1, А2, Б1, Б2, В7, Г1 – Г6.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЕМНО-ПИТАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПНЕВОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Как видно из рисунка, величина коэффициента α влияет на устойчивость пневмотранспорта – коэффициент падения скорости k_v существенно изменяется. При этом для рассматриваемых пневмотранспортных систем в диапазоне $0 < \alpha < 2$ рад/с их устойчивость может значительно снизиться. В тоже время, при $\alpha > 2$ рад/с можно считать, что $k_v \cong \text{const}$ для любого расхода воздуха. Кроме того, приведенные графики позволяют сделать вывод о том, что степень влияния параметра α на устойчивость процесса пневмотранспорта зависит от производительности ВМ (значения скорости $v_{\text{стац}}^B$).



а) ПТУ № 1



б) ПТУ № 2

Рисунок 2 – Влияние коэффициента α на величину коэффициента k_v

Если для транспортируемого материала (муки) в качестве критической скорости воздуха принять $v_{\text{кр}}^B = 3$ м/с, то при использовании ВМ с производительностью 0,1 кг/с (ПТУ № 1) скорость воздуха на входе в материалопровод составит 6,57 м/с, а коэффициент $[k_{v1}] = 3/6,57 = 0,46$, тогда как для ПТУ № 2 с воздуходувной машиной производительностью 0,2 кг/с скорость воздуха на входе будет 12,6 м/с, а $[k_{v2}] = 3/12,6 = 0,24$. Значения коэффициентов $[k_{v1}]$ и $[k_{v2}]$ будут определять границу устойчивости.

Как видно на рисунке 2, реализовать устойчивое транспортирование на стадии загрузки материала для ПТУ № 1 достаточно проблематично даже при очень маленьких значениях коэффициента α (медленная загрузка материала). Устойчивая работа ПТУ № 2 вполне осуществима с большим «запасом прочности» при любых значениях α .

Влияние объема ВПО на устойчивость работы ПТУ оценивали при вычислительном эксперименте, в котором задействованы ячейки матрицы А1, Б1, В1 – В7, Г1 – Г6 (таблица 1). На рисунке 3 приведены графики зависимости коэффициента падения скорости k_v для нескольких ПТУ с одинаковой производительностью воздуходувной машины 0,1 кг/с, но разными объемами ВПО: ПТУ № 1 – объем $V = 1,5$ м³, ПТУ № 3 – объем $V = 1$ м³, ПТУ № 4 – объем $V = 0,2$ м³. Зона неустойчивого транспортирования на стадии загрузки сыпучего материала в трубопровод на рисунке 3 заштрихована.

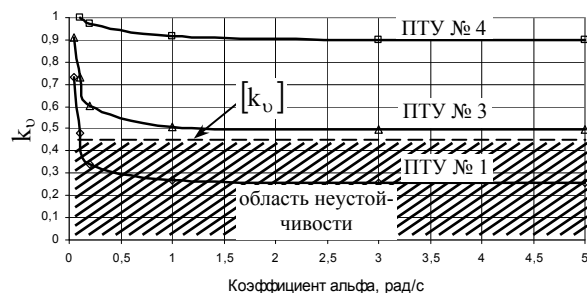


Рисунок 3 – Изменение коэффициента k_v в зависимости от коэффициента α при различных объемах ВПО

Результаты численного эксперимента для трех пневмоустановок свидетельствуют о том, что степень влияния коэффициента α на коэффициент падения скорости k_v существенно зависит от величины объема воздухоподводящего оборудования. Так при объеме ВПО 0,2 м³ коэффициент k_v во всем диапазоне α изменяется незначительно (от 1 до 0,9), тогда как при $V = 1,5$ м³ изменения коэффициента k_v происходят в диапазоне от 1 до 0,26.

На рисунке 4 представлены графики зависимости изменения объемной концентрации транспортируемого материала по длине материалопровода и во времени, начиная с момента поступления материала, при различных значениях коэффициента α . Производительность установок № 5 и № 6 составляет 12,6 т/ч (другие параметры соответствуют ПТУ № 1, 3, 4).

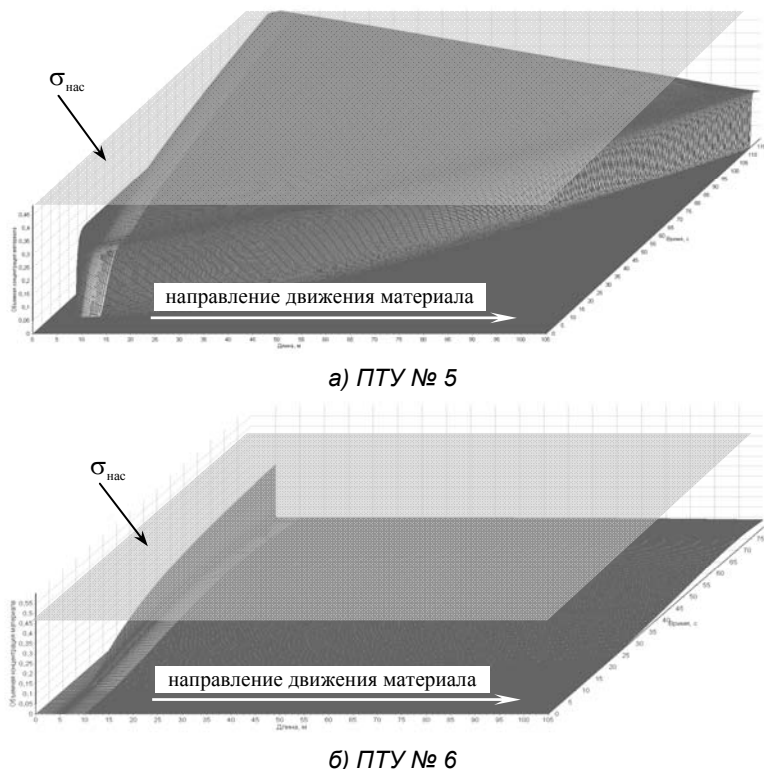


Рисунок 4 – Изменение объемной концентрации материала по длине материалопровода с течением времени

Анализ этих зависимостей позволяет констатировать, что в установке № 5 при $\alpha = 1$ рад/с (рис. 4, а) по всей длине материалопровода с течением времени происходит накопление транспортируемого материала. В конечном итоге это приводит к закупорке материалопровода, поскольку уже через 120 с концентрация материала σ в аэросмеси в начале материалопровода превысит концентрацию в свободной насыпи $\sigma_{\text{нас}}$ (начнется уплотнение материала). Для ПТУ № 6 при $\alpha = 0,05$ рад/с (рис. 4, б) такого не наблюдается на всем протяжении работы установки.

Таким образом, результаты численного эксперимента и их анализ позволяют сделать некоторые выводы. Влияние характеристики питателя, а именно коэффициента α в уравнении (1), на устойчивость процесса пневмотранспортирования сыпучих материалов очевидно. Степень этого влияния зависит от многих факторов, в том числе, от производительности ВМ и объема воздухоподводящего оборудования. На этапе проектирования ПТУ необходимо проводить проверку на устойчивость пневмотранспорта на стадии загрузки материала в материалопровод с учетом характеристики питателя.

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. Анализ работы однотрубной нагнетающей пневмотранспортной установки / К. А. Мухопад, А. В. Яковлев, В. П. Тарасов, К. Б. Кошелев // Вестн. КрасГАУ. – Красноярск : Изд-во КрасГАУ, 2007. – № 6. – С. 184 – 191.
3. Тарасов, В. П. Повышение устойчивости работы нагнетающих пневмотранспортных установок / В. П. Тарасов, К. А. Мухопад // Перспективы развития пищевой промышленности России: материалы конф. – Оренбург : ВПК ГОУ ОГУ, 2005. – С. 83 – 88.

Тарасов В.П., к.т.н., профессор, зав. кафедрой «Машины и аппараты пищевых производств» ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел.: 8(3852) 29-07-43;

Мухопад К.А., доцент кафедры «Теоретическая механика и механика машин» ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел.: 8(3852) 29-08-56.