

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕАЛЬНЫХ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ АЭРОСМЕСИ НА ЭНЕРГОЗАТРАТЫ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТИРОВАНИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Наряду с известными достоинствами пневматический трубопроводный транспорт характеризуется сравнительно большими удельными затратами энергии на перемещение материала единичной массы. Поэтому для достижения сопоставимых с характеристиками традиционных видов механического непрерывного транспорта технико-экономических показателей пневмотранспортирования необходимо обеспечивать оптимальное по энергозатратам сочетание его режимных параметров.

На основе анализа известных данных по пневмотранспорту сыпучих материалов можно выделить ряд основных факторов, изменение любого из которых вызывает соответствующее изменение потерь давления на единичной длине трубопровода. Это физические свойства, состояние и расход несущей среды; расходная массовая концентрация транспортируемого материала или производительность установки по транспортируемому материалу; геометрия и размеры трубопровода, профиль пневмотрассы; размеры, плотность и скорость витания частиц транспортируемого материала. С точки зрения оценки режимов пневмотранспортирования по критерию энергозатрат все эти основные факторы являются определяющими, и в дальнейшем будем называть их режимными параметрами.

В инженерной практике для оценки энергозатрат на пневмотранспорт на стадии проектирования преимущественно применяют методы определения потерь давления несущей среды, основанные на использовании в расчетных зависимостях легко регистрируемых расходных параметров: приведенных (отнесенных ко всему поперечному сечению трубопровода) скоростей несущей среды и витания частиц, расходной массовой концентрации и т.д. Такие расчетные зависимости справедливы для конкретных материалов в определенных диапазонах изменения расходных режимных параметров. Как правило, их получают экспериментально, отдельные из них — методами теории подобия и анализа размерностей. Соответственно степенные зависимости для определения эмпирических коэффициентов Гагерштадта k , сопротивления перемещению материала λ_M и аэросмеси λ_{CM} содержат наряду с расходными режимными параметрами опытные постоянные и числовые коэффициенты. Отсутствие универсального математического описания затрудняет оценку степени влияния различных расходных режимных параметров на энергоемкость процесса направленного перемещения сыпучих материалов воздушным потоком.

Затраты энергии при транспортировании различных сред отражают результат динамического взаимодействия поверхностных, массовых и инерционных сил при течении аэросмеси. С позиций механики гетерогенных сред изменение потерь давления при переходе от одних режимных параметров к другим является следствием соответствующего изменения условий силового взаимодействия фаз в потоке аэросмеси. С другой стороны, анализ движения произ-

вольного объема аэросмеси показывает, что изменение условий силового взаимодействия фаз вызывает соответствующее изменение истинной концентрации транспортируемого материала [1]. При этом переход к течению аэросмеси с другим значением истинной концентрации транспортируемых частиц реализуется за счет изменения относительного скольжения компонентов, т.е. воздуха и частиц транспортируемого материала. Отсюда следует, что любое изменение режимных параметров процесса транспортирования приводит к соответствующему изменению действительных параметров течения аэросмеси. Поэтому выбор оптимальных по энергозатратам условий пневмотранспортирования сыпучих материалов должен основываться на зависимости потерь давления от истинной концентрации их частиц, так как этот параметр отражает условия силового взаимодействия фаз при любом соотношении режимных параметров.

Оценка влияния реализуемых в каждом конкретном случае режимных параметров пневмотранспортирования на действительные параметры течения аэросмеси представляет интерес не только в смысле выбора оптимальных по энергозатратам условий процесса, но и выявления основных закономерностей направленного перемещения сыпучих материалов потоком газа. Кроме того, для ряда производственных процессов, совмещающих пневмотранспортирование с сушкой, нагреванием или охлаждением, пневмоклассификацией материала и т.д., действительные параметры течения являются технологическими.

Зависимость действительных параметров течения аэросмеси от режимных можно определять путем непосредственного измерения истинной концентрации транспортируемых частиц в потоке, например методом отсечки [2]. Однако наряду с простотой и высокой точностью измерения этот метод отличается большой трудоемкостью, что затрудняет получение надежных результатов в широком диапазоне изменения режимных параметров.

Рассмотрим возможность определения действительных параметров течения на основе анализа легко и точно регистрируемых режимных параметров. Исполнение представление об аэросмеси как о сжимаемой двухкомпонентной гетерогенной среде, в которой реальное течение воздуха с твердыми частицами можно заменить взаимопроникающим движением воздушной фазы и второй квазисплошной, аппроксимирующей поток дискретных частиц [3].

Градиент давления и, следовательно, действительные параметры течения аэросмеси стабилизируются за так называемым разгонным участком пневмотранспортного трубопровода. Для случая одномерного изотермического вполне установившегося (равновесного) течения математическое описание дисперсного потока аэросмеси можно представить следующими основными уравнениями [4]:

1) неразрывности для воздушной и твердой фаз:

$$G_B = (1 - c) \rho_B v_A; \quad (1)$$

$$G_M = c \rho_M v_M A, \quad (2)$$

где G_B , G_M — массовая производительность установки по воздуху и транспортируемому материалу; c — истинная объемная концентрация перемещаемых

частиц; ρ_B — средняя на некоторой длине L трубопровода плотность воздуха; ρ_M — средняя плотность материала частиц; v, v_M — действительная скорость соответственно воздуха и частиц; A — площадь поперечного сечения трубопровода: $A = \pi D^2/4$; D — диаметр трубопровода;

2) равновесия воздушной и твердой фаз:

$$\frac{\Delta p}{L} = g \rho_B \sin a + \lambda_B \rho_B \frac{v^2}{2D} + \frac{c}{1-c} \rho_M F_{B3}; \quad (3)$$

$$\frac{\Delta p}{L} = g \rho_M \sin a + \lambda_M \rho_M \frac{v_M^2}{2D} - \rho_M F_{B3}, \quad (4)$$

где Δp — перепад статического давления в трубопроводе длиной L ; g — ускорение свободного падения; a — угол наклона оси трубопровода к горизонтالي; λ_B, λ_M — коэффициент сопротивления перемещению соответственно воздушной и твердой фаз; F_{B3} — сила межфазного взаимодействия, приходящаяся на единичную массу транспортируемого материала;

3) состояния воздушной фазы

$$\rho_0 / \rho_{B0} = p / \rho_B, \quad (5)$$

где ρ_{B0} — плотность воздуха в некотором сечении трубопровода при давлении ρ_0 ; p — текущее значение давления.

Исключив из (3) и (4) F_{B3} , получим зависимость потерь давления от действительных параметров течения смеси

$$\frac{\Delta p}{L} = g \left((1-c) \rho_B + c \rho_M \right) \sin a + (1-c) \lambda_B \rho_B \frac{v^2}{2D} + c \lambda_M \rho_M \frac{v_M^2}{2D}, \quad (6)$$

а в случае исключения $\Delta p/L$ — зависимость коэффициента сопротивления транспортируемых частиц от действительных параметров течения аэросмеси.

$$\lambda_M = 2 \frac{D}{v_M^2} \frac{F_{B3}}{1-c} - 2 \frac{gD}{v_M^2} \left(1 - \frac{\rho_B}{\rho_M} \right) \sin a + \lambda_B \frac{\rho_B}{\rho_M} \frac{v^2}{v_M^2}. \quad (7)$$

Дополним систему основных уравнений (1), (2), (5) – (7) замыкающими соотношениями.

Сила межфазного взаимодействия (сила аэродинамического взаимодействия) определяется из известного соотношения

$$F_{B3} = \frac{3}{4} \zeta_M \frac{\rho_B}{d_s^3 \rho_M} |v - v_M| (v - v_M), \quad (8)$$

где ζ_M — коэффициент аэродинамического сопротивления частиц; d_s — диаметр шаровой частицы, эквивалентной по объему и массе реальной частице со средним диаметром d .

Коэффициент ζ_M для частиц диаметром d_s определяется экспериментально из условий витания:

$$\zeta_M = \frac{4}{3} g \frac{\rho_M}{\rho_B} \frac{d_3}{v_s^2} \quad (9)$$

Действительная (с учетом истинной концентрации частиц и ограничения потока стенками трубопровода) скорость v_s витания частиц материала выражается через приведенную скорость $\bar{v}_{сп}$ витания:

$$v_s = \bar{v}_{сп} (1 - c)^3 (1 - (d/D)^2)^{3/2}. \quad (10)$$

Зависимость эквивалентного диаметра d_3 от среднего диаметра d частиц транспортируемого материала в случае полидисперсной смеси определяется по конкретным опытным данным.

Коэффициент сопротивления перемещению воздуха

$$\lambda_B = \lambda_B (Re, \Delta), \quad (11)$$

где критерий Рейнольдса для воздушного потока

$$Re = vD\rho_B/\eta, \quad (12)$$

Δ — относительная шероховатость стенок трубы; η — динамическая вязкость воздуха.

С учетом поставленной задачи установим соответствие между действительными скоростями воздуха и частиц материала, истинной концентрацией частиц и соответствующими расходными режимными параметрами:

$$v = \bar{v}/(1 - c); \quad (13)$$

$$v_M = (\bar{v}/c)\mu(\rho_B/\rho_M). \quad (14)$$

Здесь \bar{v} — приведенная скорость воздуха; μ — расходная массовая концентрация транспортируемого материала.

Система алгебраических уравнений (1), (2), (6) — (14) при известной из опыта зависимости d_3 от d и свойств частиц отображает соотношения между действительными и расходными параметрами течения материаловоздушной смеси за разгонным участком пневмотранспортного трубопровода. Используемые в уравнениях режимные параметры (перепад давления $\Delta p/L$, приведенная скорость \bar{v} воздушной фазы, производительность G_M установки по транспортируемому материалу или расходная массовая концентрация μ , давление p_0 и соответствующая ему плотность воздуха ρ_{B0} в конце участка трубопровода длиной L) легко регистрируются в процессе транспортирования. Средняя в трубопроводе длиной L плотность воздуха в соответствии с (5)

$$\rho_B = \rho_{B0} p_c / p_k, \quad (15)$$

где среднеинтегральное давление воздуха при изотермическом расширении определяется соотношением

$$\rho_c = \rho_H \ln(\rho_H/\rho_K) / (\rho_H/\rho_K - 1). \quad (16)$$

Здесь ρ_H, ρ_K — соответственно начальное и конечное абсолютное давление на границах участка трубопровода длиной L .

Средние диаметр, плотность частиц материала, приведенная скорость их витания, а также геометрические характеристики трубопровода известны в каждом случае пневмотранспортирования.

Из системы уравнений (1), (2), (6) — (14) с учетом соотношений (15) и (16) численным методом можно определить истинную объемную концентрацию частиц материала в смеси, соответствующую реализуемому в каждом конкретном случае соотношению режимных параметров. По известному значению c легко найти другие действительные параметры процесса. С учетом (9), (10) коэффициент сопротивления перемещению частиц материала во взвешенном состоянии

$$\lambda_M = 2 \frac{gD}{v_M^2} \frac{(v - v_M)^2}{v_s^2 (1-c)} - 2 \frac{gD}{v_M^2} \sin \alpha + 2 \frac{gD}{v_M^2} \frac{\rho_B}{\rho_M} \sin \alpha +$$

$$+ \lambda_B \frac{\rho_B v^2}{\rho_M v_M^2},$$

его минимальное значение в случае вертикального трубопровода достигается при выполнении условия

$$(v - v_M)^2 = v_s^2 (1 - c). \quad (17)$$

Опыты по транспортированию измельченного торфа в таком трубопроводе показали, что минимальные потери давления $\Delta p/L$ имеют место при выполнении условия (17).

Предложенный алгоритм определения действительных параметров течения материаловоздушной смеси при различных соотношениях режимных параметров может быть использован для проектного расчета пневмотранспортных установок в случае большой длины пневмотрассы, когда влиянием разгонного участка можно пренебречь. Максимальные напор и перепад давлений в трубопроводе определяются характеристикой воздуходувной машины. Истинную концентрацию частиц в смеси можно найти по (6).

Таким образом, выявление зависимости истинной концентрации материала в аэросмеси от режимных параметров процесса его транспортирования позволяет выбирать оптимальное с точки зрения производительности установки соотношение указанных параметров, исходя из установленного перепада давлений в трубопроводе. Тем самым исключается произвольный выбор ряда режимных параметров (диаметра трубопровода, расходной массовой концентрации материала и т.п.), характерный для существующих методик инженерного расчета пневмотранспортных систем.

Список литературы

1. Кислов Н.В., Петренко С.М. Физические представления о механизме регулирования силового взаимодействия в потоке аэросмеси при изменении режимных параметров пневмотранспортирования // Физические основы торфяного производства. Калинин, 1987.
2. Матвеев И.О., Петренко С.М. Устройство для определения концентрации материала при пневмотранспортировании сыпучих смесей. Мн., 1988. (Информ. листок № 88—68),
3. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М., 1978.
4. Петренко С.М., Кислов Н.В. Описание движения торфовоздушной смеси в трубопроводах пневмотранспортных установок. Деп. в ЦБНТИ Минтоппрома РСФСР 01.0788, № 22.

УДК 631.24:661.939

В.В.АРТИХОВИЧ, В.И.КУНОВСКИЙ,
Г.А.СТРОЕВ, А.А.ШАБЕЛЬНИК

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЬДОАККУМУЛЯТОРОВ, СПОСОБСТВУЮЩИХ СНИЖЕНИЮ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ХРАНЕНИИ ПЛОДОВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ

Существующие системы холодоснабжения картофелехранилищ требуют значительных капитальных затрат. Кроме того, вследствие применения искусственного охлаждения в них велики и энергетические затраты. Природные условия БССР позволяют использовать вместо охлаждения с помощью холодильных машин охлаждение природным холодом, который может аккумулироваться в насадках различного типа.

Для картофелехранилищ вместимостью 500 т на кафедре "Теплогазоснабжение" БПИ разработаны льдоаккумуляторы двух типов: 1) лед—воздух где в качестве емкостей для хранения льда используются полимерные пакеты вместимостью 1 л, заполняемые водой. В холодный период года наружный воздух омывает подвешенные в льдоаккумуляторе пакеты и вода в них замерзает. В теплый период года воздух из холодильных камер пропускается через льдоаккумулирующую насадку, где охлаждается и затем возвращается в камеру; 2) лед—промежуточный теплоноситель—воздух, где подобные пакеты с водой размещаются в подземных теплоизолированных емкостях, заполненных хладагентом, циркулирующим через рекуперативный теплообменник. В последнем в холодный период года охлаждается наружным воздухом хладагент, а в теплый — воздух, подаваемый в холодильные камеры.

Технико-экономические расчеты показывают, что при использовании указанных льдоаккумуляторов в системах холодоснабжения картофелехранилищ затраты на электроэнергию в 2—2,5 раза ниже, чем при искусственном охлаждении. Резко уменьшается металлоемкость систем холодоснабжения (в 3—4 раза). Экономический эффект составляет 1—2 к. на 1 кг хранимой продукции. Эти показатели получены на основании расчетных характеристик льдоаккумулирующих насадок, требующих экспериментальной проверки.

В связи с необходимостью уточнения расчетных характеристик льдоаккумулирующих насадок для систем снабжения картофелехранилищ природным холодом типа лед—воздух и лед—промежуточный теплоноситель—воздух