

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ НЕСУЩЕГО ГАЗА НА ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА С ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ

На пневмотранспортом стенде исследовано влияние повышения плотности несущего газа на гидравлическое сопротивление, критическую скорость и удельные энергозатраты при течении двухфазного потока с твердыми частицами. Установлено снижение гидравлического сопротивления и энергозатрат при движении газового потока с твердыми частицами с ростом плотности несущего газа. Определены пределы применимости известных из литературы эмпирических зависимостей для гидравлического сопротивления и критической скорости при повышенной плотности несущего газа.

На пневмотранспортному стенді досліджено вплив підвищення густини несучого газу на гідравлічний опір, критичну швидкість і питомі енерговитрати при течії двофазного потоку з твердими частками. Встановлено зниження гідравлічного опору та енерговитрат при русі газового потоку з твердими частками зі зростанням густини несучого газу. Визначено межі застосування відомих з літератури емпіричних залежностей для гідравлічного опору та критичної швидкості при підвищеній густині несучого газу.

The effects of increasing the carrier gas density on the hydraulic resistance, the critical velocity and energy consumption in flowing the two-phase flow with solid particles are studied using the pneumatic transport bench. A decrease in the hydraulic resistance and energy consumption for the motion of the gas solid-particle flow is established when the carrier gas density increases. Limits of applications of known empiric relations for the hydraulic resistance and the critical velocity are defined when the carrier gas density increases.

Течения двухфазных потоков типа газ – твердые частицы широко используется в технологических процессах различных отраслей техники: в энергетике, горном деле, химическом производстве, металлургии. В цементной, строительной, химической, алюминиевой и пищевой промышленности широко применяется пневматическое транспортирование разнохарактерных сыпучих материалов. В энергетике и химической технологии применяются двухфазные системы охлаждения, двигатели на металлизированном топливе, реакторы с двухфазными рабочими телами. В системах газодобычи имеют место течения природного газа с частицами породы от скважин до систем газоочистки при давлениях в несколько десятков атмосфер [1 – 7].

Накопленный экспериментальный материал по двухфазным течениям, обобщенный в виде зависимостей для гидравлических сопротивлений, критических скоростей, скоростей скольжения, параметров разгона и других величин, характеризующих гидравлические особенности этих потоков, получен при небольших рабочих давлениях и плотностях несущего газа.

Развитие новых технологий идет в направлении увеличения рабочих давлений и плотности газовых составляющих двухфазных потоков, что связано с увеличением дальности пневмотранспортирования, интенсификацией тепло- и массообменных процессов в химических и энергетических установках.

Поэтому знание гидравлических характеристик двухфазных потоков с повышенной плотностью несущего газа, зависящей от его химического состава и рабочего давления, является актуальной задачей при разработке, проектировании и эксплуатации технологических аппаратов данного типа. Представленные ниже результаты относятся к течениям двухфазных потоков указанного типа в горизонтальных трубопроводах.

Исследование было проведено на пневмотранспортном стенде [8] при различных рабочих давлениях несущего газа. Схема стенда и его общий вид представлены на рис. 1 и рис. 2. По уровню рабочего давления (до 3,3 МПа) данный стенд не имеет аналогов в Украине и за рубежом и может быть использован для отработки систем с течениями двухфазных потоков при повы-

шенной плотности несущего газа.

Цель экспериментов: определение гидравлического сопротивления двухфазного потока, минимальной (критической) скорости устойчивого движения газозвеси и удельных энергозатрат при повышенной плотности несущего газа.

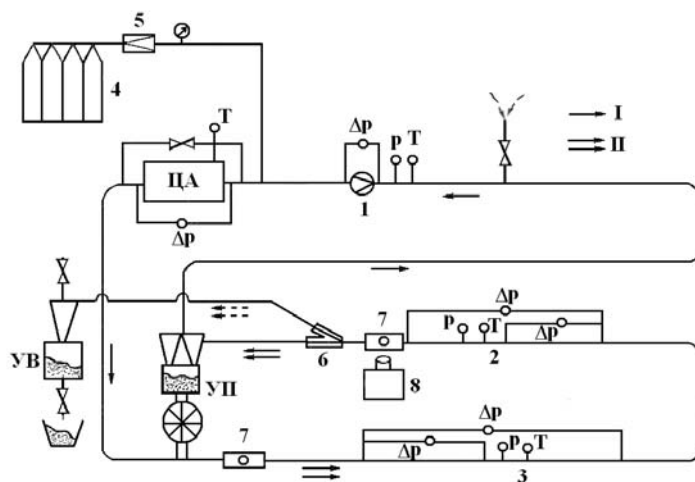


Рис. 1

Стенд смонтирован по замкнутой схеме с контурами чистого газа (I) и двухфазной взвеси (II). Циркуляционный агрегат, в качестве которого был использован шестеренчатый компрессор, заключен в герметичный бокс, охлаждаемый водой.

Проточная часть стенда, представляющая собой комплекс транспортных трубопроводов с расходомером несущего газа типа Вентури 1, мерными участками 2, 3 диаметром 30 и 50 мм, переключателем потока 6, прозрачными вставками 7, компрессором (ЦА), устройствами выгрузки (УВ) и перегрузки твердой фазы (УП), перед экспериментами заполнялась воздухом до необходимого давления из блока газоснабжения 4 через редуктор 5. Устройство перегрузки (УП) представляет собой блок циклонов, установленных на цилиндрическом бункере, в нижней части которого помещен барабанный питатель с регулируемой скоростью вращения. Устройство выгрузки состоит из циклона и приемного бункера. Необходимый режим течения газа в проточном тракте стенда устанавливался с помощью перепускного крана на байпасной линии ЦА.

Для перехода в режим двухфазного течения включается приводной электродвигатель барабанного питателя УП, который подает сыпучий материал в трубопровод. Твердые частицы подхватываются потоком газа и движутся вместе с ним по трубопроводам с мерными участками, а затем попадают на вход блока циклонов УП. В циклонах происходит разделение фаз: газ из циклонов поступает на вход ЦА, а твердые частицы из бункера УП с помощью барабанного питателя вновь вводятся в поток газа. Расход газа определялся с помощью трубы Вентури в контуре чистого газа.

Расход твердой фазы находился по скорости вращения барабанного питателя, предварительно проградуированного для конкретного ее вида. Гидравлическое сопротивление определялось по перепаду давления на мерных участках с помощью датчиков давления «Сапфир-22ДД».

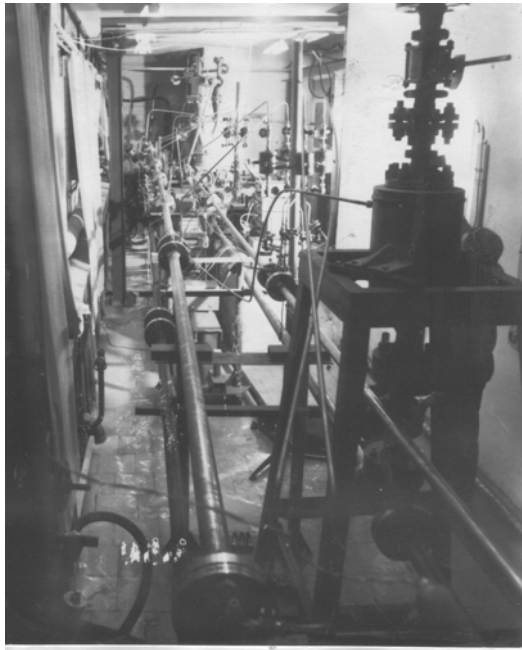


Рис. 2

Величина критической скорости фиксировалась для заданного скоростного режима визуально или с помощью видеокамеры 8 через прозрачные вставки 7 в мерном трубопроводе. В качестве твердой фазы использовались гранулы полиэтилена ($d_{\text{экв}}=4$ мм, $\rho_{\text{T}}=930$ кг/м³). Эксперименты проводились при фиксированном массовом расходе несущего газа для каждого из значений избыточного рабочего давления.

На рис. 3, для удобства анализа влияния рабочего давления на гидравлическое сопротивление двухфазного потока, результаты экспериментов представлены в виде

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_0^0} = f_1(\rho, \mu) \quad \text{и} \quad \frac{\Delta p}{\Delta p_0^0} = f_2(\rho, \beta),$$

где ρ – плотность несущего газа в стенде; Δp – гидравлическое сопротивление двухфазного потока на мерном участке; Δp_0^0 – гидравлическое сопротивление чистого газа на мерном участке при $\rho = 1,25$ кг/м³; μ , β – расходная и объемная концентрация твердой фазы.

Расходная и объемная концентрации твердой фазы определяются соотношениями

$$\mu = \frac{G_{\text{T}}}{G}; \quad \beta = \frac{1}{1 + \frac{1}{\mu} \frac{\rho_{\text{T}} u_{\text{T}}}{\rho u}},$$

где G_{T} , G – расходы твердой фазы и газа соответственно; ρ_{T} – плотность материала твердой фазы; u_{T} , u – скорости частиц твердой фазы и несущего газа соответственно (величина относительной скорости частиц u_{T}/u для ус-

ловий данных экспериментов, найденная с помощью видеосъемки, составляла примерно 0,4).

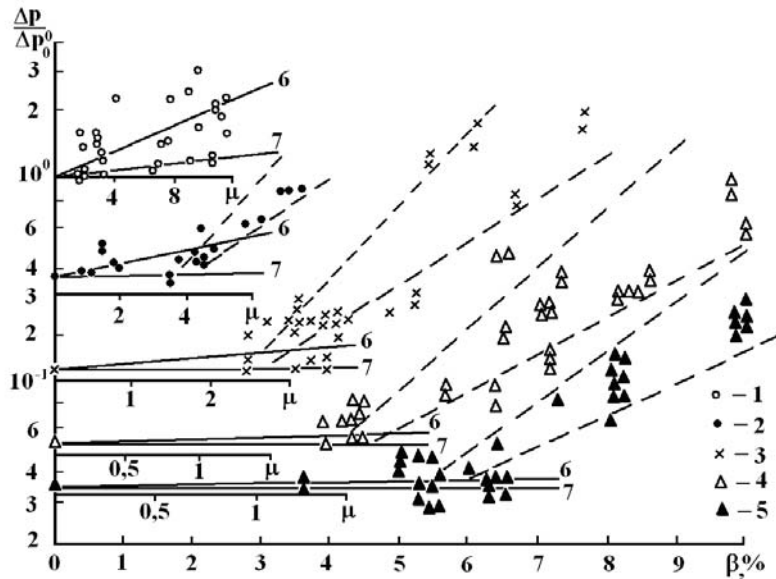


Рис. 3

Приведенные результаты показывают, что гидравлическое сопротивление при повышенном избыточном рабочем давлении в системе и значениях объемной концентрации, не превышающих 3 – 4 %, существенно меньше сопротивления чистого газа при нулевом избыточном давлении (экспериментальные значения 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют плотности несущего газа $\rho_T = 1,25; 2,89; 7,04; 12,75; 17,83 \text{ кг/м}^3$).

Там же приведены результаты расчетов с использованием предложенной в работе [2] зависимости для коэффициента Гастерштадта, выполненных для крайних значений скорости несущего газа, реализованных в экспериментах (линии 6 соответствуют $U = U_{\min}$, а линии 7 – $U = U_{\max}$).

При расчетах использована общепринятая гипотеза о допустимости сложения гидравлических потерь, обусловленных течением газа и движением твердых частиц, в соответствии с которой гидравлическое сопротивление двухфазного потока можно представить в виде

$$\Delta p = \Delta p_0(1 + K\mu),$$

где Δp_0 – гидравлическое сопротивление трубопровода при движении чистого газа; K – коэффициент Гастерштадта, зависящий от массовых и аэродинамических свойств твердых частиц, параметров пневмомагистрали, режима течения и др. [9].

В соответствии с работой [2] коэффициент K рассчитывался по формуле

$$K = 0,1 \frac{(\rho_T - \rho)gD}{\rho u^2},$$

где D – внутренний диаметр трубопровода; g – ускорение свободного падения.

Можно отметить, что результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с опытными данными для каждого уровня плотности несущего газа в

области объемных концентраций до 3 – 4%. При дальнейшем росте объемной концентрации экспериментальные значения гидравлического сопротивления превышают значения, определяемые зависимостью работы [2], экстраполированной на область повышенных плотностей несущего газа и объемных концентраций. Причем предельные значения объемной концентрации, с превышения которых имеет место рост гидравлического сопротивления относительно зависимости работы [2], сдвигаются в сторону больших объемных концентраций с ростом плотности несущего газа.

Эмпирические зависимости для определения минимально допустимых скоростей движения двухфазного потока (критических скоростей) по литературным данным могут быть обобщены для $\mu = 1 - 15$ кг/кг в виде [8]

$$U^* = A\mu^\omega \sqrt{\frac{\rho_T}{\rho}},$$

где $A = A(D, d, g)$; d – эквивалентный диаметр частицы; ω – постоянное число, по данным различных авторов, принимающее фиксированное значение от 0 до 0,5.

На рис. 4 представлено влияние плотности несущего газа на относительное изменение критической скорости несущего газа в виде расчетной зависимости $U^*/U_0^* = \sqrt{\rho/\rho_0}$ (сплошная линия) и данных экспериментов на стенде (\circ – $\mu = 1,5 - 4,0$; \blacksquare – $\mu = 5 - 9$; \triangle – $\mu = 11 - 15$), которые свидетельствуют о допустимости экстраполяции эмпирических соотношений на условия повышенной плотности несущего газа; значения ρ_0, U_0^* соответствуют плотности и критической скорости при давлении, близком к атмосферному.

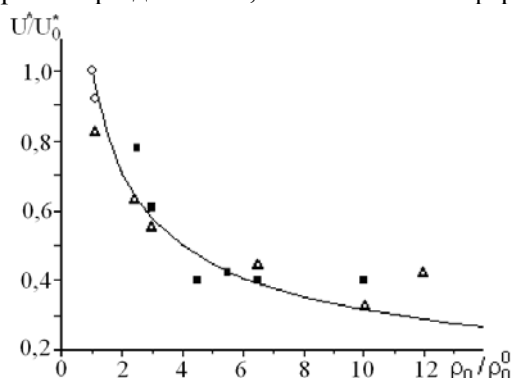


Рис. 4

Определение энергозатрат при движении двухфазного потока с повышенной плотностью несущего газа было проведено при избыточном давлении несущего газа от 0 до 0,8 МПа. Расход воздуха изменялся в диапазоне от 0,04 до 0,4 кг/с, расход твердой фазы составлял $G_T = 0,16; 0,44; 0,68$ кг/с. В процессе экспериментов измерялся перепад давления на циркуляционном агрегате.

Энергозатраты на единицу массы транспортируемой твердой фазы (без учета затрат мощности на создание в системе повышенного давления) определялись как отношение гидравлической мощности циркуляционного агрегата к производительности по сыпучему материалу

$$\sigma = \frac{G p_H}{\rho G_T} \ln \left(\frac{p_H}{p_K} \right) \approx \Delta p_{ЦА} G / \rho G_T,$$

где p_H , p_K – давление на входе и выходе из циркуляционного агрегата соответственно; $\Delta p_{ЦА}$ – перепад давлений на циркуляционном агрегате.

Полученные результаты, представленные на рис. 5, показывают, что с ростом давления (плотности) несущего газа удельные энергозатраты на движение двухфазного потока снижаются. Так, из сравнения кривых 1 и 2, соответствующих плотности несущего газа $\rho_T = 1,25 \text{ кг/м}^3$ и $\rho = 2,5 \text{ кг/м}^3$ (рабочие избыточные давления $p_p = 0 \text{ МПа}$ и $p_p = 0,2 \text{ МПа}$) при $G_T = 0,16 \text{ кг/с}$, видно, что при одинаковых расходных концентрациях твердой фазы (например, для $\mu \approx 2 \text{ кг/кг}$) удельные энергозатраты с ростом плотности несущего газа падают примерно в 10 раз. Аналогичная ситуация имеет место для кривых 2 и 4, соответствующих плотностям $\rho = 2,5 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_T = 5 \text{ кг/м}^3$ при $G_T = 0,16 \text{ кг/с}$. Сравнение кривых 4 и 5, соответствующих расходам $G_T = 0,44 \text{ кг/с}$ (●) и $G_T = 0,68 \text{ кг/с}$ (▲) при плотности несущего газа $\rho = 10 \text{ кг/м}^3$ (рабочее избыточное давление $p_p = 0,8 \text{ МПа}$), показывает, что при сопоставимых энергозатратах повышенная плотность несущего газа обеспечивает увеличение расхода твердой фазы в 2,75 – 4,25 раза.

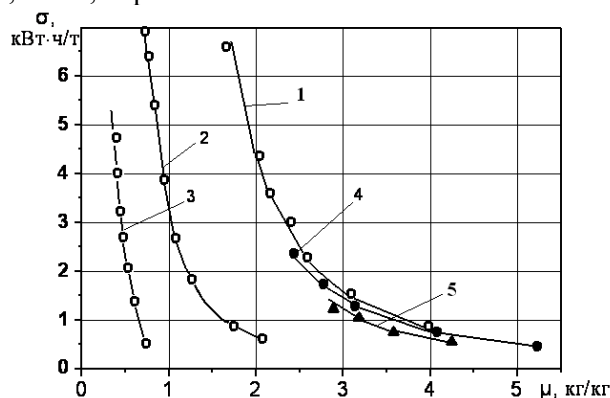


Рис. 5

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что использование несущего газа повышенной плотности приводит к следующим изменениям гидравлических характеристик:

- снижаются гидравлические потери по длине пневмотрубопровода;
- снижаются энергозатраты на перемещение двухфазного потока (оценочно в несколько раз);
- величина минимально допустимой (критической) скорости уменьшается обратно пропорционально корню квадратному из плотности несущего газа.

Экстраполяция эмпирических зависимостей для гидравлического сопротивления двухфазного потока, полученных для небольшой плотности несущего газа, справедлива в области повышенных плотностей при объемных концентрациях твердой фазы, не превышающих 3 – 4%. При дальнейшем увеличении объемной концентрации твердой фазы имеющиеся зависимости требуют корректировки с учетом результатов экспериментов в данной области.

Экспериментальные данные по критическим скоростям при изменении относительной плотности несущего газа ρ/ρ_0 от 1 до 10 – 12 хорошо коррелируют с известными из литературы эмпирическими зависимостями, справедливыми для $\rho/\rho_0 \approx 1 - 1,5$.

Полученные результаты могут служить основой для создания пневмотранспортных систем замкнутого типа, работающих при повышенной плотности несущего газа, систем охлаждения с двухфазными рабочими телами, проточных химических реакторов и других систем подобного типа.

1. Трубопроводный транспорт нефти и газа / Р. А. Алиев, В. Д. Белоусов, А. Г. Немудров, В. А. Юфин, Е. И. Яковлев. – М. : Недра, 1988. – 368 с.
2. Смолдырев А. Е. Гидро- и пневмотранспорт / А. Е. Смолдырев. – М. : Metallurgia, 1975. – 384 с.
3. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами / Р. Бусройд. – М. : Мир, 1975. – 380 с.
4. Горбис З. Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков / З. Р. Горбис. – М. : Энергия, 1970. – 424 с.
5. Сукомел А. С. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при движении газозвеси в трубах / А. С. Сукомел, Р. В. Керимов, Ф. Ф. Цветков. – М. : Энергия, 1977. – 191 с.
6. Зувев Ф. Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях / Ф. Г. Зувев. – М. : Колос, 1976. – 343 с.
7. Криль С. И. К вопросу о методиках расчета основных параметров пневмотранспорта сыпучих материалов по горизонтальным трубам / С. И. Криль, М. Н. Чальцев // Прикладная гидромеханика. – 2010. – Т.12, №4. – С.36 – 44.
8. Тимошенко В. И. Влияние повышенного давления несущего газа на гидравлические характеристики двухфазного потока типа газ – твердые частицы / В. И. Тимошенко, Ю. В. Кнышенко, В. Ф. Копысов, Е. Н. Громов // Инженерно-физический журнал. – 1992. – Т.62, №2. – С.188 – 194.
9. Тимошенко В. И. Определение гидравлических потерь при движении двухфазного потока в горизонтальном трубопроводе / В. И. Тимошенко, Ю. В. Кнышенко, В. И. Щербаков // Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений). – 1990. – №9. – С.81 – 85.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 27.03.12,
в окончательном варианте 05.04.12