

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА И ГАЗОДИСПЕРСНЫХ СРЕД ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены вопросы экспериментального определения гидравлических параметров трубопроводов с близкорасположенными сварными швами и трубопроводов для пневмотранспорта сыпучего материала с повышенным давлением несущего газа. Дано описание стендов для исследований и полученных на них результатов определения гидравлических параметров, необходимых для создания натуральных технических систем. Приведены зависимости увеличения гидравлического сопротивления от размеров швов и относительного расстояния между ними, полученные на стенде для исследования влияния близкорасположенных сварных швов. На пневмотранспортном стенде получены результаты по гидравлическому сопротивлению, критической скорости и удельным энергозатратам при транспортировке двухфазных газодисперсных взвесей в ранее не исследованной области рабочих давлений.

Розглянуто питання експериментального визначення гідравлічного опору трубопроводів з близькорозташованими зварними швами та трубопроводів для пневмотранспорту сипучого матеріалу з підвищеним тиском несучого газу. Дано опис стендів для досліджень та отриманих на них результатів визначення гідравлічних параметрів, необхідних для створення натуральних технічних систем. Приведено залежності зростання гідравлічного опору від розмірів швів та відносної відстані між ними, отримані на стенді для дослідження впливу близькорозташованих зварних швів. На пневмотранспортному стенді отримано результати з гідравлічного опору, критичної швидкості та питомих енерговитрат при транспортуванні двофазних газодисперсних суспензій у раніше не дослідженій області робочих тисків.

Problems for experimental measuring hydraulic parameters of pipelines with closely-spaced joint welds and those for pneumatic transport of bulk material at an elevated pressure of the carrying gas are examined. Benches for studying and the results obtained for measuring hydraulic parameters to develop full-scale engineering systems are examined. Dependencies of an elevated hydraulic resistance on weld sizes and a relative space between them the bench for studying the effects of closely-spaced joint welds are reported using the bench for studying the effects of closely-spaced joint welds. The results for measuring a hydraulic resistance, a critical speed and specific power consumption for transporting dispersive two-phase gas suspensions in a previously unknown domain of working pressures are obtained using the pneumatic transport bench.

Ключевые слова: эксперимент, сварной шов, гидравлическое сопротивление, пневмотранспорт, критическая скорость, энергоэффективность.

Введение. Поиск путей повышения эффективности магистрального трубопроводного транспорта газа является актуальной задачей в связи с необходимостью снижения затрат на транспортировку энергоносителей к местам их потребления. Одно из направлений связано с обоснованием применимости многослойных труб из рядовой рулонной стали в магистральных газопроводах в части допустимого роста гидравлического сопротивления. Другим направлением повышения эффективности газопроводного транспорта является изучение возможности совмещения транспортировки природного газа и сыпучего материала, например угольной пыли.

Интерес к этим направлениям определяется следующим.

Многослойные трубы обладают повышенной стойкостью к хрупкому лавинообразному разрушению, которое имеет место на магистральных газопроводах из сварных труб. Кроме того, многослойные трубы допускают повышение рабочих давлений до 10 – 12 МПа. Технология изготовления многослойных труб была разработана под руководством Президента НАН Украины академика Б. Е. Патона. Эта технология предусматривает навивку 4 – 5 слоев рулонного стального листа шириной до 1700 мм, который изготавливается на отечественных прокатных станах. Ширина листа определяет длину обечаек, из которых изготавливаются газопроводы. Вследствие этого уменьшаются

расстояния между сварными швами, соединяющими отдельные участки труб, и растет количество сварных швов по сравнению с используемыми традиционными цельнометаллическими трубами длиной 10 – 11 м. Это вызывало опасения роста гидравлического сопротивления, которое существенно, на 8 – 10 %, превысит значения, характерные для традиционных труб, что приведет к снижению производительности трубопровода.

Магистральное транспортирование сыпучего (пылевидного) материала в потоке газа высокого давления (до 7,5 МПа) позволяет совместить транспортировку природного газа и измельченных угольных частиц от места их добычи к потребителю. Такой способ транспортировки представляет собой совершенно неисследованную область. По инициативе Президента академии наук Украины с участием академика Пилипенко В. В. была разработана комплексная программа создания нового вида трубопроводного транспорта – углегазотранспорта (УГТ). Эта программа была согласована с руководителями газовой и нефтяной отраслей промышленности. Программа предусматривала создание экспериментального кольца (ЭК) УГТ на базе одной из компрессорных станций (Ставищенской КС) в Киевской области. Задачей создания ЭК УГТ была отработка основных элементов предлагаемой технологии газотранспорта угольной пыли крупностью до 150 мкм, включающей линейную трубопроводную часть, перекачивающий агрегат, системы подготовки и загрузки угольной пыли в транспортный трубопровод, устройства выгрузки и сжигания углегазовой взвеси, а также другие инженерные системы. Следует отметить, что одной из основных проблем при реализации дальнего УГТ было создание перекачивающего компрессорного агрегата, работающего на газодисперсных средах с высокой концентрацией твердой фазы. Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины был определен головной организацией, обеспечивающей разработку ЭК УГТ с правом привлечения ряда институтов Национальной академии наук Украины для выполнения работ по различным направлениям.

В обеспечение работ по этим направлениям академиком Пилипенко В. В. были инициированы в ИТМ целенаправленные исследования. Основными методами для обоснования возможностей достижения поставленных целей были избраны методы экспериментального моделирования. В ИТМ были разработаны методики экспериментального моделирования и созданы экспериментальные установки для исследований в этих направлениях.

Ниже представлены описания стендов и результаты исследований.

Гидравлическое сопротивление сварных трубопроводов. Для определения влияния близкорасположенных сварных швов на гидравлическое сопротивление трубопровода была создана лабораторная установка [1], общий вид которой представлен на рис. 1.



Рис. 1

состоял из стеклянных труб с внутренним диаметром $d = 148$ мм, другой собирался из точеных алюминиевых обечаек с внутренним диаметром $d = 145$ мм. Фрагменты секций трубопроводов представлены на рис. 2.

Моделирование сварных швов в стеклянном трубопроводе осуществлялось при помощи латунных полос, изогнутых в виде колец, которые устанавливались по длине трубопровода на расстоянии одного калибра друг от друга и удерживались в этом положении за счет сил трения. Кольца имели толщину $\delta = 0,8$ мм и ширину $t = 7$ мм (рис. 2, а).

Трубопровод из стеклянных труб служил для проведения настройки и отладки системы измерения и регистрации, а также проверки имеющихся в литературе данных по влиянию сварных швов на гидравлические потери без подробного моделирования формы швов.

Эксперименты с моделями сварных швов, геометрически подобными натурным, проводились на установке с алюминиевым трубопроводом, собранным из 36 точеных алюминиевых обечаек, стянутых и зафиксированных с помощью тяг (рис. 2, б). Сварные швы моделировались вставляемыми в стыки между обечайками сменными кольцами, поверхность которых выполнялась таким образом, чтобы выступающая внутрь трубы часть колец имела форму, геометрически подобную исследуемому шву (рис. 2, г). Величины выступов прямоугольной формы составляли 0,27 мм; 0,52 мм и 1,01 мм, а скругленной – 0,32 мм и 1,01 мм.

Воздух в измерительный участок трубопровода подавался от вентилятора высокого давления через успокоительную камеру и спрямляющую решетку по трубопроводу длиной 40 калибров. В конце измерительного участка устанавливался выходной участок длиной 10 калибров. В процессе экспериментов фиксировали режимные параметры (среднюю скорость воздуха в трубопроводе) и перепад давлений на измерительном участке. Был реализован турбулентный режим течения при числах Рейнольдса до $6 \cdot 10^5$.

Установка имела два модельных трубопровода: один трубопровод

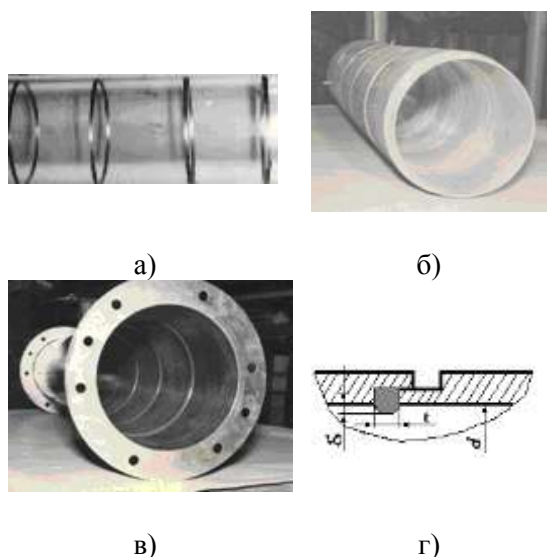


Рис. 2

Скругленные выступы имитировали профиль сварного шва, который был получен в Институте электросварки НАН Украины им. Е. О. Патона на основе статистической обработки профилей натуральных швов. При этом имел место определенный разброс по высоте колец.

Обечайки были изготовлены с допусками, позволяющими при стыковке их без сменных колец получать гидравлически гладкую трубу. Это позволяло исследовать влияние сварных швов на различных расстояниях от 1,1 до 7,7 калибра.

Кроме того, для чистовых экспериментов вместо алюминиевого трубопровода использовался трубопровод с внутренним диаметром 145 мм, изготовленный разработанным в ИТМ гальваническим методом [2] путем осаждения слоя никеля на поверхность матрицы с высотой скругленного шва 0,35 мм, изготовленной с точностью $\pm 0,01$ мм. Фрагмент такого трубопровода представлен на рис. 2, в.

При постановке экспериментов в качестве опорной была принята эмпирическая зависимость коэффициента сопротивления одного стыка сварного шва от его относительной высоты [3, 4], из которой следует, что увеличение гидравлического сопротивления пропорционально $\bar{\delta} = \delta/d$ в степени 1,5 и обратно пропорционально относительному расстоянию между швами $\bar{l}_{\text{нб}} = l_{\text{нб}}/d$. Здесь $l_{\text{нб}}$ – расстояние между швами, d – диаметр трубы, δ – высота сварного шва.

Используя это, приращение коэффициента гидравлического сопротивления за счет сварных швов представляется в виде

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = k_0 \frac{\bar{\delta}^{1,5}}{\bar{l}_{\text{нб}}}; \Delta\bar{\lambda} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} 100 \%, \quad (1)$$

где λ' и λ – коэффициенты гидравлического сопротивления трубы со сварными швами и гидравлически гладкой трубы. Коэффициент k_0 выбирается на основании результатов эксперимента [5, 6].

В результате обработки экспериментов на алюминиевой трубе установлено, что величина k_0 определяется формой выступа: для прямоугольного выступа $k_0 = 8,26$, для скругленного – $k_0 = 4,14$. Полученная зависимость позволяет найти величину $\Delta\lambda$ при промежуточных размерах выступов с учетом их формы.

На рис. 3, а представлены результаты расчетов относительного увеличения гидравлического сопротивления для скругленных и прямоугольных имитаторов швов (кривые 1 и 2) при $\bar{l}_{\text{нб}} = 1,1$. Там же приведены экспериментальные данные, полученные для соответствующих видов швов на стеклянном и алюминиевом трубопроводах и трубопроводе, изготовленном гальваническим методом. Значками «I» показаны доверительные интервалы полученных результатов с надежностью 0,95. Для стеклянного трубопровода горизонтальным значком «I» отражена неопределенность в высоте выступа, связанная с неплотным прилеганием латунных колец к поверхности трубы.

На рис. 3, б представлены абсолютные и относительные приращения гидравлических сопротивлений трубопроводов при $\bar{l}_{\text{нб}} = 1,1; 3,3; 5,5; 7,7$ и относительных высотах выступания имитаторов сварных швов над внутренней поверхностью труб $\bar{\delta} = 0,0022; 0,00235; 0,0057; 0,0069$. Точки соответствуют

трубопроводу со вставными кольцами, а крестик – трубопроводу, изготовленному методом гальванопластики. Средние значения $\Delta\lambda$ и $\Delta\bar{\lambda}$ для $\bar{\delta}=0,0022$ при $\bar{l}_{но}>1,1$ находятся в интервале, ограниченном значком «В».

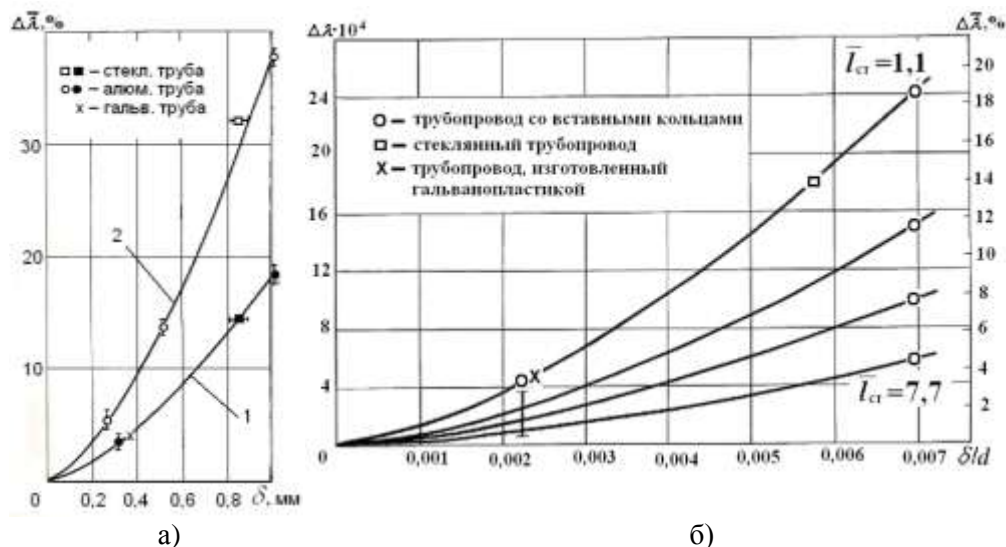


Рис. 3

Кривые, приведенные на рис. 3, б) отражают зависимости (1), при этом множитель k_0 находится из условия равенства $\Delta\lambda$, найденного из (1), значению $\Delta\lambda_{усп}$ для данного $\bar{l}_{но}$ при $\bar{\delta}=0,0069$.

Из приведенных данных следует, что для сварных швов с относительным выступом $\bar{\delta} \approx 0,0022$, отстоящих друг от друга на расстояниях 1,1 – 7,7 калибра, прирост коэффициента гидравлического сопротивления находится в пределах от 3,8 до 0,5 %.

Полученные данные позволяют оценить влияние средней величины выступа сварного шва при различном сочетании расстояний между швами. Поскольку каждый сварной шов является местным сопротивлением, для него справедлива автомодельность по числу Рейнольдса в турбулентном режиме течения. Поэтому эти результаты могут быть использованы при расчетах натуральных трубопроводов. Потери производительности газопровода для максимального прироста гидравлического сопротивления составляют не более 2 %.

Эти данные были переданы в Миннефтегазстрой и оказались приемлемыми для широкой технической реализации магистральных трубопроводов из многослойных труб.

Транспортировка газозвесей в трубопроводах при повышенном давлении. В традиционной системе транспорта сыпучих материалов в потоке газа (пневмотранспорте) несущая газовая среда (сжатый воздух) в конце магистрали после разделения с сыпучим материалом сбрасывается в атмосферу. Давление в конце магистрали лишь незначительно (на величину гидравлических потерь в системе сепарации) превышает атмосферное давление. С ростом длины магистрали необходимо увеличение давления в начале трассы, создаваемого компрессорным агрегатом. Это приводит к росту относитель-

ного перепада давления вдоль пневмотрассы, падению плотности несущего газа и соответствующему возрастанию его скорости в концевых участках. Для обеспечения эффективного пневмотранспорта на повышенные расстояния необходимо уменьшение средней скорости потока по длине пневмотрассы. Этого можно добиться повышением давления в магистрали, что приводит к уменьшению относительного перепада давления вдоль магистрали без уменьшения производительности трубопровода и, как следствие, к менее интенсивному возрастанию скорости вдоль пневмотрассы. Так, при давлении на входе $p_0 = 0,2$ МПа, а на выходе $p_L = 0,1$ МПа скорость газа в конце магистрали вырастет вдвое по сравнению со скоростью на входе; если же $p_0 = 1,0$ МПа, а на выходе $p_L = 0,9$ МПа (при сохранении разности $p_0 - p_L = 0,1$ МПа), то скорость газа в конце магистрали вырастет всего на 11 % по сравнению со скоростью на входе.

При заданной производительности пневмотранспортной системы по сыпучему материалу с ростом давления несущего газа массовая расходная концентрация твердой фазы μ уменьшается, что приводит к снижению гидравлического сопротивления двухфазного потока.

Таким образом, повышение давления несущего газа двухфазного потока оказывает двоякое влияние на снижение гидравлического сопротивления: за счет снижения гидравлических потерь чистого газа и за счет снижения влияния затрат энергии на движение твердых частиц.

В рамках подготовки к разработке ЭК УГТ в ИТМ был создан пневмотранспортный стенд высокого давления (до 3,3 МПа) для моделирования основных узлов ЭК УГТ и определения гидравлического сопротивления, критической скорости и удельных энергозатрат двухфазного потока при повышенном давлении несущего газа. Общий вид пневмотранспортного стенда представлен на рис. 4.

Для определения гидравлического сопротивления чистого газа и двухфазного потока на стенде выполнено два мерных участка длиной 5,1 м каждый из труб с внутренним диаметром 30 и 50 мм. Общая длина трубопроводов двухфазного потока и чистого газа составляет примерно 70 м. В качестве циркуляционных агрегатов (ЦА), обеспечивающих непрерывное движение двухфазного потока, использованы шестеренчатые компрессоры, помещенные в герметичные боксы с системой водяного охлаждения. Общий вид одного из боксов с ЦА представлен на рис. 5.



Рис. 4

Проблема работы циркуляционного компрессорного агрегата на стенде была решена путем отделения твердых частиц от несущего газа (воздуха) перед входом в компрессор и последующего ввода частиц в газовый поток на выходе из компрессора в устройстве перегрузки, приведенном на рис. 6.



Рис. 5



Рис. 6

Это устройство состоит из блока циклонов, установленных на цилиндрическом бункере, в нижней части которого помещен барабанный питатель с регулируемой скоростью вращения. Расход твердой фазы регулируется скоростью вращения барабанного питателя, предварительно проградуированного для конкретного вида твердых частиц. Величина минимальной скорости газозвеси, при которой отсутствует осаждение частиц на стенки трубопровода (критической скорости), фиксировалась для заданного скоростного режима визуально через прозрачные вставки в мерном трубопроводе.

Проточная часть стенда, включая боксы с циркуляционными агрегатами, перед испытаниями заполнялась сжатым воздухом до необходимого давления.

По уровню рабочего давления данный стенд не имеет аналогов в Украине и за рубежом и может быть использован для отработки пневмотранспортных систем различного назначения [7, 8].

Результаты экспериментов по определению гидравлического сопротивления двухфазного потока в горизонтальном трубопроводе с внутренним диаметром 50 мм при различных давлениях несущего газа представлены на рис. 7. В качестве сыпучего материала были использованы гранулы полиэтилена со средним диаметром 3 мм.

Для удобства анализа влияния рабочего давления на гидравлическое сопротивление двухфазного потока результаты экспериментов представлены в виде зависимостей отношения гидравлического сопротивления при повышенном давлении несущего газа Δp к сопротивлению чистого воздуха Δp_0^0 при среднем давлении, близком к атмосферному, от расходной (μ) и объемной (β) концентраций твердой фазы.

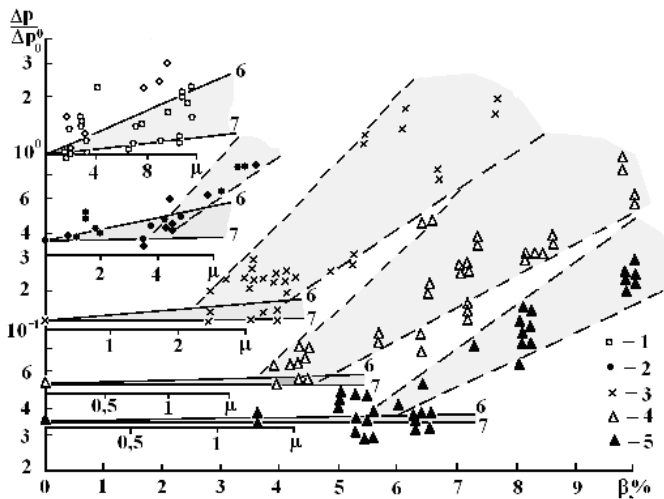


Рис. 7

сти несущего газа, реализованных в экспериментах (6 – $U = U_{\min}$, 7 – $U = U_{\max}$).

Приведенные данные показывают, что гидравлическое сопротивление при повышенном рабочем давлении в проточной части стенда и значениях объемной концентрации твердой фазы, не превышающих 3 – 4 %, существенно меньше сопротивления чистого газа при среднем давлении, равном атмосферному. Расчетные данные достаточно хорошо согласуются с результатами экспериментов для каждого уровня рабочего давления в области объемных концентраций до 3 – 4 %, характерных для традиционных систем пневмотранспорта. При дальнейшем росте объемной концентрации опытные данные гидравлического сопротивления превышают значения, определяемые зависимостями работы [9], экстраполированными на область повышенных плотностей несущего газа и объемных концентраций.

При повышении давления несущего газа в трубопроводе и, как следствие, уменьшении средней скорости двухфазного потока следует иметь в виду, что скорость движения в горизонтальном трубопроводе в любом сечении по его длине не может быть меньше критической скорости, определяющей осаждение твердых частиц на нижнюю часть трубопровода. Эта скорость обратно пропорциональна корню квадратному из плотности несущего газа [10].

На рис. 8 представлены изменение относительной критической скорости при уменьшении относительной плотности несущего газа $u^*/u_0^* = \sqrt{\rho_0/\rho_0^0}$ [11] (u_0^*, ρ_0^0 – значения при давлении близком, к атмосферному) и результаты экспериментов на стенде при разных расходных концентрациях твердой фазы μ : \circ – $\mu = 1,5 - 4,0$; \blacksquare – $\mu = 5 - 9$; Δ – $\mu = 11 - 15$. Эти результаты свидетельствуют о допустимости экстраполяции эмпирических соотношений для традиционных систем пневмотранспорта [10] на условия повышенного давления несущего газа. Существенное снижение критической скорости с ростом давления несущего газа позволяет снизить скорость транспортировки, что обеспечивает снижение эрозийного износа трубопроводов и повышение сохранности сыпучего материала.

Экспериментальные данные 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют рабочим избыточным давлениям 0; 0,129; 0,462; 0,919 и 1,315 МПа. Линиями 6 и 7 представлены результаты расчетов с использованием предложенной в работе [9] зависимости для коэффициента Гастерштадта, выполненных для крайних значений скорости

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 [8]:

$$\sigma = \Delta p_{\text{оА}} G / \rho G_0,$$

где $\Delta p_{\text{оА}}$ – перепад давления

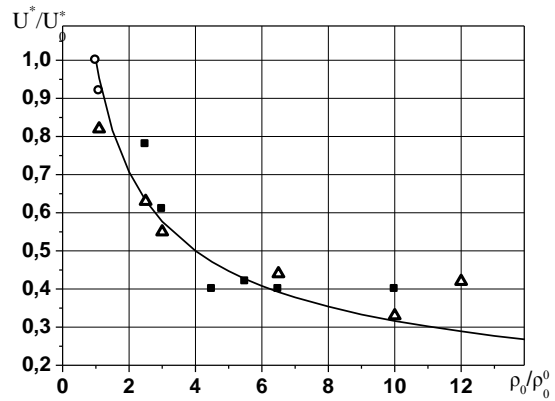


Рис. 8

на циркуляционном агрегате; G – массовый расход газа, G_0 – массовый расход сыпучего материала, ρ – плотность газа при рабочем давлении.

На рис. 9 представлены результаты определения в экспериментах на лабораторном стенде удельных энергозатрат при пневмотранспортировании с рабочим давлением несущего газа $p_0 = 0,1; 0,3; 0,5$ и $0,9$ МПа и расхода сыпучего материала $G_0 = 0,16; 0,44; 0,68$ кг/с. Расход воздуха вдоль каждой линии изменялся в диапазоне $0,04 - 0,4$ кг/с и определялся значениями $\Delta p_{\text{оА}}$, которые варьировались в экспериментах. Линии 1, 2, 3 соответствуют значению $G_0 = 0,16$ кг/с при рабочих давлениях $p_0 = 0,1; 0,3$ и $0,5$ МПа, а линии 4, 5 соответствуют рабочему давлению $p_0 = 0,9$ МПа при $G_0 = 0,44$ и $0,68$ кг/с.

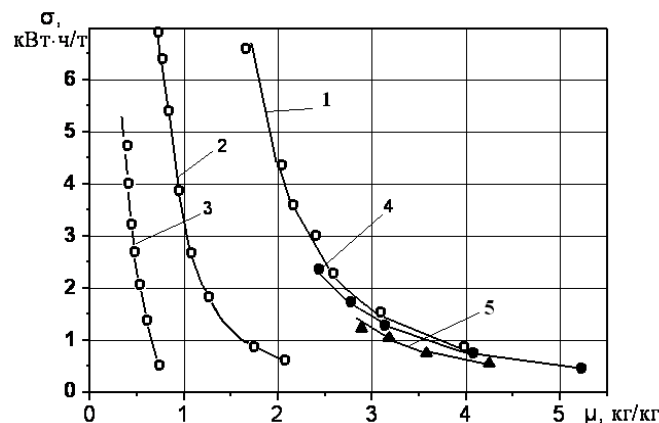


Рис. 9

Из сравнения линий 1, 2, 3 видно, что при увеличении давления в пневмотрассе расходная концентрация сыпучего материала $\mu = G_T / G$ убывает и удельные энергозатраты существенно снижаются. Например, для $\mu \approx 2$ кг/кг энергозатраты падают примерно в 6 раз, а при $\mu \approx 0,8$ кг/кг – более чем в 10 раз при одной и той же производительности пневмотрассы $G_0 = 0,16$ кг/с. Это видно из сопоставления кривых 1 – 2 и 2 – 3. Уменьшение μ при увеличении давления связано с увеличением плотности несущего газа при постоянном расходе твердой фазы. Из сопоставления линий 1, 4, 5 видно, что повышение рабочего давления до $0,9$ МПа обеспечивает рост производительности по сыпучему материалу до $0,44 - 0,68$ кг/с при удельных меньших энергозатратах, чем при производительности $0,16$ кг/с и рабочем давлении $0,1$ МПа.

Заклучение. Дано описание разработанных в ИТМ методик экспериментального моделирования гидравлических параметров трубопроводных систем для перемещения газообразных сред при наличии близкорасположенных сварных швов и при течении двухфазных газодисперсных потоков. Для реализации этих методик созданы экспериментальные установки, на которых проведены серии экспериментов.

Полученные данные по гидравлическим сопротивлениям и снижению производительности многослойных труб оказались приемлемыми для широкого технического использования при строительстве газопроводов.

На основании результатов экспериментальных исследований на пневмотранспортном стенде показано, что использование несущего газа повышенного давления при пневмотранспорте сыпучих материалов позволяет при заданной производительности снизить энергозатраты на транспортировку и уменьшить перепад скоростей несущего газа в начале и в конце пневмотранспортной линии. Это делает возможным увеличение дальности транспортирования в несколько раз по сравнению с традиционно применяемыми пневмотранспортными линиями при уменьшении как эрозионного износа линейной части трубопровода, так и измельчения транспортируемых материалов. Технология пневмотранспорта при повышенном давлении базируется в основном на использовании стандартного оборудования.

1. А. с. № 1160252. Стенд для экспериментального определения гидравлического сопротивления сварных трубопроводов / Тимошенко В. И., Логачев П. П., Кнышенко Ю. В. и др. (СССР). – опубл. 1985, Бюлл. № 21.
2. Применение технологических процессов гальванопластики для производства рельефных поверхностей деталей / В. С. Гудрамович, А. П. Гайдученко, И. А. Дисковский и др. // Перспективы применения полимерных композиций и технологических процессов гальванопластики в производстве формообразующих элементов оснастки. – Л.: Изд. Ленингр. дом научно-техн. пропаганды, 1989. – С. 20 – 28.
3. Альтигуль А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтигуль, П. Г. Киселев. – М.: Наука, 1970. – 216 с.
4. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
5. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления труб со сварными швами / В. И. Тимошенко, П. П. Логачев, Ю. В. Кнышенко и др. // Изв. ВУЗов. Нефть и газ. – 1985. – № 1. – С. 56 – 59.
6. Экспериментальное исследование влияния сварных швов трубопроводов на гидравлическое сопротивление / В. И. Тимошенко, П. П. Логачев, Ю. В. Кнышенко и др. // Изв. ВУЗов. Нефть и газ. – 1987. – № 7. – С. 54 – 57.
7. Влияние повышенного давления несущего газа на гидравлические характеристики двухфазного потока типа газ – твердые частицы / В. И. Тимошенко, Ю. В. Кнышенко, В. Ф. Копысов и др. // Инж.-физический журнал. – 1992. – Т.62, № 2. – С. 188 – 194.
8. Тимошенко В. И. Пневмотранспорт сыпучих материалов с повышенным давлением несущего газа / В. И. Тимошенко, Ю. В. Кнышенко // Наука и инновации. – 2013. – Т.9, № 1. – С. 5 – 17.
9. Смолдырев А. Е. Гидро- и пневмотранспорт / А. Е. Смолдырев. – М.: Металлургия, 1975. – 384 с.
10. Сакс С. Е. Определение критической скорости взвесенесущего потока / С. Е. Сакс // Инж.-физический журнал. – 1970. – Т. 18, № 5. – С. 832 – 837.
11. Кнышенко Ю. В. Влияние плотности несущего газа на гидравлические характеристики потока с твердыми частицами / Ю. В. Кнышенко // Техническая механика. – 2012. – № 2. – С. 43 – 49.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
Днепропетровск

Получено 20.10.15,
в окончательном варианте 22.10.15