

хим.-техн. спец. вузов] / Ю.Г. Фролов – М.: Химия, 1982. – 400 с.

4. Levine S. Theory of electrokinetic flow in fine cylindrical capillaries at high zeta-potentials/ S. Levine, J.R. Marriott, G. Neale, N. Epstein / Journal of Colloid and Interface Science. – Vol. 52, No. 1, 1975. – P. 136 – 149.

5. Семененко Е.В. Влияние электрокинетических явлений на фильтрацию жидкости в горных породах / Е.В. Семененко, Н.А. Никифорова, О.В. Витушко, Л.Ю. Колодяжная // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наукових праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 92. – С. 78 – 84.

6. Титов К.В. О влиянии поверхностной проводимости на электропроводность горных пород / К.В. Титов // «Электронный научный журнал "Исследовано в России"». – 2003. – С.1013-1026.

7. Титов К.В., Коносавский П.К., Ильин Ю.Т. Становление потенциала течения в пористой среде: численные эксперименты / К.В. Титов, П.К. Коносавский, Ю.Т. Ильин / Электронный научный журнал "Исследовано в России", 2007. – С. 139–149.

УДК 622.647.7+622.648.004.3:622.023.65

Канд. техн. наук С.Н. Пономаренко
(ИГТМ НАН Украины)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ НА СМЕШИВАНИЕ ПОТОКОВ ВОЗДУХА В ТРАНСПОРТНОМ ТРУБОПРОВОДЕ ВИБРОПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Приведені результати теоретичних і експериментальних досліджень впливу на відносні втрати кінетичної енергії кута взаємодії потоків повітря при їх змішуванні в транспортному трубопроводі вібропневмотранспортних машин з кільцевим ежектором. Встановлені закономірності зміни втрат енергії від довжини транспортного трубопроводу та співвідношення площ транспортного трубопроводу та зрізу кільцевої щілини ежектора.

DETERMINATION OF LOSSES OF ENERGY ON MIXING OF BLASTS IN A TRANSPORT PIPELINE OF VIBRO-PNEUMONIC-TRANSPORT MACHINES

Results over of theoretical and experimental researches of influence on the relative losses of kinetic energy of corner of co-operation of blasts are brought at their mixing in a transport pipeline of vibro-pneumonic-transport machines with circular ejector. Conformities to law of change of losses of energy are set from length of transport pipeline and correlation of areas of a transport pipeline and cut of circular crack of ejector.

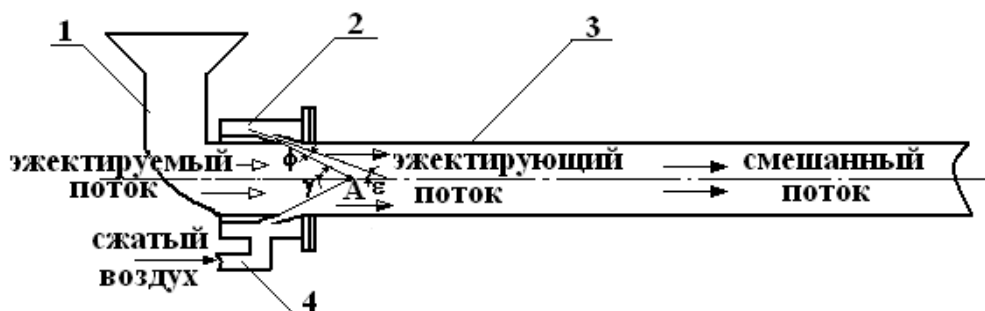
Кольцевое эжекторное устройство вибропневмотранспортных машин (ВПМ) представляет собой аппарат, в котором высоконапорный (эжектирующий) поток воздуха, вытекающий из эжектора в смесительную камеру в виде несвободной турбулентной струи, создает в ней зону разрежения, в которую под действием разности давлений устремляется низконапорный (эжектируемый) поток воздуха. При этом, происходит передача энергии одного потока другому путем их турбулентного смешения, которое происходит из-за наличия поперечных составляющих пульсационных компонентов скорости потоков. В результате этого процесса полное давление эжектируемого потока воздуха под действием эжектирующего потока воздуха увеличивается, а профили скоростей выравниваются. Однако выравнивание этих профилей происходит с потерями кинетической энергии, обусловленными смешиванием эжектирующего и эжектируемого потоков воздуха [1, 2].

Как было показано в работах [3, 4], на величину относительных потерь кинетической энергии на смешивание эжектирующего и эжектируемого потоков

воздуха существенное влияние оказывает величина угла их взаимодействия. При отсутствии в ВПМ частиц перемещаемого закладочного материала теоретическое значение относительных потерь энергии δE на смешивание воздушных потоков в кольцевом эжекторе ВПМ рассчитывается по формулам, приведенных в этой работе, а именно:

$$\delta E = \left[n \left(1 + \frac{u_{\text{э,ср}}^2}{u_{\text{с,ср}}^2} - 2 \frac{u_{\text{э,ср}}}{u_{\text{с,ср}}} \cos \gamma \right) \right] / \left[1 + n \left(1 + n \frac{u_{\text{э,ср}}^2}{u_{\text{с,ср}}^2} \right) \right], \quad (1)$$

где n – коэффициент эжекции, определяемый как $n = (\rho_{\text{э}} u_{\text{э,ср}} S_{\text{э}}) / (\rho_{\text{с}} u_{\text{с,ср}} S_{\text{с}})$; $\rho_{\text{э}}$ и $\rho_{\text{с}}$ – соответственно плотности эжектируемого и эжектирующего потоков воздуха; $u_{\text{э,ср}}$ и $u_{\text{с,ср}}$ – соответственно осредненные по площади поперечного сечения потока скорости движения эжектируемого и эжектирующего потоков воздуха; $S_{\text{э}}$ и $S_{\text{с}}$ – соответственно площадь проходного сечения эжектора в зоне эжектирования и среза кольцевой щели эжектора; γ – угол взаимодействия эжектируемого и эжектирующего потоков воздуха (см. рис. 1).



1 – загрузочная воронка; 2 – кольцевой эжектор; 3 – транспортный трубопровод; 4 – воздухоподводящий трубопровод.

Рис. 1 – Принципиальная схема распределения воздушных потоков в ВПМ с кольцевым эжектором.

Входящее в равенство (1) значение скорости эжектируемого потока воздуха рассчитывается по формуле, приведенной в работах [3, 4] и записанной для случая отсутствия в ВПМ транспортируемого закладочного материала:

$$u_{\text{э,ср}} = \left\{ \frac{\rho_{\Sigma} S_{\text{тр}}}{\rho_{\text{э}} S_{\text{э}}} \left[2 \frac{p_0 - p_L}{\rho_{\Sigma} \left(f_{\Sigma} \frac{L_{\text{тр}}}{D_{\text{тр}}} + \zeta \right)} \right]^{3/2} - \frac{\rho_{\text{с}} S_{\text{с}} u_{\text{с,ср}}^3}{\rho_{\text{э}} S_{\text{э}}} \right\}^{1/3}, \quad (2)$$

где ρ_{Σ} – плотность смешанного потока воздуха; $S_{\text{тр}}$ – площадь сечения транспортного трубопровода ВПМ; p_0 – полное давление воздуха в начале транспор-

тного трубопровода ВПМ, равное $p_0 = p_{\Sigma}^{ст} + \frac{\rho_{\Sigma} u_{\Sigma,ср}^2}{2}$; $p_{\Sigma}^{ст}$ – статическое давление воздуха в начале транспортного трубопровода ВПМ; $u_{\Sigma,ср}$ – скорость воздуха в начале транспортного трубопровода ВПМ; p_L – полное давление воздуха в конце транспортного трубопровода ВПМ; f_{Σ} – интегральный коэффициент сопротивления, равный при отсутствии перемещаемого закладочного материала коэффициенту турбулентного трения воздуха о стенки транспортного трубопровода; $L_{тр}$ и $D_{тр}$ – соответственно длина и диаметр транспортного трубопровода ВПМ; ζ – коэффициент местных сопротивлений.

Угол взаимодействия между эжектируемым и эжектирующим потоками воздуха γ в общем случае определяется в зависимости от угла расширения эжектирующего потока ϕ и угла наклона оси кольцевой щели эжектора к оси транспортного трубопровода ε . В соответствии со схемой распределения воздушных потоков в ВПМ с кольцевым эжектором, приведенной на рис. 1, угол взаимодействия эжектируемого и эжектирующего потоков воздуха равен $\gamma = \varepsilon + \phi$.

Под углом наклона оси кольцевой щели эжектора к направлению транспортирования ε подразумевается угол между осью кольцевой щели эжектора и осью транспортного трубопровода, отсчитываемый по часовой стрелке от оси транспортного трубопровода в направлении движения (см. рис. 1).

Угол расширения эжектирующего потока ϕ , согласно теории турбулентных струй [1, 2], это угол между поверхностью тангенциального разрыва и осью аппарата, из которого происходит истечение потока газа (см. рис. 1). Его численное значение постоянно и равно $\phi \cong 15^{\circ}$, поэтому, $\gamma = \varepsilon + 15^{\circ}$.

Параметры эжектирующего потока воздуха (статическое давление воздушного потока $p_c^{ст}$ и его плотность ρ_c), а также геометрические параметры ВПМ определялись рабочими характеристиками стенда для испытаний и условиями их проведения.

Параметры смешанного потока воздуха в транспортном трубопроводе при условии отсутствия в ВПМ перемещаемого закладочного материала определялись по следующим соотношениям [3, 4]:

$$\rho_{\Sigma} = p_{\Sigma}^{ст} / (RT_{\Sigma});$$

$$p_{\Sigma}^{ст} = (2 p_c^{ст} + \rho_c u_{c,ср}^2) / (2 + \rho_c u_{\Sigma,ср}^2 / p_c^{ст});$$

$$u_{\Sigma,ср} = \frac{u_{c,ср}}{2q_c} \left\{ p_c^{ст} + q_c s - \sqrt{p_c^{ст} + q_c s - 4 p_c^{ст} q_c} \right\},$$

где R – универсальная газовая постоянная; T_{Σ} – температура смешанного потока воздуха; также приняты обозначения $q_c = \rho_c u_{c,ср}^2 / 2$ и $s = S_{тр} / S_c$.

При выполнении расчетов использовались следующие значения: $f_{\Sigma} = 0,014$; $\zeta = 0,05$; $R = 287,14$ Дж/(кг×град). Полное давление (p_L) воздуха в конце транс-

портного трубопровода ВПМ принималось равным атмосферному, а температура (T_{Σ}) смешанного потока воздуха в транспортном трубопроводе – температуре окружающей среды.

Экспериментальные исследования влияния на относительные потери кинетической энергии угла взаимодействия потоков воздуха при их смешивании выполнялись на специальном стенде в условиях опытно-промышленного полигона ИГТМ НАН Украины.

Стенд представлял собой пневмотранспортную установку, оборудованную кольцевыми эжекторным устройством с углом установки щели кольцевого эжектора относительно оси транспортирования $\varepsilon=0; 15; 45$ град и отношением площадей $s=2$ и $s=4$ при дальности транспортирования $L_{тр}=5; 10; 20; 30; 40; 50; 60$ и 70 м. Давление сжатого воздуха, подводимого к исследуемой установке, регулировалось в пределах $0 \div 0,8$ МПа при расходе воздуха до $3\ 000\ \text{м}^3/\text{ч}$ в соответствии с условиями эксперимента [3].

В процессе экспериментальных исследований без наличия транспортируемого материала при фиксированной длине транспортного трубопровода регистрировались следующие основные параметры: расход, полное и статическое давление сжатого воздуха, температура воздуха в транспортном и воздухоподающем трубопроводе.

Экспериментальное значение относительных потерь энергии на смешивание воздушных потоков в кольцевом эжекторе ВПМ определялось по общепринятым формулам определения кинетической энергии с использованием измеренных при помощи анемометра значений соответствующих скоростей воздушного потока, уравнения непрерывности и определения коэффициента эжекции по формуле [1, 2]:

$$n = \frac{Q_э^m}{Q_c^m} = \frac{Q_{\Sigma}^m - Q_c^m}{Q_c^m},$$

где $Q_э^m$, Q_c^m и Q_{Σ}^m – соответственно массовые расходы эжектируемого, эжектирующего и смешанного потоков воздуха, определяемые по общепринятым соотношениям.

Результаты расчета и экспериментальные значения зависимости относительных потерь энергии на смешивание воздушных потоков в кольцевом эжекторе ВПМ от длины транспортного трубопровода и угла установки щели кольцевого эжектора относительно оси транспортирования при соответствующих величинах отношения площадей ($s=2$ и $s=4$) приведены на рис. 2.

Как видно из представленных на рис. 2 результатов (относительная погрешность расчета и экспериментальных значений не превышает $\pm 10\%$), относительные потери δE увеличиваются с ростом как угла γ , так и отношения площадей (s), линейно уменьшаясь с ростом длины транспортного трубопровода. Это обстоятельство обусловлено тем, что для большего значения $L_{тр}$ необходим сжатый воздух с большим давлением и меньшей скоростью истечения.

При этом, для относительно малых скоростей истечения воздуха ($s=2$;

см. рис. 2) на относительные потери δE угол взаимодействия γ наиболее существенно влияет для относительно коротких длин $L_{тр}$, а для относительно больших длин – это влияние уменьшается. В то же время для относительно больших скоростей истечения воздуха из кольцевого эжектора ($s=4$; см. рис. 2) относительные потери δE практически прямо пропорциональны углу взаимодействия γ по всей длине трубопровода ВПМ.

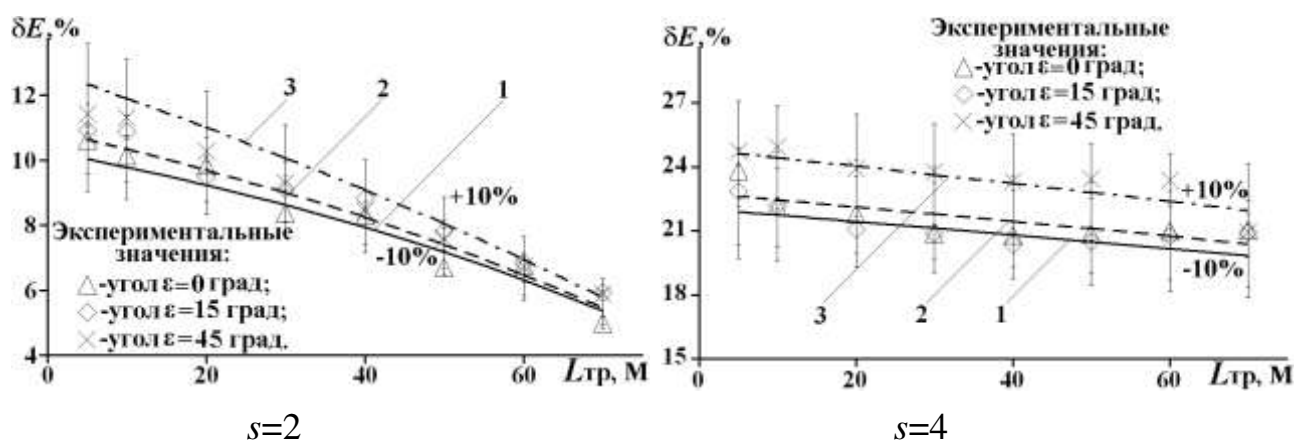


Рис. 2 – Потери кинетической энергии на смешивание в зависимости от длины транспортного трубопровода (1,2 и 3– результаты расчета; сплошная линия – для угла $\epsilon=0^0$; пунктирная линия – для угла $\epsilon=15^0$; штрихпунктирная линия – для угла $\epsilon=45^0$).

Опыт работы с кольцевыми эжекторами ВПМ показал, что угол взаимодействия эжектируемого и эжектирующего потоков газа в реальных эжекторных установках находится в пределах $0^0 \leq \gamma \leq 90^0$ и рассматривать другие варианты компоновок эжекторных устройств нецелесообразно.

Кроме этого необходимо также отметить, что до настоящего времени в вопросах турбулентного смешивания газовых потоков не рассматривались отличительные особенности взаимодействия эжектирующего и эжектируемого потоков газа в установках с кольцевым эжектором и центральным сопловым устройством.

В результате теоретических и экспериментальных исследований [3, 4] впервые была установлена неизвестная ранее закономерность, позволяющая выявить характер взаимодействия эжектирующего и эжектируемого потоков газа в камере смешения кольцевого эжектора. Эта закономерность смешивания потоков газа в кольцевом эжекторе представляют собой научную новизну в теории смешивания турбулентных струй, дополняя описание физики процесса знаниями того, что в кольцевом эжекторе:

- истечение эжектирующего потока газа из кольцевого эжектора происходит в виде несвободной турбулентной струи, имеющей форму полого цилиндра;

- внутри этого цилиндра за счет аксиального охвата эжектируемого газового потока и эжектирующим потоком формируется турбулентный пограничный слой поверхности тангенциального разрыва в виде конической поверхности, направленной своей вершиной А (см. рис. 1) в сторону движения газовых пото-

ков, при этом происходит выравнивание скоростей газовых потоков, а относительные потери на гидравлический удар становятся минимально возможными;

- величина угла при вершине конусообразного пограничного слоя смешивающихся газовых потоков прямо пропорциональна потерям энергии смешанного газового потока;

- выравнивание газодинамических параметров смешивающихся эжектирующего и эжектируемого газовых потоков в пограничном слое происходит без наличия сечения запираания эжектора, которое существует в эжекторных установках с центральным соплом.

Приведенная выше особенность взаимодействия эжектирующего и эжектируемого потоков газа в кольцевом эжекторе позволяет увеличить полную энергию смешанного потока аэросмеси за счет снижения ударных потерь энергии при истечении эжектирующего потока газа из кольцевой щели эжектора и смешивании этого газового потока с эжектируемым потоком.

Особенность взаимодействия эжектирующего и эжектируемого потоков газа в кольцевом эжекторе подтверждена материалами научного открытия «Закономерность взаимодействия смешивающихся эжектирующего и эжектируемого газовых потоков»

Уменьшение потерь энергии на смешивание потоков воздуха в транспортном трубопроводе ВПМ дает возможность:

- увеличить дальность транспортирования сыпучих материалов, в том числе горных пород, на расстояние до 120 м;

- обеспечить возможность транспортирования по трубопроводу с участками подъема и поворота до 90°;

- повысить кинетическую энергию аэросмеси на выходе из транспортного трубопровода, что позволит при использовании ВПМ с кольцевым эжектором в технологиях закладки горной породой выработанного пространства существенно (до $0,8 \div 0,85$) увеличить относительную плотность закладочного массива.

- снизить на $20 \div 40$ % энергоемкость пневмотранспортирования и тем самым уменьшить расход сжатого воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович – М.: Наука, 1969. – 324 с.
2. Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер.– М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
3. В.Н. Потураев Механика вибрационно-пневматических машин эжекторного типа / В.Н. Потураев , А.Ф. Булат, А.И. Волошин [и др.]. – Киев: Наукова думка, 2001. – 176 с.
4. Пономаренко С.Н. Исследование угла взаимодействия газовых потоков при их смешивании в кольцевом эжекторе / Пономаренко С.Н. // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: (Зб. наук. праць). – Краматорськ, 2005. – С. 174–179.

**СХЕМИ СКОРОЧЕННЯ НЕОБХІДНОГО ОБ'ЄМУ ВИМІРЮВАНЬ У
МЕТОДІ КОНТРОЛЮ СТАЦІОНАРНОЇ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ**

Предлагается последовательная процедура принятия решения относительно вектора характеристик контролируемой стационарной подъемной установки, которая является некоторым обобщением процедуры Вальда и позволяет получить выигрыш в среднем объеме испытаний, аналогичный обычному «вальдовскому» выигрышу для случая двух гипотез. Предлагаемая последовательная процедура позволяет учитывать дополнительную информацию и за счет этого получить добавочный выигрыш в объеме контроля стационарной подъемной установки.

**REDUCTION SCHEME REQUIRED VOLUME MEASUREMENTS IN THE
CONTROL METHOD OF STATIONARY HOISTING PLANT**

Offers a consistent decision-making procedure for the vector characteristics of the controlled stationary hoist, which is a generalization of Wald's procedure and provides a gain in the average volume of tests, similar to the usual "of Wald's" winning the case of two hypotheses. The proposed sequential procedure takes into account the additional information and thereby obtain additional gains in the amount of control a stationary hoist.

В даний час в Україні виникла ситуація, коли свердловинні штангові насосні установки (СШНУ) і шахтні піднімальні комплекси (ШПК) - стаціонарні піднімальні установки (СПУ) становлять значну частку в соціальному та економічному життю України. ШПК це єдина ланка з'єднання гірської виробки з поверхнею, а СШНУ охоплює понад 65% діючого фонду свердловин на Україні. Відмінною особливістю устаткування СШНУ і ШПК – СПУ, є безперервні технологічні процеси, що вимагають безперервного вимірювання аналогових параметрів, а також складність і вибухонебезпеку устаткування (для виконання проектних робіт вимагається узгодження з Держтехнаглядохоронпраці України), основним джерелом змущених коливань у СПУ є привід головного руху. Більша частина СПУ експлуатується понад нормативний термін, мають місце численні відмови і аварії, кількість яких постійно зростає. За підсумками 2005-2010 рр. загальні збитки від аварій тільки на вугільних шахтах України складали від 5 до 33 млн. грн. у рік, а втрати видобутку складали від 10 до 100 тис. т [1-2]. За розглянутий період жоден видів аварій не удалося ліквідувати і звести до нуля окрему причину травматизму, яка пов'язана з важкими травмами і навіть людськими жертвами [3]. 29 липня 2011 року на шахті "Суходольська-Східна" (ДП "Краснодонвугілля") при вибуху метану загинули 28 шахтарів; на шахті ім. Бажанова (ДП "Макіїввугілля") у результаті обвалення копра шахтного піднімального комплексу клітєвого стовбура загинули 11 шахтарів. Таки показники є типові для гірничодобувній і нафтовидобувній галузях України. Причина цих аварій у недосконалої існуючих приладів і методів контролю. Аналіз існуючих приладів і методів контролю свідчить про великий обсяг і в теж час неповноту існуючих методів контролю, що не пояснює істотну різницю в результатах контролю та не забезпечує безаварійну експлуатацію СПУ. Контроль СПУ мобільною системою контролю (МСК) досить дорогий захід. Тому актуальною є проблема скорочення необхідного об'єму вимірювань шляхом використання послідовної схеми спостережень та враховуючи додаткову інформацію і за рахунок цього теж отримати додатковий вигравш в обсязі