

УДК 662.210.587.621.572

DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.144.190>

СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХФАЗНЫМ ПОТОКОМ В КАНАЛАХ ЭЖЕКТОРА СТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

¹Шевелёва А.М., ²Тынына С.В.¹Институт технической механики НАН Украины и Государственного космического агентства Украины, ²Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

СПОСОБИ КЕРУВАННЯ ДВОФАЗОВИМ ПОТОКОМ В КАНАЛАХ ЕЖЕКТОРУ СТРУМИННОГО МЛИНА

¹Шевельова Г.М., ²Тинина С.В.¹Інститут технічної механіки НАН України та Державного космічного агентства України, ²Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

WAYS OF A TWO-PHASE FLOW CONTROL IN THE JET MILL EJECTOR CHANNELS

¹Shevelova H.M., ²Tynyna S.V.¹Institute of Technical Mechanics under the NAS of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, ²Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine

Аннотация. Эффективность управления газодисперсным потоком в каналах струйной мельницы влияет на качество протекания процесса измельчения.

В статье проанализированы способы управления двухфазными дисперсными потоками в каналах эжектора мельницы. Рассмотрены примеры схем управления за счёт подвода газа на выходе из разгонной трубки эжектора, а также за счёт геометрического воздействия посредством нескольких кольцевых щелей и угла их наклона. Показаны достоинства и недостатки каждой из конструкций. Выявлено, что наиболее эффективным способом управления является комбинированный, при котором совместно осуществляются газодинамические и геометрические воздействия на основной поток.

К геометрическим воздействиям относятся угол подвода дополнительного потока газа; соотношение площадей выходного сечения сопла эжектирующего газа и отверстий, через которые поступает дополнительный поток, а также форма, количество и место расположения отверстий. К газодинамическим – отношение давлений основного и дополнительного потока энергоносителя.

Исследованы характеристики эжектора с дополнительным подводом газа: отношение площадей критических сечений сопла вдува и основного сопла, приведенный расход вдуваемого газа, а также степень сжатия эжектора.

Проведён сравнительный анализ характеристик одноступенчатого эжектора и эжектора со вдувом в камеру смешения при одинаковом геометрическом параметре $f^* = 0,09$, где f^* – отношение площади выходного сечения сопла эжектирующего газа к площади входной части разгонной трубки.

Расчёты показали, что степень сжатия эжектора с дополнительным подводом газа больше степени сжатия одноступенчатого эжектора в 3,2 раза. Выявлено преимущество эжектора со вдувом в диапазоне значений коэффициента эжекции n от 0 до 0,1. Кроме того, в этом диапазоне эжектор со вдувом работает при меньших отношениях давлений.

Представлена принципиальная схема управления двухфазным потоком, которое осуществляется за счёт осевого подвода дополнительного энергоносителя в разгонную трубку эжектора. Наиболее эффективным управление будет, если расстояние между кольцевыми подводами составляет от двух до восьми диаметров разгонной трубки, а количество щелевых отверстий по длине трубки равно двум и больше.

Ключевые слова: управление двухфазным потоком, износ, эжектор струйной мельницы, дополнительный подвод энергоносителя, газодинамическое и геометрическое воздействия

1 Введение

Качество протекания процесса измельчения зависит от эффективности управления газодисперсным потоком в каналах струйной мельницы и от степени совершенства конструкции.

В зависимости от газодинамических параметров, а также от места приложения управляющего усилия, а именно: подачи дополнительного подвода газа –

возможно увеличить скорость основного потока на выходе из разгонной трубки эжектора, добиться более равномерного распределения частиц по основному потоку, а также создать защитный слой вокруг стенок трубки для предотвращения износа конструкции.

2 Анализ способов управления многофазными газодинамическими потоками

Существует три способа управления газодисперсным потоками: количественный, качественный и комбинированный.

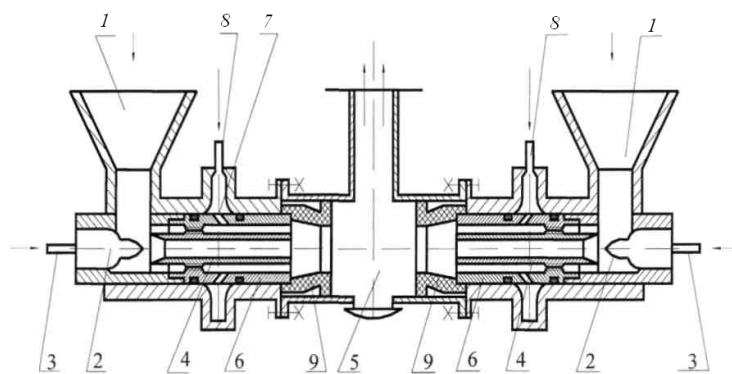
Наиболее простым способом управления является количественный.

Одним из случаев такого управления является дополнительный подвод газа на выходе из разгонной трубки эжектора, т.е. создание избыточного расхода газа во внешней части трубки. Это даёт возможность повысить скорость двухфазного потока на входе в помольную камеру и снизить её износ.

Одна из таких конструкций представлена на рис. 1 [1].

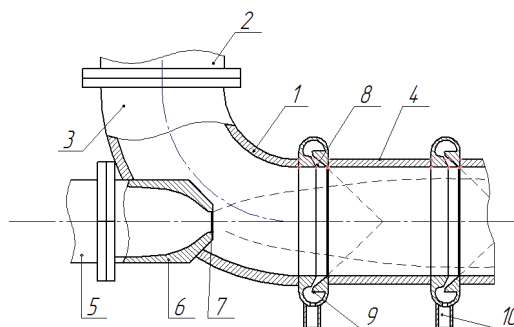
Дополнительный энергоноситель подаётся через воздухопровод 8 по каналу, который образуют внутренняя поверхность разгонных трубок 4 и внешняя поверхность подпорных патрубков 6. Устройство с дополнительным подводом ускоряет основной поток с материалом и создаёт повышенную концентрацию частиц. Это повышает удельную поверхность материала и снижает энергозатраты.

Данная конструкция позволяет достичь максимальных скоростей смешанного потока на выходе из разгонной трубки в пределах от 220 м/с до 260 м/с. Однако она не защищает разгонную трубку от воздействия твёрдой фазы, увеличивает металлоёмкость конструкции и имеет низкую степень управляемости.



1 – загрузочный бункер; 2 – сопла основного энергоносителя; 3 – воздухопровод основного энергоносителя; 4 – разгонная трубка; 5 – помольная камера; 6 – подпорные патрубки; 7 – сопла дополнительного энергоносителя; 8 – воздухопровод дополнительного энергоносителя; 9 – конусные насадки

Рисунок 1 – Противоточная струйная мельница с дополнительным подводом энергоносителя



1 – корпус мельницы; 2 – патрубок для ввода материала; 3 – смесительная камера; 4 – разгонная трубка; 5 – трубопровод энергоносителя; 6 – центральное сопло; 7 – выходное сечение сопла; 8 – периферийные сопла; 9 – распределительные коллекторы; 10 – штуцеры

Рисунок 2 – Эжектор струйной мельницы с наличием нескольких кольцевых подводов газа

Пример качественного управления потоками приведён на рис. 2, где представлен эжектор с управлением потоком за счёт геометрического воздействия посредством нескольких кольцевых щелей [2].

Особенность данной конструкции состоит в наличии периферийных сопел 8, которые образованы кольцевыми щелями и снабжены распределительными коллекторами 9.

Периферийные сопла выполнены в два ряда. Расстояние между ними – от двух до восьми диаметров разгонной трубки, угол раскрытия каждого из сопел равен $10^\circ - 24^\circ$.

Если расстояние между кольцевыми соплами будет менее двух диаметров (калибров) разгонной трубки, повысится расход основного и дополнительного потока. Если расстояние больше восьми калибров, пристеночный поток «размыкается» даже при небольших скоростях.

На рис. 3 изображён разрез части разгонной трубки с отверстиями, выполненными под наклоном [3].

Чтобы обеспечить поворот пристеночных струй потока энергоносителя из сопла в направлении дисперсного потока в трубе, углы наклона соплообразующих поверхностей выбраны согласно следующим соотношениям [3]

$$\delta_{01} = \delta + \Delta; \quad \delta = \alpha + \varphi_i - \frac{1}{2}\pi; \quad \alpha = \arcsin \frac{1}{M_i}; \quad M_i = \left(\frac{\frac{2}{k+1} \lambda_i^2}{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_i^2} \right)^{0,5};$$

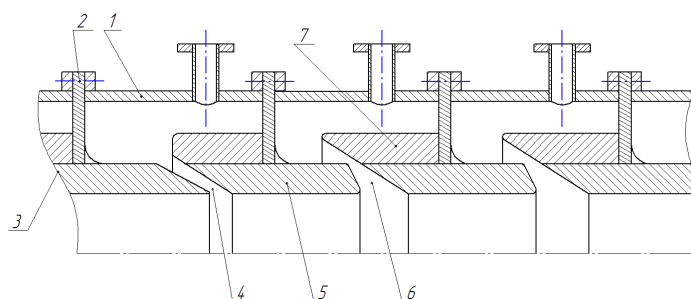
$$\lambda_i = \frac{w}{a'}; \quad \varphi_i = \sqrt{\frac{k+1}{k-2}} \arcsin \sqrt{\frac{k-1}{2} (\lambda_i^2 - 1)},$$

где δ_{01} – угол наклона образующей соплообразующей поверхности первого элемента секций к образующей стенки канала разгонной трубки; δ – оптимальный угол отклонения потока энергоносителя из сопла первого элемента секций оси разгонной трубки; Δ – изменяется от 7 до 10; φ_i – угол раскрытия стенки сопла; α – угол наклона характеристики распространения слабых возмущений; M_i – число Маха; λ_i – приведенная скорость; k – показатель адиабаты газа-энергоносителя; w – скорость потока газа-энергоносителя на выходе из сопла, м/с; a' – скорость звука в газе-энергоносителе в критическом сечении кольцевого сопла, м/с.

Максимальные значения углов определяются из выражений

$$\varphi_{\max} = \left(\sqrt{\frac{k+2}{k-1}} - 1 \right) \frac{\pi}{2};$$

$$\delta_{\max} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{k+2}{k-1}};$$



1 – корпус разгонной трубки; 2 – перегородки между форкамерами; 3, 5, 7 – подпорные патрубки; 4, 6 – сопла дополнительного подвода

Рисунок 3 – Разрез разгонной трубки с дополнительным подводом

при $k = 1,4$; $\delta_{\max} = 130^\circ 27'$;
 $\varphi_{\max} = 220^\circ 27'$.

Данная конструкция позволяет достичь такой организации взаимодействия дисперсного потока и потока энергоносителя из периферийных сопел, при которой уменьшаются составляющие векторов скоростей потоков, которые приводят к разрушению стенок разгонных трубок. При этом обеспечивается эффективное ускорение дисперсных потоков в трубках.

Наиболее эффективным управлением является комбинированный способ – с применением дополнительных потоков, при котором варьируют параметрами вдоль стенки разгонного канала или по внешнему контуру разгонного канала.

Организация управления потоком осуществляется за счёт геометрических и газодинамических воздействий.

К геометрическим относятся: угол подвода дополнительного потока газа – от 0° (тангенциальный подвод) до 90° (радиальный подвод); соотношение площадей выходного сечения эжектирующего сопла и отверстий, через которые поступает дополнительный поток, а также форма (рис. 4), количество и место расположения отверстий.

К газодинамическим – отношение давлений основного и дополнительного потока энергоносителя.

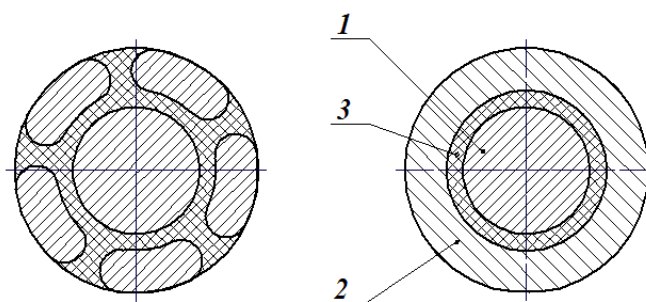
3 Исследование характеристик эжектора с дополнительным подводом массы газа

Анализ характеристик эжектора с дополнительным подводом массы газа производился по методике [4]. Схема эжектора и основные параметры изображены на рис. 5.

Число M_ϵ вдуваемой струи определяется из следующих соображений. Давление p' в сечении выравнивания f' постоянно поперёк камеры смешения.

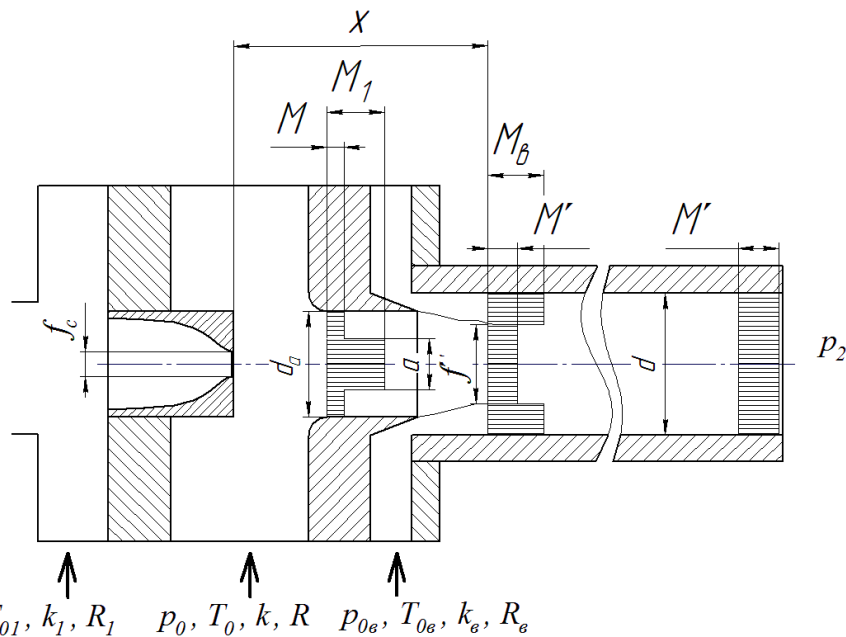
$$M_\epsilon^2 \cong \frac{2}{k_1 - 1} \left[\left(\frac{\Pi_\epsilon}{\frac{p'}{p_1}} \right)^{\frac{k_1 - 1}{k_1}} \left(1 + \frac{k_1 - 1}{2} M_1^2 \right) - 1 \right],$$

где Π_ϵ – отношение полных давлений вдуваемого (дополнительного) и основного потоков; p' – давление в сечении выравнивания f' , МПа; M_1 – число Маха эжектирующего газа во входной части разгонной трубки; p_1 – статическое давление на входе в первую камеру смешения, МПа.



а – дискретный подвод б – целевой подвод
 1 – эжектирующий поток; 2 – эжектируемый поток; 3 – область смешения

Рисунок 4 – Различные формы отверстий для подвода дополнительного потока газа



p_{01} – полное давление основного потока, МПа; T_{01} – температура торможения основного потока, К; k_1 – показатель адиабаты основного потока; R_1 – удельная газовая постоянная основного потока; $p_{0\theta}$ – полное давление дополнительного потока, МПа; $T_{0\theta}$ – температура торможения дополнительного потока, К; k_θ – показатель адиабаты дополнительного потока; R_θ – удельная газовая постоянная дополнительного потока; p_0 – полное давление эжектируемого потока, МПа; T_0 – температура торможения эжектируемого потока, К; k – показатель адиабаты эжектируемого потока; R – удельная газовая постоянная эжектируемого потока; f_c – площадь выходного сечения основного сопла, м²; d_a – площадь входной части разгонной трубки, м²; a – отношение площади струи основного потока к площади поперечного сечения начального участка разгонной трубки; f' – относительная площадь; M – число Маха эжектируемого газа на входе в разгонную трубку; M_1 – число Маха эжектирующего газа во входной части разгонной трубки; M_θ – число Маха дополнительного потока газа; M' – число Маха смешанного потока в сечении f' ; x – длина от выходного сечения сопла эжектирующего потока до среза сопел вдува, м; p_2 – давление среды, в которую истекает смесь, МПа

Рисунок 5 – Схема эжектора с дополнительным подводом потока газа

Отношение площадей критических сечений сопла вдува и основного сопла

$$S^* = \frac{(d - f')M_\theta}{f^*} \left(\frac{\frac{k_1 + 1}{2}}{1 + \frac{k_1 - 1}{2} M_\theta^2} \right)^{\frac{k_1 + 1}{2(k_1 - 1)}},$$

где f^* – отношение площади выходного сечения сопла эжектирующего газа к площади входной части разгонной трубки.

Приведённый расход вдуваемого газа

$$\Pi_\theta S^* = \frac{M_\theta}{M'} \left(\frac{1 + \frac{k - 1}{2} M_\theta^2}{1 + \frac{k - 1}{2} M'^2} \right)^{0.5} \left(\frac{d}{f'} - 1 \right).$$

Степень сжатия с учётом повышения давления в камере смешения до участка со вдувом

$$\varepsilon_{(1)} = \frac{p_2}{p_0} = \frac{p'}{p_1} \left[\frac{2k_1}{k_1+1} \left(fM'^2 + (d-f') \frac{k_6}{k_1} M_6^2 \right) - \frac{k_1-1}{k_1+1} \right] \frac{\left(1 + \varphi \frac{k_1-1}{2} M'^2 \right)^{\frac{k_1}{k_1-1}}}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}}.$$

Важным параметром в эжекторах является отношение давлений $\Pi = p_{01}/p_2$. При определенной величине противодавления течение в эжекторе перестраивается, снижается степень сжатия, а также при определенных условиях и коэффициент эжекции. Для любого эжектора справедливо равенство

$$\frac{p_{01}}{p_0} = \frac{p_{01}}{p_2} \frac{p_2}{p_0} = \varepsilon \Pi,$$

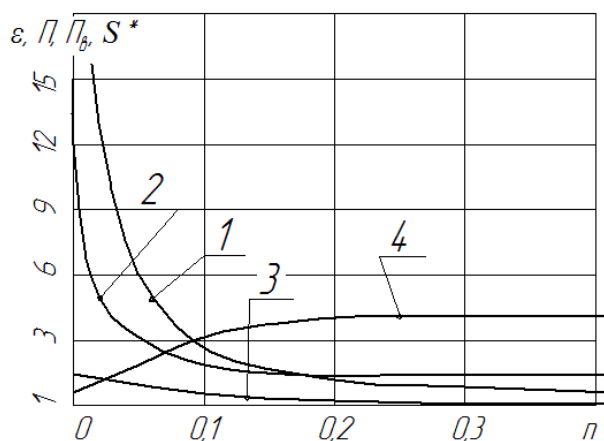
из которого и определяется отношение давлений Π при подсчитанной степени сжатия ε . При определении коэффициента эжекции следует учитывать расход газа на организацию вдува

$$n = \left(\frac{1}{a} - 1 \right) \frac{M}{M_1} \left(\frac{1 + \frac{k-1}{2} M^2}{1 + \frac{k_1-1}{2} M_1^2} \right)^{0,5} \sqrt{\frac{kR_1T_{01}}{k_1RT_0}} \frac{1}{1 + \Pi_6 S^*}. \quad (1)$$

При $\Pi_6 S^* = 0$ уравнение (1) определяет коэффициент эжекции обычного одноступенчатого эжектора.

Вычисления проводились при следующих условиях: эжектирующий и эжектируемый потоки – воздух с одинаковой температурой и давлением $p_{01} = 0,5$ МПа; $x = 0,1$ м; $D = 0,02$ м; $d = 0,024$; $\varphi = 0,6$; $\sigma_c = 0,95$; пограничный слой везде турбулентный.

На рис. 6 представлено сравнение характеристик одноступенчатого эжектора и эжектора со вдувом в камеру смешения при одинаковом геометрическом параметре $f^* = 0,09$. При $n = 0$ оба эжектора работают в режиме запирання. Согласно расчётам степень сжатия эжектора со вдувом больше степени сжатия одноступенчатого эжектора в 3,2 раза. При снижении отношения давлений p_{01}/p_0 и повышении коэффициента эжекции относительный расход вдува снижается, а минимальное рабочее отношение давлений Π для эжектора со вдувом увеличивается. Одноступенча-



ε – степень сжатия; Π – соотношение давлений;
 $\Pi_6 S^*$ – относительный расход вдува;
 1 – степень сжатия эжектора со вдувом; 2 – степень сжатия одноступенчатого эжектора; 3 – относительный расход вдува $\Pi_6 S^*$; 4 – соотношение давлений Π

Рисунок 6 – Сравнение характеристик одноступенчатого эжектора и эжектора с дополнительным подводом газа

тый эжектор по мере увеличения коэффициента эжекции допускает небольшое снижение отношения Π . Однако в диапазоне n от 0 до 0,1 проявляются преимущества эжектора со вдувом. Кроме того, в этом диапазоне эжектор со вдувом работает при меньших отношениях давлений.

4 Принципиальная схема управления

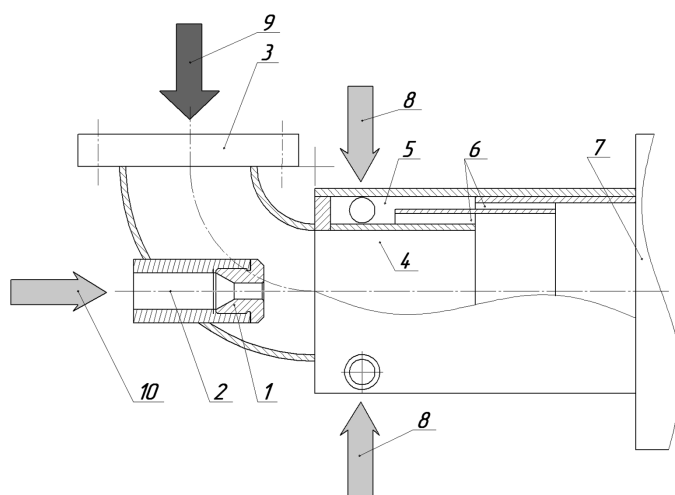
В результате теоретического анализа характеристик эжектора, а также предварительных экспериментальных исследований на модели эжекторного узла с дополнительным подводом газового потока, разработанной в ИТМ НАНУ и ГКАУ, выявлено [5-7]:

- в рассматриваемом диапазоне значений наибольшее влияние оказывает угол подвода дополнительного потока. С уменьшением угла возрастает длина воздействия на основной поток, однако уменьшается ширина защитной струи;
- наибольшее влияние на основной поток дополнительный оказывает при отношении площадей выходного сечения сопла эжектирующего газа и щелевых отверстий $f_{щ}/f_c = 2,13$;
- давление дополнительного потока должно составлять около 0,5 давления основного потока;
- при наличии нескольких подводов в виде кольцевых щелей расстояние между кольцевыми соплами должно составлять от двух до восьми диаметров разгонной трубки. При расстоянии между кольцевыми соплами мене двух диаметров трубки возникает не требуемое повышение расхода как основного, так и дополнительного потока. При расстоянии больше восьми возникает размыкание пристеночного потока даже при небольших скоростях.

Принципиальная схема управления газовым потоком с учётом допущений будет выглядеть следующим образом (рис. 7).

Выбранные схемы управления [6] будут наиболее эффективными при следующих условиях:

- при заданном диапазоне давлений более эффективной будет схема с осевым подводом газа;
- для достижения наибольшей эффективности управления газодисперсным потоком необходимо увеличить количество щелевых отверстий по длине трубки как минимум до двух;



1 – критическое сечение сопла; 2 – сопло эжектирующего газа; 3 – бункер подачи твердого материала; 4 – разгонная трубка; 5 – кольцевое сопло подачи дополнительного потока газа; 6 – щелевые зазоры; 7 – помольная камера; 8 – дополнительный поток газа; 9 – эжектируемый поток; 10 – эжектирующий поток

Рисунок 7 – Принципиальная схема эжекторного узла с осевым вдувом дополнительного энергосителя

- расстояние между кольцевыми подводами должно составлять от двух до восьми диаметров разгонной трубки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Противоточная струйная мельница: пат. 2188077 RU. № 200011162669u; заявл. 16.11.2000; опубл. 27.08.2002, Бюл. № 24. 6 с.
2. Эжектор струйной мельницы: а.с. № 1607949 SU. № 4618012; заявл. 12.12.1988; опубл. 23.11.1990, Бюл. № 43. 2 с.
3. Эжектор струменевое млина: пат. 100638 UA. № а201114119; заявл. 29.11.2011; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1. 10 с.
4. Шушин Н.А. Газовый эжектор с тангенциальным вдувом в камеру смешения. *Ученые записки ЦАГИ. Жуковский*. 2010. Т. XLI. № 3. С. 69-81.
5. Шевелёва А.М. Методы повышения качества готового продукта при струйном измельчении. *Збагачення корисних копалин*. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. № 69 (110). С. 86-94.
6. Шевелёва А.М. Усовершенствование экспериментальной модели эжекторного узла струйной мельницы. *Молодые ученые 2018 – от теории к практике: материалы IX-ой международной конференции* (Днепр, 16 февраля 2018 г.). Днепр: Национальная металлургическая академия Украины, 2018. С. 89-90.
7. Шевелёва А.М., Тынына С.В. Линейная регрессионная модель влияния дополнительного подвода газа в камеру эжектора струйной мельницы. *Збагачення корисних копалин*. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2016. Вип. 64 (105). С. 78-86.

REFERENCES

1. Uvarov, V., Bogdanov, B., Bulgakov, S., Karpachev, D., Belgorodskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet im. V. G. Shuhova (2002), *Protivotochnaja strujnaja melnica* [Counter Flow Jet Mill], Federal Service for Intellectual Property (Rospatent), Moscow, RU, Pat. 2188077.
2. Tretjakov, A., Belov, A., Zavadskij, G., Gumarov, R., Razumov, S., Belonogov, L., Barkovec, A. Gosudarstvennyj vsesojuznyj nauchno-issledovatel'skij institut cementnoj promyshlennosti (1990), *Jezhektor strujnoj melnicy* [Jet Mill Ejector], USSR State Committee on Inventions and Discoveries, SU, A.s. 1607949.
3. Grabovskij, G., Grygoru, V., Kyrpach, M., Nedbayev, M. Kyivskij nacionalnyj universytet im. T. Shevchenka (2013), *Ezhektor strumenevogo mlina* [Jet Mill Ejector], State Register of Patents of Ukraine, Kyiv, UA, Pat. 100638.
4. Shushin, N.A. (2010), "Gas ejector with tangential injection into the mixing chamber", *Uchenye zapiski CAGI*, no. 3, pp. 69-81.
5. Shevelova, H.M. (2018), "Methods of improving of the finished product quality at the jet milling", *Zbagachennja korysnyh kopalyn*, no. 69 (110), pp. 86-94.
6. Sheveleva, A.M. (2018), "Improvement of an experimental model of a jet mill ejector unit", *Molodye uchenye 2018 – ot teorii k praktike: Materialy IX-oy mezhdunarodnoj konferencii* [Young scientists 2018 - from theory to practice: Proceedings of the IXth International Conference], Dnipro, UA, February, pp. 89-90.
7. Shevelova, H.M. and Tynyna, S.V. (2016), "Linear regression model of the additional gas supply effect in the chamber of the jet mill ejector", *Zbagachennja korysnyh kopalyn*, no. 64 (105), pp. 78-86.

Об авторов

Шевелёва Анна Михайловна, магистр, младший научный сотрудник, Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ИТМ НАНУ и ГКАУ), Днепр, Украина, belgorod98@i.ua.

Тынына Сергей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, haritonroots@gmail.com.

About the authors

Shevelova Hanna Myhajlivna, Master of Science, Junior Researcher in the Institute of Technical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine (ITM, NASU & SSAU), Dnipro, Ukraine, belgorod98@i.ua.

Tynyna Sergii Volodymyrovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, haritonroots@gmail.com.

Анотація. Ефективність управління газодисперсним потоком в каналах струминного млина впливає на якість протікання процесу подрібнення.

У статті проаналізовано способи управління двофазними дисперсними потоками в каналах ежектора млина. Розглянуто приклади схем управління за рахунок підведення газу на виході з розгінної трубки ежектора, а також за рахунок геометричного впливу за допомогою декількох кільцевих щілин і кута їх нахилу. Показано переваги і недоліки кожної з конструкцій. Виявлено, що найбільш ефективним способом управління є комбінований, при якому спільно здійснюються газодинамічні і геометричні впливи на основний потік.

До геометричних впливів належать кут підведення додаткового потоку газу; співвідношення площ вихідного перетину сопла ежектуючого газу і отворів, через які надходить додатковий потік, а також форма, кількість і місце розташування отворів. До газодинамічних – відношення тисків основного і додаткового потоку енергоносія.

Досліджено характеристики ежектора з додатковим підведенням газу: відношення площ критичних перерізів сопла вдуву й основного сопла, приведена витрата газу, який вдувається, а також ступінь стиснення ежектора.

Проведено порівняльний аналіз характеристик одноступінчастого ежектора і ежектора із вдувом в камеру змішання при однаковому геометричному параметрі $f^* = 0,09$, де f^* – відношення площі вихідного перетину сопла ежектуєного газу до площі вхідної частини розгінної трубки.

Розрахунки показали, що ступінь стиснення ежектора з додатковим підведенням газу більше ступеня стиснення одноступінчастого ежектора в 3,2 рази. Виявлено перевагу ежектора із вдувом в діапазоні значень коефіцієнта ежекції n від 0 до 0,1. Крім того, в цьому діапазоні ежектор із вдувом працює при менших відношеннях тисків.

Представлена принципова схема управління двофазним потоком, яке здійснюється за рахунок осьового підведення додаткового енергоносія в розгінну трубку ежектора. Найбільш ефективним управління буде, якщо відстань між кільцевими підводами становить від двох до восьми діаметрів розгінної трубки, а кількість щілинних отворів по довжині трубки дорівнює двом і більше.

Ключові слова: управління двофазним потоком, знос, ежектор струминного млина, додаткове підведення енергоносія, газодинамічний та геометричний вплив

Abstract. The efficiency of gas-dispersed flow controlling in the jet mill channels affects the quality of the grinding process.

In the article the methods of the two-phase dispersed flows controlling in the mill ejector channels have been analyzed. The examples of control schemes have been considered due to the gas supply at the exit from the ejector accelerating tube and due to the geometrical influence by means of several annular slots and the angle of their inclination. The advantages and disadvantages of each of the designs have been showed. Have been revealed that the most effective control method is the combined one, in which gas-dynamic and geometric effects on the main flow are carried out together.

Geometric effects include the angle of the additional flow of gas; the ratio of the areas of the output section of the ejecting gas nozzle and the holes through which additional flow enters, and the shape, number and location of the holes. Gas-dynamic effects include the pressure ratio of the main and additional energy flow.

The characteristics of the ejector with an additional gas supply have been investigated. They include the ratio of the critical sections areas of the blowing nozzle and the main nozzle, the reduced flow rate of the blown gas, and the degree of compression of the ejector.

A comparative analysis of the characteristics of a single-stage ejector and an ejector with injection into the mixing chamber with the same geometrical parameter $f^* = 0.09$, where f^* is the ratio of the area of the ejector gas nozzle output section to the area of the inlet tube have been carried out.

The calculations showed that the compression ratio of the ejector with an additional gas supply is 3.2 times more than the compression ratio of a single-stage ejector. The advantage of the blower ejector is revealed in the range of values of the ejection coefficient n from 0 to 0.1. In addition, in this range, the blower ejector operates at lower pressure ratios.

A schematic diagram of two-phase flow control has been presented, which is carried out due to the axial supply of additional energy carrier to the accelerating tube of the ejector. The most effective control will be if the distance between the annular leads is from two to eight diameters of the acceleration tube, and the number of slit holes along the tube length is two or more.

Keywords: two-phase flow control, wear, jet mill ejector, additional supply of energy carrier, gas-dynamic and geometric effects

Статья поступила в редакцию 05.02.2019

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко