

УДК 622.73

**А.М. ШЕВЕЛЕВА**

(Украина, Днепр, Институт технической механики НАНУ и ГКАУ),

**С.В. ТЫНЫНА**, канд. техн. наук

(Украина, Днепр, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины)

## **ЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПОДВОДА ГАЗА В КАМЕРЕ ЭЖЕКТОРА СТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЫ**

*Введение.* Основные мероприятия по усовершенствованию существующего и созданию нового оборудования для измельчения направлены на повышение качества готового продукта, одной из важнейших характеристик которого является отсутствие посторонних примесей в результате износа элементов конструкции.

Одним из наиболее перспективных методов борьбы с износом является создание защитного потока в каналах мельницы, в частности создание дополнительного подвода массы через отверстия в разгонной трубке эжектора.

Чтобы обеспечить максимально надежную защиту стенок эжектора от воздействия частиц твердой фазы, потсупающей в канал, необходимо установить геометрические и газодинамические параметры устройства, при которых влияние дополнительного потока газа окажется наиболее эффективным.

*Целью данной работы* является установление характера воздействия геометрических и газодинамических параметров эжекторного устройства струйной мельницы с дополнительным подводом газа в разгонную трубку на эффективность защиты стенок при протекании внутрекамерных процессов.

### *Материалы исследования*

Исследования газодинамических процессов в эжекторе струйной мельницы проводились на лабораторной модели, разработанной и изготовленной в ИТМ НАНУ и ГКАУ [1]. Модель разработана на основе классической схемы эжектора и содержит канал подвода дополнительного потока газа, который поступает в разгонную трубку через щелевое отверстие в стенке (рис. 1).

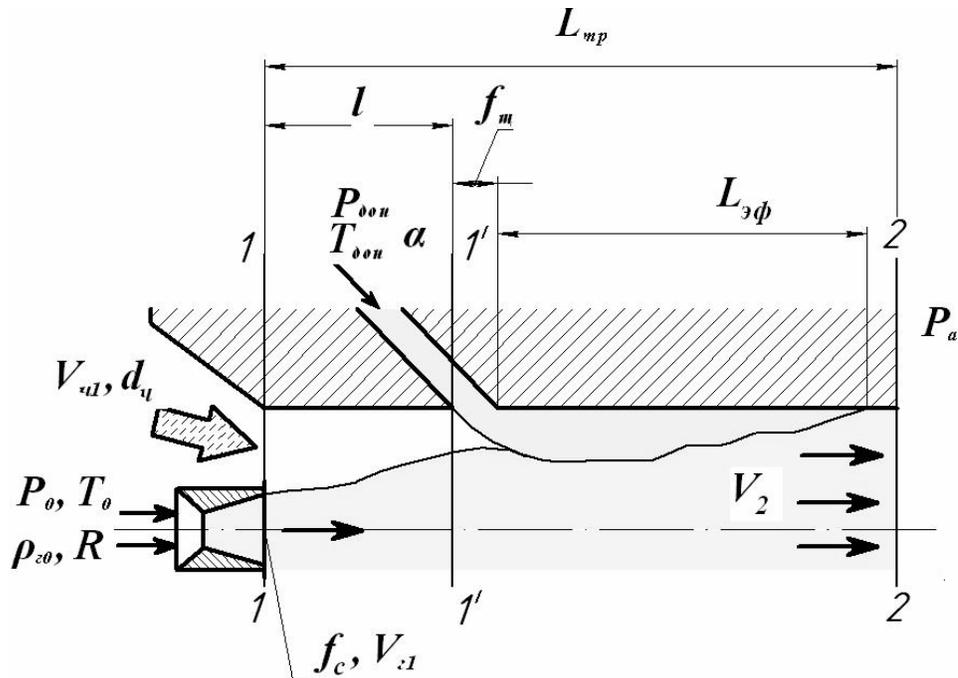


Рис. 1. Принципиальная схема эжектора струйной мельницы с дополнительным подводом массы:

1-1 – выходное сечение сопла эжектирующего газа, входное сечение разгонной трубки;

1'-1' – сечение, в котором установлено щелевое отверстие подвода дополнительного потока газа; 2-2 – выходное сечение камеры смешения.

$V_{c1}$  – скорость эжектирующего газа на выходе из сопла, м/с;

$V_{u1}$  – скорость движения твердой фазы на выходе из сопла, м/с;

$P_0$  – давление основного потока газа на входе в сопло, МПа;

$T_0$  – температура эжектирующего газа на входе в сопло, К;

$\rho_{z0}$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $d_u$  – диаметр твердых частиц, м;

$f_c$  – площадь выходного сечения сопла эжектирующего газа, м<sup>2</sup>;

$L_{тр}$  – длина разгонной трубки, м;  $P_{доп}$  – давление дополнительного потока газа, МПа;

$T_{доп}$  – температура защитного потока газа, К;  $l$  – расстояние от выходного сечения разгонной трубки до щелевого отверстия, м;  $f_{щ}$  – площадь сечения щелевого отверстия, м<sup>2</sup>;

$\alpha$  – угол подвода дополнительного потока газа;  $L_{эф}$  – эффективная длина воздействия дополнительного потока на основной, мм

В ходе экспериментальных исследований на данной модели получены зависимости эффективной длины воздействия дополнительного потока на основной (расстояния от выходного сечения щелевого отверстия до места оседания твердых частиц на стенке)  $L_{эф}$  от ряда изменяемых факторов: отношения давления основного потока к атмосферному давлению  $P_0/P_a$ ; отношения давления дополнительного потока к атмосферному давлению  $P_{доп}/P_a$ ; отношения площади сечения щелевого отверстия к площади выходного сечения сопла эжектирующего газа  $f_{щ}/f_c$ , угла подвода дополнительного потока энергоносителя относительно оси основного потока  $\alpha$ . Структурно схему эксперимента можно представить в виде "черного ящика" (рис. 2) [2].

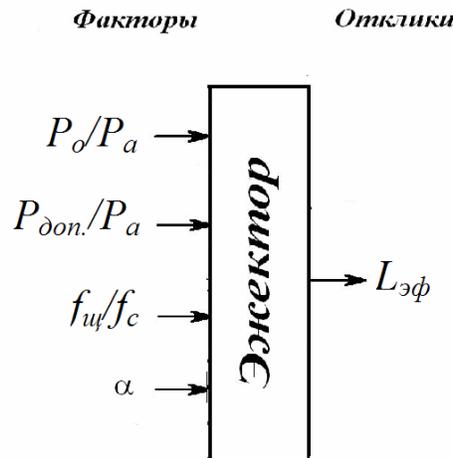


Рис. 2. Структурная схема параметров, варьируемых при эксперименте:  
 $P_o$  – давление основного потока, Мпа;  $P_a$  – атмосферное давление, Мпа;  
 $P_{доп.}$  – давление дополнительного потока газа, Мпа;  
 $f_{щ}$  – площадь сечения щелевого отверстия в стенке разгонной трубки эжектора, м<sup>2</sup>;  
 $f_c$  – площадь выходного сечения сопла эжектирующего газа, м<sup>2</sup>;  
 $\alpha$  – угол подвода дополнительного потока энергоносителя относительно оси основного потока

Диапазон варьирования исследуемых факторов (параметров) представлен в таблице.

Исследуемые факторы и уровни варьирования				
Исследуемые факторы	Обозначение	Уровень варьирования		
		-1	0	+1
$P_o/P_a$	$X_1$	0,3	0,35	0,4
$P_{доп.}/P_a$	$X_2$	0,15	0,2	0,25
$f_{щ}/f_c$	$X_3$	1,07	1,6	2,13
$\alpha$	$X_4$	30	60	90

В качестве основного рабочего плана был выбран план полного многофакторного эксперимента с двухуровневым варьированием параметров. В качестве дополнительных – однофакторные планы со стабилизацией.

В соответствии с принятым планом было проведено 33 опыта полного факторного эксперимента, каждый из которых повторялся два раза в случайном порядке.

*Анализ результатов.* В результате экспериментальных исследований получены графические изображения влияния переменных  $X_1, X_2, X_3, X_4$  на функцию отклика  $L_{эф.}$  при различных состояниях системы (рис. 3-4).

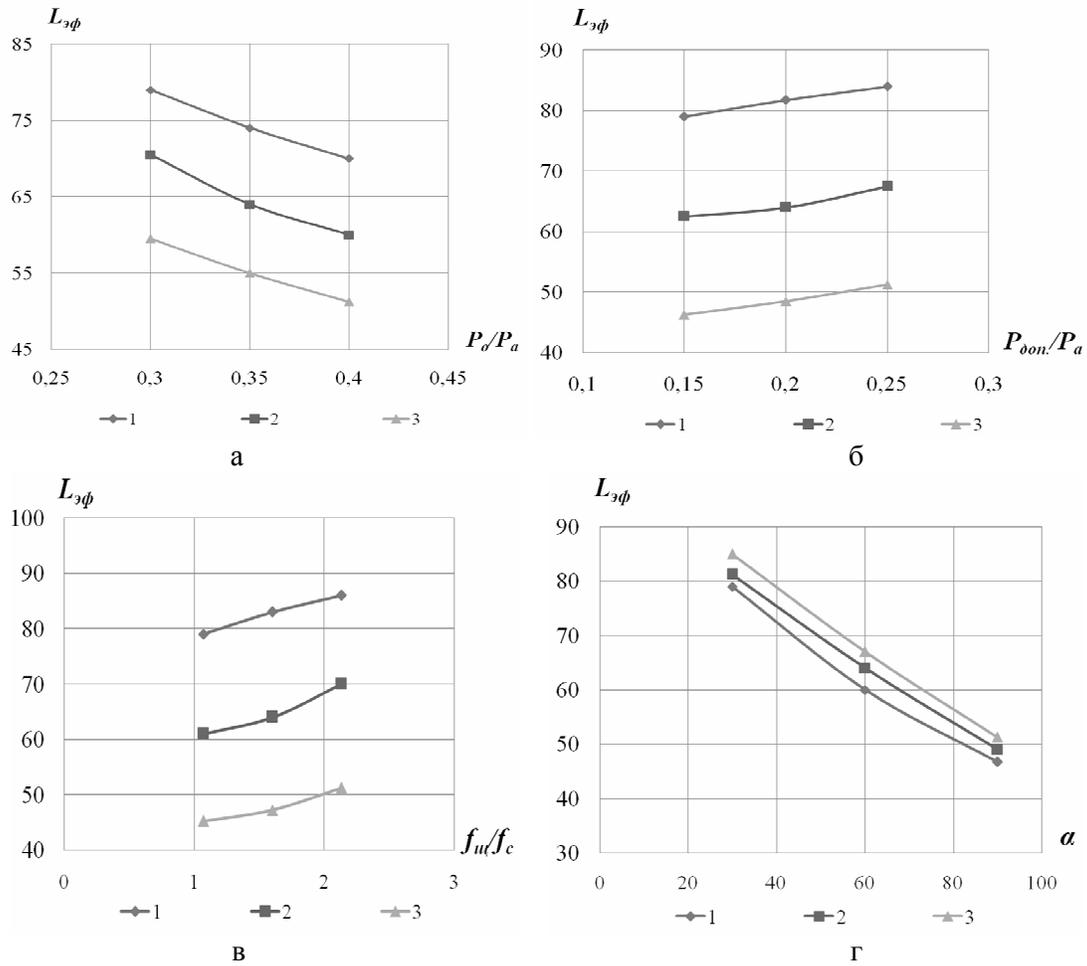


Рис. 3. График влияния на эффективную длину  $L_{эф}$ :

а)  $P_0/P_a$ ; б)  $P_{дон}/P_a$ ; в)  $f_u/f_c$ ; г)  $\alpha$ .

1 – при минимальных значениях параметров ("-1");

2 – при средних значениях ("0");

3 – при максимальных значениях ("1")

При обработке результатов эксперимента получена математическая модель, которая является уравнением регрессии:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i,j=1}^n a_{ij} x_i x_j,$$

где  $y$  – исследуемые параметры;  $a_0$  – свободный член уравнения;  $a_i$ ,  $a_{ij}$ , – коэффициенты при линейных параметрах и парном взаимодействии факторов соответственно;  $x_i$ ,  $x_j$  – уровни варьирования факторов.

Коэффициенты данной зависимости определялись методом наименьших квадратов с помощью программного комплекса "Эксперимент" [3].

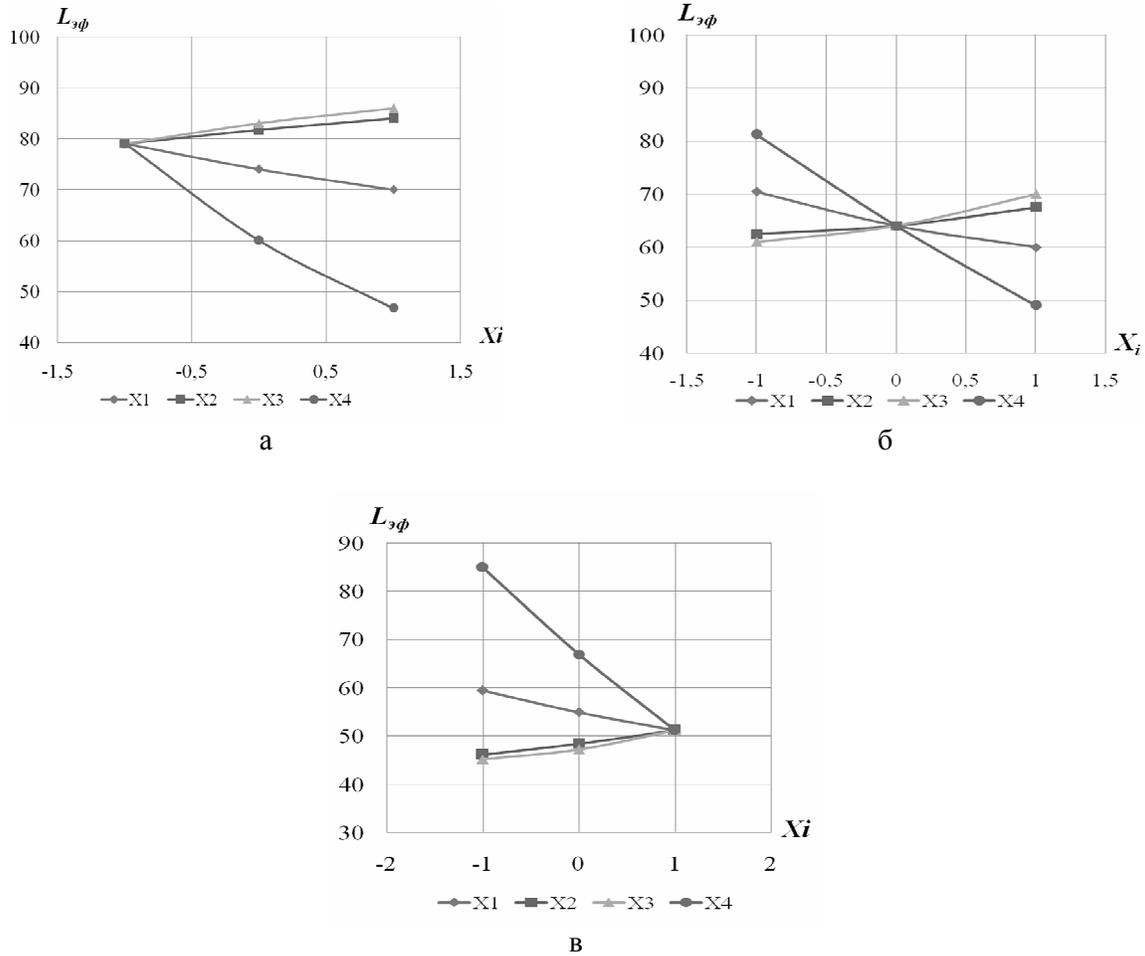


Рис. 4. График определения эффективной длины  $L_{эф}$  при изменении  $X_i$  для:  
 а) минимальных значений параметров ("-1");  
 б) средних значений ("0");  
 в) максимальных значений ("1")

Оценка значимости каждого из коэффициентов производится по критерию Стьюдента [4], незначимые коэффициенты исключаются из уравнения регрессии без существенного влияния на результат. Адекватность полученного уравнения проверяется с помощью критерия Фишера [4], а проверка однородности оценок проводится по критерию Кохрена [4].

В результате обработки экспериментальных данных получена регрессионная математическая модель для эффективной длины защиты стенок разгонного канала от износа дополнительным потоком энергоносителя:

$$L_{эф.} = 64,28 - 5,406 X_1 + 2,75X_2 + 3,75 X_3 - 14,09X_4 - 0,75X_1X_2X_4 - X_1X_3X_4. \quad (1)$$

Коэффициенты  $a_{12}$ ,  $a_{13}$ ,  $a_{23}$ ,  $a_{34}$ ,  $a_{123}$ ,  $a_{124}$ ,  $a_{234}$ ,  $a_{1234}$ , стоящие при слагаемых  $X_{12}$ ,  $X_{13}$ ,  $X_{23}$ ,  $X_{34}$ ,  $X_{123}$ ,  $X_{124}$ ,  $X_{234}$  и  $X_{1234}$  соответственно, не прошли проверку на

## **Підготовчі процеси збагачення**

значимість по критерию Стьюдента, поэтому они отсутствуют в уравнении регрессии. Расчетное значение по критерию Фишера (0,491) меньше табличного значения (2,49), что подтверждает адекватность полученной модели. А поскольку расчетное значение критерия Кохрена, равное 0,127, меньше табличного (0,4546) при заданном уровне значимости 0,05, то воспроизводимость опытов по критерию Кохрена не нарушалась в ходе реализации экспериментов.

При исследовании повышения качества струйного измельчения за счет создания защитного потока газа в эжекторе мельницы целесообразно представить полученные уравнения в натуральной форме. Переход к физическим переменным в уравнении регрессии осуществляется следующим образом:

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i},$$

где  $X_i$  – кодированное значение исследуемого фактора;  $x_i$  – натуральное (текущее) значение фактора;  $x_{i0}$  – натуральное значение нулевого фактора;  $\Delta x_i$  – интервал варьирования  $i$ -го параметра.

Таким образом, кодированные факторы  $X_1, X_2, X_3$  примут вид

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = \frac{\frac{P_o}{P_a} - 0,35}{0,05} \\ X_2 = \frac{\frac{P_{\text{дон}}}{P_a} - 0,2}{0,05} \\ X_3 = \frac{\frac{f_{\text{щ}}}{f_c} - 1,6}{0,53} \\ X_4 = \frac{\alpha - 60}{30} \end{array} \right. \quad (2)$$

После подстановки выражений (2) в уравнение (1) математическая модель примет вид:

$$\begin{aligned} L_{\text{эф.}} = & 262,26 - 0,2703 \frac{P_o}{P_a} + 0,1375 \frac{P_{\text{дон}}}{P_a} + 1,9875 \frac{f_{\text{щ}}}{f_c} - 42,27\alpha - \\ & - 0,5625 \frac{P_o}{P_a} \frac{P_{\text{дон}}}{P_a} \alpha - 0,795 \frac{P_o}{P_a} \frac{f_{\text{щ}}}{f_c} \alpha. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой зависимость эффективной длины воздействия дополнительного подвода массы газа (длины участка от выходного сечения щелевого отверстия до места оседания твердых частиц на стенки разгонной трубки) от давления эжектирующего потока на входе в сопло, давления дополнительного потока газа, отношения площади щелевого отверстия к площади выходного сечения сопла высоконапорного газа, а также угла подвода дополнительного потока газа. Положительный знак в уравнении указывает на прямо пропорциональное влияние фактора на функцию отклика, соответственно отрицательный – на обратно пропорциональное влияние.

Из уравнения (3) следует, что основное воздействие на эффективную длину  $L_{эф}$  оказывает угол подвода дополнительного потока газа. С уменьшением угла от 90 до 30 градусов возрастает расстояние от выходного сечения щелевого отверстия до места оседания твердых частиц на стенки разгонной трубки соответственно от 46,75 до 79 мм.

Следующим по значимости является давление эжектирующего потока. Уменьшение отношения давления основного потока к атмосферному давлению от 0,4 до 0,3 приводит к увеличению эффективной длины воздействия дополнительного подвода газа от 70 до 79 мм.

Существенное влияние на воздействие дополнительного потока энергоносителя оказывает также отношение площади щелевого отверстия к площади выходного сечения сопла высоконапорного газа. С ростом  $\frac{f_u}{f_c}$  в диапазоне от 1,07 до 2,13 эффективная длина возрастает от 79 до 86 мм.

Наименьшее влияние из четырех исследуемых факторов оказывает давление дополнительного потока газа, подаваемого в разгонную трубку через щелевые отверстия в стенке канала. С увеличением отношения давления дополнительного потока энергоносителя к атмосферному в диапазоне от 0,15 до 0,25 происходит увеличение эффективной длины от 79 до 84 мм.

Двойные взаимодействия, а также совместное воздействие всех варьируемых факторов не оказывает существенного влияния на изменение функции отклика.

Угол подвода дополнительного потока газа влияет на эффективную длину практически в 2,6 раза сильнее, чем отношение давления эжектирующего газа к атмосферному, почти в 3,8 раз сильнее, чем отношение площади щелевых отверстий к площади выходного сечения сопла эжектирующего газа, и в 5 раз больше, чем отношение давления подвода дополнительного потока энергоносителя к атмосферному давлению.

Наибольшая эффективная длина воздействия дополнительного потока в заданных диапазонах значений достигается при  $P_o/P_a = 0,3$ ;  $P_{дон}/P_a = 0,25$ ;  $f_u/f_c = 2,13$ ,  $\alpha = 90^\circ$ .

*Выводы.* Построенная на основе регрессионного анализа полученных экспериментальных данных математическая модель устанавливает взаимосвязь

## **Підготовчі процеси збагачення**

между геометрическими и газодинамическими параметрами эжектора струйной мельницы и характером течения внутри разгонной трубки.

Выявлено, что основными факторами, влияющими на эффективность воздействия дополнительного потока газа на основной, является угол подвода дополнительного потока газа и отношение площади щелевого отверстия к площади выходного сечения сопла высоконапорного газа. При этом угол подвода дополнительного потока является определяющим по сравнению с другими факторами.

Полученная модель может быть использована при разработке эжекторного узла струйной мельницы, оснащенного каналом подвода дополнительной массы газа для защиты стенок устройства от износа.

### **Список литературы**

1. Шевелева А.М., Грушко В.А. Экспериментальные исследования двухфазных течений в разгонных трубках струйных мельниц // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2014. – Вип. 57(98). – С. 95-100.
2. Егоров А.Е., Азаров Г.Н., Коваль А.В. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента / Под ред. В.Г. Воронова. – Х.: Вища школа, 1986. – 240 с.
3. Попов А.И., Тынына С.В. Применение ПЭВМ при обработке результатов экспериментальных исследований // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: ХАИ, 2007. – № 4(40). – С.93-96.
4. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Под ред. Н.П. Бусленко. Пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 384 с.

© Шевелева А.М., Тынына С.В., 2016

*Надійшла до редколегії 12.08.2016 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горобець*