

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ЭЖЕКТОРНОЙ СТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Бараковских Д. С., Шишкин С. Ф.

Бараковских Дмитрий Сергеевич, Шишкин Сергей Федорович  
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Россия. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 28, ИНМТ, X-200.  
E-mail: d.s.barakovskikh@urfu.ru, shsf@planet-a.ru

Рассмотрена проблема интенсификации процесса измельчения в эжекторных струйных мельницах. Приводятся результаты экспериментальных исследований эжектора и процесса помола материалов в данных мельницах с ударом в преграду. Показано, что плотность двухфазного потока определяется давлением в начальном сечении разгонной трубки. Для повышения плотности двухфазного потока предложена струйная мельница с подводом внешнего давления. Проведенные сравнительные испытания эжекторной струйной мельницы и эжекторной мельницы с подводом внешнего давления показали, что увеличение плотности двухфазного потока позволяет одновременно увеличить степень измельчения и расходную концентрацию материала при одинаковом расходе сжатого воздуха в разгонной трубке. Таким образом, повышается производительность и снижаются удельные затраты энергии при помоле материалов в эжекторных струйных мельницах.

**Ключевые слова:** струйная мельница, эжектор, удар в преграду, степень измельчения, плотность двухфазного потока, разгонная трубка.

## EFFICIENCY IMPROVING OF GRINDING IN AN EJECTOR JET MILL

Barakovskikh D. S., Shishkin S. F.

Barakovskikh Dmitriy Sergeevich, Shishkin Sergej Fedorovich  
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.  
Russia. 620002, Yekaterinburg, 28 Mira Street, INMT, X-200.  
E-mail: d.s.barakovskikh@urfu.ru, shsf@planet-a.ru

The problem of intensification of the grinding process in ejector jet mills is considered. The results of experimental studies of the ejector and the materials grinding process in these mills with a blow to the barrier are presented. It is shown that the density of the two-phase flow is determined by the pressure in the initial section of the acceleration tube. To increase the density of the two-phase flow, a jet mill with an external pressure supply is proposed. Comparative tests of an ejector jet mill and an ejector mill with external pressure supply have shown that an increase in the density of the two-phase flow allows simultaneously increasing the grinding degree and the consumption concentration of the material with the same flow rate of compressed air in the acceleration tube. Thus, productivity increases and specific energy costs are reduced when grinding materials in ejector jet mills.

**Keywords:** jet mill, ejector, blow to a barrier, grinding degree, density of two-phase flow, acceleration tube.

### Введение

Применение струйных мельниц для получения тонкодисперсных материалов обусловлено минимальным загрязнением продуктами износа.

Особенностью эжекторных струйных мельниц является высокая концентрация энергии в малом объеме взаимодействия высокоско-

ростных встречных струй или струи с преградой [1]. Кроме этого, высокая теплоотдача от частиц к потоку газа позволяет исключить нагрев и измельчать без криогенной техники термолabile материалы. Актуальной задачей в области струйного измельчения является снижение удельных затрат энергии и увеличение производительности [2].

Целью исследования является определение режимных и конструктивных параметров эжектора, позволяющих увеличить расходную концентрацию и скорость частиц материала, что в итоге обеспечит повышение степени измель-

чения и уменьшение удельных затрат энергии на помол.

На рис.1 приведена расчетная схема экспериментальной установки для исследования эжектора струйной мельницы.

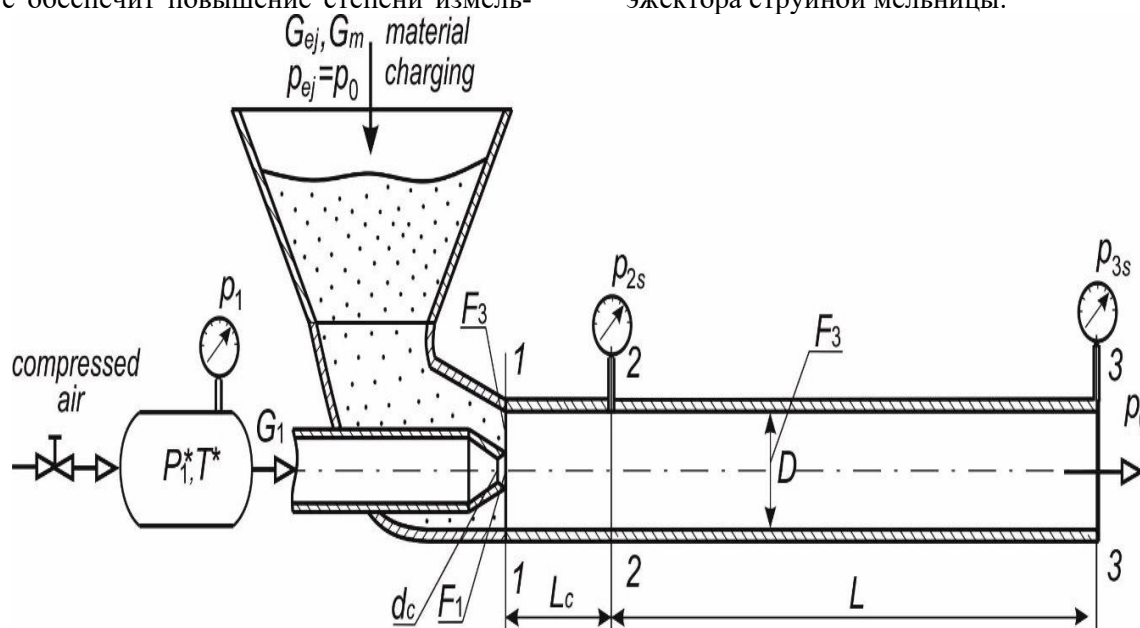


Рис. 1. Расчетная схема эжекторной струйной мельницы с ударом в преграду: сечение 1-1 – начало смешения потоков; сечение 2-2 – начальный участок разгона, сечение 3-3 – срез разгонной трубки;  $D$  – диаметр разгонной трубки;  $d_c$  – диаметр критического сечения сопла;  $L_c$  – длина камеры смешения;  $L$  – длина разгонной трубки

Fig. 1. A calculation scheme of the ejector jet mills with a blow to the barrier: section 1-1 – the beginning of the mixing of flows; section 2-2 – initial acceleration phase, section 3-3 – the end of the accelerating tube;  $D$  – the diameter of the accelerating tube;  $d_c$  – the diameter of the critical section of the nozzle;  $L_c$  – the length of the mixing chamber;  $L$  – the length of the acceleration tube

*Методика проведения эксперимента*

Диаметр разгонной трубки эжектора  $D = 11$  мм, длина  $L = 395$  мм. Использовались сменные сверхзвуковые конические сопла диаметром критического сечения сопла  $d_c = 2, 3, 5$  мм. Измерялось избыточное давление в ресивере перед соплом  $p_1$  и избыточное статическое давление в конце камеры смешения  $p_{2s}$ .

В качестве дисперсного материала использовалась узкая фракция кварцевого песка со средним размером частиц 700 мкм. Плотность твердой фазы  $\rho_m = 2650$  кг/м<sup>3</sup>, насыпная плотность  $\rho_n = 1600$  кг/м<sup>3</sup>. В качестве рабочего газа использовался сжатый воздух. Избыточное

давление воздуха перед соплом варьировалось в пределах  $p_1 = 0,17-0,6$  МПа, температура воздуха  $t = 20$  °С.

Устанавливалось необходимое давление сжатого воздуха  $p_1$  перед соплом и затем навеска песка быстро засыпалась в бункер. Эжектор работал под завалом. Во время работы измерялось время разгрузки бункера эжектора, и вычислялась производительность по материалу  $G_m$ , кг/с. Измерялось избыточное статическое давление  $p_{2s}$  в конце камеры смешения. Расход сжатого воздуха из сопла  $G_1$ , кг/с, вычислялся по известной зависимости [3]

$$G_1 = \sigma_1 m \frac{P_1^* F_1}{\sqrt{T^*}}, \quad (1)$$

где  $P_1^*$  – абсолютное давление заторможенного газа Па;  
 $T^*$  – абсолютная температура заторможенного газа, К;

$m$  – параметр, для воздуха  $m = 0,0404$  м<sup>-1</sup>·с·К<sup>0.5</sup> [3];  
 $\sigma_1$  – коэффициент потерь давления в сопле,  $\sigma_1 = 0,873$ .

Расход газа в разгонной трубке рассчитывается

$$G = G_1 + G_{ej}, \quad (2)$$

где  $G_{ej}$  – расход эжектируемого воздуха, кг/с.

Так как эжектор работал под завалом, то расход эжектируемого воздуха принимался равным нулю  $G_{ej} = 0$ .

$$\mu = \frac{G}{G_m}, \quad (3)$$

Абсолютное статическое давление  $p_2$  в конце камеры смешения вычислялось по зависимости

$$p_2 = p_{2s} + p_{bar}, \quad (4)$$

$$G_{df} = \frac{\sqrt{GG_m}}{F_3} = \frac{G\sqrt{\mu}}{F_3} = \rho_2 w_2 \sqrt{\mu} = \rho_3 w_3 \sqrt{\mu}, \quad (5)$$

где  $F_3$  – площадь сечения разгонной трубки, м<sup>2</sup>;  $\rho_2, \rho_3$  – плотность сплошной среды соответственно в сечении 2–2 и 3–3 разгонной трубки, кг/м<sup>3</sup>,  $w_2, w_3$  – скорость сплошной среды соответственно в сечении 2–2 и 3–3 разгонной трубки, м/с.

$$w_2 = \frac{GRT_2}{F_3 p_2}, \quad (6)$$

$$T_2 = T^* \tau(\lambda) = T^* \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \left( \frac{w_2}{a_k} \right)^2 \right), \quad (7)$$

$$w_2 = -\frac{k+1}{k-1} \frac{F_3 p_2}{2GRT^*} + \frac{1}{a_k} \sqrt{\left( \frac{k+1}{k-1} \frac{F_3 p_2 a_k}{2GRT^*} \right)^2 + \frac{k+1}{k-1}}, \quad (8)$$

где  $R$  – удельная газовая постоянная, для воздуха  $R = 287,10$  Дж/(кг·°К);

$T_2$  – абсолютная температура сплошной среды в сечении 2–2 разгонной трубки, °К;

$k$  – показатель адиабаты, для воздуха  $k = 1,4$ ;

по выражению

Расходная концентрация материала  $\mu$ , кг/кг определялась по зависимости [4]

где  $p_{bar}$  – атмосферное барометрическое давление, Па.

Плотность двухфазного потока  $G_{df}$ , кг/(с·м<sup>2</sup>), определялась по зависимости

Таким образом, плотность двухфазного потока остается постоянной вдоль разгонной трубки.

Из уравнения неразрывности (6) с помощью газодинамической функции  $\tau(\lambda)$  [5] (7) можно выразить скорость воздушного потока  $w_2$  в начале разгонной трубки по зависимости (8):

$a_k$  – критическая скорость, м/с, выражается по известной зависимости [4]:

Аналогично, используя значения статического давления  $p_3$  можно выразить скорость воздушного потока  $w_3$  в конце разгонной трубки

$$a_k = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT^*}. \quad (9)$$

$$w_3 = -\frac{k+1}{k-1} \frac{F_3 p_3}{2GRT^*} + \frac{1}{a_k} \sqrt{\left( \frac{k+1}{k-1} \frac{F_3 p_3 a_k}{2GRT^*} \right)^2 + \frac{k+1}{k-1}}, \quad (10)$$

*Результаты и их обсуждение*

В табл. 1 приведены экспериментальные и расчетные данные. В последнем столбце приведена разность статических давлений  $\Delta p = p_2 -$

$p_3$ , которая характеризует потери давления в разгонной трубке.

Зависимость плотности двухфазного потока от давления в начале разгонной трубки для

всех диаметров сопел и режимов работы эжектора была аппроксимирована квадратичной

функцией  $G_{dfa}$ . Эта зависимость представлена на рис. 2.

Таблица 1

Экспериментальные данные работы эжектора под завалом  
Table 1. Experimental data of the ejector operation under the blockage

Сопло, $d_c$ , мм	$P_1^*$ , МПа	$G$ , кг/с	$G_m$ , кг/с	$\mu$ , кг/кг	$p_2$ , МПа	$G_{df}$ , кг/(с·м <sup>2</sup> )	$G_{dfa}$ , кг/(с·м <sup>2</sup> )	$p_3$ , МПа	$w_2$ , м/с	$w_3$ , м/с	$\Delta p$ , кПа
2	0,280	0,0018	0,0366	20,20	0,10	87,6	105,0	0,102	15,5	15,8	1,93
	0,463	0,0030	0,0434	14,50	0,106	122,8	121,1	0,102	24,9	26,0	4,49
	0,580	0,0038	0,0477	12,70	0,108	144,0	131,2	0,102	30,6	32,4	6,08
	0,646	0,0042	0,0477	11,40	0,109	151,9	136,6	0,102	33,8	36,1	6,97
3	0,295	0,0043	0,0438	10,20	0,112	147,7	150,5	0,102	33,9	37,0	9,66
	0,436	0,0063	0,0489	7,70	0,123	189,6	201,7	0,103	45,4	54,1	19,9
	0,553	0,0081	0,0539	6,70	0,130	224,3	226,1	0,104	54,7	67,7	25,3
	0,700	0,0102	0,0540	5,30	0,140	252,5	257,3	0,106	64,2	84,2	33,6
5	0,283	0,0114	0,0401	3,50	0,130	230,5	227,8	0,105	77,0	95,3	25,5
	0,358	0,0145	0,0405	2,80	0,142	260,8	262,7	0,106	89,4	117,9	35,3
	0,412	0,0167	0,0433	2,60	0,148	289,2	278,9	0,109	97,8	131,9	39,8
	0,532	0,0215	0,0366	1,70	0,167	302,0	304,1	0,112	111,7	162,1	54,7

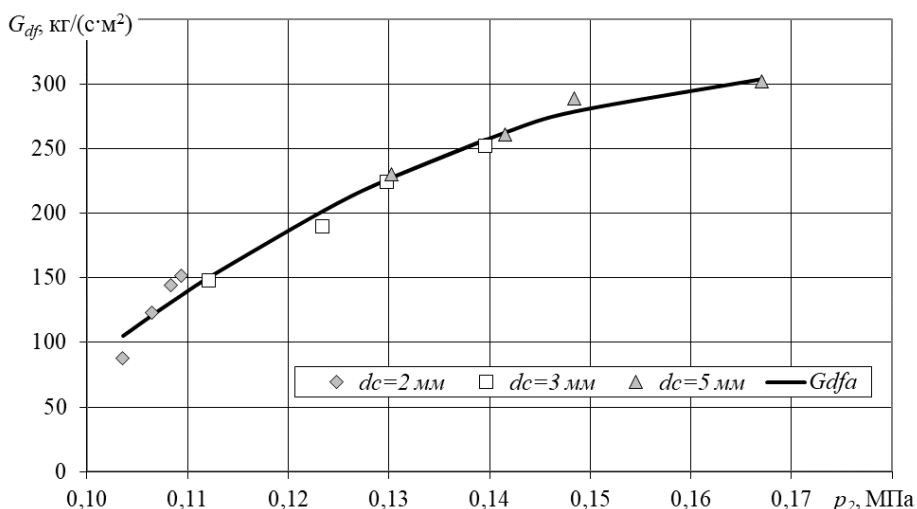


Рис. 2. Зависимость плотности двухфазного потока от статического давления в начале трубки  
Fig. 2. Dependence of the density of the two-phase flow on the static pressure at the tube beginning

На рис. 3. приведена зависимость потерь давления от плотности двухфазного потока. Данная зависимость хорошо аппроксимируется квадратичной зависимостью.

Плотность двухфазного потока определяет скорость разгона частиц и расходную концентрацию. В конечном счете степень измельчения определяется скоростью разгона частиц, а

производительность мельницы определяется расходной концентрацией.

Как следует из представленных данных, плотность двухфазного потока однозначно определяется давлением  $p_2$  в начале разгонной трубки (рис. 2). Полное давление в сечении 2-2 для газового эжектора можно оценить по приближенной формуле [3] Г.Н. Абрамовича:

$$P_2^* = \frac{\alpha P_1^* + P_0}{1 + \alpha}, \quad (11)$$

где  $P_1^*$  – полное давление перед соплом;  
 $p_0$  – внешнее давление во всасывающем патрубке;

$P_2^*$  – полное давление в начале разгонной трубки;  
 $\alpha$  – геометрический параметр эжектора, который определяется выражением

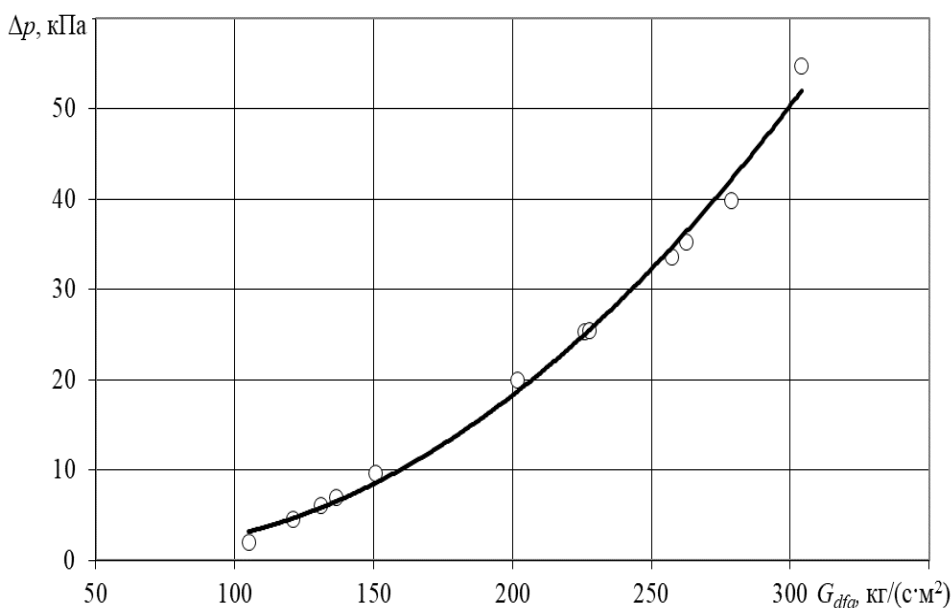


Рис. 3. Зависимость потерь давления от плотности двухфазного потока  
 Fig. 3. Dependence of pressure losses on the density of the two-phase flow

$$\alpha = \frac{F_1}{F_3 - F_1}, \quad (12)$$

где  $F_1$ ,  $F_3$  – соответственно площадь сечения активного сопла и площадь сечения трубы.

По данным Г. Н. Абрамовича формула (11) справедлива для дозвуковых и сверхзвуковых сопел, а точность формулы лежит в пределах 2–5 %.

Как следует из данной зависимости, повышение давления  $P_2^*$  ограничено давлением  $P_1^*$  (оно, как правило, не превышает давление в заводской сети 0,6–0,7 МПа). Геометрический параметр  $\alpha$  также ограничен соотношением диаметра сопла  $d_c$  и диаметра трубы  $D$ . Для двухфазного эжектора (газ – твердые частицы) давление  $P_2^*$  определяется сложнее [6, 7], но формула (11) дает правильную качественную картину.

Чтобы повысить давление  $P_2^*$  и, тем самым, плотность двухфазного потока, было предложено выполнить эжектор струйной мельницы с подводом внешнего давления, т.е.  $p_{ej} > p_0$  [8].

На рис. 4. представлена схема эжекторной струйной мельницы с подводом внешнего давления. Проведены сравнительные испытания струйной мельницы с обычным эжектором

(СМ) и струйной мельницы с подводом внешнего давления (СМВД) при близких значениях расхода газа в разгонной трубке.

Конструктивные параметры СМ:  $d_c = 5,5$  мм;  $D = 10,7$  мм;  $L = 250$  мм. Конструктивные параметры СМВД:  $d_c = 4,0$  мм;  $D = 10,0$  мм;  $L = 1000$  мм. Испытания проводились на двух типах материала — кварцевый песок и полевой шпат. Кварцевый песок со средним размером частиц  $d_{50} = 280$  мкм, плотностью  $\rho_m = 2700$  кг/м<sup>3</sup>; насыпной плотностью  $\rho_n = 1965$  кг/м<sup>3</sup>. Полевой шпат со средним размером частиц  $d_{50} = 180$  мкм, плотностью  $\rho_m = 2630$  кг/м<sup>3</sup>, насыпной плотностью  $\rho_n = 1590$  кг/м<sup>3</sup>. Степень измельчения  $i$  определялась как отношение средневзвешенного размера частиц до удара и после удара

$$i = \frac{d_{50}}{d_{50end}}, \quad (13)$$

где  $d_{50end}$  – средний размер частиц после измельчения, мкм.

Экспериментальные данные после одного цикла измельчения для мельниц приведены в табл. 2.

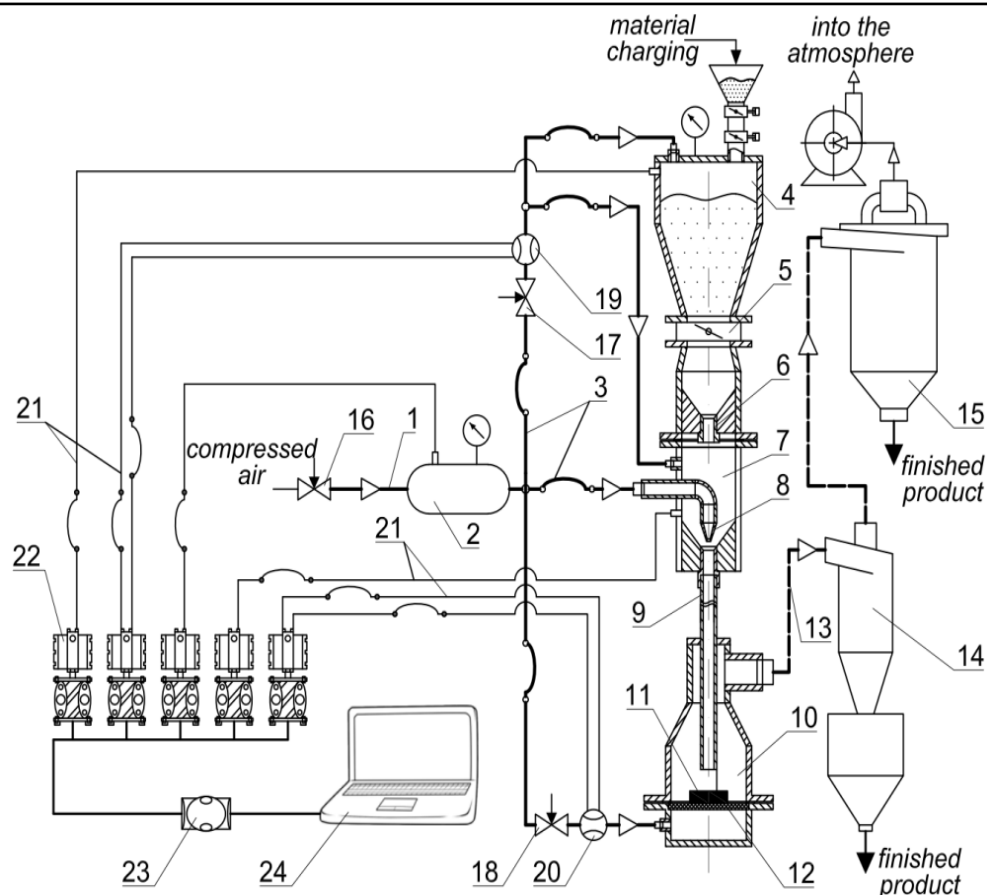


Рис. 4. Схема эжекторной струйной мельницы с подводом внешнего давления:

1 – патрубок подвода сжатого воздуха; 2 – ресивер; 3 – трубопроводы; 4 – герметичный бункер с материалом; 5 – поворотный затвор; 6 – питатель; 7 – камера эжектора; 8 – сверхзвуковое коническое сопло; 9 – разгонная трубка; 10 – камера помола; 11 – преграда; 12 – беспровальная решетка; 13 – воздуховод; 14 – циклон с бункером; 15 – рукавный фильтр; 16, 17, 18 – шаровой кран; 19, 20 – стандартная диафрагма; 21 – импульсные трубки; 22 – микропроцессорные датчики давления «Метран-100-ДИ» и «Метран-100-ДД»; 23 – контроллер; 24 – ПЭВМ.

Fig. 4. The installation scheme of the ejector jet mill with external pressure:

1 – compressed air sleeve; 2 – receiver; 3 – jet mill; 3 – flexible pipeline; 4 – material hopper; 5 – rotary shutter; 6 – feeder; 7 – ejector chamber; 8 – the supersonic nozzle; 9 – acceleration tube; 10 – grinding chamber; 11 – barrier (target); 12 – aerating grid; 13 – air pipe; 14 – cyclone; 15 – bag filter; 16, 17, 18 – ball valve; 19, 20 – standard diaphragm; 21 – pulse tubes; 22 – microprocessor sensors of excess pressure ‘Metran-100 DI’ and pressure difference ‘Metran-100 DD’; 23 – eight-channel controller; 24 – PC.

Таблица 2

Экспериментальные данные после одного цикла измельчения для мельниц СМ и СМВД  
Table 2. Experimental data after one grinding cycle for “SM” and “SMVD” mills

Дисперсный материал	$G_m$ , кг/с	$P_1^*$ , МПа	$p_{ej}$ , МПа	$G_1$ , кг/с	$G_{ej}$ , кг/с	$\mu$ , кг/кг	$G_{df}$ , кг/с	$d_{50end}$ , мкм	$i$
Кварцевый песок (СМ)	0,0312	0,5084	–	0,0283	–	1,104	330,7	127	2,2
Кварцевый песок (СМВД)	0,0465	0,5804	0,2328	0,0183	0,0076	1,796	441,9	75	3,7
Полевой шпат (СМ)	0,0267	0,5017	–	0,0280	–	0,952	303,8	73	2,5
Полевой шпат (СМВД)	0,0444	0,5621	0,2357	0,0178	0,0073	1,771	425,3	55	3,3

Заключение

В результате сравнительных испытаний установлено, что плотность двухфазного потока в СМВД больше, чем в СМ в 1,3 раза при помоле кварцевого песка и в 1,4 раза при помоле полевого шпата. Повышение плотности двухфазного потока позволило одновременно увеличить степень измельчения и расходную концентрацию материала. Из представленных данных следует, что после одного удара степень измельчения в СМВД больше, чем в СМ в 1,7 раза при помоле кварцевого песка и в 1,3 раза при помоле полевого шпата. При этом расходная концентрация в СМВД выше, чем в СМ в 1,6 раза при измельчении кварцевого песка и в 1,9 раза при измельчении полевого шпата.

Таким образом, лабораторные испытания эжекторной струйной мельницы с подводом внешнего давления показали увеличение расходной концентрации, производительности и степени измельчения материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федотов К. В. Струйное измельчение. М.: Горная книга, 2014. 194 с.
2. Chamayou A. Air jet milling. Handbook of Powder Technology. 2007. Vol. 12. P. 421–435.
3. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика В 2 ч. Ч. 1. 5-е изд. М.: Наука, 1991.
4. Разумов И.М. Пневмо- и гидротранспорт в химической промышленности. М.: Химия, 1979. 248 с.
5. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. 2-е изд., перераб. М.: Госэнергоиздат, 1961. 671 с.
6. Бараковских Д. С., Шишкин С. Ф. Движение частиц в разгонной трубке струйной мельницы при малых концентрациях. Вестник Белгородского государственного техно-

логического университета им. В. Г. Шухова. 2016. № 4. С. 121–128.

7. Бараковских Д. С., Шишкин С. Ф. Движение двухфазного потока в разгонной трубке струйной мельницы. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2017. № 5. С. 82–88. DOI:10.1088/1757-899X/966/1/012077

8. Barakovskikh D. S., Shishkin S. F. Ejector jet mill with external pressure. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering: 15th Intern. Conf. on Indust. Manufacturing and Metallurgy, 18–19 June 2020. Nizhny Tagil, 2020. Vol. 966. № 012077. (in Russian). DOI:10.1088/1757-899X/966/1/012077

REFERENCES

1. Fedotov K.V. Jet grinding. M.: Gornaya kniga, 2014. 194 p. (in Russian).
2. Chamayou A. Air jet milling. Handbook of Powder Technology. 2007. Vol. 12. P. 421–435.
3. Abramovich G.N. Applied gas dynamics. V 2 p. P. 1. 5-e izd. M.: Nauka, 1991. (in Russian).
4. Razumov I.M. Pneumatic and hydraulic transport in the chemical industry. M.: Himiya, 1979. 248 p. (in Russian).
5. Deich M.E. Technical gas dynamics. 2-e izd., pererab. M.: Gosenergoizdat, 1961. 671 p. (in Russian).
6. Barakovskikh D.S., Shishkin S.F. The movement of particles in the accelerating tube of the jet mill at low concentrations. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 2016. N 4. P. 121–128. (in Russian).
7. Бараковских Д. С., Шишкин С. Ф. Движение двухфазного потока в разгонной трубке струйной мельницы. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2017. № 5. С. 82–88. DOI:10.1088/1757-899X/966/1/012077
8. Barakovskikh D.S., Shishkin S.F. Ejector jet mill with external pressure // IOP Conference Series. Materials Science and Engineering: 15th Intern. Conf. on Indust. Manufacturing and Metallurgy, 18–19 June 2020. Nizhny Tagil, 2020. Vol. 966. № 012077. DOI:10.1088/1757-899X/966/1/012077 (in Russian).