

ИРИНА ПОСТНИКОВА, ВАЛЕРЬЯН БЛИНИЧЕВ\*, ЯНУШ КРАВЧИК\*\*

## РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ИХ СТОЛКНОВЕНИИ В ПРОТИВОТОЧНЫХ СТРУЯХ

### CALCULATION OF PROCESS OF CRUSHING OF PARTICLES AT THEIR COLLISION IN COUNTERFLOW JETS

#### А н н о т а ц и я

В статье рассматривается процесс измельчения частиц твердого материала при их столкновении в противоположно направленных двухфазных высокоскоростных струях. Подробно проанализирован вопрос о вероятности столкновения частиц в ядре измельчения. Дано выражение для определения концентрации твердых частиц в любом сечении двухфазной струи. В статье рассматривается алгоритм определения гранулометрического состава частиц после измельчения их при столкновении двух противоположно направленных высокоскоростных двухфазных струй.

*Ключевые слова: измельчение, двухфазная высокоскоростная струя, ядро измельчения, гранулометрический состав*

#### Abstract

In article process of crushing of particles of a firm material is considered at their collision in opposite directed two-phase high-speed jets. The question on probability of collision of particles in a nucleus of crushing is in detail analyzed. Expression for definition of concentration of firm particles in any section of a two-phase jet is given. In article the algorithm of definition Particle Size structure of particles after their crushing is considered at collision of two opposite directed high-speed two-phase jets.

*Keywords: crushing, two-phase high-speed jets, a nucleus of crushing, particle size structure*

\* К.т.н. доцент Ирина Постникова, д.т.н. профессор Валерьян Блиничев, Ивановский Государственный Химико-Технологический Университет.

\*\* Д.т.н. профессор Януш Кравчик, Краковская Политехника.

В Ивановском государственном химико-технологическом университете на кафедре машин и аппаратов химических производств разработан аппарат комбинированного действия для одновременного проведения таких процессов, как обжиг минерального сырья в слое зернистого материала, измельчение твердых частиц в противоточных высокоскоростных струях, истирание продуктов обжига и измельчения в псевдооживленном слое и разделение частиц по крупности в инерционном классификаторе [1-3].

При расчете аппаратов подобного типа необходимо определение вероятности столкновения частиц в противоточных струях, истекающих в слой псевдооживленного зернистого материала, и нахождение фракционного состава частиц при измельчении.

А. И. Зайцев и Д. О. Бытев в [4] предлагают определять вероятность столкновения частиц в противоточных струях, зная вероятность свободного пробега частицей одного потока расстояния  $l$  во встречной струе.

Авторами доказано [11], что частицы попадают в струю только на начальном ее участке, где наблюдается максимальное падение давления рабочего газа. При этом частицы как бы проваливаются (подсасываются) в струю. Площадь подсоса частиц твердой фазы определяется зоной разрежения струи, которая представляет собой конус, ограниченный с одной стороны срезом напорного сопла, а с другой – координатой конца начального участка развития струи внутри псевдооживленного слоя –  $X_n$ .

С учетом изложенного, выражение для определения количества твердой фазы, попавшей в струю газа, можно записать в следующем виде

$$J_{ms} = \left[ \frac{2,276 \cdot \varphi_1^2 - (1 + J_{np} / J_z) / 2,24}{1 + J_{np} / J_z} - 0,5 \cdot \frac{F_{кон}}{\pi \cdot (r^{cn})^2} \cdot \frac{J_{np}}{J_a} \right] \cdot \frac{J_{np}}{J_z} \cdot J_z^p \quad (1)$$

Здесь  $F_{кон}$  – площадь поверхности конуса всасывания;  $J_z^p$  – расход рабочего газа в сопле;  $J_{np}$  – расход привлеченного в высокоскоростную струю газа из окружающего слоя;  $\varphi_1$  – коэффициент скорости газа на начальном этапе развития струи;  $r^{cn}$  – радиус газового сопла. Методика расчета основных составляющих данного уравнения изложена в [11].

При выводе уравнения для определения вероятности столкновения воспользуемся схемой, изображенной на рис. 1.

Если принять в качестве допущения, что частицы, попадая в струю, двигаются затем порциями со скоростями, равными средней скорости движения частиц по сечению струи, то на каждом участке факела длиной  $\Delta X$  будет находиться  $n$  штук частиц твердой фазы

$$n = n'' \cdot \Delta t \quad (2)$$

где  $n''$  – количество частиц, поступивших в струю за единицу времени равную 1 секунде. Находим это количество, зная секундный массовый расход твердой фазы, поступающей в струю.

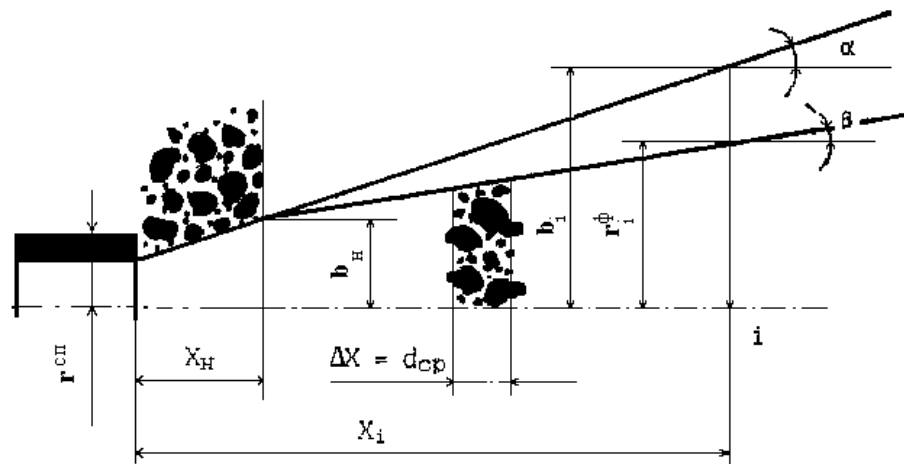


Рис. 1. Распределение частиц твердого материала в двухфазной струе

Fig. 1. Distribution of particles of a firm material in two-phase jet.

$$n'' = \frac{6 \cdot J_{ms}}{\pi \cdot d_{cp}^3 \cdot \rho_{ms}} \quad (3)$$

$\Delta\tau$  – промежуток времени, за который частица проходит расстояние длиной  $\Delta X$ .

$$\Delta\tau = \Delta X / W_{-d} \quad (4)$$

Здесь  $W_{cp}$  – средняя скорость частиц твердого материала по сечению струи на определенном отрезке оси распространения.

Тогда концентрация частиц по площади поперечного сечения струи выразится соотношением

$$C_F = n f_{ms} / F_{ms}^{\phi} \quad (5)$$

Значение  $F_{ms}^{\phi}$  – полной площади поперечного сечения факела, в объеме которого движутся твердые частицы, не совпадает с  $F_z^{\phi}$  – площадью поперечного сечения газового факела, т.к. угол раскрытия газового факела  $\alpha$  больше, чем аналогичная характеристика факела твердых частиц –  $\beta$ . По данным [5]  $\beta$  составляет около  $10^\circ$ , в то время как  $\alpha$  приблизительно  $20-22^\circ$ .

$$F_{ms}^{\phi} = \pi \cdot r_{\phi}^2$$

$$r_{\phi} = b_H + (X_i - X_H) \cdot \text{tg}\beta \quad (6)$$

$$f_{ms} = \pi \cdot d_{cp}^2 / 4$$

Примем также, что  $\Delta X = d_{cp}$ , т.е. пакет частиц за время  $\Delta t$  проходит расстояние, равное среднему диаметру частиц. С учетом сказанного, после простых арифметических преобразований, получаем следующее выражение для  $C_F$ .

$$C_F = \frac{1,5 \cdot J_{m6}}{W_{cp} \cdot F_{m6}^{\phi} \cdot \rho_{m6}} \quad (7)$$

Для рассмотрения процесса столкновения частиц в противоположно направленных двухфазных струях выделим в общем объеме аппарата так называемое «ядро столкновения» – смотри физическую модель аппарата рис. 2. Считаем, что вертикальная ось столкновения струй совпадает с геометрической осью симметрии аппарата, и процесс взаимопроникновения факелов газа и твердых частиц симметричен относительно данной оси, именуемой в дальнейшем «границей столкновения» –  $i$ .

Рассмотрим теперь непосредственно процесс столкновения частиц в противоточных струях, рис. 3.

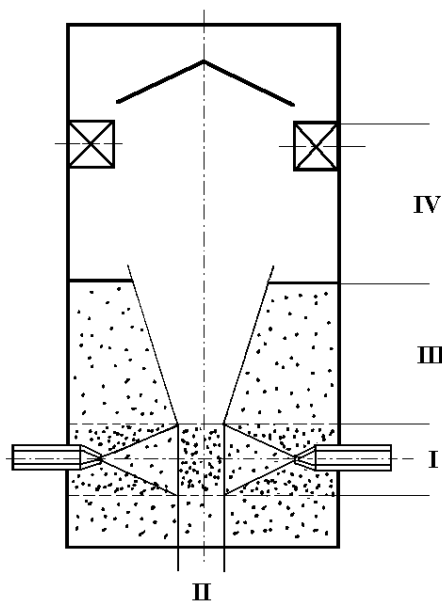


Рис. 2. Физическая модель аппарата

**I** – высоконапорная двухфазная струя; **II** – ядро столкновения противоточных струй;  
**III** – псевдооживленный слой; **IV** – зона сепарации

Fig. 2. The physical model

**I** – two-phase high-speed jets; **II** – a nucleus of crushing;  
**III** – fluidized bed; **IV** – separation zone

Очевидно, что на расстоянии  $X_i$  от среза сопла (определяемого из условия достижения частицей оптимальной для измельчения скорости), с учетом того, что противоположная струя симметрична первой, вероятность столкновения частиц

твёрдого материала друг с другом  $P_{Ci}$  при условии их равномерного распределения по сечению потока, будет равна арифметической сумме площадей поперечного сечения, занимаемых частицами в струе, т.е.

$$P_{Ci} = 2 \cdot C_F \quad (8)$$

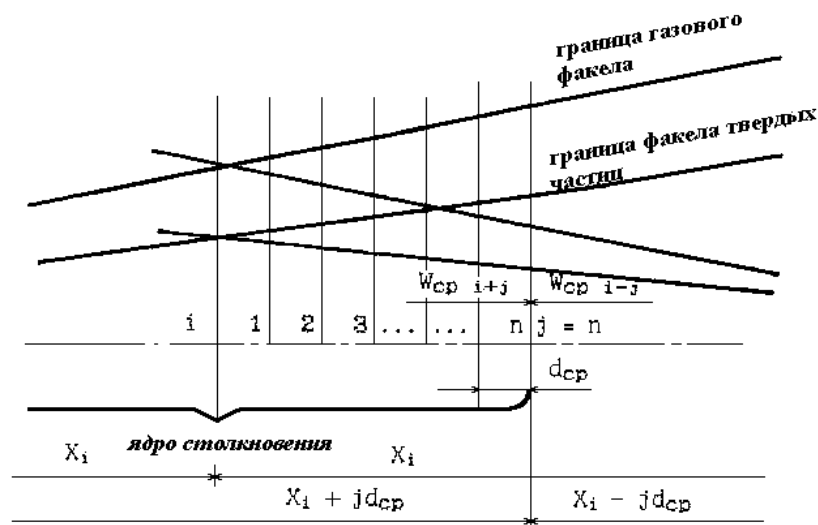


Рис. 3. Схема к расчету вероятности столкновения

Fig. 3. The circuit to calculation of probability of collision

Учитывая, что двухфазные струи симметричны относительно границы столкновения  $i$ , будем рассматривать в дальнейшем распространение только левого потока внутри встречной струи. Разделим факел по продольной координате на  $j$  участков, каждый из которых равен по длине среднему диаметру частиц.

С учетом того, что левый поток после прохождения границы столкновения расширяется, а правый, наоборот, сужается, радиусы факелов твердых частиц будут иметь неодинаковые размеры, что можно записать как

$$r_{\phi j}^{лев} = r_{\phi i} + j \cdot d_{cp} \cdot \operatorname{tg} \beta; \quad r_{\phi j}^{прав} = r_{\phi i} - j \cdot d_{cp} \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (9)$$

Соответственно

$$P_{Cj} = C_{Fj}^{лев} + C_{Fj}^{прав}; \quad C_{Fj}^{лев} = \frac{1,5 \cdot J_{ms}}{W_{cpi+j} \cdot F_{mej}^{лев} \cdot \rho_{ms}}; \quad C_{Fj}^{прав} = \frac{1,5 \cdot J_{ms}}{W_{cpi-j} \cdot F_{mej}^{прав} \cdot \rho_{ms}} \quad (10)$$

Из рисунка 3 видно, что на некотором удалении от границы столкновения потоков  $i$ , частицы периферийной зоны факела, движущиеся по наиболее удаленной от оси траектории, столкнутся с частицами, находящимися вне струи, сконцентрированными на границе противоположного факела. В околоструйном пространстве слой

зернистого материала имеет довольно низкую порозность, частицы расположены близко друг к другу и образуют плотный слой, перемещающийся с малыми, по сравнению с частицами внутри струи, скоростями. Поэтому, можно считать, что вероятность столкновения с частицами слоя частиц двухфазного струйного потока будет равна единице, а разрушение последних при этом аналогично измельчению при ударе о неподвижную частицу. Скорость удара при этом будет равна скорости движения периферийных частиц.

Кроме периферийной зоны в факеле можно выделить центральное ядро частиц твердого материала, в котором они двигаются примерно с равными скоростями, и в котором разрушение будет определяться вероятностью столкновения частиц с движущимися частицами встречного потока. При этом скорость их соударения будет складываться из скоростей движения частиц в двух встречных потоках:  $W_{cpi+j} + W_{cpi-j}$ , а вероятность столкновения определяется по формуле (10).

Зону столкновения частиц во встречном потоке можно ограничить и рассматривать только, так называемое, ядро столкновения или измельчения.

Размеры этого ядра зависят от размеров факела, от диаметра частиц, их скорости, физико-механических характеристик измельчаемого материала, и по данным [6, 7] могут находиться в пределах 5-10 диаметров частицы от границы столкновения  $i$  в обе стороны от нее. Расчеты по предлагаемой модели показывают, что суммарная вероятность столкновения частиц в выделенном ядре приближается к 70%.

Для определения грансостава частиц после измельчения непосредственно в ядре столкновения используется матричная модель измельчения, подробно описанная В. Н. Блиничевым и другими авторами в [8-10].

$$\begin{bmatrix} F_k(d_1) \\ F_k(d_2) \\ \cdot \\ \cdot \\ F_k(d_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - P_p(d_1) & & & & \\ & 1 - P_p(d_2) & & & \\ & & \cdot & & \\ & & & \cdot & \\ & & & & 1 - P_p(d_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_n(d_1) \\ F_n(d_2) \\ \cdot \\ \cdot \\ F_n(d_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_p(d_1) \\ P_p(d_2) \\ \cdot \\ \cdot \\ P_p(d_n) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_n(d_1) \\ F_n(d_2) \\ \cdot \\ \cdot \\ F_n(d_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ \varphi_1(d_2) & 0 & & & \\ \cdot & & 0 & & \\ \cdot & & & 0 & \\ \varphi_1(d_n) & \cdot & \cdot & \varphi_1(d_n) & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Или в обобщенной форме

$$F_k^{uzm}(d) = (1 - P_p(d)) \cdot F_n^{uzm}(d) + P_p(d) \cdot F_n^{uzm}(d) \cdot \varphi(d) \quad (12)$$

где вероятность разрушения

$$P_p(d) = 2 \cdot P(d) \cdot \sum_{i=1, j=1}^{j=n} P_{Cij} \quad (13)$$

Вероятность столкновения частиц в ядре измельчения  $P_{Cij}$  определяется по формуле (10). Вероятность измельчения частиц твердого материала  $P$  при их столкновении определяется по известной формуле

$$P = \frac{1}{(2 \cdot \pi)^{0.5}} \int_{-\infty}^t e^{-t^2/2} dt$$

$$t = 2,5 \cdot \lg W / W_{кр} ; \quad W_{кр} = 1,9 \cdot \left( \left( \frac{[\sigma]}{\rho} \right) \cdot 10^{-3} + 1 \right) / d_{cp}^{0.48} \quad (14)$$

Скорость  $W$  в формуле (14) определяется:

- а) для частиц периферийной зоны, как  $W_j$ ;
- б) для частиц в ядре измельчения, как  $W_{cpi-j} + W_{cpi+j}$ ;
- в) для частиц, находящихся на границе столкновения, как  $2 \cdot W_i$ .

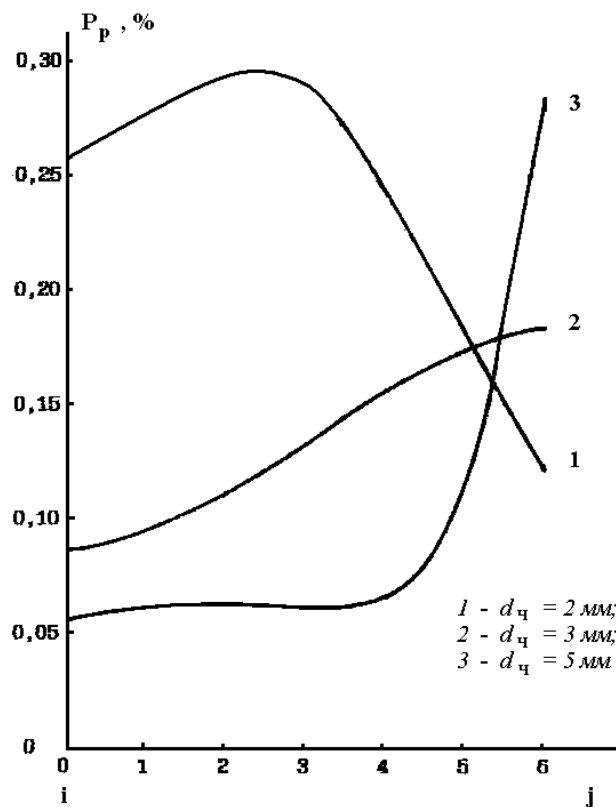


Рис. 4. Вероятность разрушения частиц в ядре измельчения при  $r^{cn} = 6$  мм

Fig. 4. Probability of destruction of particles in a nucleus of crushing at  $r^{cn} = 6$  mm

Распределительная функция  $\phi(d)$  рассчитывается по уравнению

$$\phi(d) = 1 - \exp \left[ - \frac{d - d_i}{\sqrt{2,56 - d_i \cdot (W_i / W_{кр})^{1,85}}} \right] \quad (15)$$

По результатам расчета были построены следующие графики:

- зависимость вероятности разрушения частиц в ядре измельчения от размеров частиц и диаметра сопел – рис. 4.;
- зависимость вероятности измельчения от скорости нагружения – рис. 5;
- график изменения исходного грансостава частиц зернистого материала при измельчении в противоточных струях – рис. 6

Предложенная методика расчета вероятности однократного столкновения и разрушения частиц твердого материала в противоточных высокоскоростных струях энергоносителя [11] позволяет, зная производительность высокоскоростных струй и число циклов столкновений частиц, определять производительность аппарата по тонкодисперсному продукту, причем по заданной заранее границе измельчения.

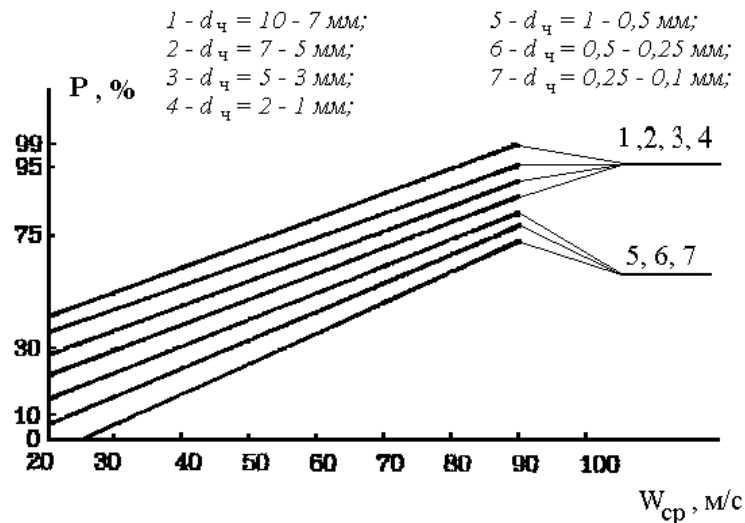


Рис. 5. Зависимость вероятности ударного измельчения частиц от скорости их нагружения в ядре измельчения при  $r^{cn} = 6 \text{ мм}$

Fig. 5. Dependence of probability of shock crushing of particles on their speed contacts in a nucleus of crushing at  $r^{cn} = 6 \text{ mm}$



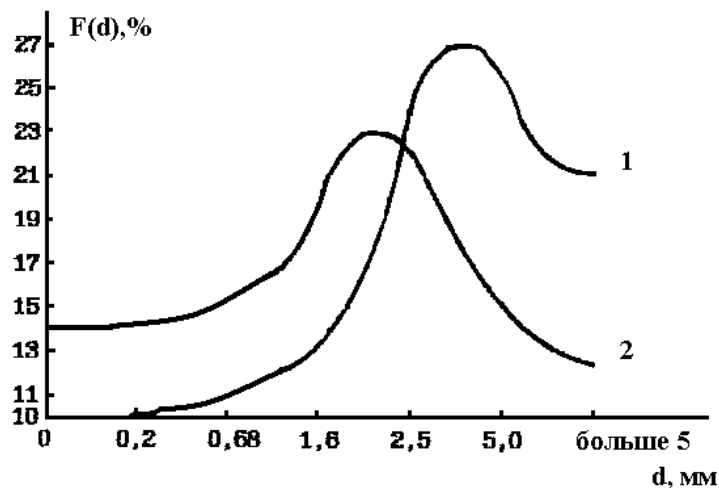


Рис. 6. Изменение грансостава зернистого материала при однократном нагружении в ядре измельчения при  $r^{cm} = 6$  мм  
1 – начальный грансостав; 2 – конечный грансостав

Fig. 6. Change particle size a granular material at unitary contact in a nucleus of crushing at  $r^{cm} = 6$  mm  
1 – initial particle size; 2 – final particle size

#### СИМВОЛЫ

|               |  |                      |
|---------------|--|----------------------|
| $C$           | – концентрация                                 |                      |
| $J$           | – расход материала                             | [кг/с]               |
| $F$           | – площадь                                      | [м <sup>2</sup> ]    |
| $F(d)$        | – матрица-столбец грансостава материала        |                      |
| $P$           | – вероятность измельчения                      |                      |
| $P_p$         | – вероятность разрушения                       |                      |
| $P_c$         | – вероятность столкновения                     |                      |
| $P(d)$        | – диагональная матрица вероятностей разрушения |                      |
| $S$           | – площадь сечения частицы                      | [м <sup>2</sup> ]    |
| $W$           | – абсолютная скорость твердой фазы             | [м/с]                |
| $X$           | – абсцисса по оси струи                        | [м]                  |
| $Y$           | – ордината по сечению факела струи             | [м]                  |
| $b$           | – радиус факела струи                          | [м]                  |
| $d$           | – диаметр частиц твердой фазы                  | [м]                  |
| $r$           | – радиус                                       | [м]                  |
| $\gamma$      | – удельная плотность                           | [кг/м <sup>3</sup> ] |
| $\varepsilon$ | – порозность                                   |                      |
| $\rho$        | – плотность                                    | [кг/м <sup>3</sup> ] |
| $[\sigma]$    | – предел прочности на разрушение               | [МПа]                |

|          |                                      |        |
|----------|--------------------------------------|--------|
| $\alpha$ | – угол раскрытия струи               | [град] |
| $\beta$  | – половина угла конуса потока частиц | [град] |

### Литература

- [1] Блиничев В. Н., Постникова И. В.: *Некоторые аспекты применения и расчета высокотемпературных аппаратов комбинированного действия*, II Международная конференция «Теоретические и экспериментальные основы создания нового оборудования», Краков 1995, 98-120.
- [2] Колобердин В. И., Блиничев В. Н., Афонин С. Б., Постникова И. В.: *Противоточная струйная мельница*, А.с. № 1721890 от 22.11.91.
- [3] Колобердин В. И., Блиничев В. Н., Афонин С. Б., Постникова И. В.: *Способ измельчения минерального сырья*, Патент РФ № 1823229 от 12.10.92.
- [4] Зайцев А. И., Бытев Д. О.: *Ударные процессы в дисперсно-пленочных системах*, М.: Химия, 1994, 178.
- [5] Сучков Е. А.: *Моделирование и оптимизация процессов сушки сыпучих материалов в аппаратах псевдооживленного слоя с множественным фонтанированием*, Диссертация на соискание ученой степени кандидата техн. наук, Москва 1987, 155.
- [6] Ныч А. В., Блиничев В. Н.: *Экспериментальное исследование пневматического способа измельчения*, Иваново, Ивановский хим. техн. институт, 1986, Деп. В ОНИИТЭХИМ, г. Черкассы, 11.
- [7] Ныч А. В., Блиничев В. Н.: *Условие ускорения частиц в газовом потоке с высоким*, к.п.д. Иваново, Ивановский хим.техн. институт, 1986, Деп. в ОНИИТЭХИМ, г. Черкассы, 10.
- [8] Блиничев В. Н.: *Разработка оборудования и методов его расчета для интенсификации процессов тонкого измельчения материалов и химической реакции в твердых телах*, Диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук, Иваново 1975.
- [9] Смирнов Н. М., Блиничев В. Н., Стрельцов В. В.: *Расчет гранулометрического состава материала, измельченного в мельнице ударно-отражательного действия*, Теор. основы хим. технологии, 1981, т.15, N 3, 424-428.
- [10] Яшков В. В., Федосов С. В., Блиничев В. Н.: *Метод расчета гранулометрического состава материала в совмещенном процессе сушки и измельчения в мельницах ударно-отражательного действия*, Интенсификация процессов переработки сыпучих материалов: Межвуз. сб. научн. трудов, Ивановск. хим.техн. ин-т., Иваново 1987, 97-100.
- [11] Постникова И. В.: *Совмещение процесса химической реакции в твердом теле с разрушением образующихся продуктов*, Диссертация на соискание ученой степени кандидата техн. наук, Иваново 1996.