

УДК 532.525.2

РАСЧЕТ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОТИВОТОЧНЫХ СТРУЙНЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ДЛЯ ИНТЕНСИВНОГО УДАРНОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛА

С. В. Воробьев, А. М. Козлов, И. В. Постникова, В. Н. Блиничев
ФГБОУ ВО Ивановский государственный химико-технологический университет

В статье рассматривается процесс измельчения частиц твердого материала при их столкновении в противоположно направленных двухфазных высокоскоростных струях. Приведена зависимость критической скорости ударного нагружения частиц от прочности исходного материала. Дано выражение для определения концентрации твердых частиц в любом сечении двухфазной струи. Проанализирован вопрос о вероятности столкновения частиц в ядре измельчения.

Ключевые слова: критическая скорость разрушения, струйная мельница, вероятность столкновения, вероятность разрушения.

Введение

В настоящее время, несмотря на появление конструкций струйных мельниц с истечением струй в свободный объём твердых частиц, не имеется методик, позволяющих точно рассчитывать скорости движения частиц в струе, знание которых необходимо для последующего расчета вероятностей столкновения и разрушения материала при однократном взаимодействии.

По результатам исследований [1], на скорость истирания материала в псевдооживленном слое значительно влияет форма частиц.

Зоны столкновения частиц в противоточных струях, при скоростях существенно больших критических скоростей соударения, являются поставщиком не только тонкодисперсных частиц, но также и большого количества крупных осколков неправильной формы разру-

шившихся частиц, энергия которых расходуется на интенсивный процесс истирания острых углов осколков в объёме вихревого движения частиц псевдооживленного слоя.

1. Определение критической скорости разрушения зернистых материалов

Из-за широкого спектра распределения прочности частиц природных материалов даже одного размера под критической скоростью $v_{кр}$ ударного нагружения понимается такая скорость, при которой вероятность их разрушения равна 50%.

На основании проведенного нами анализа [2] наиболее оптимальным уравнением для определения критических скоростей $v_{кр}$ разрушения материала является:

$$v_{кр} = \frac{1,9 \left(\left[\frac{\tau_{ср}}{\rho_{тв}} \right] 10^{-3} + 1 \right)}{d_q^{0,48}} \quad (1)$$

где $\tau_{ср}$ – напряжение сдвига, МПа,
 d_q – средний диаметр частиц,

$\rho_{тв}$ – плотность тела, кг/м³.

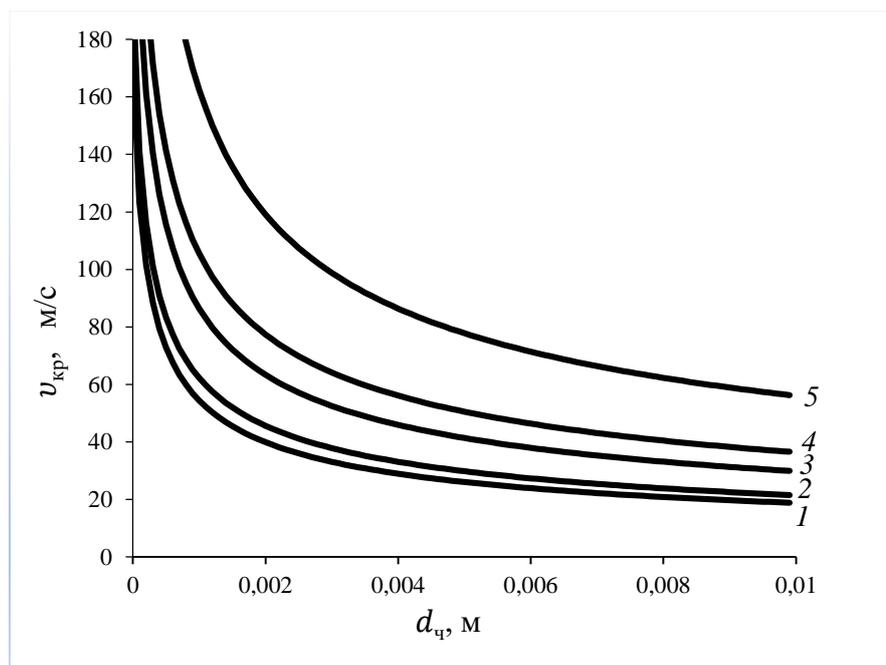


Рис. 1 Зависимость критической скорости $v_{кр}$ разрушения от среднего диаметра $d_{ч}$ частиц зернистого материала разной прочности $\tau_{сд}$.

1-CaO ($\tau_{сд}=4$ МПа), 2-мел ($\tau_{сд}=7$ МПа), 3-CaCO₃ ($\tau_{сд}=27$ МПа),
4-NaCl ($\tau_{сд}=32$ МПа), 5-Антрацит ($\tau_{сд}=48$ МПа).

Таким образом, прочность является основным фактором, влияющим на величину критической скорости $v_{кр}$ разрушения материала. В то же время, наблюдается следующая зависимость: при уменьшении среднего диаметра $d_{ч}$ частиц измельчаемого материала, критическая скорость $v_{кр}$ разрушения увеличивается (рис. 1). Бенуа Б. и др. [3] объяснили этот масштабный эффект тем, что в крупных образцах имеется большее ко-

личество различных дефектов (вакансий, дислокаций, поверхностных дефектов и др.), которые снижают прочность материала [4].

2. Определение скорости и концентрации частиц твердой фазы в турбулентной струе газа погруженной в псевдооживленный слой

Эффективное измельчение материала возможно только при условии:

$$v_{ч} \geq v_{кр}, \text{ т.е. } \sigma_{\max} \geq \sigma_{в} \quad (2)$$

Таким образом, для определения оптимальных режимов работы подобных аппаратов нужно уметь рассчитывать концентрацию и скорости $v_{ч}$ движения частиц в струе, знание которых необходимо для дальнейшего расчета вероятностей столкновения и разрушения материала при однократном столкновении частиц в противоточных струях в импульсном режиме.

Для решения этой задачи нами [5] была разработана ячеечная модель эжек-

ции, позволяющая с высокой точностью определять скорость газовой и твердой фазы в любой точке пространства струи. Представленные результаты исследования дают возможность определять габариты зоны разрежения, необходимые для надежного расчета коэффициента эжекции гетерогенной среды (воздух + твердые частицы).

На рис. 2 представлены результаты расчета скоростей твердых частиц $v_{ТВ}$ по вышеуказанной модели для известняка,

Расчеты по предлагаемой модели показывают, что суммарная вероятность

столкновения частиц в выделенном ядре приближается к 100 %.

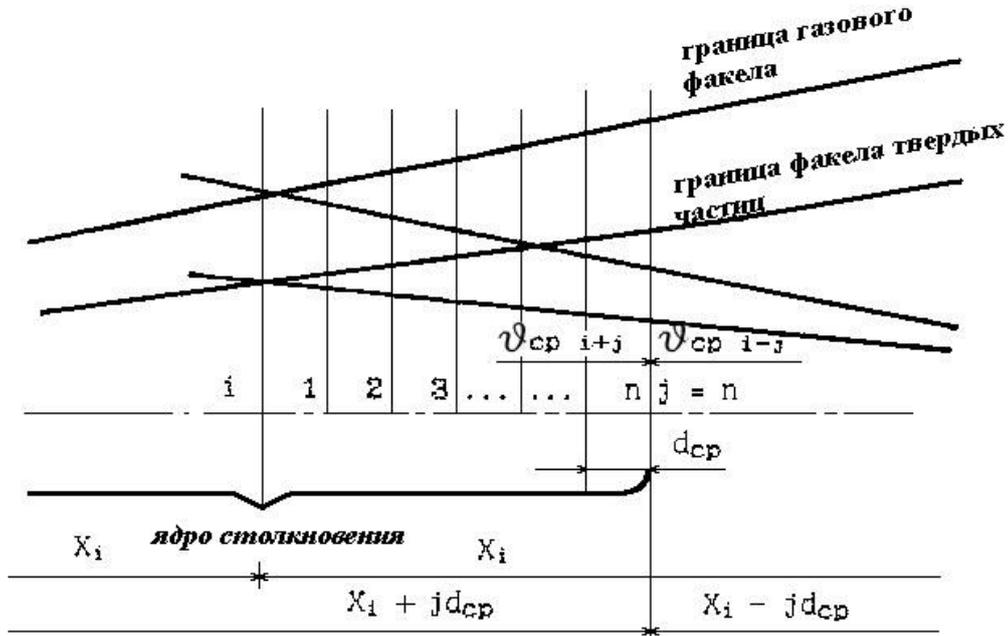


Рис. 3 Схема к расчету вероятности столкновения P_{ci}

Для определения грансостава частиц после измельчения непосредственно в ядре столкновения используется мат-

ричная модель измельчения, подробно описанная Блиничевым В.Н. и другими авторами [9].

$$F_k^{изм}(d) = (1 - P_p(d)) F_n^{изм}(d) + P_p(d) F_n^{изм}(d) \varphi(d) \tag{5}$$

где вероятность разрушения:

$$P_p(d) = P(d) \sum_{i=1, j=1}^{j=n} P_{cij} \tag{6}$$

Вероятность разрушения частиц твердого материала P при их столкновении определяется по известной формуле:

$$P = \frac{1}{(2\pi)^{0,5}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt; t = 2,51lg \frac{v}{v_{кр}} \tag{7}$$

С увеличением скорости удара вероятность разрушения приближается к единице, а при уменьшении — к нулю [109].

Распределительная функция $\varphi(d)$ для частиц рассчитывается по уравнению:

$$\varphi(d) = 1 - exp \sqrt{\frac{d - d_i}{2,56 - d_i \left(\frac{v}{v_{кр}}\right)^{1,85}}} \tag{8}$$

Вывод: Представленные результаты исследования истечения турбулентной высоконапорной струи в однородную среду позволяют определить габариты зоны разрежения в зависимости от диаметра сопла и скорости истечения воздуха, необходимые для надежного расчета коэффициента эжекции гетерогенной среды (воздух + твердые частицы). Знание концентрации, скорости движения и критической скорости разрушения частиц твердой фазы позволит определить вероятность их столкновения и разрушения в противоточных струях, погруженных в псевдооживленный слой с учетом их прочностных характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-03-00787.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блиничев В. Н., Стрельцов В. В., Лебедева Е. С. Исследование процесса измельчения зернистых материалов при обработке их в псевдооживленном слое // Химия и химическая технология. — 1967. — № 12. — С. 1389-1393.
2. Воробьев С.В., Беляев И.А., Блиничев В.Н. Анализ расчетных зависимостей для определения критических скоростей ударного нагружения частиц // Международный научно-технический форум первые международные Косыгинские чтения -2017. — М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017. — С. 1736-1740.
3. Бенуа Б. Мандельброт. Фрактальная геометрия природы. — М.: Институт компьютерных исследований, 2002. — 656 с.
4. Латышев О.Г., Казак О.О. Влияние нарушенности горных пород на их свойства и состояние // Известия уральского государственного горного университета. — 2017. — № 4(48). — С. 62 – 65.
5. Vorob'ev, S.V., Postnikova, I.V. & Blinichev, V.N. Outflow of Free Turbulent Jet in a Fluidized Bed. // Khimicheskie Volokna. —2019— №. 4. — pp. 96–100.
6. Терехов В.И., Пахомов М.А. Влияние частиц на структуру течения и дисперсию твердой примеси в двухфазной осесимметричной струе // Журнал технической физики. — 2011. — № 10(81). — С. 27 – 35.
7. Беляев И.А., Воробьев С.В., Постникова И.В. Определение вероятности разрушения частиц при струйном измельчении // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. — 2018. — № 4 (56). — С. 15-20.
8. Ныч А.В., Блиничев В.Н. . Экспериментальное исследование пневматического способа измельчения // Межвуз. сб.научн.трудов . — Иваново : Иванов, хим.-техн. ин-т, 1986. — С. 11 .
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. — № 3(15). — С. 424-428.
10. Ладаев Н.М., Жбанов Н.С. Влияние вероятности разрушения на степень измельчения материалов // Вестник МГСУ. — 2012. — № 5. — С. 103-106.

CALCULATION OF RATIONAL MODES OF OPERATION OF-COUNTERFLOW JET MILLS FOR INTENSE SHOCK DESTRUCTION OF MATERIAL

S. V. Vorob'ev, A. M. Kozlov, I. V. Postnikova, V. N. Blinichev

The article discusses the process of grinding particles of solid material when they collide in oppositely directed two-phase high-speed jets. The dependence of the critical velocity of shock loading of particles on the strength of the starting material is given. An expression is given for determining the concentration of solid particles in any section of a two-phase jet. The question of the probability of collision of particles in the grinding core is analyzed.

Keywords: critical velocity of destruction, jet mill, probability of collision, probability of fracture.

REFERENCES

1. Blinichev V. N., Strel'cov V. V., Lebedeva E. S. Issledovanie processa izmel'cheniya zernistykh materialov pri obrabotke ih v psevdoozhizhennom sloe. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. 1967. № 12. S. 1389-1393.
2. Vorob'ev S.V., Belyaev I.A., Blinichev V.N. Analiz raschetnykh zavisimostej dlya opredeleniya kriticheskikh skorostej udarnogo nagruzheniya chastic. Mezhdunarodnyj nauchno-tekhnicheskij forum pervye mezhdunarodnye Kosygin'skie chteniya. - 2017. M.: FGBOU VO «RGU im. A.N. Kosygina». 2017. S. 1736-1740.
3. Benua B. Mandel'brot. Fraktal'naya geometriya prirody. M.: Institut komp'yuternyh issledovanij, 2002. 656 s.
4. Latyshev O.G., Kazak O.O. Vliyanie narushennosti gornyh porod na ih svojstva i sostoyanie. Izvestiya ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta. 2017. № 4(48). S. 62 – 65.
5. Vorob'ev, S.V., Postnikova, I.V. & Blinichev, V.N. Outflow of Free Turbulent Jet in a Fluidized Bed. Khimicheskie Volokna. 2019. №. 4. pp. 96–100.
6. Terekhov V.I., Pahomov M.A. Vliyanie chastic na strukturu techeniya i dispersiyu tverdoj primesi v dvuhfaznoj osesimmetrichnoj strue. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. 2011. № 10(81). S. 27 – 35.
7. Belyaev I.A., Vorob'ev S.V., Postnikova I.V. Opredelenie veroyatnosti razrusheniya chastic pri strujnom izmel'chenii. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie. 2018. № 4 (56). S. 15-20.
8. Nych A.V., Blinichev V.N. . Eksperimental'noe issledovanie pnevmaticheskogo sposoba izmel'cheniya. Mezhvuz. sb.nauchn.trudov . Ivanovo : Ivanov, him.-tekhn. in-t, 1986. S. 11 .
9. Smirnov N. M., Blinichev V. N., Strel'cov V. V. Raschet granulo metrcheskogo sostava materiala, izmel'chennogo v mel'nice udarno-otrazhatel'nogo dejstviya. Teor. osnovy him. tekhnologii. 1981. № 3(15). S. 424-428.
10. Ladaev N.M., ZHbanov N.S. Vliyanie veroyatnosti razrusheniya na stepen' izmel'cheniya materialov. Vestnik MGSU. 2012. № 5. S. 103-106.