

УДК 691. 002. 5; 666.1/9

А. А. Гарабажиу, аспирант;  
А. Э. Левданский, ассистент

### **МЕТОДИКА РАСЧЕТА СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЫ**

Design procedure of the velocity of gas flow in the grinding chamber rotor-centrifugal mill with the inertia-gravitation unloading of products.

В настоящее время одним из путей решения весьма важной проблемы повышения эффективности процесса тонкого измельчения, как одного из наиболее энергоемких, является использование измельчителей, реализующих высокоскоростное ударное нагружение. Высокая скорость деформирования материала в мельнице приводит к хрупкому разрушению даже пластичных материалов, которое характеризуется малой величиной пластической деформации, большой скоростью распределения трещин и малой энергией, необходимой для их разрушения [1]. К машинам данного типа относятся мельницы ударно-отражательного действия, имеющие целый ряд преимуществ перед измельчителями другого типа: низкие удельные энергозатраты, высокая тонина помола и небольшие габаритные размеры. Однако внедрение мельниц ударно-отражательного действия в промышленную практику сдерживается отсутствием надежного инженерного метода их расчета и недостаточной глубиной исследования протекающих в них процессов.

Одним из перспективных методов исследования сложных химико-технологических процессов является их формализация с помощью математических моделей [2], основой которых является математическое описание структуры потоков на рассматриваемом уровне иерархии физико-химических явлений и эффектов.

Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию характера движения газового потока в рабочей камере роторно-центробежной мельницы (РЦМ) с инерционно-гравитационной выгрузкой готового продукта. Конструктивные особенности и принцип работы данной мельницы ударно-отражательного действия подробно изложены в работах [3, 4]. Принимая во внимание тот факт, что РЦМ с инерционно-гравитационной выгрузкой готового продукта конструктивно подобна современным мельницам-вентиляторам (ВМ), то в основу теоретических исследований характера движения газового пото-

ка в РЦМ авторами была положена методика расчета ВМ, разработанная Волковинским В. А. [5], с учетом целого ряда других работ, таких, как [6, 7, 8], по аэродинамике воздушного потока для мельниц ударно-отражательного действия и роторно-вихревых камер.

При описании течения воздушного потока в РЦМ можно выделить две зоны: течение в роторе мельницы и в зоне измельчения (в кольцевом канале между выходной кромкой лопастей и отражательными стержнями мельницы). Рассмотрим отдельно каждую из зон.

### 1. Течение газового потока в роторе мельницы

Движение воздуха в рабочей камере РЦМ носит сложный, неустановившийся характер и является отрывным. Для упрощения расчета и анализа течения воздушной среды в рабочем колесе мельницы вместо трехмерной модели течения рассматривают двухмерную, сохраняющую основные свойства реального потока. Для расчета и анализа течения воздушного потока в рабочем колесе необходимо знать кинетические параметры потока перед и за вращающейся круговой решеткой, определяемые треугольниками скоростей [5, 8].

Для рабочего колеса РЦМ с радиальными лопастями треугольники скоростей газового потока при входе в межлопастный канал (с индексом 1) и при выходе из него (с индексом 2) представлены на рис. 1.

Воздух поступает в рабочую камеру РЦМ через входной патрубок в осевом направлении. Поскольку входной патрубок имеет цилиндрическую форму, то поле скоростей в сечении с минимальной площадью достаточно равномерно. Поэтому за характерную скорость газового потока ( $C_0$ , м/с) на входе в мельницу принимают среднерасходную скорость в сечении патрубка диаметром ( $D_0$ , м):

$$C_0 = \frac{V}{F_0} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D_0^2}, \text{ м/с,} \quad (1)$$

где  $V$  — производительность РЦМ по воздуху, м<sup>3</sup>/с;

$F_0$  — площадь сечения входного патрубка в крышке мельницы, м<sup>2</sup>;

$D_0$  — диаметр входного патрубка в крышке мельницы, м.

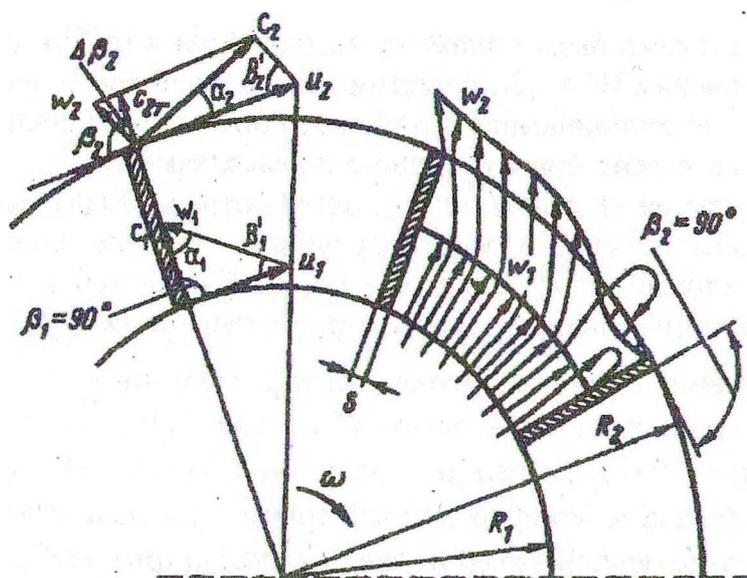


Рис. 1. Треугольники скоростей газового потока при входе в рабочее колесо роторно-центробежной мельницы и при выходе из него:

$C$  — абсолютные скорости;  $U$  — переносные скорости;  $W$  — относительные скорости;  $\omega$  — угловая скорость вращения ротора, рад/с;  $R_1$  — внутренний радиус рабочего колеса, м;  $R_2$  — внешний радиус рабочего колеса, м;  $S$  — толщина лопасти, м

В рабочем колесе РЦМ газовый поток отклоняется от осевого направления к радиальному. В связи с неравномерностью воздушного потока в сечениях каналов между лопастями рабочего колеса под скоростью потока в этих сечениях понимают осредненную величину. Для исследования течения воздуха в каналах рабочего колеса вводят подвижную систему координат, связанную с рабочим колесом мельницы и вращающуюся вместе с ним с угловой скоростью:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \text{ рад/с}, \quad (2)$$

где  $n$  — частота вращения рабочего колеса мельницы, об/мин.

Вектор абсолютной скорости газового потока ( $C_1$ , м/с) при входе на лопасти рабочего колеса мельницы направлен по радиусу от центра, а его значение с учетом загромождения сечения мелющими лопастями [9, 10] и в предположении равномерного заполнения потоком сечения входа в межлопастный канал составит:

$$C_1 = C_{1r} = \frac{V}{(\pi \cdot D_1 - Z \cdot S) \cdot h}, \text{ м/с}, \quad (3)$$

где  $D_1$  — внутренний диаметр рабочего колеса, м;  
 $Z$  — число лопастей на рабочем колесе мельницы, шт;  
 $S$  — толщина лопасти, м;  
 $h$  — высота лопасти, м.

Вектор окружной скорости газового потока при входе на лопасти мельницы ( $U_1$ , м/с) направлен перпендикулярно радиусу вращения колеса, а величина переносной скорости определяется из выражения

$$U_1 = \frac{D_1 \cdot \omega}{2}, \text{ м/с}. \quad (4)$$

Относительная скорость газового потока ( $W_1$ , м/с) при входе на лопасти мельницы равна разности абсолютной и окружной скоростей, а модуль ее при значении тангенциальной составляющей скорости, равной нулю ( $C_{1u} = 0$ ), при отсутствии устройства для закручивания потока на входе в колесо, вычисляется по формуле

$$W_1 = \sqrt{C_{1r}^2 + U_1^2}, \text{ м/с}. \quad (5)$$

Направление относительной скорости ( $W_1$ , м/с) определяется углом ( $\beta_1^1$ ) между вектором ( $W_1$ ) и касательной к окружности диаметром ( $D_1$ , м). Угол входа газового потока ( $\beta_1^1$ ) равен

$$\beta_1^1 = \arctg \frac{C_{1r}}{U_1}, \text{ град}. \quad (6)$$

Разность величин между углом входа на лопасти ( $\beta_1$ ) и углом входа газового потока ( $\beta_1^1$ ) определяет значение угла атаки:

$$\alpha_1 = \beta_1 - \beta_1^1, \text{ град}. \quad (7)$$

По аналогии с центробежными вентиляторами [9, 10] при увеличении производительности РЦМ по воздуху возрастает угол ( $\beta_1^1$ ), значение угла атаки ( $\alpha_1$ ) уменьшается и при больших значениях производительности угол атаки принимает отрицательное значение. При номинальных значениях производительности РЦМ по воздуху угол атаки можно принимать равным нулю.

Окружная скорость газового потока при выходе из рабочего колеса мельницы равна

$$U_2 = \frac{D_2 \cdot \omega}{2}, \text{ м/с}, \quad (8)$$

где  $D_2$  — наружный диаметр рабочего колеса мельницы, м.

Вектор абсолютной скорости газового потока на выходе из рабочего колеса ( $C_2$ , м/с) в плоскости вращения можно разложить на следующие две составляющие (рис. 1.): радиальную ( $C_{2R}$ ) и тангенциальную ( $C_{2U}$ ).

Тангенциальная составляющая вектора абсолютной скорости газового потока ( $C_{2U}$ , м/с) на выходе из рабочего колеса мельницы может быть рассчитана по следующей формуле:

$$C_{2u} = (1 - K) \cdot U_2, \text{ м/с}, \quad (9)$$

где  $K = \text{EXP}\left(\frac{-\pi \cdot h}{t}\right)$  — коэффициент прозрачности однородной решетки с прямыми лопастями (согласно аэродинамической теории решеток [9]);

$t = \frac{\pi \cdot D_2}{Z}$  — шаг установки лопастей на рабочем колесе, м.

Радиальная составляющая вектора абсолютной скорости газового потока ( $C_{2R}$ , м/с) на выходе из рабочего колеса мельницы определяется по формуле

$$C_{2r} = \frac{V}{(\pi \cdot D_2 - Z \cdot S) \cdot h}, \text{ м/с}. \quad (10)$$

Модуль абсолютной скорости газового потока ( $C_2$ , м/с) на выходе из рабочего колеса мельницы равен

$$C_2 = \sqrt{C_{2r}^2 + C_{2u}^2}, \text{ м/с}. \quad (11)$$

Относительная скорость газового потока ( $W_2$ , м/с) на выходе из рабочего колеса мельницы определяется разностью векторов абсолютной ( $C_2$ , м/с) и окружной ( $U_2$ , м/с) скоростей:

$$W_2 = \sqrt{C_{2r}^2 + (U_2 - C_{2u})^2}, \text{ м/с}. \quad (12)$$

Направление скорости ( $C_2$ , м/с) определяется углом атаки ( $\alpha_2$ ) между векторами абсолютной и окружной скоростей:

$$\alpha_2 = \arctg \frac{C_{2r}}{C_{2u}}, \text{ град.} \quad (13)$$

Направление скорости ( $W_2$ , м/с) определяется углом выхода газового потока ( $\beta_2^1$ ), который меньше угла ( $\beta_2$ ) выхода потоков с лопастей. Это объясняется отставанием газового потока от лопастей рабочего колеса в относительном движении, обусловленном конечным числом лопастей.

$$\beta_2^1 = \arctg \frac{C_{2r}}{U_2 - C_{2u}}, \text{ град.} \quad (14)$$

Угол отставания газового потока ( $\Delta\beta_2$ ) на выходе из рабочего колеса определяется разностью углов ( $\beta_2$ ) и ( $\beta_2^1$ ):

$$\Delta\beta_2 = \beta_2 - \beta_2^1, \text{ град.} \quad (15)$$

## II. Течение газового потока в зоне измельчения мельницы

Расчет скоростей газового потока в кольцевом канале между выходной кромкой лопастей и отражательными стержнями Р-ЦМ (или в зоне измельчения) можно осуществить при помощи методики, подробно изложенной в работе [10].

Треугольники скоростей газового потока при его движении в зоне измельчения мельницы представлены на рис. 2.

Пусть ( $R_3$ , м) и ( $C_3$ , м/с) — соответственно текущий радиус и абсолютная скорость газового потока в начале кольцевого канала, а ( $R$ , м) и ( $C$ , м/с) — текущий радиус и абсолютная скорость газового потока в любой точке произвольного сечения канала (см. рис. 2).

Тангенциальную составляющую ( $C_u$ , м/с) абсолютной скорости газового потока ( $C$ , м/с) можно определить по условию постоянства момента скорости  $RC_u = \text{const}$  (поскольку влияние сил трения об отбойную поверхность не учитывается):

$$R_3 \cdot C_{3u} = R \cdot C_u; \quad C_u = C_{3u} \cdot \frac{R_3}{R}. \quad (16)$$

Радиальную составляющую ( $C_R$ , м/с) абсолютной скорости газового потока ( $C$ , м/с) можно найти с помощью уравнения неразрывности ( $h = \text{const}$ ):

$$V = 2 \cdot \pi \cdot R_3 \cdot h \cdot \mu \cdot C_{3r} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h \cdot \mu \cdot C_r, \quad (17)$$

где  $\mu$  — коэффициент заполнения сечения ротора мельницы активным потоком.

Отсюда находим

$$C_r = C_{3r} \cdot \frac{R_3}{R}. \quad (18)$$

Таким образом, радиальные составляющие скорости газового потока находятся в таком же соотношении, как и тангенциальные составляющие. Следовательно, параллелограммы скоростей подобны и существует равенство  $\alpha \approx \alpha_3$  (см. рис. 2). Иными словами, линиями тока являются логарифмические спирали. Поскольку проекции скорости ( $C$ , м/с) изменяются обратно пропорционально радиусу сечения, то и сама скорость изменяется так же:

$$C = C_3 \cdot \frac{R_3}{R}. \quad (19)$$

В первом приближении можно принять, что  $R_3 \approx R_2$ , а  $C_3 \approx C_2$ . Тогда при помощи формул (16), (18), (19) легко можно определить скорость газового потока в зоне измельчения РЦМ.

Что же касается скорости газового потока в непосредственной близости от отбойной поверхности мельницы, то тангенциальная составляющая ( $C_U$ , м/с) абсолютной скорости потока ( $C$ , м/с) принимается равной нулю, так как отражательные стержни, выполняющие роль отбойной поверхности, жестко зафиксированы в корпусе мельницы. Радиальная же составляющая ( $C_R$ , м/с) абсолютной скорости газового потока ( $C$ , м/с) в непосредственной близости от отбойной поверхности мельницы не равна нулю, так как отражательные стержни жестко зафиксированы вдоль цилиндрической обечайки корпуса измельчителя с определенным зазором, имеющим прямоугольную форму и равным  $\delta = 1 - 5$  мм (см. рис. 2).

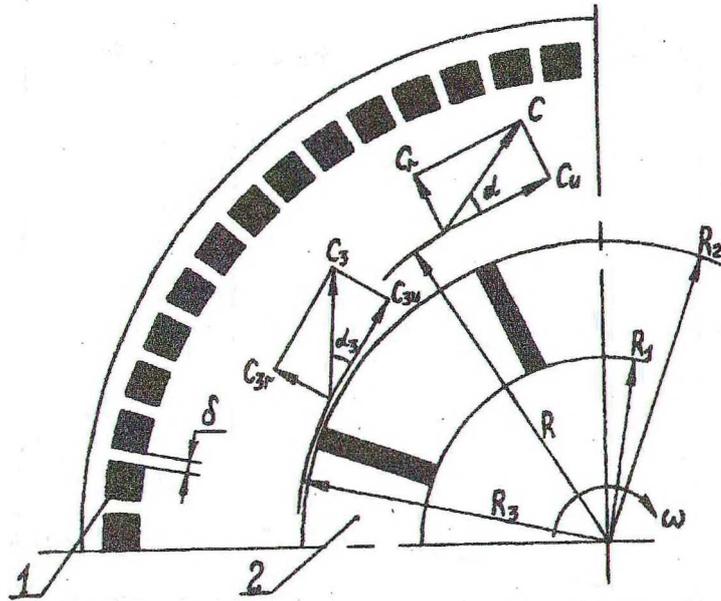


Рис. 2. Треугольники скоростей газового потока в кольцевом канале между отражательными стержнями (1) и выходной кромкой лопастей рабочего колеса (2) роторно-центробежной мельницы:

$\omega$  — угловая скорость вращения ротора, рад/с;  $R_1$  — внутренний радиус рабочего колеса, м;  $R_2$  — внешний радиус рабочего колеса, м;  $R$ ,  $R_3$  — текущий радиус движения газового потока, м;  $\delta$  — ширина зазора между отражательными стержнями мельницы, м

Радиальная составляющая ( $C_R^1$ , м/с) абсолютной скорости газового потока ( $C$ , м/с) в прямоугольном зазоре между отражательными стержнями мельницы может быть вычислена по следующей формуле:

$$C_R^1 = \frac{V}{l \cdot \delta \cdot p}, \text{ м/с}, \quad (20)$$

где  $l$  — высота зазора, м;  
 $\delta$  — ширина зазора, м;  
 $p$  — количество зазоров, шт.

По предложенной выше методике, с помощью ЭВМ, авторами был проведен расчет скорости движения газового потока в рабочей камере РЦМ. Так как прототипом данного измельчителя является пылевой центробежный вентилятор типа ЦП 6-28, то производительность мельницы по воздуху, согласно данным Соломаховой Т. С. [11], составляла  $V = 0,45 \text{ м}^3/\text{с}$ . Результаты расчета наглядно представлены на рис. 3 и рис. 4.

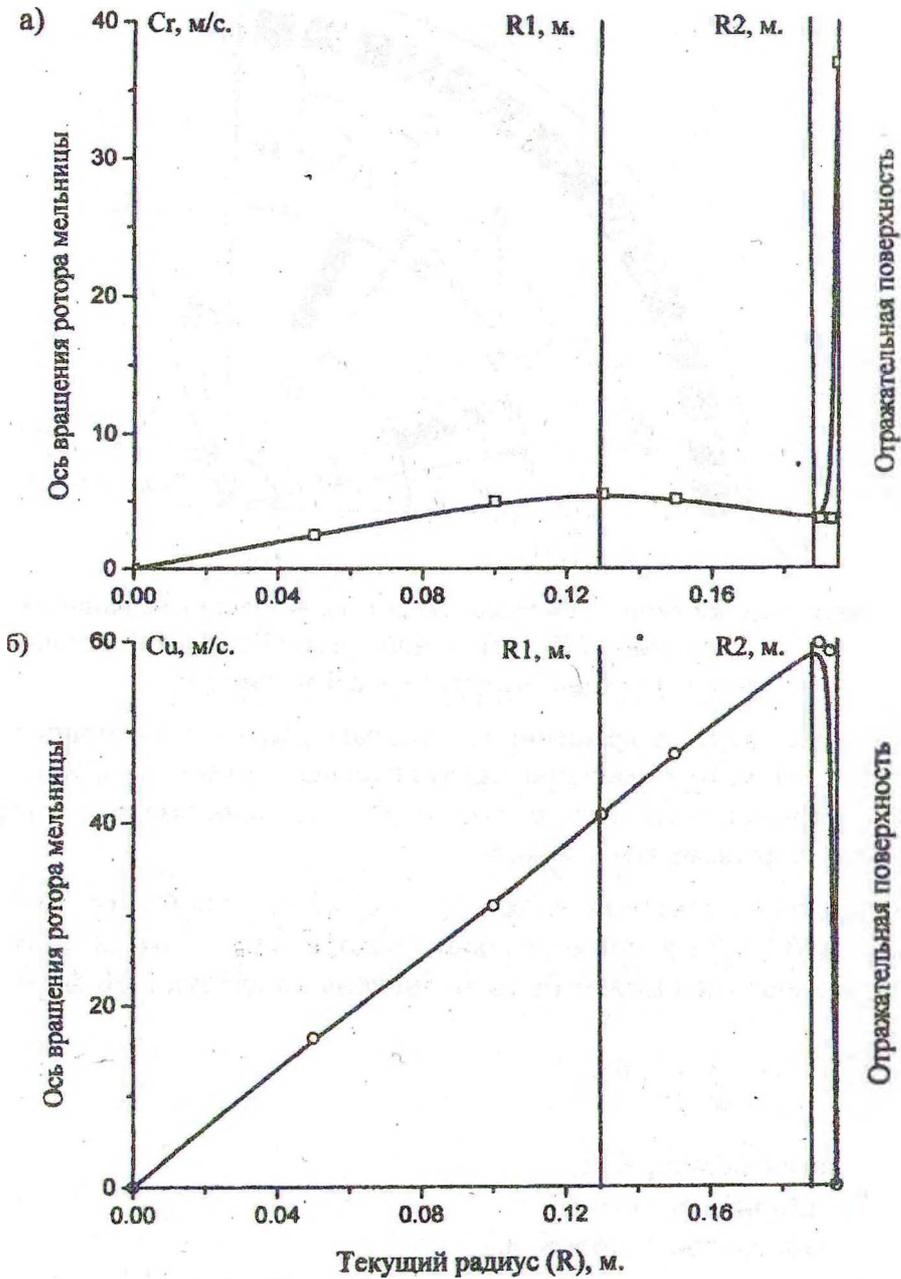


Рис. 3. Профиль распределения скорости движения газового потока в рабочей камере роторно-центробежной мельницы:

а) для радиальной составляющей ( $C_r$ , м/с) абсолютной скорости газового потока ( $C$ , м/с); б) для тангенциальной составляющей ( $C_u$ , м/с) абсолютной скорости газового потока ( $C$ , м/с)

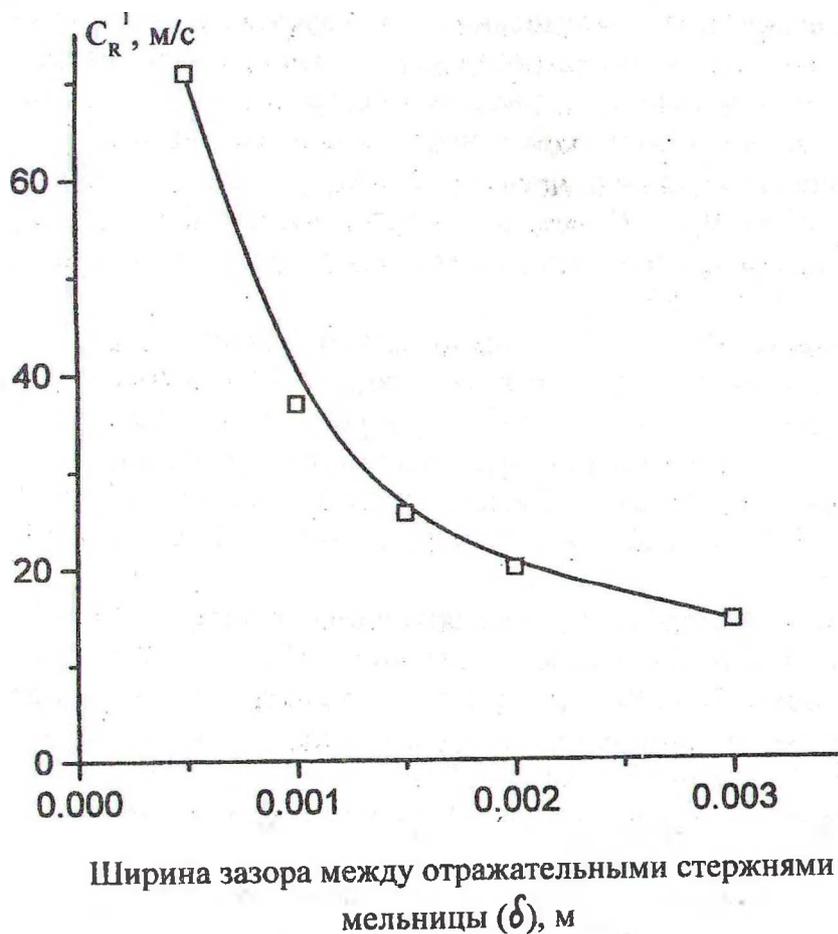


Рис. 4. Зависимость радиальной составляющей ( $C_R^1$ , м/с) абсолютной скорости движения газового потока ( $C$ , м/с) от ширины зазора ( $\delta$ , м) между отражательными стержнями роторно-центробежной мельницы ( $\omega = 314,2$  рад/с)

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ионов В. И., Огибалов П. М. Напряжения в телах при импульсном нагружении. — М.: Высшая школа, 1975. — 463 с.
2. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. — М.: Наука, 1976. — 288 с.
3. Гарабажиу А. А., Левданский Э. И., Левданский А. Э. Разработка и исследование роторно-центробежной мельницы с инерционно-гравитационной выгрузкой готового продукта // Труды БГТУ. Сер. III. Химия и хим. технология. 1998. Вып. VI. — С. 149 - 155.

4. Левданский Э. И., Левданский А. Э, Гарабажиу А. А. Энергосберегающие роторно-центробежные мельницы для измельчения сыпучих и кусковых материалов // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности: Материалы междунар. науч.-техн. конф., 27-28 окт. 1998 г. / Минист. образ. Респ. Беларусь. Концерн «БЕЛНЕФТЕХИМ». Белорус. хим. общество. Белорус. гос. технолог. ун-т. — Мн.: БГТУ, 1998. — С. 36 - 38.
5. Волковинский В. А. Системы пылеприготовления с мельницами-вентиляторами. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 384 с.
6. Пискунов А. В., Клочков Н. В., Афонин С. Б. Математическая модель аэродинамики воздушного потока в мельнице // Гидродинамика, тепло- и массообмен в зернистых средах: Межвуз. сб. науч. тр. / Ивановский хим.-технолог. ин-т. — Иваново, 1985. — С. 14 - 18.
7. Штым А. Н. Аэродинамика циклонно-вихревых камер. — Владивосток: Издат. Дальневосточного ун-та, 1985. — 200 с.
8. Труханович В. Б. Закономерности газоцентробежного разделения суспензии в роторных аппаратах: Дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. — Минск, 1991. — 150 с.
9. Центробежные вентиляторы / Под ред. Т. С. Соломаховой. — М.: Машиностроение, 1975. — 416 с.
10. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 380 с.
11. Соломахова Т. С., Чебышева К. В. Центробежные вентиляторы. — М.: Машиностроение, 1980. — 326 с.

УДК 666.961

И. И. Круглов, аспирант;  
П. Е. Вайтехович, доцент

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАВИТАЦИИ НА ПРОЦЕСС РАСПУШКИ АСБЕСТА

The investigation of cavitation influence on the process of asbestos treatment.

Неспособность выдерживать действие больших растягивающих напряжений, приводящая при значительном понижении давления к кавитации, т.е. к потере сплошности и образованию внутри жидкости паровых или газовых каверн, является фундаментальным свойством