

DOI: 10.12737/23478

Бойчук И.П., канд. техн. наук, доц.,
Перелыгин Д.Н., ст. преп.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГАЗОПЫЛЕВОЙ ПОТОК В ВИХРЕ-АКУСТИЧЕСКОМ ДИСПЕРГАТОРЕ

igor_boichuk@mail.ru

В статье рассмотрено движение газодисперсного потока в камере вихре – акустического диспергатора. Проведено моделирование акустического воздействия на течение закрученного потока. Показано, что акустическое воздействие на течение потока приводит к его торможению. При этом течение потока в пограничном слое принимает колебательный характер. Моделирование позволило установить характер распределения акустических колебаний при использовании одиночных и последовательно расположенных генераторов акустических волн, усиливающийся эффект их торможения.

Ключевые слова: вихре- акустический диспергатор, акустическое воздействие, течение около каверны.

Введение. Переработка отходов горноперерабатывающих производств, как правило, связана с потребностями смежных отраслей в сырьевых материалах. Результаты многочисленных исследований по комплексной переработке различных техногенных материалов подтвердили технико-экономическую целесообразность их использования для обеспечения ресурсосбережения и получения новых видов продукции [1–3].

Одним из наиболее перспективных направлений утилизации промышленных отходов является их комплексное использование в производстве строительных материалов, что позволяет до 40 % удовлетворить потребности в сырье этой важнейшей отрасли промышленности. Применение отходов промышленности позволяет на 10–30 % снизить затраты на изготовление строительных материалов по сравнению с производством их из природного сырья. Экономия капитальных вложений при этом составляет 35–50 % [4–5].

В современной технологии производства строительных материалов тонкодисперсные порошки являются одним из основополагающих компонентов, которые существенным образом влияют на качество готовой продукции [6]. Тонкость помола материалов имеет важное значение для интенсификации различных технологических процессов. Однако получение высокодисперсного продукта затруднено вследствие повышенных энергозатрат на измельчение материалов, а также их абразивности при интенсивном истирающем воздействии, которое вызывает высокий износ мелющих тел и других частей помольного агрегата. Это приводит к повышению стоимости процесса измельчения, а также к получению некачественного, загрязненного продукта [7, 8]. Согласно данным [9–10] энерго-

затраты на измельчение различных материалов достигают 20 % от общего энергопотребления на производство продукции.

Наиболее перспективным методом для тонкого и сверхтонкого помола различных материалов, используемых в малотоннажных и инновационных технологиях, является струйный метод измельчения [11–14]. Однако при всех преимуществах данного метода остаются нерешенными проблемные задачи снижения энергоемкости процесса, абразивного износа рабочих органов, повышение эффективности аспирационной системы и др.

На наш взгляд, одним из перспективных типов струйных мельниц являются вихре-акустические диспергаторы с комплексным динамическим воздействием на измельчаемый материал. В таких мельницах измельчение исходного материала интенсифицируется за счет создания зон звуковых и ультразвуковых колебаний, поперечных к вращающемуся газодисперсному потоку [15–18], что приводит к усталостному разрушению измельчаемых частиц и получению высокодисперсного продукта.

Для интенсификации процесса разрушения частиц в систему вводят излучатели звука – динамические (вращающиеся) и статические (свистковые) сирены. К статическим сиренам относятся, в частности, такие генераторы акустических колебаний как виброструйные свистки. В случае наличия генераторов колебаний процесс движения газодисперсной фазы в камере диспергатора приводит к возникновению акустического излучения. В литературе [19–20] указывается, что акустическое излучение может оказывать влияние на движение закрученного потока с частицами. Это влияние приводит, с одной стороны, к силовому воздействию на частицу и к воздействию на поток с другой.

Силовое воздействие на частицы сводится к следующим вариантам. Во первых, происходит поглощение частицами звукового излучения. Излучения больших частот лучше поглощаются мелкими частицами твердой фазы, а малых частот – крупными [21]. Поглощение увеличивает уровень напряжения в частицах. Такие эффекты полезны для разрушения частиц при ударе или даже их саморазрушения. Акустические возмущения вносят в процесс разрушения дополнительные механизмы [22]. Во-вторых, происходит воздействие на частицу знакопеременной нагрузки от звукового излучения. Акустическое излучение приводит к воздействию на частицу различных сил: силы радиационного дрейфа, обусловленной действием радиационного давления; силы дрейфа, обусловленной периодическим изменением вязкости среды; силы, обусловленной разностью плотностей частицы и несущей среды [21]. Такое воздействие приводит к тому, что частицы менее 0,01 мм, которые двигаются в некотором удалении от стенки, могут вовлекаться в колебательное движение высокоскоростного потока под действием волн сжатия и разряжения [21]. Под действием этих волн частицы испытывают чередующиеся сжимающие и растягивающие напряжения [23]. Все это ведет к усилению внутреннего напряженно-деформированного состояния частиц, способствует умножению и росту микродефектов внутренней структуры частиц и их разрушению [24]. При этом успешно используется физическое свойство твердых кристаллических материалов - их усталостная прочность ниже статиче-

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\varphi^2}{r} = F_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} - \frac{V_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_\varphi}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} + \frac{V_r V_\varphi}{r} = F_\varphi - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + v \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial z^2} - \frac{V_\varphi}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

где t – время, r, φ, z – цилиндрические координаты, V_r, V_φ, V_z – компоненты вектора скорости, p – давление, ρ – плотность, v – вязкость.

Предположим, что вихревую камеру заполняет вязкая жидкость, которая вращается вокруг центральной оси с постоянной угловой скоростью. Согласно [26], течение жидкости в вихревой камере можно принять ламинарным и установившимся с отсутствующими массовыми силами, а движение двухфазного потока можно

ской прочности [25], т. е. для ускорения процесса усталостного объемного разрушения частиц кроме увеличения квазистатических (безударных) периодических нагрузок выгодно увеличивать как частоту, так и амплитуду высокочастотных циклических возмущений параметров потока в области измельчения.

Воздействие на поток. Воздействие акустических колебаний на течение ведет к изменению значения коэффициента сопротивления трения. Колебательное движение возле стенки приводит к увеличению расхода энергоносителя по сечению. Следовательно, значение коэффициента сопротивления трения должно быть меньше, чем у плоской полуограниченной струи. У потока при воздействии акустических колебаний торможение полуограниченной закрученной струи идет намного медленнее, а уменьшение коэффициента сопротивления трению делает профиль скорости вдоль стенки более пологим в сравнении с потоком без воздействия акустических колебаний [26]. Это приводит к снижениям потерь энергии, увеличению расхода и уменьшению количества ударов частиц о стенки камеры.

Определение аэродинамических характеристик потока. Основное течение (ядро потока). Так как вихревая камера представляет собой цилиндр с вращающимся в ней газом, то движение потока воздуха может быть описано уравнениями Навье-Стокса совместно с уравнением неразрывности в цилиндрической системе координат.

рассматривать как движение единой жидкости со свойствами несущего потока.

При этих предположениях из системы (1)-(4) получим систему

$$\frac{dp}{dr} = \rho \frac{V_\varphi^2}{r}, \quad (5)$$

$$\frac{d^2 V_\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dV_\varphi}{dr} - \frac{V_\varphi}{r^2} = 0, \quad (6)$$

решением которой для тангенциальной скорости и давления являются уравнения [26]

$$V_{\varphi}(r) = V_{\varphi\max} \left(\frac{r}{R_c}\right)^{\frac{k}{k-1}}, p(r) = \frac{\rho}{2} \frac{k-1}{k} \left(\frac{r}{R_c}\right)^{\frac{2k}{k-1}} V_{\varphi\max}^2 + p_0 \quad (7)$$

где $k = \frac{c_p}{c_v}$, а R_c – радиус вихревой камеры.

Формулы (7) описывает общую структуру характерных для вынужденного вихря течений. Распределение скорости $v_{\varphi}(r)$ показано на рис. 1.

Пограничный слой. Распределение скорости в пристенном течении определяется из теории Кармана и для установившегося течения определяется соотношением [27]

$$V_x = U \left(\frac{3}{2} \frac{y}{\delta} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\delta} \right)^3 \right) \quad (11)$$

где δ – толщина пограничного слоя, $U = (V_x)_{y=\delta}$ – скорость на границе пограничного слоя. На рис. 2 и 3 показаны распределение скорости в пограничном слое и профиль скорости в вихревой камере.

Известно [26], что основное влияние на течение звуковая волна оказывает в пограничном слое. Плоская звуковая волна, создаваемая генератором акустических колебаний, имеет вид [28]

$$v_x = v_{0x}(y) \cos(\omega t - kx), v_y = v_{0y}(y) \cos(\omega t - kx). \quad (12)$$

$$v_x = U \left(\frac{3}{2} \mu - \frac{1}{2} (\mu)^3 \right) - \frac{v_0^2}{4c_0} (\mu - \mu^2) \sin(2kx),$$

где c_0 – скорость звука.

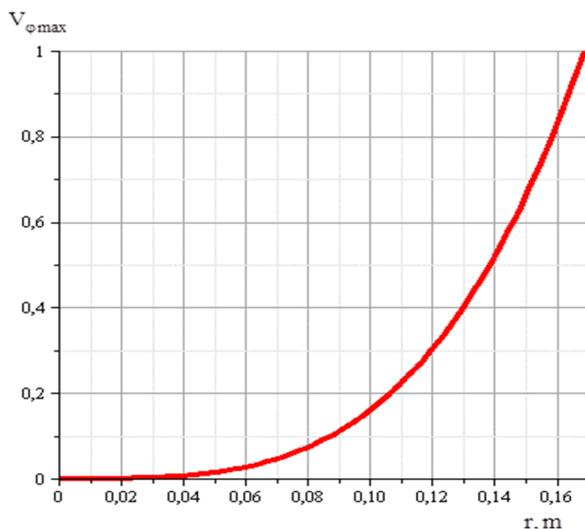


Рис. 1. Распределение тангенциальной скорости по радиусу камеры

где x, y – декартовы координаты, k – волновое число, ω – круговая частота.

В тонком пограничном слое воздействие звуковой волны на основное течение приводит к изменению скорости течения. В стоячей волне звуковая волна в пограничном слое вызывает течение, сводящееся к образованию вихрей определенной величины [28]. Скорость такого течения определяется формулой

$$v_x = -\frac{v_0^2}{4c_0} (\mu - \mu^2) \sin(2kx), v_y = -\frac{v_0^2}{4c_0} k \delta \mu^2 \cos(2kx), \quad (13)$$

где $\mu = \frac{y}{\delta}$.

По данным Акунова В. Г. [29] в однофазной струе образуется от 10 до 15 стоячих волн. Поэтому течение (13), вызванное в пограничном слое звуковой волной, накладываясь на течение (11), будет приводить, по всей вероятности, к уменьшению скорости. При этом расположенные подряд несколько генераторов акустических колебаний будут приводить к большему торможению потока по сравнению с одиночным.

Сложение (11) и (13) даст скорость в пограничном слое при наложении на основной поток течения, вызванного звуковой волной

$$v_y = -\frac{v_0^2}{4c_0} k \delta \mu^2 \cos(2kx). \quad (19)$$

Поле скоростей (19) представлено на рис.4. На рис. 4–6 показан характер течения в пограничном слое.

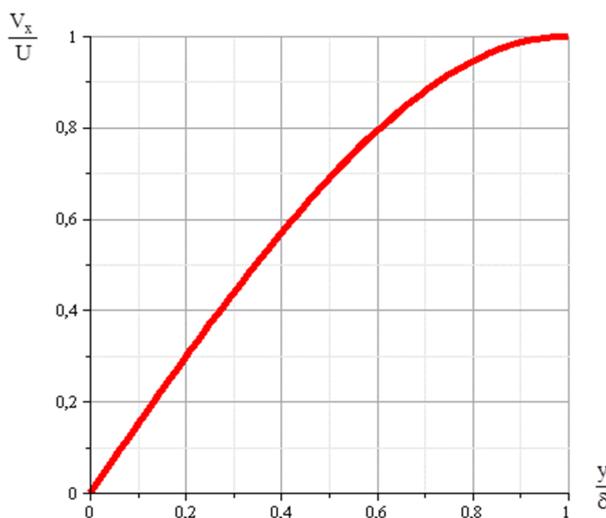


Рис. 2. Распределение тангенциальной скорости в пограничном слое

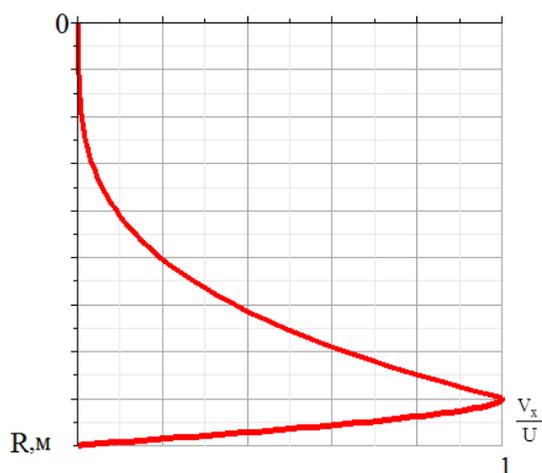


Рис. 3. Профиль скорости в вихревой камере

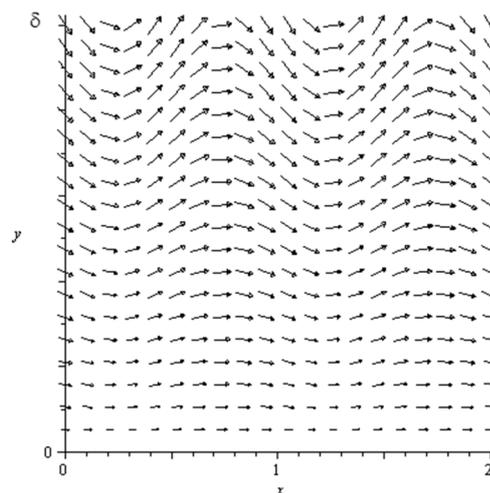


Рис. 4. Поле скоростей в пограничном слое

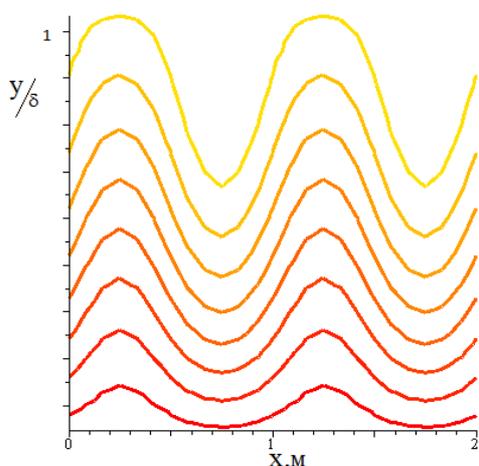


Рис. 5. Распределение скорости v_x в пограничном слое

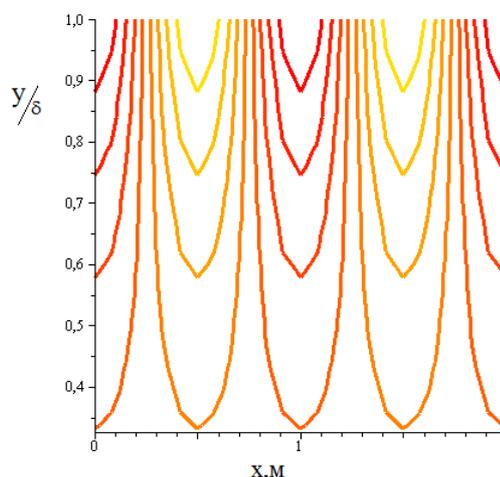


Рис. 6. Распределение скорости v_y в пограничном слое

Движения потока в зонах разряжения-сжатия. Акустические генераторы, являющиеся источником упругих колебаний, представляют собой каверны круглой или прямоугольной формы (рис.7). Для течений около и внутри двумерных каверн характерен отрыв потока у

передней стенки и присоединение его у задней [30]. Внутри каверны при этом возникает возвратно-циркуляционное течение. При этом в каверне возникают зоны вторичных отрывов потока. Это течение зависит от геометрических параметров каверны.

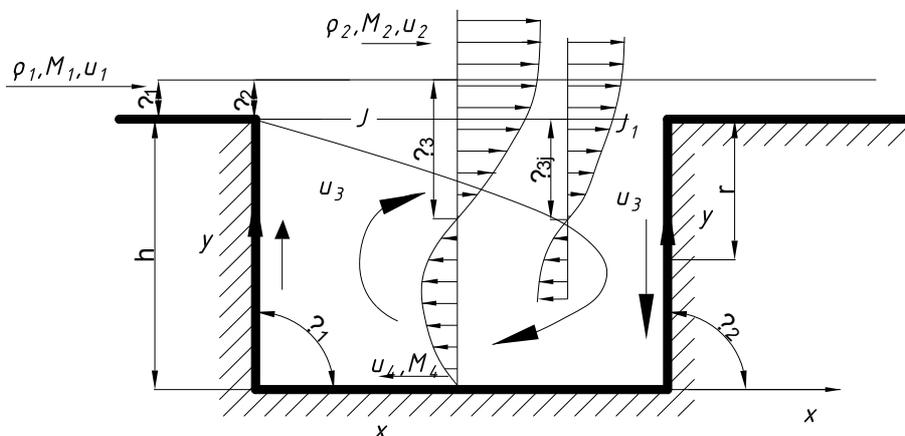


Рис. 7. Схема течения потока в камере резонатора

В трехмерных течениях также наблюдаются возвратные течения, подобные двумерным. Отличительной особенностью является наличие на боковых стенках топологических структур типа «фокус» [31]. При этом фокус может быть устойчивым и неустойчивым. Устойчивый фокус распространяется от стенки в поток как концентрическая вихревая линия, обладающая значительной энергией. Неустойчивый фокус – присоединение вихревого жгута к стенке. Наличие данных структур говорит о том, что течение газа внутри каверны происходит вокруг вихря. Однако, поскольку через вихрь происходит значительное перетекание массы между стенками, то это свидетельствует о поперечном течении внутри каверны. Такое течение взаимодействует с основным потоком и приводит к возникновению торообразного вихря. Этот вихрь поддерживает состояние трехмерности потока, воздействует на сдвиговый слой и приводит к несимметричному затеканию потока в каверну.

Как подтверждают эксперименты, течение внутри камеры является нестационарным, а

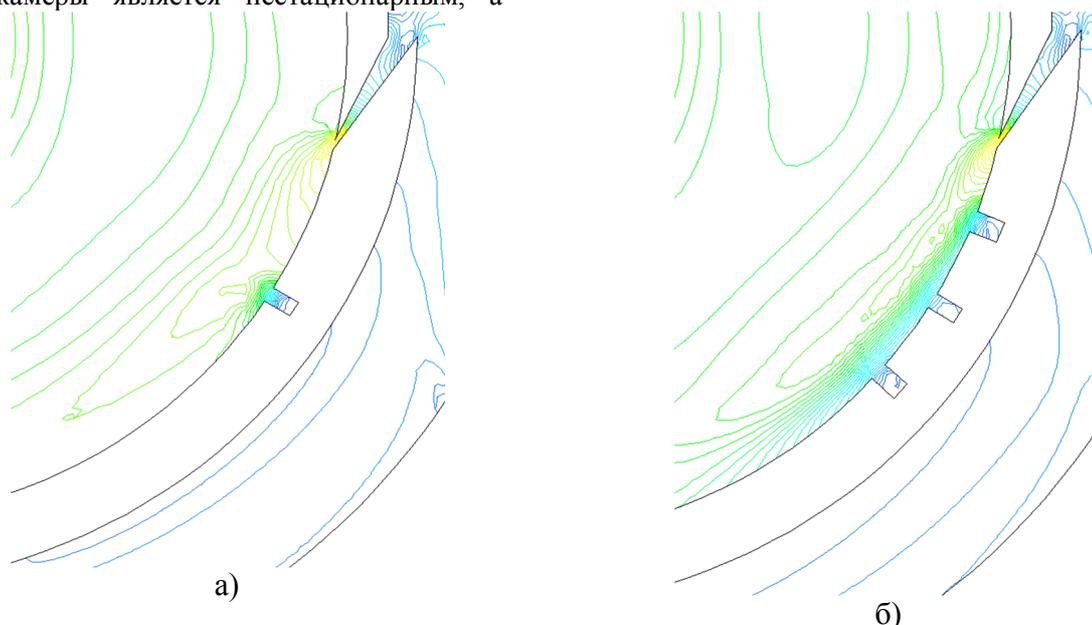


Рис. 8. Картина течения около а) одной и б) трех каверн

Из рисунков видно, что расположенные подряд несколько каверн значительно больше тормозят поток по сравнению с одной каверной.

Заключение. В работе выполнено моделирование акустического воздействия на течение закрученного потока в вихре – акустическом диспергаторе. Установлено, что акустическое воздействие на течение потока приводит к его торможению. При этом течение потока в пограничном слое принимает колебательный характер.

Моделирование позволило установить характер распределения акустических колебаний при использовании одиночных и последователь-

но расположенных генераторов акустических волн, усиливающийся эффект их торможения.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований реализованы в производственных условиях при испытании опытно-промышленной технологической линии.

Численное моделирование течения в камере диспергатора. Для проверки сделанных предположений о влиянии числа генераторов на поток было выполнено численное моделирование квазистационарного трехмерного течения закрученного потока в камере вихре - акустического диспергатора. Картина течения около каверны, полученная в результате численного моделирования, показана на рис.8.

но расположенных генераторов акустических волн, усиливающийся эффект их торможения.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований реализованы в производственных условиях при испытании опытно-промышленной технологической линии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мосинец В.Н., Грязнов М.В. Горные работы и окружающая среда. М.: Мысль, 1978. 293 с.
2. Ласкорин Б.И., Барский Л.А., Персиц В.З. Безотходная технология переработки мине-

рального сырья. Системный анализ. М.: Недра, 1984. 334 с.

3. Ситтиг М. Извлечение металлов и неорганических соединений из отходов, пер.сангл. М.: Металлургия, 1985. 408 с.

4. Доненов Б. Минеральные ресурсы в современной экономике Казахстана НТЦМИ: отчет. Алматы, 2004. 136 с.

5. Голиков В.И. Цидаев Т.С., Цидаев Б.С. Хвосты обогащения металлургических руд как сырье для производства строительных материалов // Сухие строительные смеси. 2015. №4. С. 21–25.

6. Львов В.В. Новые технологии в тонком и сверхтонком измельчении минерального сырья. Записки Горного института. 2013. Т.202. С. 115–117.

7. Березовский С.Н. Березовский Н.И. Комплексное освоение, использование сырья и вскрышных пород для производства строительных материалов // Вестник Белорусско-Российского университета. 2009. №3. С. 155–161.

8. Перельгин Д.Н., Севостьянов В.С., Бойчук И.П., Кузнецов И.А. Исследование ударного контакта абразивных частиц с футеровкой вихре-акустического диспергатора. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №2. С. 122–125.

9. Гончаров С.А., Ананьев П.П. Энергосбережение при подготовке руд к обогащению на железорудных и золоторудных горно-обогатительных коинатах // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2009. №3. С. 91–95.

10. Ракаев А.И. Шумилов П.А. Закономерности измельчения бедных медно-никелевых руд в барабанных мельницах // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2009. Т. 12. №4. С.638–643.

11. Постникова И.В., Блиничев В.Н. Кравчик Я. Струйные мельницы // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2005. №2(42). 144–151.

12. Кравченко В.П. Активация доменных шлаков // Вестник Приазовского державного технического университета. Технические науки. 2010. №2. С. 17–20.

13. Федотов К.В., Дмитриев В.И. Изменение технологических свойств руды при измельчении в противоточно-вихревых струях // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2010. С.129–132.

14. Гарабажиу А.А. Разработка и исследование вихревой мельницы с непрерывной проточной классификацией готового продукта: Автореф. дисс. канд. техн. наук / Минск, 2000.

15. Патент РФ №2226432. Вихреакустический диспергатор. Севостьянов В.С., Лесовик В.С., Перельгин Д.Н., Горлов А.С., Нечаев С.П. 10.04.2004, Бюл. №10

16. Патент РФ №2250138. Вихреакустический диспергатор. Гридчин А.М., Севостьянов В.С., Лесовик В.С., Горлов А.С., перельгин Д.Н., Федоренко Б.З. 20.04.2005, Бюл. №11.

17. Патент РФ №2317147. Вихреакустический диспергатор-смеситель (варианты). Севостьянов В.С., Гридчин А.М., Нечаев С.П., Лесовик В.С., Горлов А.С., Перельгин Д.Н. 28.02.2008. Бюл. №5

18. Севостьянов В.С., Перельгин Д.Н., Уральский В.И., Горлов А.С., Глаголев Е.С., Бабаевский А.Н. Разработка и исследования энергосберегающего помольного оборудования для высокодисперсного измельчения материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №3. С.76–80.

19. Патент РФ 2013134. Газодинамическое устройство тонкого измельчения. Артемьев В.К. 28.02.2008. Бюл. №5

20. Патент РФ №2103070. Способ тонкого или сверхтонкого измельчения полидисперсных частиц кристаллических материалов. Карданов Ю.Х.

21. Захаров Ю.А. Измельчение дисперсных материалов в вихревых мельницах при воздействии акустических колебаний. Автореф. дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2001. 18 с.

22. Патент РФ № 96109854/03, 14.05.1996. Шостак В. В., Кулаков М. Па. Способ измельчения материалов в потоке энергоносителя и устройство вихревого помола для его осуществления // Патент РФ № 2100082. 1997.

23. Патент РФ № 93053658/33, 06.12.1993. Артемьев В.К.; Карданов Ю.Х. Способ сверхтонкого измельчения материалов // Патент РФ № 2070094. 1996.

24. Основы физики и техники ультразвука. Б. А. Агранат, М. Н. Дубровин, Н. Н. Хавский. М.: Высш. шк., 1987. 352 с.

25. Голдстейн М.Е. Аэроакустика. М.: Машиностроение, 1981. 294 с.

26. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика, Ч.2 М.: Физматгиз, 1963. 728 с.

27. Агранат Б.А. Основы физики и техники ультразвука Москва. Высшая школа, 1987. 352.

28. Кочин Н.Е. Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. М.: Физматгиз, 1963. 728 с.

29. Акунов В.И. Струйные мельницы. Элементы теории и расчета. М.: Государственное

научно-техническое изд-во машиностроительной литературы, 1962. 265 с.

30. Чжен П. Управление отрывном потоком. М.: пер. с англ, Мир. 1979.

31. Антонов А.М. Численное и экспериментальное исследование сверхзвукового обтекания выемки. Автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. физ-мат. наук 1994 г. Москва.

Boychuk I.P., Perelygin D.N.

INTEGRATED RESEARCHES OF ACOUSTICAL EXPOSURE ON GAS-DUST FLOW IN THE VORTEX-ACOUSTIC DISPERSER

The article deals with the movement of gas-dispersed flow in the chamber of vortex - acoustic disperser. The simulation of the acoustic impact on the course of the swirling flow. It is shown that the acoustic effect for a flow leads to its inhibition. At the same time for the flow in the boundary layer takes oscillatory. Modeling has allowed to establish the nature of the distribution of acoustic oscillations by using single and successive acoustic wave generators, enhances the effect of braking.

Key words: *vortex - acoustic disperser, acoustic impact, the gas flow around the cavity*

Бойчук Игорь Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: igor_boichuk@mail.ru

Перелыгин Дмитрий Николаевич, старший преподаватель кафедры технологических комплексов, машин и механизмов.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: mehanikus@mail.ru