

Н.С. ПРЯДКО, канд. техн. наук,

Е.В. ТЕРНОВАЯ

(Украина, Днепропетровск, Институт технической механики НАНУ и ГКАУ)

АЭРОАКУСТИКА ПОМОЛЬНЫХ КАМЕР РАЗЛИЧНОГО ТИПОРАЗМЕРА

Введение. Турбулентные двухфазные течения с твердыми частицами широко распространены в природе и во многих практических приложениях. К техническим устройствам, в которых используются газодисперсные потоки, относятся системы газоочистки и пневмотранспорта, струйные мельницы и различные энергетические установки. Течение смеси воздуха с твердыми частицами представляет собой сложную систему, поведение которой определяется взаимодействием большого количества факторов. Присутствие дисперсной примеси даже в малых концентрациях может кардинально менять структуру потока. Прежде всего, это связано с разнообразием свойств используемых частиц, что может приводить к реализации большого числа режимов течения газодисперсного потока. Изменение концентрации и размера частиц может вызвать как количественную, так и качественную перестройку течения. Широкое использование в практических приложениях газодисперсных потоков побудило проведение многочисленных исследований гидромеханики течений с твердыми частицами. Исследования газоструйного измельчения сыпучих материалов в настоящее время в основном направлены на повышение эффективности, снижение энергозатрат и стоимости измельчения, износа и металлоемкости измельчителей, увеличение их долговечности.

Анализ предыдущих публикаций и постановка задачи. К настоящему времени опубликован ряд работ [1-3], содержащих различные аспекты определения характеристик противоточных измельчителей. Они позволяют представить общую картину течений и разработать методику расчета газоструйного измельчителя на основе экспериментальных данных. Иногда упрощения и неточности в моделировании приводят к противоречиям, что связано с недостаточно полным учетом микроструктуры турбулентности [4].

Газоструйный измельчитель определяют, как правило, следующими характеристиками: производительностью мельницы, дисперсностью продукта измельчения, энергозатратами, удельным износом конструктивных элементов, расходом, давлением и температурой энергоносителя. Основными размерами, определяющими эти характеристики, являются длина L_{mp} и диаметр d_T разгонных трубок, расстояние l_T между их срезами в помольной камере, диаметр d_C сопел эжекторов, число оборотов n ротора классификатора. Характеристики измельчителя определяются зависимостями между основными параметрами потоков и размерами его элементов и используются при оценке его технико-экономических показателей и определении областей рационального приме-

Підготовчі процеси збагачення

ния. Однако исследователи не рассматривали форму помольной камеры, ее рабочий объем, от которого зависит производительность мельницы и интенсивность измельчения частиц

Для повышения эффективности струйного измельчения и установления оптимального режима работы мельниц разработана методика акустического мониторинга процесса измельчения, установлены связи технологических и акустических параметров процесса [5-7].

Исследование акустических сигналов процесса измельчения в различных струйных мельницах показало зависимость их характеристик от размера частиц, в частности, от дисперсности измельченного продукта. Установлено [8], что в процессе измельчения материала в промышленной мельнице при увеличении удельной поверхности измельченного продукта, т.е. уменьшении размера частиц, показатели преобразования Гильберта-Хуанга и вейвлет-анализа увеличиваются, что соответствует увеличению энергии сигналов. Для обоснования установленной зависимости была выдвинута гипотеза о подтверждении этого факта общей теорией измельчения, основанной на "энерго-крупностных соотношениях" [9], суть которых сводится к положению: энергия, необходимая для одинакового сокращения крупности частиц, увеличивается с уменьшением их крупности.

Для лабораторной мельницы УСИ-20 отмечена обратная зависимость, т.е. при увеличении размера частиц энергия увеличивается. Это невозможно было объяснить в рамках известных теорий. Однако исследования аэроакустики помольных камер струйных мельниц различного типоразмера позволила посмотреть на эту зависимость с других позиций – с позиций аэроакустики.

Цель данной работы – исследовать особенности рабочих объемов помольных камер и найти закономерности, влияющие на характеристики акустических сигналов процесса струйного измельчения.

Движение среды влияет на характер распространения звуковых волн, их излучение и прием. В простейшем случае движения среды как целого волновые фронты точечного источника представляют собой расширяющиеся со скоростью звука сферы, центры которых перемещаются со скоростью среды. При регулярном течении среды возникает акустическое течение.

Акустические течения возникают как в свободном неоднородном звуковом поле, так и вблизи различного рода препятствий. Акустические течения всегда имеют вихревой характер, их скорость возрастает с увеличением интенсивности звука, но обычно не превосходит величины колебательной скорости частиц в звуковой волне. Нестационарные течения среды вызывают генерацию звука. Периодичный срыв вихрей за плохо обтекаемым телом порождает вихревой звук. Интенсивный звук генерируется высокоскоростными турбулентными течениями. Прикладные проблемы акустического движения среды, связанные с аэродинамической генерацией звука в высокоскоростных потоках, составляют предмет аэроакустики, изучающей проблемы акустики движущихся газовых потоков, взаимодействия звука с потоком и методы снижения аэрошумов.

Основной причиной аэродинамической генерации звука является образо-

вание вихрей и их ускоренное движение в неоднородном поле течения при обтекании тел, помещенных в поток, а также при истечении газа в покоящуюся или движущуюся среду. Нестационарные составляющие потока в пограничных слоях около обтекаемых тел или в свободных слоях, таких как зона смешения струи, приводят к непрерывной генерации вихрей и увеличению турбулентности потока [10].

Локальные препятствия в виде выпуклостей и выемок разнообразной формы на обтекаемой поверхности во многих случаях являются источниками акустических излучений в окружающую среду. Параметры акустических полей зависят от геометрии неоднородности обтекаемой поверхности, режимов обтекания, характеристик среды и ряда других факторов. Локальные препятствия, помещенные в пограничный слой, образуемый на телах обтекания, воздействуют на когерентные вихревые структуры, формирующие этот слой и возбуждающие псевдозвуковые пульсации давления [11, 12]. Кроме того, в выемках и в окрестности выпуклостей образуются присущие им вихревые системы, которые вносят свой вклад в гидродинамический шум. Области отрыва и присоединения пограничного слоя, а также удара слоя смешения о стенку выемки являются зонами повышенных пульсационных полей [13, 14].

Основной материал исследования

В помольных камерах измельчение происходит за счет столкновения высокоскоростных двухфазных потоков, вытекающих из разгонных трубок в общее пространство камеры. При встрече частиц двух противоточных потоков возникает веерная струя, частицы сталкиваясь, измельчаются, увлекаются вихрями, которые образуются вне центра зоны измельчения, выносятся из камеры к классификатору. Нижняя часть помольных камер имеет форму выемок, которые вносят свой вклад в образование вихревой структуры потоков в камере.

Рассмотрим рабочие объемы помольных камер используемых мельниц. Изучались акустические сигналы процесса измельчения трех струйных мельниц: промышленной – струйной мельницы Вольногорского горно-металлургического комбината (ВГМК) производительностью 2000 кг/ч – и двух лабораторных большой мельницы УСИ-20 и малой – УСИ-02, производительностью соответственно 20 и 2 кг/ч. Формы помольных камер этих струйных мельниц показаны на рис. 1.

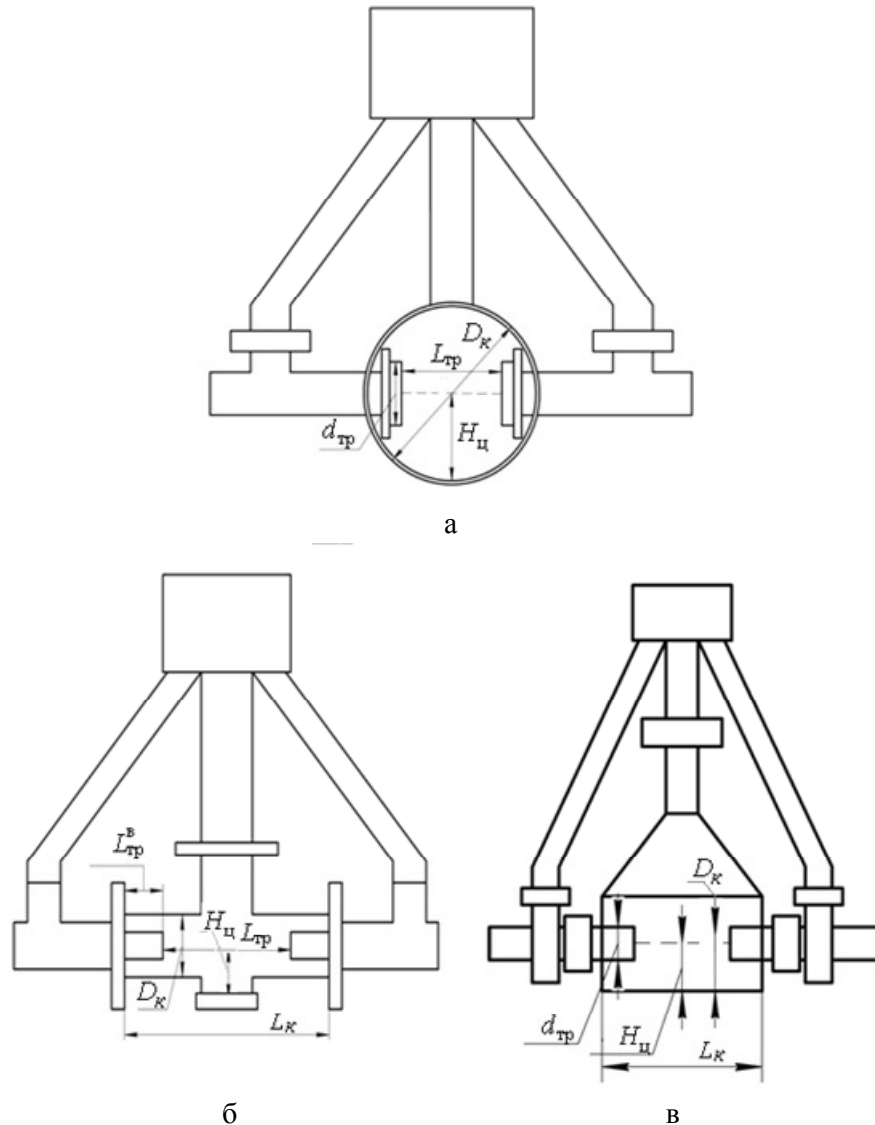


Рис. 1. Помольные камеры промышленной (а – ВГМК) и лабораторных (б – УСИ-20, в – УСИ-02) струйных мельниц

Описание лабораторных мельниц приведено в [5]. Промышленная мельница ВГМК имеет шарообразную камеру, слегка сплюснутую по фронтальной и задней стенке. Лабораторная установка УСИ-20 обладает цилиндрической камерой, а установка УСИ-02 – пирамидальной с круговым цилиндром в нижней части. Для дальнейшего анализа характерные размеры помольных камер показаны в табл. 1, необходимые вычисленные относительные размеры приведены в табл. 2, где обозначены d_c , $d_{тр}$ – диаметры сопла и разгонной трубки, $H_{ц}$ – высота от дна камеры до центра разгонной трубки, $L_{тр}$ – расстояние между трубками, $L_{тр}^в$ – длина выступа разгонной трубки в камере, D_k , L_k – диаметр, длина и общий объем камеры, $H_{раб}$, $S_{раб}$, $V_{раб}$ – высота, площадь и объем рабочего пространства камеры, $H_{ц}^*$, D_k^* , V_k^* , $V_{раб}$ – относительные высота, диаметр, общий и рабочий объем камеры, нормированные, соответственно, $H_{ц}^*$, D_k^* – величиной $d_{тр}$ и V_k^* , $V_{раб}^*$ – произведением $L_{тр}^* S_{тр}$.

Параметры помольных камер							
Название	d_c , мм	$d_{тр}$, мм	$H_{ц.}$, мм	$L_{тр}$, мм	$L_{тр}^B$, мм	$D_{к}$, мм	$L_{к}$, мм
УСИ-02	2,5	9	18,5	40	15	70	50
УСИ-20	6	20	32,5	65	68	65	195
ВГМК	18	100	220	410	350	690	690

Таблиця 2

Относительные размеры помольных камер							
Название	$H_{ц}^*$	$D_{к}^*$	$H_{раб}^*$	$S_{раб}^*$	$V_{раб}$	$V_{к}^*$	$V_{раб}^*$
УСИ-02	2,1	7,78	5,7	32,1	62800	75,6	24,7
УСИ-20	1,6	3,25	2	8,3	215581	31,7	10,6
ВГМК	2,2	6,9	4,5	23,5	65979250	80,1	20,5

На рис. 2 показаны схематично анализируемые объемы помольной камеры.

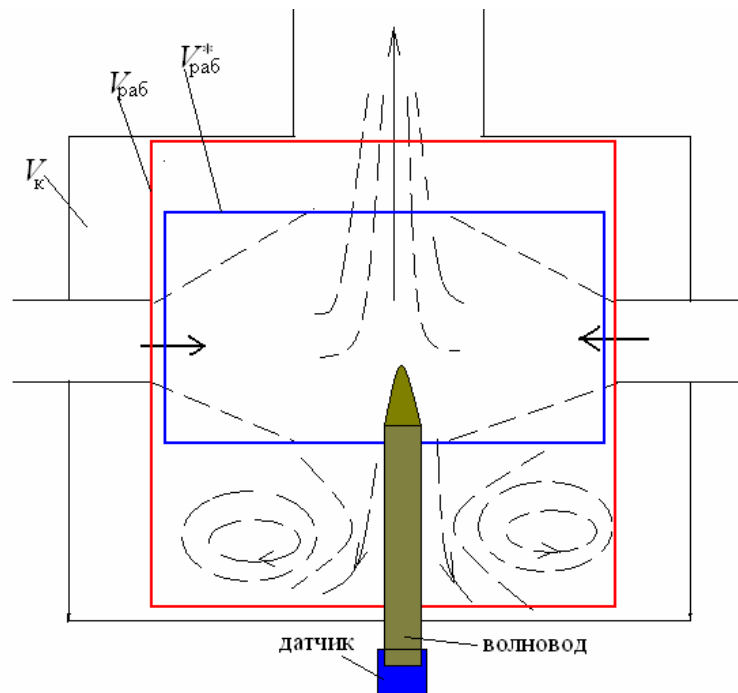


Рис. 2. Исследуемые объемы помольной камеры

Анализ данных таблицы 2 дает основание говорить о влиянии величины относительных параметров на характеристики акустических сигналов в камере, что, вероятно, и объясняет различные зависимости энергии сигналов в камере от дисперсности материала. Так, относительный диаметр $D_{к}^*$ и объем $V_{к}^*$ камеры у лабораторной установки УСИ-20 значительно отличается от этих же величин двух других мельниц. Аналогичная закономерность наблюдается для параметров рабочих объемов камер: $H_{раб}^*$, $S_{раб}^*$, $V_{раб}^*$. При анализе акустических сигналов в помольной камере при измельчении материалов необходимо учитывать не только влияние технологических параметров (в частности, параметров энергоносителя), но форму и относительный рабочий объем помольной камеры.

Підготовчі процеси збагачення

Это связано с тем, что аэроакустические особенности двухфазных течений в камере (рис. 2) накладывают свой отпечаток на сигналы, регистрируемые волноводом и датчиком системы акустического мониторинга процесса измельчения.

Энергетический анализ сигналов процесса измельчения в помольной камере малой лабораторной мельницы УСИ-02 показал зависимость энергетики сигналов от дисперсности материала, аналогичную зависимости для промышленной мельницы. Характеристики сигналов акустического мониторинга струйного измельчения в большой лабораторной мельнице УСИ-20, как указывалось выше, имели обратную зависимость от изменения дисперсности продукта. Таким образом, одна из лабораторных мельниц имела отличные от промышленной мельницы энергетические характеристики сигналов зоны измельчения. Этот факт может быть объяснен аэроакустическими характеристиками рабочего объема мельниц. Вероятной причиной указанного факта может быть наличие излучающих акустические сигналы вихревых структур большей мощности в помольных камерах промышленной мельницы и малой лабораторной мельницы УСИ-02 (табл. 2). Несмотря на различие в масштабах измельчительных установок относительные геометрические параметры указанных камер близки по своему значению и значительно отличаются от тех же параметров камеры большой лабораторной мельницы УСИ-20. В камере УСИ-20 вихревые зоны, образуемые выемками внизу камеры и за выступами разгонных трубок, значительно меньше, чем в упомянутых камерах. Поэтому потоки более мелких частиц (с большей удельной поверхностью) обладают меньшей энергией, что отражают показатели преобразования Гильберта-Хуанга и вейвлет-анализа: с увеличением удельной поверхности материала коэффициенты уменьшаются

Выводы. Анализ геометрии рабочих объемов помольных камер показал необходимость учета аэроакустических характеристик двухфазных потоков и влияние их на параметры акустических сигналов, регистрируемых в ходе мониторинга процесса струйного измельчения материалов.

Список литературы

1. Акунов В.И. Струйные мельницы. – М.: Машгиз, 1962. – 264 с.
2. Уваров В.А. Научные основы проектирования и создания пневмоструйных мельниц: Дис. ... д-ра техн. наук. – Белгород, 2006. – 354 с.
3. Блиничев В.Н.. Разработка оборудования и методов его расчета для интенсификации процессов тонкого измельчения материалов и химической реакции в твердых телах: Дис. ... д-ра техн. наук. – Иваново, 1975. – 313 с.
4. Кривошеков В.И. К расчету гидродинамических параметров противоточного гидrocиклона с перемешкой на базе турбулентно-диффузионной модели // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2010. – Вип. 43(84). – С. 61-80.
5. Прядко Н.С. Акустико-эмиссионный мониторинг процесса струйного измельчения // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – № 6. – С. 46-52.
6. Акустический мониторинг работы струйных мельниц различного типоразмера / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко и др. // Вестник НТУ "ХПИ". – 2011. – Вып. 50. – С. 3-10.
7. Горобец Л.Ж., Прядко Н.С. Акустические параметры оптимизации процесса струйного измельчения // Зб. наук. праць ПолНТУ. – 2012. – Вип. 2(32). – С. 128-136.

Підготовчі процеси збагачення

8. Михалев А.И., Прядко Н.С., Сухомлин Р.А. Анализ процесса тонкого измельчения материалов на основе Гильберта-Хуанга и вейвлет – преобразований акустических сигналов // Сб. материалов IX Конгресса обогатителей стран СНГ. – МИСиС, 2013. – Т1.– С. 409-412.

9. Пилов П.И., Прядко Н.С. Моделирование замкнутых циклов измельчения на основе гипотезы Риттенгера // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 51(92). – С. 98-107.

10. Швец А.И. Экспериментальное исследование течения в выемке на осесимметричном теле // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т.42. – №2. – С. 88-95.

11. Rockwell D. Vortex-body interactions // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1998. – V. 30.– P. 199-229.

12. Bull M.K. Wall-pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers: Some reflections on forty years of research // Sound Vibr.– 1996.– V. 190, № 3. – P. 299-315.

13. Lin J.C., Rockwell D. Organized oscillations of initially turbulent flow past a cavity // AIAA J. – 2001. – V. 39, № 6. – P. 1139-1151.

14. Чжен П. Отрывные течения. В 3 т.– М.: Мир, 1972. – 916 с.

© Прядко Н.С., Терновая Е.В., 2013

*Надійшла до редакції 18.11.2013 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горобець*