

ОБ ИЗНОСЕ РАЗГОННЫХ ТРУБОК ПРИ ГАЗОСТРУЙНОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ

Приведены результаты экспериментальных исследований износостойкости разгонных трубок инжекторной системы газоструйного измельчителя. Выявлены области максимального эрозийного уноса материала стенки разгонной трубки. Рассмотрены возможные способы уменьшения эрозийного уноса, в частности защитой стенки разгонной трубки сверхзвуковой пристеночной струей.

Наведено результати експериментальних досліджень зносостійкості розгінних трубок інжекторної системи газоструйного подрібнювача. Виявлено області максимального ерозійного виносу матеріалу стінки розгінної трубки. Розглянуто можливі способи зменшення ерозійного виносу, зокрема захист стінки розгінної трубки надзвуковим струменем біля стінки.

The results of the experimental research of the accelerated tube wear resistance for the gas- jet grinder inject system are presented. Regions of a maximal erosion ablation of the accelerated tube wall material are revealed. Possible ways of diminution of erosion ablation, in particular by protection of the accelerated tube wall by a supersonic wall jet are considered.

Введение. Газоструйное измельчение сыпучих материалов широко применяется для получения мелкодисперсных чистых от технологических примесей порошков. Существенным недостатком такого измельчения является быстрый износ разгонных трубок инжектора помольной камеры. При этом была установлена [1] линейная зависимость износа разгонных трубок от производительности измельчителя. Однако картина износа мало исследована, не были разработаны эффективные способы защиты стенки разгонной трубки от эрозийного воздействия твердых частиц измельчаемого материала.

Целью данной работы было изучение характера эрозийного уноса стенки разгонной трубки помольного узла и поиск путей повышения ее износостойкости, улучшение конструкции узла, которое ведет к повышению эффективности процесса газоструйного измельчения.

Эффективность работы струйной мельницы определяется скоростью соударения частиц измельчаемого материала и вероятностью этих соударений. В свою очередь, эти величины зависят от дисперсности и физико-механических свойств исходного материала, дисперсности конечного продукта и т.п. Современный подход к проектированию струйных мельниц предполагает поиск оптимальных конструкций и режимных параметров при максимальном использовании энергии газового потока. В широком спектре решаемых при проектировании измельчителей проблем центральное место занимают вопросы, касающиеся помольного узла, включающего инжектор и помольную камеру. Это подтверждает актуальность и важность работ, которые направлены на улучшение параметров и характеристик инжекторных устройств.

К настоящему времени не создана математическая модель процессов, происходящих в помольном узле. Методика расчета характеристик двухфазного потока в инжекторе базируется на одномерных приближениях без учета взаимодействия твердых частиц с газовым потоком и их взаимовлияния. Решение задачи об износостойкости разгонных трубок инжекторного узла требует разработки методов, учитывающих трехмерность двухфазного потока. При этом необходимо определить характеристики распределения твердых частиц в поперечном сечении потока и их взаимодействие со стенкой разгон-

ной трубки. Экспериментальные исследования характера износа стенок разгонных трубок, проведенные в Институте технической механики НАН Украины и НКА Украины, являются предварительным этапом в разработке метода расчета траектории частиц в инжекторном узле и эрозии стенок разгонной трубки.

Экспериментальные исследования проводились на газоструйном измельчителе УСИ-20 производительностью 20 кг/час, схема которого приведена на рис. 1

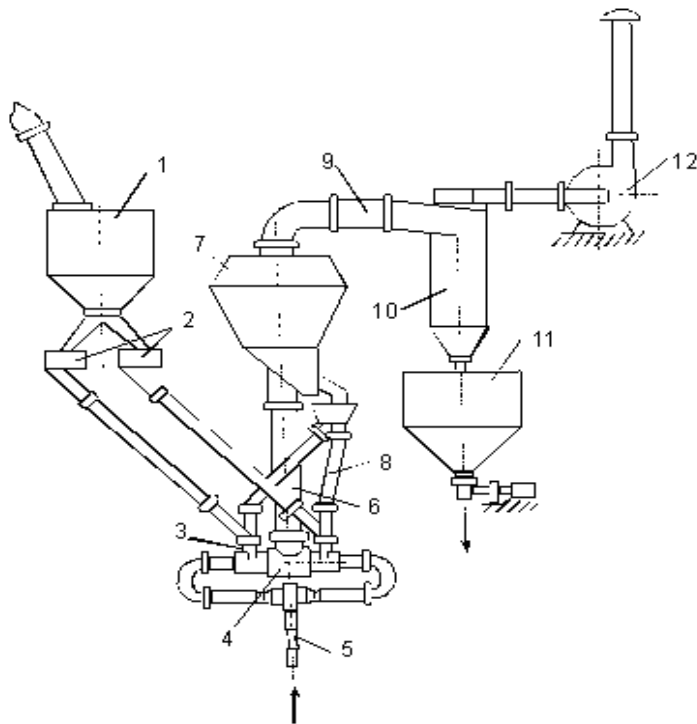


Рис. 1

Струйная мельница УСИ-20 предназначена для изучения газодинамических процессов в проточных трактах аппаратов, реализующих подобный способ измельчения. Кроме того, с использованием этого аппарата проводился поиск новых технических решений, обеспечивающих повышение эффективности процесса струйного измельчения сыпучих материалов. Установка УСИ-20 позволяет проводить исследования по измельчению сыпучих материалов, отличающихся своими физико-механическими свойствами, и имеет следующие основные характеристики:

- диаметр помольной камеры – 65 мм;
- длина помольной камеры – 195 мм;
- расстояние между срезами разгонных трубок в помольной камере – 65 мм;
- внутренний диаметр разгонной трубки – 20 мм;
- толщина стенки разгонной трубки – 2,2 мм;
- длина разгонной трубки – 155 мм;
- диаметр сопла несущего рабочего тела – 6 мм;
- давление на входе в сопло несущего рабочего тела – 3 атм.;
- температура несущего рабочего тела – 293 – 440 К;
- исследуемый материал – шамот, известняк, песок, шлак.

Экспериментальная установка включала все узлы классической схемы газоструйного измельчителя: загрузочный бункер 1, шиберные заслонки 2, эжекторные узлы 3, помольную камеру 4, магистрали 5 подвода несущего рабочего тела (холодного или нагретого воздуха), отводящий трубопровод 6, классификатор 7 и трубопроводы 8 возврата сыпучего материала в полость эжектора 3 на доизмельчение, трубопровод 9 для отвода из классификатора 7 готового продукта, дисперсность частиц которого определяется оборотами классификатора, циклон 10 и бункер 11 готового продукта, вытяжной вентилятор 12.

После каждого цикла измельчения, содержащего несколько включений измельчителя, проводилась разборка измельчительного узла и анализ состояния поверхности разгонных трубок.

Согласно модели рабочего процесса в струйном аппарате [2], в разгонную трубку (камеру смешения) инжектирующее и инжектируемое рабочие тела поступают в виде двух отдельных потоков. При дозвуковом истечении несущего рабочего тела из сопла давление на срезе сопла равно давлению в помольной камере и на входе в разгонную трубку давления инжектирующего и инжектируемого потоков одинаковы. При критическом истечении инжектирующего рабочего потока давление на срезе сопла может существенно отличаться от давления инжектируемого потока. Если сопло выполнено нерасширяющимся или с неполным расширением, поток после выхода из сопла будет расширяться, при этом скорость его будет сверхзвуковой. Инжектируемый поток на этом участке может ускоряться, достигая скорости звука, если между стенками камеры и сверхзвуковой струей образуется суживающийся канал.

Инжектор помольного узла отличается от аппарата для пневмотранспорта тем, что его выходная часть представляет собой не диффузор, а внезапное расширение (в помольную камеру) и контролируемой величиной является не давление, а скорость двухфазного потока. При этом решается задача по обеспечению требуемых значений коэффициента инжекции при максимальной скорости движения частиц на входе в помольную камеру. Если для пневмотранспорта важно обеспечить максимальное значение коэффициента инжекции, то для инжектора помольного узла он должен быть таким, чтобы концентрация твердых частиц отвечала оптимальному процессу дробления в помольном узле.

На рис. 2 показана схема течений сыпучего материала через традиционный инжектор, включающий сопло Лавалья.

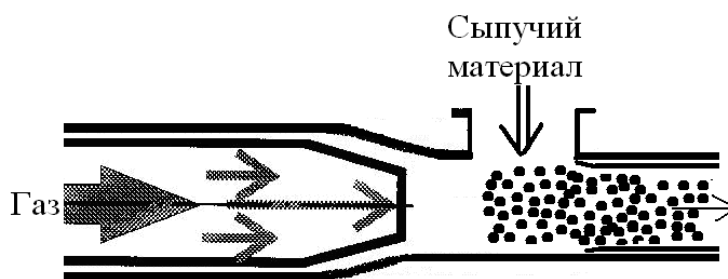


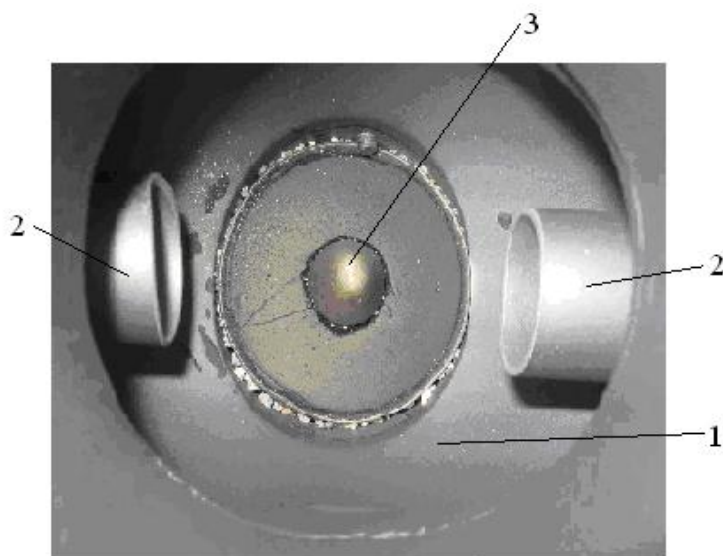
Рис. 2

Для газоструйного измельчительного аппарата длина и диаметр разгонных трубок, расстояние между ними являются важными параметрами, влияющими на производительность мельницы. Так, при равных технологических параметрах (расход воздуха $460 \text{ м}^3/\text{ч}$) и одинаковом диаметре трубок ($d = 30 \text{ мм}$) максимальная производительность получена при длине трубок $L = 170 \text{ мм}$. При этом частицы материала приобретают максимальную скорость на срезе разгонных трубок. Дальнейшее увеличение длины трубки ведет к уменьшению скорости вследствие трения о стенки и увеличения гидравлического сопротивления трубки. Это приводит к снижению эффективности измельчения. При использовании трубок диаметра $d = 28 \text{ мм}$ достигается более тонкий помол. Таким образом, экспериментально были определены оптимальные размеры разгонных трубок: $L = 170 \text{ мм}$, $d = 28 \text{ мм}$.

Экспериментальные исследования показали, что в газоструйном измельчителе сыпучих материалов наибольшему абразивному износу подвержены разгонные трубки, особенно их выходные участки. Поэтому выбор оптимальных размеров разгонных трубок должен проводиться с учетом удельного износа, определяющего срок службы трубок, эксплуатационных расходов, связанных с необходимостью их замены, а также загрязнения измельчаемого материала продуктом износа. Исследование зависимости удельного износа от длины трубок показало, что оптимальный удельный износ соответствует разгонным трубкам диаметром $d = 28 \text{ мм}$ и длиной $170 - 200 \text{ мм}$.

Поскольку конечной целью исследования износостойкости разгонных трубок является создание конструкции из простых материалов (низкосортных сталей), в эксперименте использовались разгонные трубки, изготовленные из стали Ст 3.

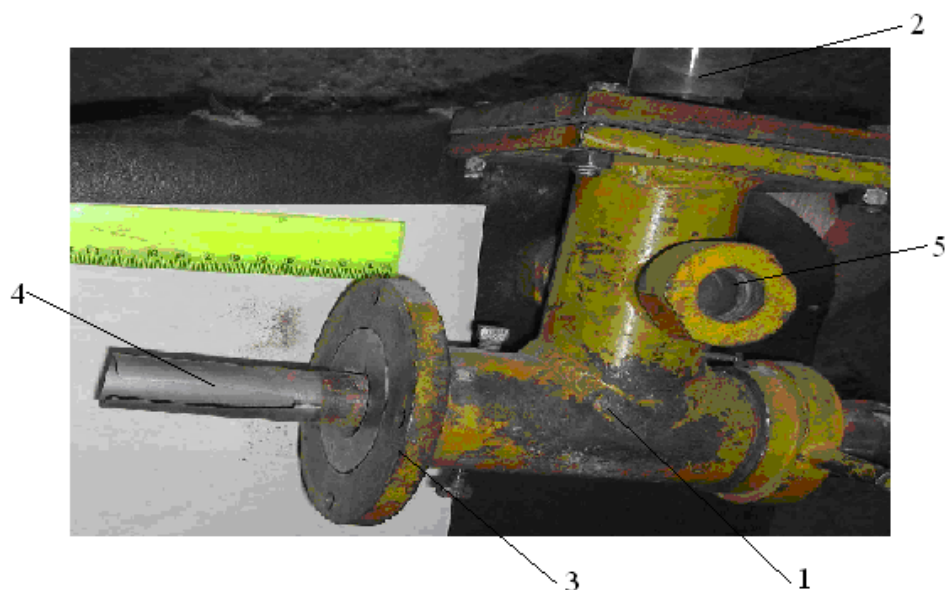
На рис. 3 приведена фотография полости помольной камеры 1 с установленными в ней разгонными трубками 2 (диаметром 28 мм) и волноводом 3 датчика для акустического мониторинга.



1 – помольная камера; 2 – разгонная трубка; 3 – волновод

Рис. 3

На рис. 4 – фотография инжекторного узла 3 из рис. 1 с вмонтированной разгонной трубкой 4 (в состоянии частичного износа стенки).



- 1 – корпус инжектора; 2 – патрубок подвода сыпучего материала;
- 3 – фланец подстыковки к помольной камере; 4 – разгонная трубка;
- 5 – окно визуализации потока загружаемого сыпучего материала

Рис. 4

На рис. 5 – фотография исходной разгонной трубки до ее эксплуатации



Рис. 5

На рис. 6 – фотографии разгонных трубок в последовательности времени эксплуатации. Анализ истории развития каверн на поверхности разгонных трубок показывает следующее. На рис. 6 б) зафиксирована начальная стадия износа. Каверна на стенке разгонной трубки зарождается почти в средней ее части. Несимметричность износа свидетельствует об отклонении оси сопла инжектора от оси разгонной трубки. Дальнейшая выработка разгонной трубки (рис. 6 в) характеризуется распространением каверны к срезу разгонной трубки. Затем каверна распространяется по периметру разгонной трубки в основном в области выхода потока из разгонной трубки (рис. 6 г) и практически полностью разрушает стенку в течение 4 часов работы измельчителя на материале типа шамот при давлении несущего тела инжектора $P = 3$ атм.



Рис. 6

Состояние разгонных трубок значительно влияет на производительность мельницы. Проводились исследования процесса измельчения на газоструйной установке УСИ-20 на изношенных (1) и новых (2) трубках (рис. 7).

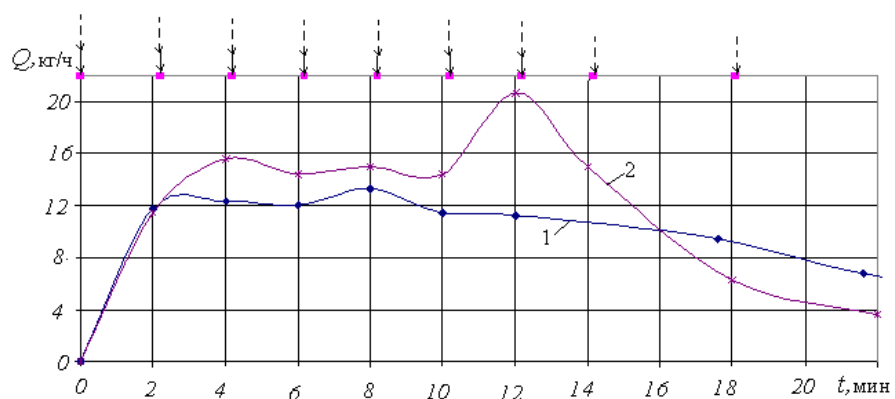


Рис. 7

Моменты загрузки при новых трубках показаны стрелками со сплошными линиями, при изношенных – пунктирными линиями; начальная порция – 1,0 кг, последующие 0,5 кг. Было установлено, что при тех же технологических параметрах ($P = 3$ атм, число оборотов классификатора $n = 600$ мин⁻¹, материал – шамот) и одинаковом режиме загрузки струй материалом при ис-

пользовании новых неизношенных разгонных трубок общая производительность мельницы повышается на 29% (с 10,36 кг/ч до 13,4 кг/ч). Причем на отдельных этапах измельчения производительность мельницы на новых трубках значительно выше средней.

Вопрос повышения износостойкости разгонных трубок может быть решен путем устранения касания частицами материала внутренней поверхности трубок. Известны попытки защиты внутренних поверхностей разгонных труб от износа подачей газа-энергоносителя через дополнительные сопла в пристеночный слой и закруткой этого потока [3]. В этом случае происходит отжатие измельчаемых частиц материала от стенок разгонных труб и сообщение им винтового движения. Оси указанных дополнительных сопел составляют острый угол с продольной и поперечной осями разгонных труб. Такое конструктивное исполнение разгонных труб действительно уменьшает их износ, однако сопровождается существенным увеличением расхода газа-энергоносителя.

Для эффективного решения проблемы защиты разгонных труб от эрозионного воздействия было предложено использовать в качестве эжектирующего сопла не сопло Лавала (как в классическом эжекторе), а кольцевое сопло, что позволит подавать сыпучий материал не на периферию, а вовнутрь струи несущего газа.

Для усовершенствования конструкции инжектора были проведены экспериментальные исследования плоской модели кольцевого инжектора [6], при этом исследовалось распределение полного давления в поперечном сечении струи. Несущая способность сверхзвуковой струи исследовалась с использованием различных сыпучих материалов. Это устройство (рис. 8) работает следующим образом.

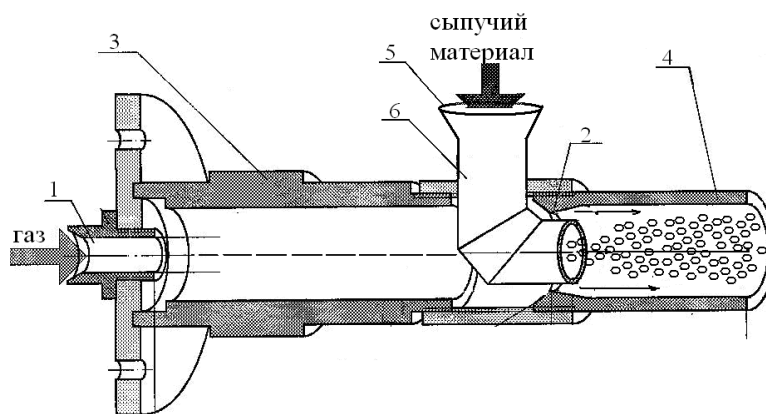


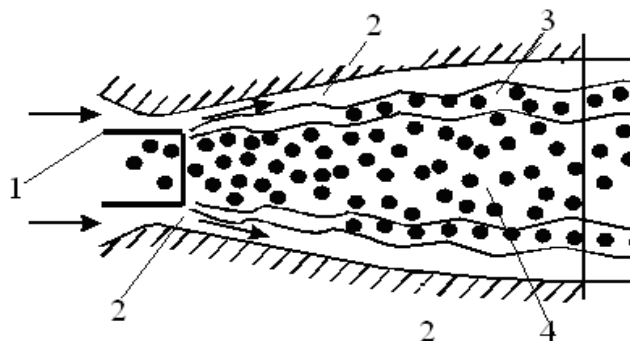
Рис. 8

Через штуцер 1 в устройство подают газ-энергоноситель. Истекающая из него струя газа движется по втулке 3, а затем после прохождения через кольцевое сопло 2 по внутренней поверхности разгонной трубки 4. После запуска кольцевого сопла открывают подачу сыпучего материала. Для этого материал подают в воронку 5, откуда он поступает в канал трубки 6, из которой сыпучий материал будет эжектироваться сверхзвуковым потоком газа, истекающим из сопла 2. Кольцевая сверхзвуковая струя, истекающая из сопла 2, двигаясь вдоль разгонной трубки 4, защищает ее от эрозионного воздействия твердых частиц, поступающих из трубки 6. С другой стороны пограничный

слой кольцевой струи увлекает твердые частицы, разгоняет их, распределяя равномерно по сечению разгонной трубки 4.

Эксперименты [7] показали эффективность защиты стенки разгонной трубки от эрозионного воздействия твердых частиц.

На рис. 9 показана схема течения в кольцевом инжекторе



1 – разгонная трубка; 2 – кольцевая струя без частиц;
3 – погранслои; 4 – твердые частицы

Рис. 9

Выбором геометрических параметров кольцевой струи можно обеспечить равномерную защиту стенок разгонной трубки от эрозионного воздействия твердых частиц с учетом гравитационных сил, действующих на частицы.

Остаются невыясненными вопросы несущей способности кольцевой пристеночной сверхзвуковой струи, процессов захвата и транспортировки ею твердых частиц.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований выяснен характер эрозии разгонных трубок газоструйного измельчителя, которая в процессе работы измельчителя начинается от средней части разгонной трубки и перемещается к ее выходу, не имея выраженной симметрии. Предложен эффективный способ защиты стенок разгонной трубки на основе кольцевого сверхзвукового эжектора.

1. Акунов В. И. Струйные мельницы. Элементы теории и расчета / В. И. Акунов. – М. : Машиностроение, 1967. – 262 с.
2. Горобец В. И. Новое направление работ по измельчению / В. И. Горобец, Л. Ж. Горобец. – М. : Недра, 1977. – 183 с.
3. Пилов П. И. Новые подходы к решению проблем обработки и переработки полезных ископаемых / П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко // Матеріали Міжнародної конференції «Проблеми комплексного освоєння недр». Форум гірників -2006». – Дніпропетровськ, 2006. – С. 105 – 109.
4. Пилов П. И. Параметры акустического излучения промышленной газоструйной установки / П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко, А. Е. Щербаков, Н. С. Прядко, И. В. Верхоробина // Вестник нац. техн. ун-та «ХПИ». – Харьков, 2007. – Вып. № 27. – С. 33 – 41.
5. Pilov P. I. An acoustic monitoring of the sizes changes of grinded particles / P. I. Pilov, L. J. Gorobets, V. N. Bovenko, N. S. Pryadko // Науковий вісник НГУ. – 2008. – № 6. – С. 23 – 26.
6. Патент на винахід 50750 Україна, МПК F23H 9/10. Газоструминний млин / Коваленко М. Д., Стрельников Г. А., Головач А. Г. ; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ.– 98041782 ; заявл. 08.04.1998 ; опубл. 15.11.2002, Бюл. № 11.– 2 с.
7. Коваленко Н. Д. О возможности повышения надежности разгонных сопел эжектора помольной камеры противоточной струйной мельницы / Н. Д. Коваленко, Г. А. Стрельников, С. В. Тынына, А. И. Астапов // Материалы V Конгресса обогатителей стран СНГ. – Киев, 2005. – Том 2. – С. 120 – 123.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 10.07.09,
в окончательном варианте 04.11.09