

## **Направление 4. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

---

### **СЕПАРАТОР СО СМЕЩЕННЫМ РОТОРОМ**

**Александрова Е.Б., канд. техн. наук, доц.,  
Стадченко А.А., студент**

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

В производстве современных строительных материалов и строительстве одним из основных направлений являются: получение композиционных отделочных материалов с высокой заводской готовностью; применение пластмасс для изготовления широкой гаммы изделий, обладающих высокой прочностью; использование лаков, красок, обладающих большой покрывной способностью [1].

Изготовление отделочных материалов, пластмасс, линолеума и других строительных материалов, обладающих высокими потребительскими качествами возможно на основе применения составляющих компонентов, размер частиц которых менее 5 мкм.

В качестве таких компонентов наиболее широкое применение нашли мел, мрамор и различные пигменты с размером частиц менее 5 мкм.

Технология получения таких порошков кроме сушки и измельчения обязательно предусматривает процесс классификации, который определяет качество готовой продукции.

Наибольшее распространение в области классификации получили центробежные сепараторы различных модификаций. Многолетний опыт эксплуатации таких сепараторов показал, что достаточно эффективно они работают при разделении порошков с размером частиц до 20 мкм. При классификации порошков с размером частиц менее 20 мкм происходит, ввиду значительной адгезии, их агломерация, причем получаются достаточно прочные агломераты, которые требуют дополнительной операции по их дезагломерации в специальных устройствах по сухому, либо мокрому способу [2].

Для решения этой проблемы возможно использование центробежного сепаратора по патентам на изобретение РФ №40606 и

№ 2259893 [3,4]. Данный сепаратор предназначен для классификации сухих слипающихся порошков.

Отличительной чертой разработанного сепаратора является смещение оси ротора от оси корпуса на эксцентриситет «е», таким образом, создавая в камере неравнозначные области классификации. Такое расположение ротора позволяет повысить качество сепарации за счет изменения динамики потока при переменных условиях движения двухфазной смеси в стесненных условиях.

Сравнительный анализ порошков, получаемых в обычном и предлагаемом усовершенствованном сепараторах, показал, что порошки из нашего сепаратора имеют высокое качество – в них практически отсутствуют агломерированные зерна. Кроме этого, в центробежном сепараторе с эксцентрически расположенным ротором получается порошок со средневзвешенным размером частиц менее 1 мкм. В обычном сепараторе минимально возможная дисперсность порошка составляла 3,4 мкм.

В результате проведенных экспериментов в центробежном сепараторе со смещенным ротором осуществлена устойчивая сепарация мела и получен мел ММС-1 из мела ММ-200.

Вследствие чего, динамический сепаратор может быть рекомендован для классификации мелкодисперсных слипающихся порошков с размером частиц менее 10 мкм, к которым относятся мел, глина, тальк, размельченные минеральные пигменты, известь.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № НК-14-41-08042/14р\_офи\_м.*

#### **Список литературы:**

1. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. Москва 1972. 230 с.
2. Дмитриенко В.Г., Богданов В.С., Логачев И.Н., Семикопенко И.А., Жидков В.В. Закономерности движения частиц порошка в зоне сепарации цилиндрической формы классификатора центробежного типа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 1. С. 60-65.
3. Патент РФ №40606 Александрова Е.Б., Богданов В.С., Уваров В.А., Шарапов Р.Р., Карпачев Д.В., Овчинников И.А., Мелихов С.В., Булгаков С.Б., Поздняков С.С., Ярыгин А.А. Центробежный воздушно-проходной сепаратор В 07 В 7/083, от 11.05.2004 г.
4. Патент РФ № 2259893 Александрова Е.Б., Богданов В.С., Уваров В.А., Булгаков С.Б., Овчинников И.А. Воздушно-динамический классификатор, В 07 В 7/083 от 20.04.2004 г.

## РАСЧЁТ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АЭРАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА ПНЕВМОКАМЕРНОГО НАСОСА

**Богданов В.С., д-р техн. наук, проф.,**

**Гавриленко А.В., аспирант**

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

Пневматический транспорт находит широкое применение в разных отраслях промышленности, в строительстве, сельском хозяйстве и всякого рода перегрузочных работах на железнодорожном и водном транспорте. Установки пневматического транспорта служат для перемещения насыпных грузов по трубам или желобам в струе сжатого или разреженного воздуха. Пневматический транспорт позволяет перемещать пылевидные, порошкообразные, зернистые и кусковые материалы.

Движущаяся по трубопроводу с большой скоростью струя воздуха образует с мелкофракционным грузом достаточно однородную аэросмесь, заполняющую сечение трубопровода. Частицы груза перемещаются скачкообразно во взвешенном состоянии и скольжением по нижней стенке трубы.

Основной составляющей частью пневматического транспорта, влияющей на процесс перемещения различных грузов, является пневмокамерный насос.

Недостатком его является то, что увеличивается противодавление в трубопроводе при смешении транспортируемого материала (например, цемента, имеющего обычно 140°C) и транспортируемого агента (сжатого воздуха с температурой 20°C). Это приводит к увеличению температуры сжатого воздуха внутри транспортного трубопровода и затрудняет разгрузку камеры известного насоса, а для улучшения последней требуется проведение дополнительной механической работы за счет увеличения количества транспортирующего агента [1].

Для устранения этого эффекта в патенте RU 2312808 С1 предлагается для пневмокамерного насоса сжатый воздух по трубопроводу нагнетать в аэрационное устройство (мульти сопловый аппарат), который с помощью сопел инжектирует струи сжатого воздуха в находящийся в камере материал, упрощая движение воздуха к открытому концу трубы для выдачи материала [4].

В системе Siemens NX 8.5 под управлением Teamcenter 9 была создана уникальная упрощённая трёхмерная модель аэрационного

устройства пневмокамерного насоса с действительными размерами. После выделения внутренней геометрии в модуле NXThermal/Flow была задана сетка с параметрами воздуха. Входным параметром была скорость воздуха при подаче в аэрационное устройство. Целью расчёта было рассчитать оптимальную скорость на выходе из сопел аэрационного устройства.

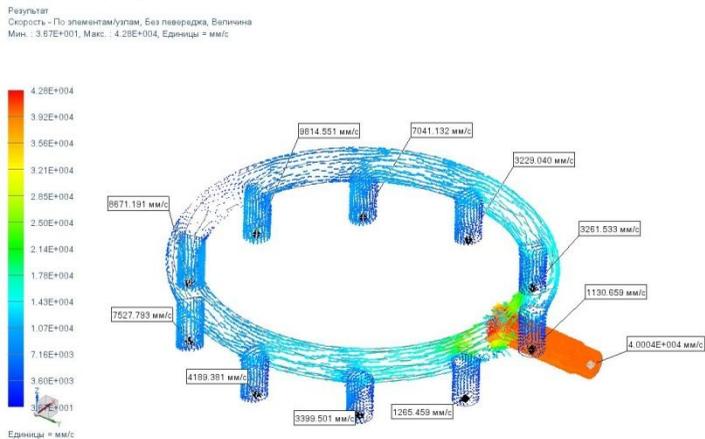


Рисунок 1 – Распределение скоростей в аэрационном устройстве с прямыми соплами одного диаметра

Исходя из полученных результатов, можно сделать утверждение о том, что распределение потоков воздуха имеет неравномерный характер, что может привести к завихрению воздуха, тем самым затруднив выгрузку камеры насоса.

Для достижения необходимого эффекта псевдооживления материала предлагается изменить диаметры сопел для более равномерного распределения воздуха в трубопроводе.

В результате расчётов было подобрано одно из возможных рациональных сечений сопел, при котором скорости выхода воздуха имеют близкие значения. Например, при размере кольца трубопровода  $\varnothing 150$  мм и скорости подачи воздуха 40 м/с., в случае одинаковых размеров сопел, имеем следующие результаты, начиная от входного патрубка против часовой стрелки (рис. 1):

$\varnothing$ , мм	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
$v$ , м/с	1,13	3,26	3,23	7,04	9,81	8,67	7,52	4,19	3,39	1,26

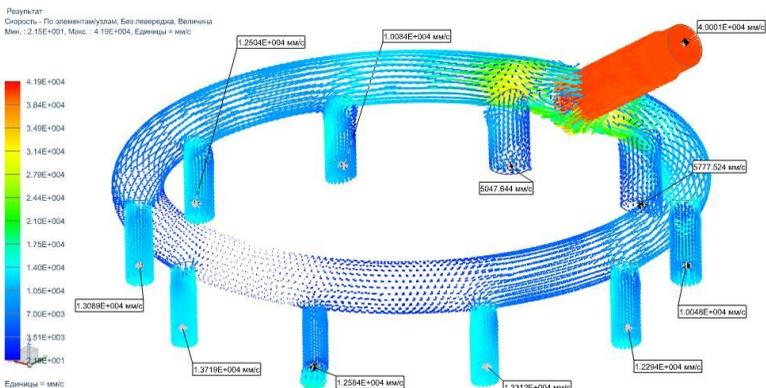


Рисунок 2 – Распределение скоростей в аэрационном устройстве с прямыми соплами оптимального диаметра

При размере кольца трубопровода  $\varnothing$  150 мм и скорости подачи воздуха 40 м/с., в случае различных размеров сопел, начиная от входного патрубка против часовой стрелки (рис. 2):

$\varnothing$ , мм	120	90	85	80	75	75	80	85	90	120
$v$ , м/с	5,04	10,08	12,50	13,09	13,72	12,58	13,31	12,29	10,04	5,77

Это позволит повысить скорость истечения воздуха из сопел, тем самым улучшив разгрузку камеры насоса; сократить расход сжатого воздуха и снизить материалоёмкость конструкции аэрационного устройства.

Различные конструкции пневмокамерных насосов позволяют искать, находить и внедрять наиболее эффективные режимы транспортирования сыпучих материалов и способы выкачки материала из камеры.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № НК-14-41-08042/14р\_офи\_м.*

#### Список литературы:

1. Калинушкин М.П., Коппель М.А., Серяков В.С., Шапунов М.М. Пневмотранспортное оборудование. Справочник. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1986. 286 с.
2. Богданов В.С., Горшков П.С., Несмеянов Н.П., Бражник Ю.В. Пути увеличения степени однородности сухих строительных смесей с целью

- формирования максимального их качества // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2013. №4. С.62-64.
3. Фадин Ю.М. Сравнительный анализ открытого и замкнутого циклов измельчения клинкера и добавок // Мир цемента. 2013. №1. С. 49-50.
  4. Хлудеев В.И., Ефременко А.Н., Ефременко С.Н.. Энергосберегающие технологии пневмотранспорта сыпучих материалов [Электронный ресурс]. URL: [http://www.tes31.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=87&Itemid=171](http://www.tes31.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=87&Itemid=171) (дата обращения: 26.05.2014).

## ПНЕВМОСТРУЙНАЯ МЕЛЬНИЦА

**Булгаков С.Б., канд. техн. наук, доц.,  
Уваров В.А., д-р техн. наук, проф.,  
Леонов А.Н., аспирант**

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

Разработанная пневмоструйная мельница предназначена для тонкого измельчения или механической активации цемента и других абразивных и неабразивных материалов путем соударения частиц движущихся навстречу друг другу при помощи воздушных струй, истекающих из сопел с высокими скоростями. Мельница работает на сжатом воздухе давлением  $0,6 \pm 0,8$  МПа. Процесс измельчения в мельнице осуществляется непрерывно при кратной циркуляции основного материала с добавлением исходного продукта из бункера-питателя.

Процесс измельчения в противоточной пневмоструйной мельнице (рис. 1) основан на принципе высокоскоростного ударного самоизмельчения частиц материала, сталкивающихся друг с другом со скоростью до 200 м/с.



Рисунок 1 – Мельница пневмоструйная: 1 – камера помола, 2 – классификатор, 3 – коллектор подачи сжатого воздуха, 4 – электродвигатель привода классификатора, 5 – защитный кожух клиноременной передачи

Разгон частиц материала в струях энергоносителя до необходимой скорости обеспечивается с помощью восьми разгонных трубок. Соударение и измельчение частиц материала происходит в помольной камере, которая соединена с центробежным проходным классификатором. Удвоенная скорость соударения частиц в таких мельницах повышает эффективность процесса помола.

Мельница пневмоструйная состоит из следующих основных изделий: камеры помола 1, центробежного проходного классификатора 2, двух коллекторов подачи сжатого воздуха 3 (верхнего и нижнего), электродвигателя привода классификатора 4 и защитного кожуха клиноременной передачи 5.

Камера помола 1 (рис. 3) предназначена для протекания процесса измельчения и состоит из следующих изделий: наружного стального корпуса 1, среднего стального корпуса 2, внутреннего корпуса 3, выполненного из ПВХ, шумоизолирующего слоя 4 из монтажной пены, нижнего стального днища 5 с насыпанным на него до среза нижних разгонных трубок слоя клинкера, четырех пар направленных навстречу друг к другу разгонных трубок 6, четырех нижних и четырех верхних эжекторных отсеков 7, верхнего фланца 8, предназначенного для установки через переходной конус и крепления к нему с помощью болтовых соединений классификатора (см. рис. 1) и двух резиновых прокладок 9.

Разгонные трубки (рис. 2) предназначены для забора из эжекторных отсеков измельчаемого материала и его разгона до скорости  $\approx 200 - 220$  м/с.

Основа 1 разгонных трубок изготовлена из пластиковой водопроводной трубы, в торец которой ввинчено комбинированное сопло 2 с нарезкой для присоединения к коллектору подачи сжатого воздуха (см. рис. 1).



Рисунок 2 – Разгонная трубка: 1 – труба, 2 – сопло

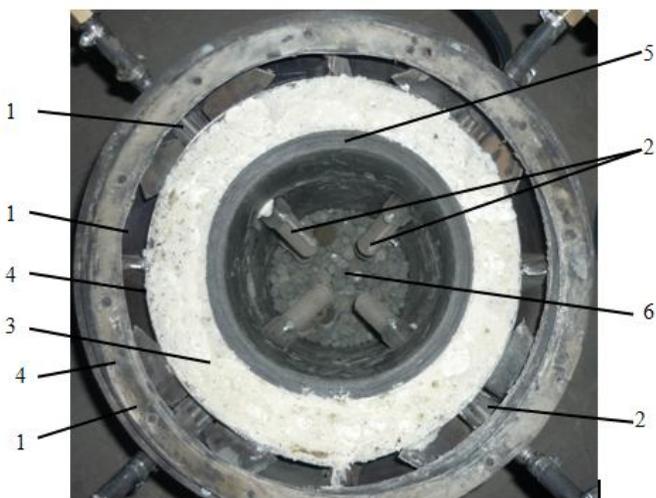


Рисунок 3 – Камера помола: 1 – наружный корпус, 2 – средний корпус, 3 – внутренний корпус, 4 – нижнее днище, 5 – шумоизолирующий слой, 6 – разгонные трубки, 7 – эжекторные отсеки, 8 – верхний фланец, 9 – прокладка резиновая

Классификатор (рис. 4) предназначен для сортировки измельчаемого материала на «готовый продукт» и «крупку» и состоит из следующих составных частей: корпуса 1, внутри которого размещен вращающийся ротор с вертикальными лопастями в виде «белчьего колеса», разгрузочного патрубка 2 для отвода готового продукта, подшипникового узла 3, который обеспечивает вращение вала с закрепленным на нём ротором, шкива 4 с клиноременной передачей, загрузочного патрубка 5 для подачи измельчаемого материала в мельницу и кронштейна 6 для крепления электродвигателя.

Для обеспечения работоспособности мельница укомплектована вибрационным питателем (рис. 5), двумя циклонами СЦН-40-300 и СЦН-40-200 с бункерами, газоходами (рис. 6), рукавным фильтром ФРКИ-10 и вентилятором высокого давления для создания разрежения по всему тракту помольного комплекса.

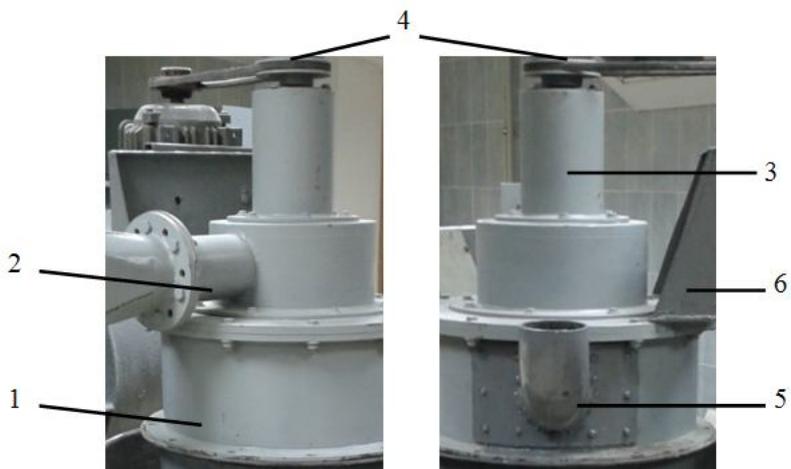


Рисунок 4 – Классификатор: 1 – корпус, 2 – разгрузочный патрубок, 3 – подшипниковый узел, 4 – шкив, 5 – загрузочный патрубок, 6 – кронштейн электродвигателя



Рисунок 5 – Мельница с вибрационным питателем: 1 – мельница, 2 – вибрационный питатель



Рисунок 6 – Пылеосадительное оборудование: 1 – циклон СЦН-40-300, 2 – циклон СЦН-40-200, 3 – бункеры, 4 – газоходы

Пневмоструйная мельница работает следующим образом.

Энергоноситель, сжатый воздух от компрессора, подается в коллекторы подачи сжатого воздуха 3 (см. рис 1) и поступает через сопла во внутреннюю полость разгонных трубок 2 (см. рис 3).

Измельчаемый материал – цемент, вибрационным дозатором, подается через загрузочный патрубок во внутрь сепаратора, откуда, за счет центробежной силы равномерно сбрасывается на цилиндрический корпус 1 (см. рис. 4), откуда всасывается в эжекторные отсеки 7 камеры помола (см. рис. 2), захватывается струями воздуха и, разгоняясь в разгонных трубках 6, сталкивается в центральной части помольной камеры. Происходит измельчение.

Измельченный материал поступает в верхнюю часть камеры помола в зону действия вращающегося ротора классификатора, где грубый продукт «крупка» отбрасывается на стенки корпуса классификатора и возвращается на домол, а готовый продукт, достигший заданной степени измельчения (активации), проходит через классификатор и удаляется через разгрузочный патрубок 2 (см. рис. 4) на осаждение и пылеочистку.

Мелкая фракция в виде готового продукта, перемещается по газоходам 4 и осажается в двух циклонах 1, 2 и бункерах 3 (см. рис 6).

Окончательная очистка воздуха от пыли производится в рукавном фильтре. После очистки отработанный воздух вентилятором выбрасывается в атмосферу.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № НК-14-41-08042/14р\_офи\_м.*

#### **Список литературы:**

1. Экспериментальные исследования струйной противочной мельницы/ С.Б. Булгаков, В.С. Богданов, Е.Б. Александрова, Д.В. Карпачев // Энергосберегающие технологии в дорожной и строительной технике: Материалы межвуз. сб. статей. Белгород: Изд-во БГТУ, 2002. С. 33-36.
2. Условия износа рабочей камеры вихре-акустического диспергатора/ С.Б. Булгаков, А.С. Горлов, А.В. Губарев, С.В. Рябцева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №4. С. 87-91.

## КРИТЕРИЙ НЕОБХОДИМОСТИ ИННОВАЦИОННОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ЦЕМЕНТНЫХ ЗАВОДОВ

**Вердиян М.А., д-р техн. наук, проф., академик МАСИ,  
Несмеянов Н.П., канд. техн. наук, проф.,  
Ильин Д.В., аспирант**

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

Острой проблемой, стоящей в настоящее время перед отраслью, является необходимость проведения инновационной модернизации (ИМ) цемзаводов, которая диктуется не только директивными указаниями вышестоящих органов, но и низкой эффективностью работы действующих производств, вызванной традиционными способами организации типовых процессов превращения сырья в цемент, что приводит к отсутствию новых источников доходов у предприятия.

И здесь неизбежно возникает вопрос. Каким критерием (параметром) следует характеризовать результат успешной инновационной модернизации (ИМ) конкретного завода.

С позиций развиваемой новой идеологии анализа технологий цемента [1,2] таким параметром ИМ может служить уровень конкурентоспособности (КС) исследуемого объекта. Этот запатентованный нами [1] параметр численно определяется через соотношение всех затрат, включенных в себестоимость цемента  $C(\mathcal{E})$  в кВт $\times$ ч/т к его качеству, выраженному в эксергетических характеристиках  $E_{\text{цем}}$  [кдж/кг].

$$КС = \frac{C(\mathcal{E})}{E_{\text{цем}}} \quad (1)$$

В этом выражении:  $C(\mathcal{E}) = \frac{\mathcal{E}_{[\text{кВт}\times\text{ч}/\text{т}]}}{a} \times 100\%$

где  $E_{\text{цем}}$  – эксергия цемента, определяемая по методике [2] с учетом того, что 1 кВт $\times$ ч=3,6 Мдж;

$\mathcal{E}$  – удельный расход электроэнергии на получение одной тонны цемента, кВт $\times$ ч/т;

$a$  – доля удельного расхода электроэнергии в себестоимости цемента, в %.

Критерий КС является безразмерной величиной и из выражения (1) следует, что необходимо уменьшать себестоимость цемента и увеличивать его качество. Это означает, что чем ниже КС, тем выше уровень конкурентоспособности исследуемого цемзавода, и что для

выбора тех или иных решений в связи с ИМ, следует использовать изменение величины КС, причем  $КС_{\text{предл}}$  должно быть меньше  $КС_{\text{сущ}}$ .

Выполним расчеты для исследуемого объекта – ОАО «Осколцемент» цементного завода, у которого в качестве базовых данных приняты  $\mathcal{E}=90$  кВт×ч/т;  $a \approx 15\%$ .

$$\text{Тогда } C(\mathcal{E}) = \frac{90}{15} \times 100 = 600 \text{ кВт} \times \text{ч/т.}$$

Рассмотрим некоторые весьма возможные варианты изменения величины КС и как по его значению можно судить об эффективности принимаемых технологических решений. При получении цемента СЕМІ-42,5R эксергия цемента по нашим данным [2] составляет,  $E_{\text{цем}}(42,5R) = 7200$  [Мдж/т], а при получении СЕМі-52,5N-  $E_{\text{цем}}(52,5N) = 8070$  [Мдж/т]. Тогда при одинаковых базовых данных по  $\mathcal{E}$  и  $a$  цемента критерий КС будет следующим:

$$КС(42,5R) = \frac{3,6 \times 600}{7200} = 0,3, \text{ а } КС(52,5N) = \frac{3,6 \times 600}{8070} = 0,2676,$$

Это говорит, казалось бы, о преимуществе данного завода при выпуске цемента 52,5N. Однако при выпуске такого цемента с повышенной эксергией имеет место неизбежное увеличение  $\mathcal{E}$  (кВт×ч/т), которое при одинаковом уровне  $КС=0,3$  составит 100,875 кВт×ч/т. При этом себестоимость цемента составит:

$$C(\mathcal{E}) = \frac{100,875 \times 100}{15} = 672,5 \text{ кВт} \times \text{ч/т или}$$

$$\mathcal{E} = \frac{672,5 \times 15}{100} = 100,875 \text{ кВт} \times \text{ч/т};$$

$$\text{Тогда } КС(52,5N) = \frac{3,6 \times 672,5}{8070} = 0,3$$

Если выбранные технические решения обеспечивают величину  $КС > 0,3$ , а это значит, что  $\mathcal{E}$  будет больше 100,875 кВт×ч/т, то такой инновационной модернизации следует давать дополнительную оценку, т.к. в таком случае не исключен вариант снижения эффективности работы цементного завода.

Таким образом, критерий КС следует считать новым объективным параметром, оценивающим эффективность проведения ИМ на каждом заводе. А это значит, что нам впервые удалось перейти к количественной оценке по эффективности внедрения любых нововведений на любом цемзаводе, что позволяет дать научно-обоснованную программу финансового развития цементных заводов.

В состав комплексного критерия оценки эффективности создаваемых новых и реконструируемых действующих цементных производств входит и срок (период) окупаемости затрат на реализацию проекта. Работа цемзаводов в рыночных условиях показала, что этот показатель должен определяться естественно при получении цемента различных видов-марок, имеющих, как теперь стало известным и различные значения стоимости их эксергии.

Однако с помощью традиционного технико-экономического подхода трудно определить оперативную себестоимость выпускаемой партии конкретного цемента, а тем более – срок освоения энергетических затрат на его получение. Поэтому данное исследование, направленное на усовершенствование традиционных технико-экономических расчетов цементного производства, работающего в сложных условиях неопределенности по изменению сырья, режимов работ технологии и оборудования, с использованием понятия предельной стоимости эксергии цемента является актуальным.

Общеизвестная последовательность расчета срока окупаемости (Т) новостроящегося цемзавода, не учитывающая качества выпускаемой продукции:

$$T = \frac{K}{\Pi} \quad (2)$$

где К – капитальные вложения;

Π – текущая или годовая прибыль.

На примере создания зарубежной фирмой нового цемзавода расчет выглядит таким образом:

В качестве исходных данных приняты общие и осредненные данные, характерные для вновь строящихся заводов: ОАО «Щуровский цемент», ЗАО «Подгоренский цементник» и ЗАО «Жугулевский комбинат строительных материалов». Стоимость каждого завода ≈ 500 млн.\$, мощность завода 2 млн.т цемента в год, тогда удельные капитальные вложения  $K/M = 500 \text{ млн.} \$ / 2 \text{ млн.т} = 250 \text{ } \$/(\text{т/год}) = 250 \times 30 = 7500 \text{ руб}/(\text{т/год})$ .

Π – текущая прибыль формируется в зависимости от величины предельной стоимости эксергии получаемого цемента  $E_{\text{цемент}}$ . Это новый подход к анализу процессов технологии цемента с позиций энергетического анализа.

Введено понятие и разработана методика определения предельной стоимости эксергии цемента. Этот параметр определяется по величине  $E_{\text{цемент}}$  с размерностью кВт×ч/т и поэтому рассчитывается на

заводе по цене электроэнергия одного кВт×ч.

Размерность  $E_{\text{предел.цем.}} = E \text{ кВт} \times \text{ч} / 3,6 = 7200 / 3,6 = 2000 \text{ кВт} \times \text{ч}$ .

Известно, что  $1 \text{ кВт} \text{ ч} = 3,6 \text{ Мдж}$ .

Принимаем, что расчет ведется для получения цемента СЕМІ-42,5R с эксергией  $E = 7200 \text{ [Мдж/тонн]}$ .

При этих данных  $1\$ = 30 \text{ руб/ч}$ ;  $1 \text{ кВт} \text{ ч} = 2 \text{ руб}$  величина  $T$  составит:

$$T = \frac{7500 \frac{\text{руб}}{\text{т}} \times 1 \text{ год}}{4000 \text{ руб/т}} = 1,875 \text{ год}$$

Традиционный технико-экономический подход к оценке стоимости цемента не позволяет учесть стоимость качества цемента в рамках одного и того же типа и класса прочности. В то же время эксергия цемента  $E_{\text{цем}}$  является гибким ценобразующим параметром, определяющим качество цемента и его стоимость в изменяющихся условиях по сырью, клинкеру и технологии их превращения.

Сегодня величина  $T$  может и должна стать управляемым параметром, т.к. авторы располагают новой научной идеологией и на ее основе многими технологическими решениями, позволяющими в широких пределах изменять величину срока окупаемости в зависимости от конкретных условий заказчика и места его (цементного завода) строительства. При отборе вариантов предпочтение отдается проектам с наименьшим сроком окупаемости.

Появление таких проектов становится возможным, когда одновременно на модернизированном заводе создается научно-технологический и интеллектуальный центр (НИИЦ), когда создается специальный отраслевой институт по выработке различных проектов. Опыт работы такого института у нас в РФ есть ОАО «Научно-исследовательский институт цементной промышленности» (ОАО НИИЦемент), в лаборатории которого «Кибернетика и системный анализ технологических процессов» проводились научно-исследовательские и опытно-конструкторские по созданию цементного завода будущего.

Объектом интенсификации и управления составными частями новой российской цементной отрасли являются взаимосвязанные подсистемы «наука – производство – кадры». При этом производство цемента и строительных материалов на его основе рассматривается как единое химико-технологическое производство на двух иерархических уровнях:

– на первом уровне типовых химико-технологических процессов и производства в целом получения цемента и на уровне производства строительных материалов на основе цемента;

– на втором уровне сравнительный анализ работы цементных предприятий и потребителей цемента показывает, что причина повышенных энергозатрат и снижения качества выпускаемой продукции – цемента и строительных материалов на его основе – заключается в несогласованности технологий и организации работы цементных заводов и предприятий, потребляющих конкретный цемент.

Цементзаводы вместо выпуска единичных адресных цементов с максимальной эксергией отпускают потребителям множественные цементы различного свойства заданной видо-марки.

Мы видим, что против РФ и стран СНГ осуществляется агрессивная экспансия отрасли. Происходит расширение сферы господства монополистических иностранных цементных объединений, осуществляемое экономическими и политическими методами. Отмечалось, что иностранные компании, пользуясь отсутствием государственного контроля и управления цементной отраслью, при поддержке отдельных отечественных специалистов навязывают нам морально устаревшую технику и технологию сухого способа производства цемента с вращающимися агрегатами большой единичной мощности. В связи с этим возникает вопрос: какой при одинаковых условиях по сырью, топливу, мощности и качеству цемента создавать цементзавод: мокрый или сухой способ производства цемента с вращающимися агрегатами. И главный вопрос здесь таков – может ли иметь место инновационная модернизация (ИМ) и технологическое обновление (ТО) цементзаводов в цементной отрасли? Если – да, то в каком направлении, и что для этого нужно сделать. И обсуждение и решение этого вопроса является сегодня главной задачей. Согласитесь, ведь нельзя признать за ИМ обычные ремонтно-восстановительные действия, дозаправку системы обычными запасными частями и т.п.

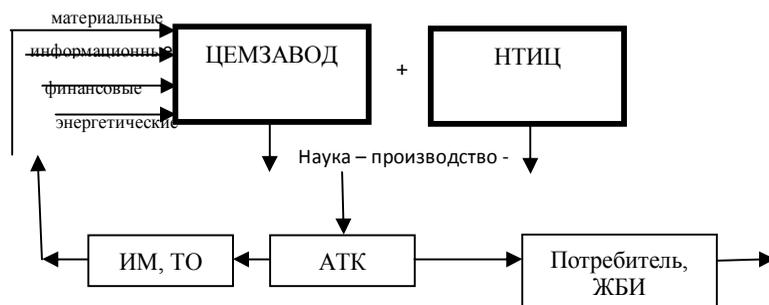
Стоит признать, что сделать это будет весьма непросто. По факту на сегодняшний день в стране практически не осталось отраслевых научных центров, ориентированных на внедрение инноваций в производство. АО «НИИЦемент» практически нет. Однако потребности современного рынка таковы, что если не проводить регулярную модернизацию производства, то продукция (цемент) в скором времени просто окажется неконкурентоспособной, т.е. цемент окажется непригодным для применения в строительных материалах, где он используется, т.е. энергонапряженность  $\text{ЭН}_{\text{тек}}$  будет меньше  $\text{ЭН}_{\text{зад}}$ . Без

развития отраслевой науки модернизация превращается в простую закупку иностранного оборудования, что уже имеет место сегодня. Но даже в таких условиях проблема ИМ и ТО может быть успешно решена путем создания на местах заводских НТ центров и подготовки здесь же на месте заводского отряда (класса) модернизаторов. Опыт такой у нас имеется. Готовность – начинай хоть сейчас. Здесь важно понять – при решении ИМ и ТО дилетантам с традиционной подготовкой здесь не место. И чтобы процесс внедрения ИМ и ТО был успешным, необходимо использование новой системы «Наука – производство – кадры».

В настоящих предложениях в НТИЦ реализован принцип единства нового научного мировоззрения, модернизируемого и нового производства и подготовки новых специалистов технологическо-управленцев. Предлагаемые научные разработки не имеют зарубежных аналогов, имеют отечественный приоритет и составляют сущность и содержание предложений. Их внедрение закрепляет и суммирует интеллектуальную собственность компании. Предложения составлены на примере ЗАО «Евроцемент груп».

#### Структура модернизируемого цемзавода

Потоки:



Таким образом, применительно к цемзаводам инновационная модернизация ИМ – это разработка комплекса мероприятий, направленных на внедрение на действующих заводах новой научной идеологии, техники, технологий, изобретений и т.п., направленных на изменение работы завода и придания ему повышенной конкурентоспособности с критерием  $КС_{предл}$  меньше, чем  $КС_{сущ}$ .

Под технологическим обновлением нами понимается реализация внедрения такого комплекса взаимосвязанных технологических решений, которые приближают процесс превращения сырья к

идеализированному, когда  $\Delta$ , Кач.=  $D(E) \rightarrow \min$ , повышают при этом – по сравнению с существующими показателями – энергетическую, и экономическую, и экологическую эффективность работы цементных заводов с достижением конкурентоспособности выпускаемой продукции. Выбор этих решений определит и конкретное направление технологического обновления, которое невозможно решить без научно-обоснованной единой технологической идеологии».

### ЦЕМЕНТНЫЙ ЗАВОД НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Что может служить критерием успешной реализации ИМ при внедрении комплекса мероприятий? Таким критерием может служить параметр характеризующий конкурентоспособность цементного завода и срок его окупаемости

$T_i$  после внедрения ИМ:  $KC_{\text{предл}} < KC_{\text{сущ}}$  и срок окупаемости  $T_{\text{предл.}} < T_{\text{баз.}}$

Рыночный принцип «Спрос рождает предложение» в условиях дефицита.

$$KC = \frac{C(\Delta)}{E_{\text{цемент}}} \quad (3)$$

Рыночный принцип «Спрос рождает предложение» в условиях дефицита товара – цемента – объективно вызывает необходимость создания новых производств. Однако мы не можем себе позволить прирост производства цемента простым повторением и использованием существующих технологий. Для выбора эффективных решений нами предложен и запатентован критерий оценки конкурентоспособности предлагаемых технологий.

$$KC = C(\Delta) / E_{\text{цемент}} \quad (4)$$

Уровень конкурентоспособности предлагаемых технологий  $KC_{\text{предл}}$  должен быть выше уровня существующих  $KC_{\text{сущ}}$ .

Вершиной внедрения ИМ в отрасли является создание цементного завода будущего. Реализация ИМ и ТО предполагает обязательное внедрение на заводах комплекса семи взаимосвязанных между собой этапов:

1. Определение дисперсий колебаний Ф.Х. и Ф.М. свойств исходных сырьевых компонентов, сырьевой шихты на их основе.

2. Определение эксергетических характеристик  $E_{\text{исх}}$  сырьевых компонентов, сырьевой шихты  $E_{\text{сыр.ш.}}$  и дисперсии этих колебаний  $D(E_{\text{исх}})$ ;  $D(E_{\text{сыр.ш.}})$ .

3. Разработка 2-х стадийной схемы измельчения сырьевой шихты.

4. Разработка системы перемешивания шлама с  $\Delta KН < 0,01$ .
5. Циклический способ обжига шлама с  $Q_{\min}$ ;  $A_{\text{кл.мах}}$  и  $D_{\min}(E_{\text{кл}})$ .
6. Стабилизация качества активности с  $\Delta A_{1, 2, 3, \dots, 28}$  цемента по их энергетическим показателям.
7. Получение адресного цемента для конкретного вида СМ, где он используется, в мельнице дискретно-непрерывного действия.

**СЕБЕСТОИМОСТЬ ЦЕМЕНТА**  
различных технологий при  $\Xi = Q = 1 \text{ кВт ч}$

$\frac{\Xi}{\frac{\text{квт/ч}}{т}}$	$\frac{Q}{\frac{\text{кг. усл. т}}{т. кл.}}$	Трудоемкость $\frac{\text{квт/ч}}{т}$	Сырьевые материалы $\frac{\text{квт/ч}}{т}$	Амортизация	Себестоимость $S(\Xi)$ $\frac{\text{квт/ч}}{т}$	Активность клинкера $\text{кг/см}^2$	Критерий КС
-Базовая технология (мокрый способ)							
90	210	90	90	120	600	500	1,2
15%	35%	15%	15%	20%	100%		
Базовая технология (сухой способ)							
150	150	150	90	60	600	450	1,33
25%	25%	25%	15%	10%	100%		
Предлагаемая технология (комбинированный способ)							
90	150	90	90	80	500	500	1.0
18%	30%	18%	18%	16%	100%		

Исследования показывают, что только после внедрения этапов легко может быть получен цемент СЕМІ – 52,5N со значением эксергии  $E_{\text{цем}}=8070 \text{ мдж /т.}$

Тогда,  $E_{\text{пред.цем.}} = 8070/3,6 = 2244 \text{ кВт} \times \text{ч/т}$ .

При  $1 \text{ кВт/ч} = 2 \text{ руб.}$   $T = \frac{7500}{4488} = 1,672$  года, что эквивалентно снижению соответствующих финансовых затрат при прежнем  $T = 1,875$  год и новым  $T = 1,672$  год. Себестоимость цемента различных технологий дана в таблице,

где  $КС = C(\text{Э})/A$

Вывод: Уровень конкурентоспособности предлагаемой технологии меньше, технологии производства мокрого способа и меньше технологии производства сухого способа.

#### Список литературы:

1. Вердиян М.А., Несмеянов Н.П. Патент РФ по оценке конкурентоспособности цементных заводов, № 2250203 от 20.04.2005г.
2. Вердиян М.А., Бобров Д.П. Эксергетический анализ процессов химической технологии (на примере технологии цемента). М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2004. 68 с.
3. Вердиян М.А., Несмеянов Н.П. Эксергетический анализ в задачах одновременного повышения эффективности работы мельниц и качества цемента. Москва: МАСИ, 2005. 101 с.

## УСЛОВИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ИСХОДНОЙ МАССЫ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА ЧЕРЕЗ ПРОСЕИВАЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ГРОХОЧЕНИИ

Герасимов М.Д., канд. техн. наук, проф.,  
Мкртычев О.В., доц.

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

Развитию теории сортировки сыпучих материалов на грохотах посвятили работы многие отечественные учёные: Бауман В.А., Блехман И.И., Вайсберг Л.А. [1,2,3] и другие. Чаще всего процесс грохочения рассматривается как вероятностный процесс. Однако, сам процесс как правило, рассматривается относительно единичного сита и непосредственно находящегося на нём материала.

В тоже время, представляет интерес вопрос прохождения всей исходной массы сыпучего материала через несколько сит и разделение всего объёма на отдельные классы. При этом грохочение на одном, двух, трёх ситах является частным случаем общего решения. Решение такой задачи представляет и практический интерес, так как в технической и справочной литературе отсутствуют рекомендации по проектированию двух и трёх ситовых грохотов. Данная работа входит в направление совершенствования машин для сортировки и измельчения сыпучих материалов [4,5].

Рассмотрим в данной работе условия прохождения массы сыпучего материала через систему параллельных сит. Допустим, что материал массы  $M$ , состоит из  $n$  классов с массами  $M_1, M_2, \dots, M_n$  (рис. 1).

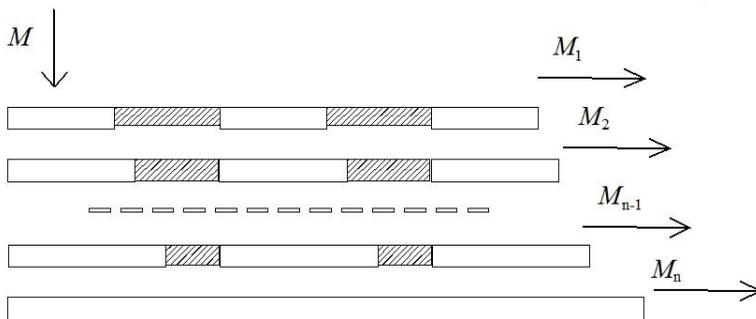


Рисунок 1 – Схема системы параллельных сит

Будем считать, что сыпучий материал состоит из однородной смеси составляющих продуктов на каждой поверхности сита. При этом деление продукта на надрешётный и подрешётный продукт, в процессе грохочения, происходит порционно в течение момента  $\Delta t$ . При этом этот момент времени будем считать в первом приближении одинаковым для всех просеивающих поверхностей (рис. 2).

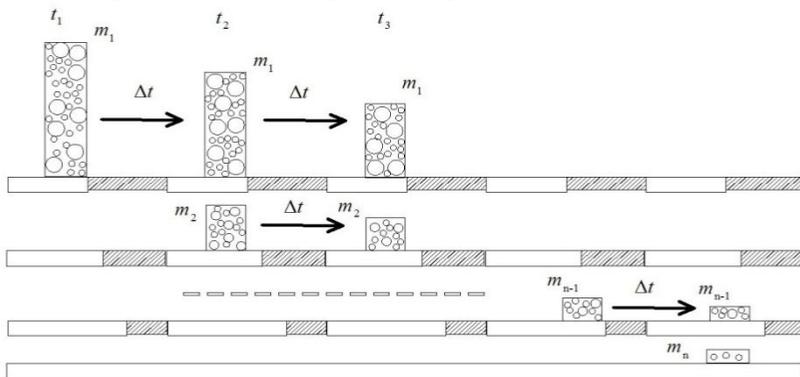


Рисунок 2 – Дискретное рассмотрение прохождения сыпучего материала через  $n$  параллельных сит.  $m_1(t), m_2(t), \dots$  – масса надрешётного продукта на первом, втором, ... сите, соответственно, является функцией времени

Из сделанных допущений вытекает сразу несколько математических соотношений для введённых величин.

Так, шаг по времени равен

$$\Delta t = t_{k+1} - t_k \quad (1)$$

для  $k = 1, 2, \dots$ .

Начальная масса на первом сите равна массе, поданной на грохочение:

$$m_1(t_1) = M. \quad (2)$$

Конечная масса на каждом сите равна массе соответственного класса:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} m_i(t_k) = M_i, \quad (3)$$

для  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Закон сохранения массы в этих обозначениях примет вид:

$$M = m_1(t_1) = m_1(t_2) + m_2(t_2) = m_1(t_3) + m_2(t_3) + m_3(t_3) = \dots =$$

$$= m_1(t_n) + m_2(t_n) + \dots + m_n(t_n) = \dots \quad (4)$$

Легко проверить истинность и следующего рекуррентного соотношения

$$m_i(t_j) + m_{i+1}(t_j) = m_i(t_{j-1}), \quad (5)$$

где  $i = 1, 2, \dots, (n-1)$  и  $j = 2, 3, \dots, \infty$ .

Действительно, для момента времени  $t_2$ , рис. 2, сразу показывает справедливость этого равенства

$$m_1(t_2) + m_2(t_2) = m_1(t_1),$$

если посмотреть на первую и вторую поверхности.

Аналогично, для момента времени  $t_n$ , рис. 2, показывает, что

$$m_{n-1}(t_n) + m_n(t_n) = m_n(t_{n-1})$$

Обозначим вероятность разбиения материала на надрешётный и подрешётный продукт на сите  $i$  через  $q_i$  и  $p_i$ , соответственно. То есть

$$q_i = \frac{m_i(t_k)}{m_i(t_{k-1})} \quad (6)$$

и

$$p_i = \frac{m_{i+1}(t_k)}{m_i(t_{k-1})}. \quad (7)$$

Будем считать, что определённая таким образом вероятность не зависит от времени. Таким образом, для момента времени  $t_2$  масса надрешётного продукта (продукт на I-ом сите) связана с массой продукта на этом же сите в предыдущий момент времени соотношением

$$m_1(t_2) = q_1 m_1(t_1), \quad (8)$$

а масса подрешётного продукта в момент времени  $t_2$  (продукт на II-ом сите) связана с массой продукта на верхнем сите в предыдущий момент времени соотношением

$$m_2(t_2) = p_1 m_1(t_1). \quad (9)$$

Аналогичные (8) и (9) соотношения справедливы для всех просеивающих поверхностей и всех моментов времени.

Используя соотношения (2) и (5)...(7), запишем закон сохранения массы для нескольких первых моментов времени.

Момент  $t_2$ :

$$M = m_1(t_2) + m_2(t_2) = q_1 m_1(t_1) + p_1 m_1(t_1) = (q_1 + p_1) M. \quad (10)$$

Момент  $t_3$ :

$$M = m_1(t_3) + m_2(t_3) + m_3(t_3) = q_1 m_1(t_2) + p_1 m_1(t_2) + q_2 m_2(t_2) + p_2 m_2(t_2) = (q_1 q_1 + p_1 q_2 + q_1 p_1 + p_1 p_2) M. \quad (11)$$

.....

Образование коэффициентов, стоящих в скобках формул (10), (11), ..., легче рассмотреть, используя граф, построенный на рис. 3.

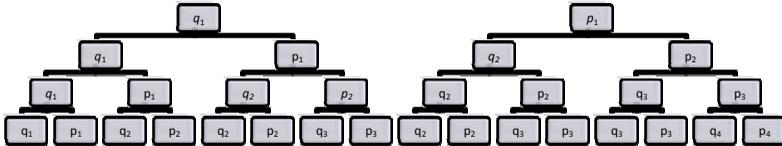


Рисунок 3 – Граф построения коэффициентов

Правило образования узлов на графе основано на выражениях (6), (7). От узла  $q_i$  отходят вниз два узла  $q_i$  и  $p_i$ , а от узла  $p_i$  отходят два узла  $q_{i+1}$  и  $p_{i+1}$ .

С помощью графа легко продолжить запись закона сохранения массы.

Момент  $t_4$ :

$$M = (q_1 q_1 q_1 + q_1 q_1 p_1 + q_1 p_1 q_2 + q_1 p_1 p_2 + p_1 q_2 q_2 + p_1 q_2 p_2 + p_1 p_2 q_3 + p_1 p_2 p_3) M. \quad (12)$$

Этот же граф легко использовать для определения массы продукта в любой момент времени на любой из просеивающих поверхностей. На  $i$ -ой поверхности будут члены, с коэффициентами, заканчивающимися на  $q_i$  и  $p_{i-1}$ . При этом на верхней поверхности будет масса, заключённая в члене с коэффициентом  $q_1 q_1 \dots q_1$ . В то же время, на нижней из рассматриваемых поверхностей будет масса, заключённая в члене с коэффициентом  $p_1 p_2 p_3 \dots$  (табл. 1).

Таблица 1 – Определение массы продукта для каждого момента времени на каждой поверхности

Момент времени	Выход на поверхности, $xM$				
	I	II	III	IV	...
$t_1$	1				...
$t_2$	$q_1$	$p_1$			...
$t_3$	$q_1 q_1$	$p_1 q_2 + q_1 p_1$	$p_1 p_2$		...
$t_4$	$q_1 q_1 q_1$	$q_1 q_1 p_1 +$ $q_1 p_1 q_2 +$ $p_1 q_2 q_2$	$q_1 p_1 p_2 +$ $p_1 q_2 p_2 +$ $p_1 p_2 q_3$	$p_1 p_2 p_3$	...
.....	...	...	...	...	...

Таким образом, получены зависимости, позволяющие прогнозировать массу материала, получаемую на каждом сите при известном объёме исходной массы сыпучего материала и количестве просеивающих поверхностей.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № НК-14-41-08043/14р\_офи\_м.*

#### **Список литературы:**

1. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов: Справочник / под ред. В.А. Баумана и др. М.: Машиностроение, 1970. 548 с.
2. Вибрация в технике: Справочник. В 6-ти т./ ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение, 1981. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э.Э. Лавендела. 1981. 509 с., ил.
3. Вайсберг Л.А. Проектирование и расчёт вибрационных грохотов. М.: Недра, 1986. 144 с.
4. Герасимов М.Д., Мкртычев О.В. Кинематический анализ вибрационного механизма планетарного типа / ScienceTime. 2014. № 4. С.44-57.
5. Уральский А.В., Севостьянов В.С. Многофункциональный центробежный агрегат с параллельными помольными блоками // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. № 1. С. 106-111.

## РАСЧЁТ СИСТЕМЫ ОДНОВАЛЬНЫХ ВИБРАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ РЯДОВ ФУРЬЕ

Герасимов М.Д., канд. техн. наук, проф.,

Мкртычев О.В., доц.,

Степанищев В.А., аспирант

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

Планетарные вибраторы широко применяются в разных технологических областях [1,2]. Техническое решение [2] получения направленных механических колебаний с помощью планетарных вибраторов позволяет ещё больше расширить границы применения таких механизмов. В последние годы коллективом исследователей, работающим в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова выполнен целый ряд теоретических и экспериментальных работ по анализу и проектированию планетарных вибраторов направленного действия [2-6] и вибрационных машин [7].

Цель данной работы провести анализ системы последовательно соединённых вибрационных механизмов направленных колебаний планетарного типа с помощью Фурье-анализа для получения заданного характера изменения ускорения. В частности, проводится анализ вибрационного механизма направленных колебаний планетарного типа при различных соотношениях размеров планетарной передачи и разной частоте обращения.

Для функции (рис. 1)

$$x = \begin{cases} x_1, & 0 < t < t_1, \\ x_2, & t_1 < t < t_1 + t_2 = T, \end{cases}$$

разложение в ряд Тейлора в заданном интервале  $(-\pi, \pi)$  и периодическое продолжение вне этого интервала, имеет вид

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{a_1 t_1 + a_2 t_2}{T} + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_1 - a_2}{\pi k} \left[ \sin\left(2\pi k \frac{t_1}{T}\right) \cos\left(2\pi k \frac{t}{T}\right) - \right. \\ &\left. - \cos\left(2\pi k \frac{t_1}{T}\right) \sin\left(2\pi k \frac{t}{T}\right) + \sin\left(2\pi k \frac{t}{T}\right) \right] = \\ &= \frac{a_1 t_1 + a_2 t_2}{T} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_1 - a_2}{\pi k} \left[ \sin\left(2\pi k \frac{t_1 - t}{T}\right) + \sin\left(2\pi k \frac{t}{T}\right) \right] = \end{aligned}$$

$$= \frac{a_1 t_1 + a_2 t_2}{T} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_1 - a_2}{\pi k} \sin\left(\pi k \frac{t_1}{T}\right) \cos\left(\pi k \frac{t_1 - 2t}{T}\right)$$

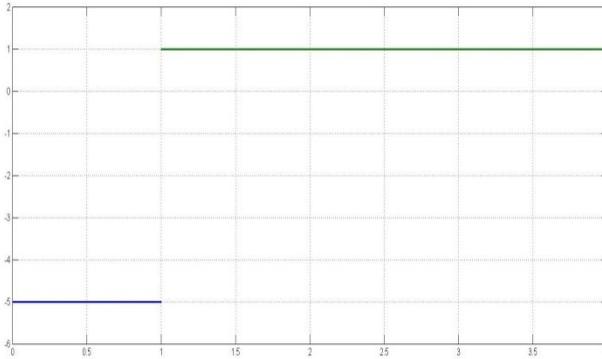


Рисунок 1 – Требуемая характеристика на выходе

Задавая экстремальные значения проекции ускорения на ось абсцисс можно получать необходимые элементы разложения ряда Фурье с требуемой точностью, ограничиваясь первыми членами ряда. Для примера на рис. 2 показан график  $x(t)$  для значений  $a_1 = -5$ ;  $a_2 = 1$ ;  $t_1 = 0,5\pi$ ;  $t_2 = 1,5\pi$  в диапазоне  $t$  от 0 до 10 для первых 5 членов ряда Фурье

$$x(t) \approx \frac{-1}{2} + \sum_{k=1}^5 \frac{-6}{\pi k} \sin\left(\frac{\pi k}{4}\right) \cos\left(\pi k \frac{0,5\pi - 2t}{2\pi}\right)$$

и для первых 7 членов ряда Фурье

$$x(t) \approx \frac{-1}{2} + \sum_{k=1}^7 \frac{-6}{\pi k} \sin\left(\frac{\pi k}{4}\right) \cos\left(\pi k \frac{0,5\pi - 2t}{2\pi}\right)$$

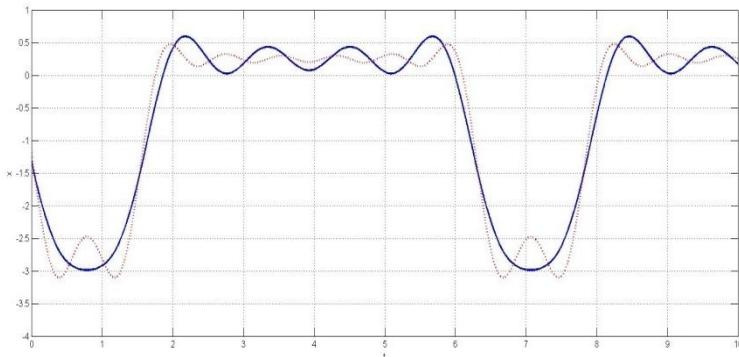


Рисунок 2 – Результат разложения в ряд Фурье функции  $x(t)$  5-ю первыми членами ряда (сплошная синяя) и 7-ю первыми членами ряда (штриховая красная)

Если собирается система последовательно соединённых вибрационных механизмов направленных колебаний планетарного типа рассматриваемых в [2,3], то колебание каждого механизма в отдельности будет вносить следующий вклад в ускорение:

$$a_i = -\left(\frac{\pi n_i}{30}\right)^2 R_i \cos\left(\varphi_0 - \frac{\pi n_i}{30} t\right)$$

Следовательно, например, для первых 5 членами ряда, должно выполняться равенство:

$$\begin{aligned} \frac{a_1 t_1 + a_2 t_2}{T} + \sum_{k=1}^5 \frac{a_1 - a_2}{\pi k} \sin\left(\pi k \frac{t_1}{T}\right) \cos\left(\pi k \frac{t_1 - 2t}{T}\right) = \\ = -\sum_{i=1}^5 \left(\frac{\pi n_i}{30}\right)^2 R_i \cos\left(\varphi_{0i} - \frac{\pi n_i}{30} t\right) \end{aligned}$$

Подобное равенство в принципе возможно только если

$$a_1 t_1 = -a_2 t_2 \quad (1)$$

или

$$-\frac{a_1}{a_2} = \frac{t_2}{t_1}$$

В этом случае

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^5 \frac{a_1 - a_2}{\pi k} \sin\left(\pi k \frac{t_1}{T}\right) \cos\left(\pi k \frac{t_1 - 2t}{T}\right) \\ = - \sum_{i=1}^5 \left(\frac{\pi n_i}{30}\right)^2 R_i \cos\left(\varphi_{0i} - \frac{\pi n_i}{30} t\right) \end{aligned}$$

Перепишем данное равенство в виде

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^5 \frac{a_1 - a_2}{\pi k} \sin\left(\pi k \frac{t_1}{T}\right) \cos\left(\pi k \frac{t_1}{T} - 2\pi k \frac{t}{T}\right) \\ = - \sum_{i=1}^5 \left(\frac{\pi n_i}{30}\right)^2 R_i \cos\left(\varphi_{0i} - \frac{\pi n_i}{30} t\right) \end{aligned}$$

Ввиду независимости параметров, для этого достаточно решить систему уравнений и требования, чтобы левые и правые суммы были равны друг другу во все моменты времени, приравнявая аналогичные коэффициенты, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} 2\pi k \frac{1}{T} = \frac{\pi n_k}{30} \\ \pi k \frac{t_1}{T} = \varphi_{0k} \\ \frac{a_1 - a_2}{\pi k} \sin\left(\pi k \frac{t_1}{T}\right) = - \left(\frac{\pi n_k}{30}\right)^2 R_k \end{cases}$$

Эта система позволяет, с учётом (1), определить искомые параметры системы  $n_k, \varphi_{0k}, R_k$ :

$$\begin{cases} n_k = \frac{60}{T} k, \\ \varphi_{0k} = \pi k \frac{t_1}{T}, \\ R_k = \frac{a_2 - a_1}{\pi k} \sin\left(\pi k \frac{t_1}{T}\right) \left(\frac{30}{\pi n_k}\right)^2 = T^2 \frac{a_2 - a_1}{4\pi^3 k^3} \sin\left(\pi k \frac{t_1}{T}\right). \end{cases} \quad (2)$$

Если задать не значение  $T = t_1 + t_2$ , а значение  $n_k$ , то первое уравнение полученной системы (2) можно использовать для определения периода колебаний. Рассмотрим конкретный пример для  $k = 1:5$ . Значения ускорения (см. рис. 1)  $a_1 = 1 \cdot 10^4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ ,  $a_2 = -5 \cdot 10^4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ ,  $n_{1:5} = 500:500:2500 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}$ .

Из (1) следует, что  $t_1 = 5t_2$ . Следовательно, из первого уравнения системы (2) можно получить время работы на каждом значении ускорения:

$$6t_2 = \frac{60}{n_k} k.$$

Откуда,  $t_2 = 10/n_1 = 0,02$  с,  $t_1 = 0,1$  с и  $T = t_1 + t_2 = 0,12$  с.

Из второго уравнения (2) получим значения начальных углов отклонения каждого вибровозбудителя от вертикали против часовой стрелки:  $\varphi_{01} = \alpha = \frac{5}{6}\pi$ ,  $\varphi_{02} = 2\alpha = \frac{10}{6}\pi$ ,  $\varphi_{03} = 3\alpha = \frac{3}{6}\pi$ ,  $\varphi_{04} = 3\alpha = \frac{8}{6}\pi$ ,  $\varphi_{05} = 3\alpha = \frac{1}{6}\pi$ .

Третье уравнение системы (3) позволяет получить значения радиуса направляющей окружности:

$$R_1 = -3,483 \text{ м}, R_2 = 0,754 \text{ м}, R_3 = -0,258 \text{ м}, R_4 = 0,094 \text{ м}, R_5 = -0,028 \text{ м}.$$

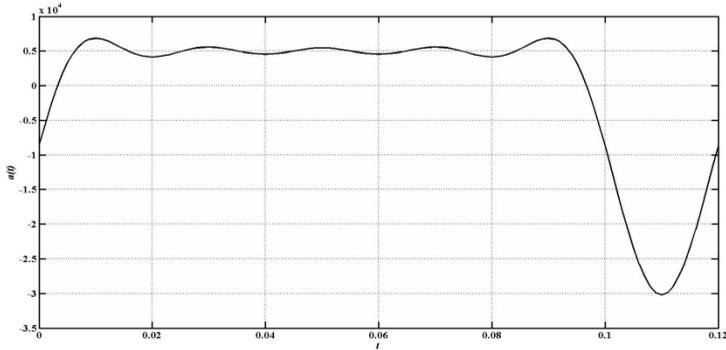


Рисунок 3 – Колебания, происходящие за один период  $T$  в результате сложения колебаний вида  $-\sum_{i=1}^5 \left(\frac{\pi n_i}{30}\right)^2 R_i \cos\left(\varphi_{0i} - \frac{\pi n_i}{30} t\right)$

Таким образом, показана возможность расчёта параметров колебаний отдельных вибрационных модулей, которые в сумме позволяют получить эффект удара, причём с возможностью использования минимального числа единичных вибрационных модулей.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № НК-14-41-08043/14р\_офи\_м.*

#### Список литературы:

1. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов: Справочник / под ред. В.А. Баумана и др. М.: Машиностроение, 1970. 548 с.
2. Герасимов М.Д., Исаев И. К. Способ направленных колебаний и устройство для его осуществления. Патент RU 2381078 С2, В06В 1/00, 24.12.2007.

3. Герасимов М.Д., Мкртычев О.В. Кинематический анализ вибрационного механизма планетарного типа // ScienceTime. 2014. № 4. С. 44-57.
4. Герасимов М.Д., Герасимов Д.М., Исаев И.К. и др. Одновальный планетарный вибратор направленных колебаний. Решение о выдаче патента по заявке RU 2012 133129 от 2014.01.13.
5. Герасимов М.Д., Герасимов Д.М. Определение закона движения, скорости и ускорения центра масс планетарного вибровозбудителя // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. №12. С. 8-11.
6. Герасимов М.Д. Способ получения направленных механических колебаний для практического применения в технологических процессах // Строительные и дорожные механизмы. 2014. №1. С. 35-38.
7. Уральский А.В., Севостьянов В.С. Многофункциональный центробежный агрегат с параллельными помольными блоками // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. № 1. С. 106-111.

## **ТОНКОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦАХ**

**Дейнека Е.Ю., канд. техн. наук**

*Национальный университет водного хозяйства  
и природопользования (г. Ровно)*

Главным недостатком традиционных барабанных мельниц является низкий механический коэффициент полезного действия, вследствие высоких удельных затрат энергии – до 40-60 кВт·час. Это обусловлено сравнительно низкой интенсивностью циркуляции в рабочей камере вращающегося барабана мелющей загрузки, поскольку значительная ее часть является пассивной и не принимает участие в измельчении. При этом процесс помола реализуется при несвободном падении с последующим сдвигом активного слоя, доля которого составляет лишь 30-45% всей загрузки. Существенно усилить интенсивность взаимодействия мелющих тел с частицами измельчаемого материала можно путем самовозбуждения автоколебаний загрузки [1].

Аналитически, на основе методов аналитической механики, принципа установления иерархии переменных механических систем и теории быстрых движений зернистых материалов, было получено условие асимптотической устойчивости установившегося движения мельницы [2] и условие устойчивости течения загрузки в камере вращающегося барабана [3]. Факторами неустойчивости являются вариации осевого момента инерции загрузки, момента сопротивления вращению барабана, дилатансия или разрыхление загрузки и демпфирующее влияние частиц измельчаемого материала на взаимодействие молотильных тел [4-6].

Известный теоретический метод расчета переменного осевого момента инерции загрузки [7,8] не соответствует физической сущности задачи, поскольку учитывает только его «присоединенную» к барабану часть. В то же время был разработан метод расчета инерционных параметров загрузки при визуализации картин движения в поперечном сечении вращающейся камеры [9]. Применение принципа затвердевания механической системы [10,11] позволило существенно упростить задачу благодаря учету всей массы загрузки – как «присоединенной», так и «отделенной».

В качестве цели работы было принято определение динамических характеристик переходных режимов движения загрузки в стационарно

вращающейся камере для оценки их влияния на условия самовозбуждения и развития автоколебаний.

При визуальном анализе картин движения загрузки были применены двумерные аналоги динамических и инерционных параметров в безразмерной форме.

Осевой, или его аналог полярный, момент инерции количественно оценивался по отношению его к значению момента при полном заполнении камеры барабана  $\psi_{i1}$  ( $\kappa=1$ ), а качественно – по отношению к моменту для пристенного слоя загрузки  $\psi_{iш}$  при текущем заполнении  $\kappa$ :  $\psi_{i1} = 2I_{p\delta} / \pi$ ,  $\psi_{iш} = 2I_{p\delta} / \left\{ \pi \left[ 1 - (1 - \kappa)^2 \right] \right\}$ , где  $I_{p\delta}$  – безразмерный полярный момент инерции фигуры загрузки,  $\kappa$  – степень заполнения камеры загрузкой.

Момент сопротивления, или его аналог статический момент, количественно оценивался по отношению к значению условного максимального момента при половинном заполнении камеры  $\psi_{m0,5}$  ( $\kappa=0,5$ ), а качественно – по отношению к условному максимальному моменту  $\psi_{mc}$  при текущем  $\kappa$ :  $\psi_{m0,5} = 3S_{y\delta} / 2$ ,  $\psi_{mc} = 3S_{y\delta} / (2\sin^3\alpha)$ , где  $S_{y\delta}$  – безразмерный статический момент фигуры сечения загрузки,  $\alpha$  – половина центрального угла сегментного сечения загрузки. Условный максимальный момент отвечает распределению загрузки в сечении камеры в виде идеального твердотельного сегмента, повернутого вместе с барабаном из состояния покоя на прямой угол.

Дилатансия загрузки в камере оценивалась по отношению текущего заполнения площади сечения камеры к полной площади этого сечения при текущей  $\kappa$ :  $\nu = F_{\delta} / (\pi\kappa)$ , где  $F_{\delta}$  – текущее значение безразмерной заполненной площади.

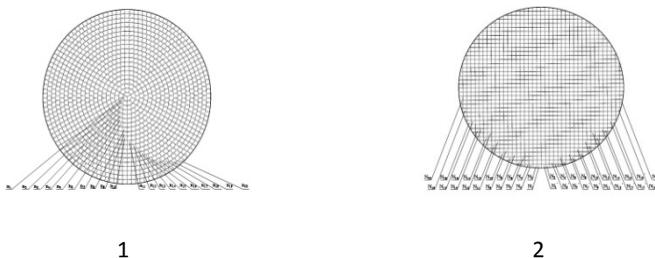
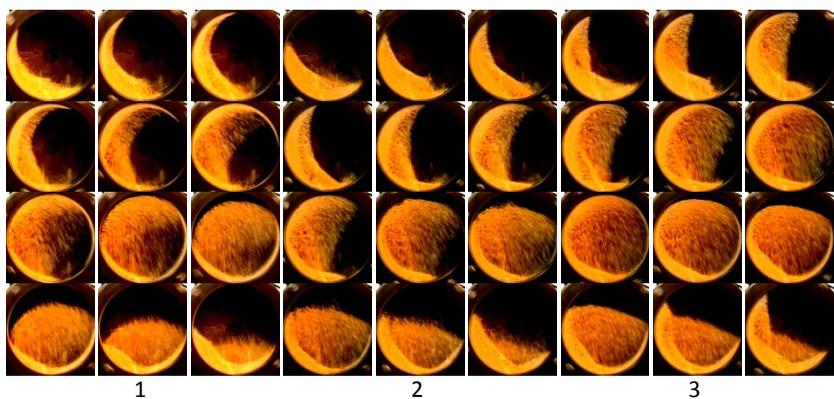


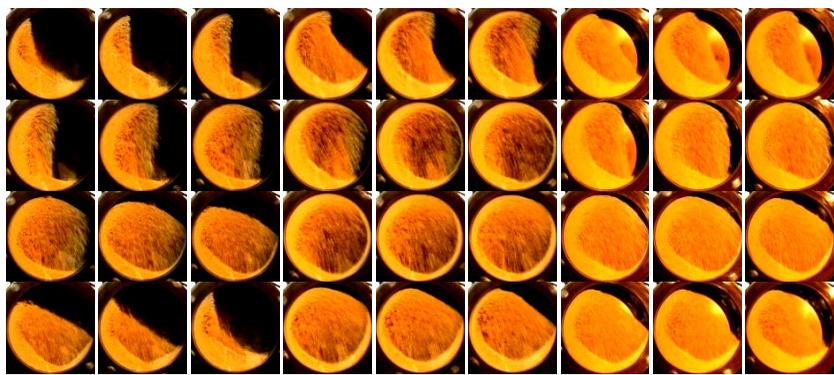
Рисунок 1 – Схемы расчетных сеток: 1 – с концентрическим размещением слоев ячеек, 2 – с рядным размещением слоев ячеек



1

2

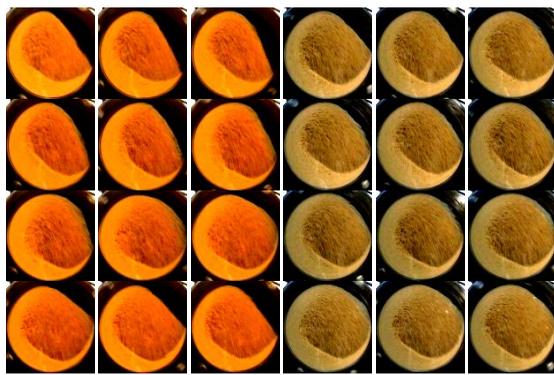
3



4

5

6



7

8

Рисунок 2 –  
 Последовательные  
 картины движения  
 загрузки для одного  
 периода автоколебаний:  
 1 –  $\kappa=0,15$ ; 2 –  $\kappa=0,2$ ;  
 3 –  $\kappa=0,25$ ; 4 –  $\kappa=0,3$ ;  
 5 –  $\kappa=0,35$ ; 6 –  $\kappa=0,4$ ;  
 7 –  $\kappa=0,45$ ; 8 –  $\kappa=0,5$

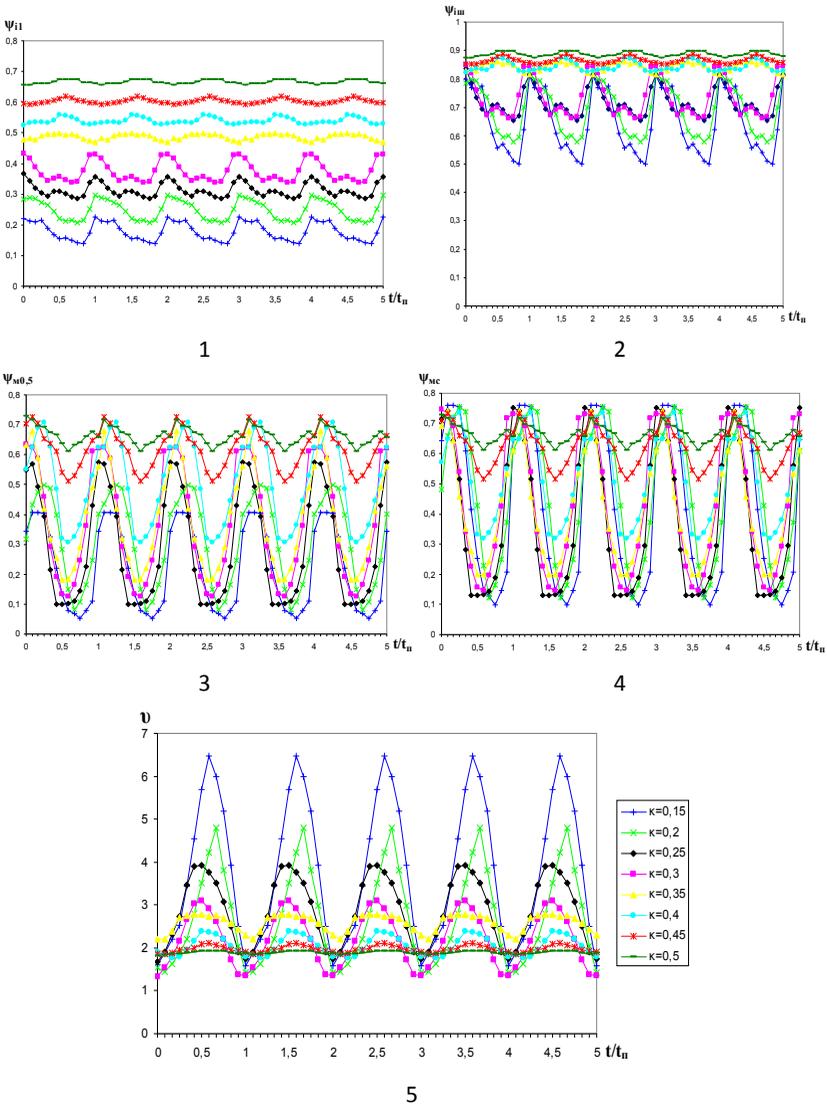


Рисунок 3 – Зависимости  $\psi_{I1}$  (1),  $\psi_{Iin}$  (2),  $\psi_{M0,5}$  (3),  $\psi_{Mc}$  (4) и  $v$  (5) от времени для нескольких периодов автоколебаний загрузки с максимальной амплитудой при  $\kappa = 0,15-0,5$

Для определения момента инерции использовалась расчетная сетка с концентричным расположением ячеек в виде кольцевого сектора (рис. 1.1), а для момента сопротивления – сетка с рядным расположением квадратных ячеек (рис. 1.2). Для определения дилатансии применялись обе сетки. Число кольцевых слоев ячеек первой сетки ( $n_{20}$ ) и половина числа вертикальных слоев ячеек второй ( $N_{20}$  та  $N'_{20}$ ) было принято равным 20. Общее число ячеек в каждой сетке составляло около 1200.

Мелющая загрузка моделировалось зернистым материалом с размером элементов  $d=2,2$  мм. В качестве измельчаемого материала применялся цемент. Была использована камера без выступов диаметром  $D=212$  мм и длиной 100 мм. Соотношение  $d/D \approx 0,01$  соответствует условиям работы трубных мельниц.

Для визуализации движения использовалась цифровая видеосъемка. Фиксировались картины переходного режима периодического движения загрузки во время автоколебаний. Изображения картин покрывались расчетными сетками и подсчитывалось количество заполненных ячеек. Было обработано 104 картины движения.

На рис. 2 изображены полученные последовательные картины движения загрузки для одного периода колебаний при  $\kappa=0,15-0,5$ .

Автоколебания возникали в диапазоне относительной скорости вращения  $\psi_{\omega} = \omega/\omega_{кр} = 0,85-1,15$ , нижняя граница которого уменьшалась с усилением демпфирующего влияния измельчаемого материала при увеличении его содержания в загрузке. Продолжительность периода колебаний загрузки в камере составляла около 0,5 с. Частота колебаний в 1,05-1,3 раза превышала частоту вращения и возрастала с уменьшением заполнения камеры. Автоколебания загрузки наблюдались при заполнении камеры  $\kappa \geq 0,15$ , а уверенное колебательное движение при  $\kappa \geq 0,25$ .

На рис. 3 приведены графики рассчитанных зависимостей  $\psi_{i1}$ ,  $\psi_{i\omega}$ ,  $\psi_{m0,5}$ ,  $\psi_{mc}$  и  $v$  от  $\psi_{\omega}$  в течение одного периода автоколебаний загрузки для восьми степеней заполнения камеры  $\kappa=0,15, 0,2, 0,25, 0,3, 0,35, 0,4, 0,45$  и  $0,5$ ; где  $t$  – время,  $t_n$  – продолжительность периода колебаний. При вычислении моментов учитывалась погрешность, обусловленная дилатансией загрузки в камере барабана.

Сравнительный анализ [12] картин движения и графических зависимостей свидетельствует о существенном возрастании амплитуды колебаний координат элементов, положения свободной поверхности загрузки и моментов инерции, сопротивления вращению и дилатансии с уменьшением степени заполнения камеры.

Было, также, выявлено проявление эффекта неустойчивости вращения барабанной мельницы в двух формах. Первое проявление автоколебаний является бифуркацией установившегося движения системы с возникновением периодического аттрактора. Второе проявление колебаний в виде пульсаций загрузки в камере является бифуркацией сдвигового зернистого потока с возникновением странного аттрактора вследствие хаотизации движения.

#### Список литературы:

1. Пат. 42493U України, МПК В 02 С 17/00. Спосіб подрібнення в барабанному млині із автоколивним внутрішньокамерним завантаженням / Дейнека К.Ю. – № u200900549; заяв. 26.01.09; опубл. 10.07.09, Бюл. № 13. 12 с.
2. Науменко К.Ю. Нестійкі режими обертання барабанних млинів // Вісн. НУВГП. Рівне: НУВГП, 2006. Вип. 2(34). Ч. 2. С. 111-119.
3. Дейнека К.Ю. Стійкість руху внутрішньокамерного завантаження барабанного млина // Вісн. НУВГП. Рівне: НУВГП, 2008. Вип. 3(43). С. 250-257.
4. Дейнека К.Ю. Создание рациональных режимов работы барабанных мельниц с автоколебательной внутрикамерной загрузкой // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харків. політехн. ін-т»: Зб. наук. пр. Темат. вип. «Хімія, хім. технологія та екологія». Х.: НТУ «ХП», 2010. № 65. С. 69-74.
5. Дейнека К.Ю. Створення раціональних режимів роботи барабаних млинів із автоколивним внутрішньокамерним завантаженням // Вісн. КНУ ім. М. Остроградського. Кременчук, 2011. Вип. 3(68), ч. 1. С. 93-95.
6. Дейнека К.Ю. Встановлення умов самозбудження пульсацій внутрішньокамерного завантаження барабанного млина // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харків. політехн. ін-т»: Зб. наук. пр. Темат. вип. «Хімія, хім. технологія та екологія». Харків: НТУ «ХП», 2011. № 50. С. 72-79.
7. Крюков Д.К. Усовершенствование размольного оборудования горнообогатительных предприятий. М.: Недра, 1966. 174 с.
8. Крюков Д.К. Маховой момент шаровых мельниц // Изв. вузов. Горн. журн. 1958. № 2. С. 131-134.
9. Науменко К.Ю. Застосування методу візуалізації для визначення змінних інерційних параметрів внутрішньокамерного завантаження барабанного млина // Вісн. НУВГП. Рівне: НУВГП, 2007. Вип. 4(40). Ч. 3. С. 9-16.
10. Новоселов В.С. Аналитическая механика систем с переменными массами. Л.: Изд-во ЛГУ, 1969. 240 с.
11. Бессонов А.П. Основы динамики механизмов с переменной массой звеньев. М.: Наука, 1967. 279 с.
12. Науменко Ю.В., Дейнека К.Ю. Теоретичні основи робочих процесів машин барабанного типу: монографія. Рівне: НУВГП, 2014. 531 с.

## ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОРПУСА СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА 1,6X8 М В CAD/CAE-СИСТЕМЕ NX

Ельцов М.Ю., канд. техн. наук, проф.,  
Хахалев П.А., аспирант,  
Фоменко А., студент,  
Латышев И., студент

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

При проектировании новых изделий, а также в процессе модернизации уже существующего оборудования часто встречаются задачи по проведению различных типов инженерных расчетов, которые позволяют разработчику подобрать рациональные геометрические параметры деталей, оценить долговечность конструкции и убедиться в ее работоспособности, существенно снизив затраты времен и денежных средств [1].

В статье описан расчет на прочность корпуса сушильного барабана Ø1,6×8 с учетом тепловых нагрузок в модуле "Расширенная симуляция" CAD/CAM/CAE-системы NX.

Порядок действий при расчете конечно-элементной сборки в модуле "Расширенная симуляция" выглядит следующим образом:

1. Открыть САD-сборку.
2. Создать КЭ сборку.
3. Создать конечно-элементные модели деталей сборки, которые будут участвовать в расчете.
4. Добавить конечно-элементные модели в КЭ сборку.
5. Создать расчетную модель, задать нагрузки, граничные условия, а также условия контактного взаимодействия тел.
6. Запустить решение модели.
7. Провести анализ результатов.

На этапе моделирования для каждой детали сборки корпуса барабана был назначен материал [2]. Обечайки корпуса сушильного барабана изготовлены из Ст3 ГОСТ 14637-69:

- плотность  $\rho=7850 \text{ кг/м}^3$ ;
- модуль упругости  $E=2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ;
- предел прочности  $\sigma_B=420 \text{ МПа}$ ;
- предел текучести  $\sigma_T=235 \text{ МПа}$ .

Важнейшим этапом при проведении расчетов является создание конечно-элементной модели. На все 6 обечаек были наложены 3D-гексаэдральные сетки с типом элемента CHEXA (8) и размером 120 мм.

Созданные конечно-элементные модели добавляем в конечно-элементную сборку.

В расчетной модели были заданы условия взаимодействия КЭ моделей в КЭ сборке. Для соединения обечаек между собой использовался тип взаимодействия – "Соединение поверхность-поверхность", который исключает любые взаимные перемещения выбранных граней друг относительно друга.

Также были собраны нагрузки, необходимые для расчета корпуса барабана на прочность (рис. 1):

1. вес корпуса  $G=24822,83$  Н;
2. вес материала  $F_1=5852$  Н;
3. вес пересыпных устройств  $F_2=19843,58$  Н [3].

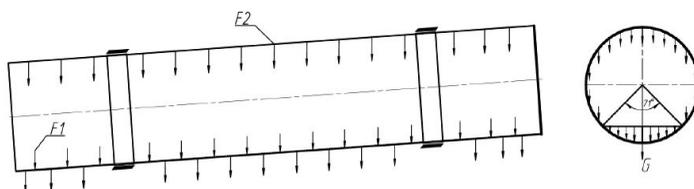


Рисунок 1 – Расчетная схема

С помощью команд "Ограничение закрепления" было задано граничное условие в месте установки кольца на обечайку, которое допускает вращение относительно продольной оси корпуса, а остальные степени свободы отсутствуют. Расчетная модель корпуса барабана показана на рис. 2.

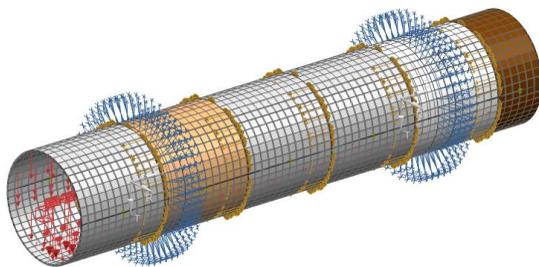


Рисунок 2 – Расчетная модель корпуса барабана

В связи с тем, что корпус работает при высоких температурах, был проведен тепловой расчет. Исходными данными для расчета были следующие параметры:

1. температура теплоносителя на входе  $T_1=350^{\circ}\text{C}$ ;
2. температура теплоносителя на выходе  $T_2=80^{\circ}\text{C}$ ;
3. скорость движения теплоносителя  $V=1,1\text{ м/с}$ .

В результате проведенного расчета, были получены данные о распределении температуры в деталях корпуса барабана (рис. 3).

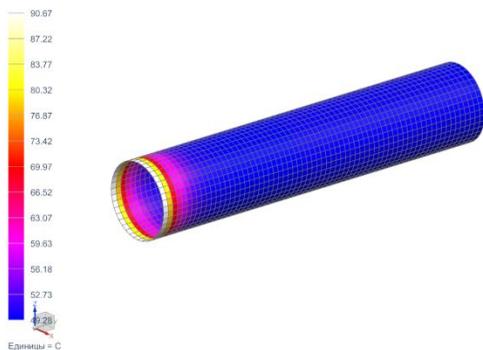


Рисунок 3 – Результаты теплового расчета корпуса барабана

После проведения расчета корпуса барабана с учетом проведенного теплового расчета проанализируем полученные результаты (табл. 1).

Таблица 1 – Максимальные напряжения и перемещения в деталях

№	Наименование	Максимальные напряжения по Мизесу, МПа	Максимальные перемещения, мм
1	Обечайка 1	56,39	0,608
2	Обечайка 2	67,20	0,271
3	Обечайка 3	33,42	0,245
4	Обечайка 4	25,92	0,251
5	Обечайка 5	54,07	0,217
6	Обечайка 6	29,18	0,260

Результаты расчета отображены на рис. 4 и 5.

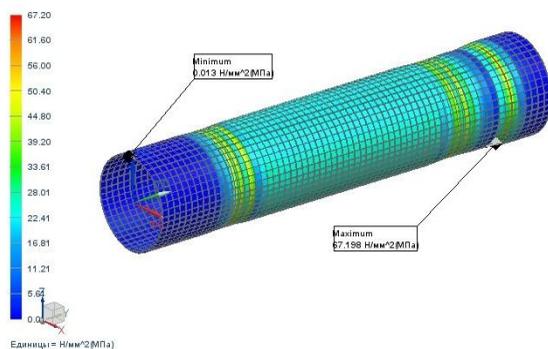


Рисунок 4 – Распределение напряжений в корпусе барабана

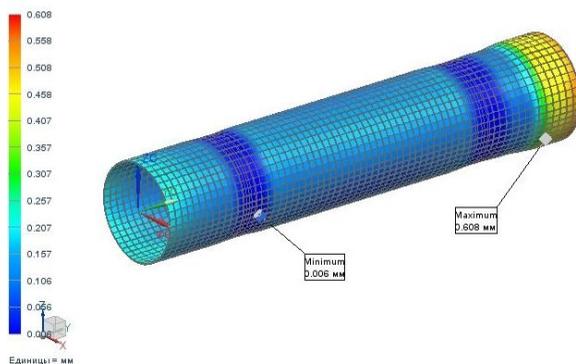


Рисунок 5 – Распределение перемещений в корпусе барабана

Для того чтобы сделать вывод о работоспособности конструкции при заданных нагрузках и граничных условиях необходимо произвести проверку условий прочности и жесткости.

Условие прочности предполагает сравнение максимальных расчетных напряжений с допускаемыми для выбранного материала и определение коэффициента запаса прочности:

$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\max}} \geq [n],$$

где  $n$  – коэффициент запаса прочности;

$[\sigma]$  – допускаемые напряжения для выбранного материала,  $[\sigma] = 235 \text{ МПа}$ ;

$\sigma_{\max}$  – максимальные расчетные напряжения,  $\sigma_{\max} = 67,2 \text{ МПа}$ ;

$[n]$  – допускаемый коэффициент запаса прочности,  $[n] = 3 \dots 5$ .

$$n = \frac{235}{67,2} = 3,497$$

$$3 \leq 3,497 \leq 5$$

Условие прочности выполняется.

Чтобы определить конструкцию на жесткость необходимо сравнить максимальные перемещения с допускаемыми:

$$\delta_{\max} \leq [\delta]$$

где  $\delta$  – максимальные расчетные перемещения,  $\delta = 0,608 \text{ мм}$ ;

$[\delta]$  – допускаемые перемещения, мм:

$$[\delta] = \frac{1}{250} \cdot a$$

где  $a$  – габаритный размер конструкции,  $a = 8000 \text{ мм}$ .

$$[\delta] = \frac{1}{250} \cdot 8000 = 32 \text{ мм}$$

$$0,608 \text{ мм} \leq 32 \text{ мм}.$$

Условие жесткости выполняется.

Развитие систем инженерного анализа позволяет существенно облегчить работу инженера-расчетчика, что ведет к снижению сроков выхода изделия на рынок готовой продукции и общих расходов на его разработку, а также повышению качества продукции.

### **Список литературы:**

1. NXAdvancedSimulation. Инженерный анализ / П.С.Гончаров, И.А.Артамонов, Т.Ф.Халитов, С.В.Денисихин, Д.Е.Сотник.М.: ДМК Пресс, 2012. 504 с.
2. Проектирование в NX под управление Teamcenter / М.Ю. Ельцов, А.А. Козлов, А.В. Седойкин, Л.Ю. Широкова. М.: ДМК Пресс, 2013. 752 с.
3. Силенок С.Г., Борщевский А.А., Горбовец М.Н. и др. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 1990. 416 с.

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ КОМПАКТИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Ильина Т.Н., д-р техн. наук, проф.,  
Севостьянов М.В., канд. техн. наук, доц.,  
Кошуков А.В., аспирант,  
Емельянов Д.А., аспирант,  
Григорьев В.А., магистрант**

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

Основную массу техногенных волокнистых материалов (ТВМ) – представляют целлюлозно-бумажные отходы (ЦБО). Целлюлоза самый распространенный полимер на земле, который играет важную роль в природном круговороте углерода. Однако ежегодное увеличение отходов целлюлозно-бумажной промышленности и загрязнение ими окружающей среды ставит ряд задач по утилизации ЦБО [1,2]. Поскольку целлюлоза – это органическое соединение, состоящее из нерастворимых волокон, которые не расщепляются обычными ферментами желудочно-кишечного тракта млекопитающих, а расщепление в промышленных условиях целлюлозы до глюкозы очень сложно и требует колоссальных экономических затрат, то процесс компактирования ТВМ в сформованные тела заданной геометрической формы с последующим использованием – является одним из приоритетных направлений в настоящее время [3, 4].

Одним из направлений утилизации бумажных отходов является производство на их основе гранулированных стабилизирующих добавок для щебёночно-мастичного асфальтобетона. Особенности механических характеристик пылевидных отходов (низкая насыпная плотность  $\rho=60-70 \text{ кг/м}^3$ ) обуславливают трудности их последующей переработки.

Бумажные отходы, а именно картонные упаковки, ватманы, мелованная бумага для последующего гранулирования необходимо измельчить до размеров волокон 1,5-5,0 мм. Истинная плотность этих материалов составляет от  $400 \text{ кг/м}^3$  для картона и до  $800 \text{ кг/м}^3$  для мелованной бумаги. Значение скорости витания одиночных частиц составляет от 4 до 8 м/с, а при объемной концентрации от 0,1 до 0,5 скорость витания снижается до 1,5-2,5 м/с [5]. Подачу таких легких материалов в устройство для компактирования целесообразно осуществлять пневмотранспортом с последующим улавливанием твердого в циклоне.

Скорость материально-воздушной смеси в цилиндрической части циклонной установки составляет  $2,0 \pm 0,5$  м/с. Для осаждения частиц под действием центробежных сил необходимо увеличить их плотность и размер, и соответственно скорость витания. На рис. 1 представлены результаты расчета скорости витания частиц различной плотности и крупности, откуда видно, что перед циклоном целесообразна стадия агломерации частиц в потоке, которую целесообразно осуществить в торообразных камерах пневмомеханического гранулятора [6].

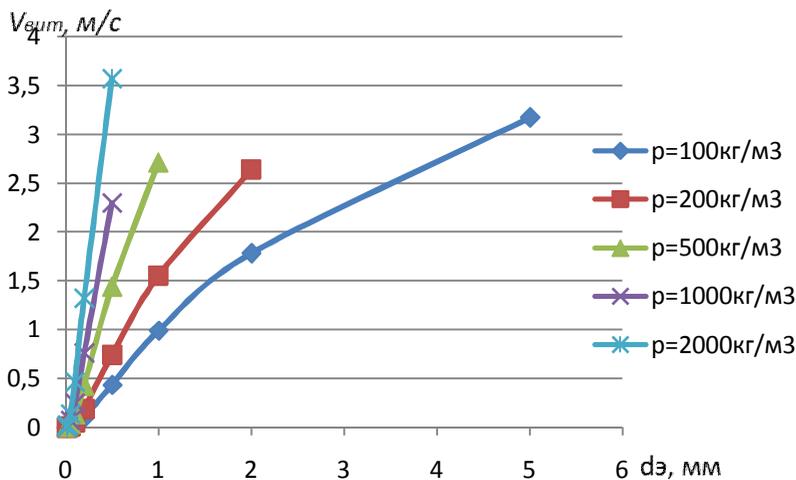


Рисунок 1 – Зависимость скорости витания пылевидных частиц от их диаметра

Проведенные ранее исследования процесса гранулирования техногенных материалов с различными физико-механическими характеристиками также выявили необходимость предварительного уплотнения шихты с низкой насыпной плотностью [7,8].

Комплексная переработка сырьевых и техногенных материалов, а также создание безотходных производств – одно из важнейших направлений развития различных отраслей промышленности. С учетом выполненных научно-технических и конструкторско-технологических разработок коллективом сотрудников университета спроектирован и изготовлен малотоннажный технологический комплекс для производства экструдированных техногенных материалов (рис. 2). Технологический комплекс предназначен для производства экструдированных техногенных материалов различного

технологического назначения, но основную роль уделяется созданию гранулированных стабилизирующих добавок для щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА).

Технологический комплекс включает оборудование для измельчения отходов, которое осуществляется в две стадии в шредере и молотковой дробилке. Измельченный до 1,5-5,0 мм волокнистый материал подается в циклон для осаждения твердой части. Для получения гранул к измельченной бумажной смеси подается связующее в виде минерального масла. Перемешивание смеси осуществляется в высокоскоростном смесителе с последующим поступлением шихты в пресс-валковый гранулятор. Полученные кондиционные гранулы размером 0,5-1,0 см поступают в бункер готовой продукции. Некондиционный материал направляется на повторное гранулирование.

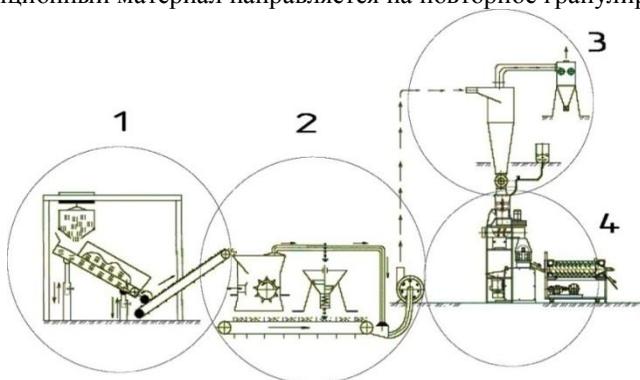


Рисунок 2 – Малотоннажный технологический комплекс для производства экструдированных техногенных материалов:  
1– зона загрузки; 2– зона измельчения; 3– зона аспирации;  
4–зона смешения и компактирования

Полученные из бумажных отходов гранулы применяются в качестве стабилизирующих добавок для щебеночно-мастичного асфальтобетона в дорожном строительстве. Основная задача добавок заключается в обеспечении дисперсного армирования вяжущего и исключение расслаивания смеси во время предварительного хранения в накопительных бункерах и транспортирования. Поэтому гранулы должны соответствовать определенным требованиям: по прочности, стеканию вяжущего, водонасыщению смесей ЩМА. Результаты испытания ЩМАС использованием гранулированных добавок, полученных в технологическом комплексе, представлены в таблице.

Таблица

Наименование показателя	Норма по ГОСТ 31015-2002	ГСД-14
Стекание вяжущего в, % по массе	От 0,07 до 2,0	0,09
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее: при температуре 20°С при температуре 50°С	2,2 0,65	3,33 1,1
Сдвигоустойчивость: Коэффициент внутреннего трения, не менее	0,93 0,18	0,96 0,24
Сцепление при сдвиге при температуре 50°С, МПа, не менее		
Трещиностойкость – предел прочности на растяжение при расколе при температуре 0°С, МПа:	2,5 – 6,0	3,2
Водонасыщение, % по объему образца отформованных из смесей	От 1,0 до 4,0	2,23
Водостойкость при длительном водонасыщении, не менее	0,85	0,95

Как видно из таблицы, полученные гранулы отвечают требованиям ГОСТа.

Одной из проблем при эксплуатации данного комплекса является унос пылевидных частиц с потоком воздуха из циклона. Для улавливания этих частиц в комплексе используется система аспирации, состоящая из циклона с диаметром корпуса 800 мм и рукавного фильтра. Производительность циклона по воздуху достигает 2 м<sup>3</sup>/с. Увеличение производительности циклона сверх оптимальной приводит к резкому повышению гидравлического сопротивления системы. Снижение производительности уменьшает коэффициент улавливания.

Улавливание тонкодисперсной пыли осуществляется в рукавном фильтре Mini-4000 номинальной производительностью 4000 м<sup>3</sup>/ч.

Подача запыленного потока происходит снаружи рукавных фильтров, регенерация которых осуществляется импульсным способом.

Следует отметить, что для успешной эксплуатации технологического комплекса актуальными задачами являются совершенствование технологии получения гранул заданного качества из различных техногенных материалов, подбор конкурентоспособной связующей добавки для предварительной агломерации частиц в воздушном потоке и далее в пресс-валковомгрануляторе, исследование свойств уловленных тонкодисперсных частиц и разработка способов их утилизации.

#### **Список литературы:**

1. Свергузова С.В. Проблема накопления и переработки отходов: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2005. 114 с.
2. Свергузова С.В., Юрченко В.А., Горох Н.П. Проблема утилизации и захоронения отходов: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2007. 166с.
3. Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Ильина Т.Н., Уральский В.И. Технологические модули для комплексной переработки техногенных материалов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2010. №9. С. 43-45.
4. Севостьянов В.С., Макридин А.А., Севостьянов М.В., Шинкарев Л.И. Техника и технология комплексной утилизации целлюлозно-бумажных отходов // Проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии: Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: Изд-во ПГТУ, 2011. С. 152-156.
5. Емельянов Д.А., Ильина Т.Н. О скорости витания техногенных волокнистых материалов // Актуальные проблемы развития науки и образования: сборник научных трудов по материалам междунар. научн.-практ. конф. 5 мая 2014 г. М.: «АР-Консалт», 2014. С. 109-112.
6. Заявка на патент №2013137715 от 12.08.2013 Устройство для пневмомеханического гранулирования техногенных материалов. Авторы: В.С. Севостьянов, Т.Н. Ильина, М.В. Севостьянов, Д.А. Емельянов, А.В. Кошукон.
7. Sevost'yanov W.S., Il'ina T.N., Sevost'yanov M.V., Emel'yanov D.A. Processes of Granular Charges Pre-Compaction // Advances in Natural and Applied Sciences, 8(4) April 2014, Pages: 301-304.
8. Севостьянов В.С., Ильина Т.Н., Севостьянов М.В., Шкарпеткин Е.А. Исследование условий процессов микрогранулирования в дисперсных системах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. №1. С. 81-86.

## **ТОНКОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ЧАСТИЦ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДВУХФАЗНЫХ СТРУЙ В ПРОТИВОТОЧНОЙ СТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЕ**

**Карпачев Д.В., канд. техн. наук, доц.,  
Семикопенко И.А., канд. техн. наук, проф.**  
*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова*

При исследовании процессов, происходящих в струйной мельнице, рассматривалась следующая задача: взаимодействие двухфазных струй, направленных навстречу друг другу.

К настоящему времени современной газодинамикой и, в частности, теорией турбулентных струй, достаточно широко исследованы однофазные и двухфазные газовые струи [1,2,3]. Не так давно, при решении подобного рода задач, применялись приближенные методы решения, позволяющие получать практически приемлемые результаты. Так, одним из основоположников и создателей струйной помольной техники в России Акуновым В.И., разработана теория струйных мельниц, основные выводы которой базируются на теоретических посылах гидродинамики. При этом энергетическое представление о струйных процессах позволило установить основные количественные зависимости параметров свободных и стесненных струй, а также эжекторов. Газовая струя, несущая твердую фазу, представлена разбитой на четыре участка различной структуры, в том числе с различной формой поверхностей раздела. Такое энергетическое истолкование процесса струеобразования обладает некоторыми преимуществами по сравнению с предложенным Голеевским А.А. [6] методом, при котором участки струи характеризуются величиной коэффициента увлечения.

С помощью предложенной Акуновым В.И. теории были получены критический весовой расход твердой фазы, предельное и оптимальное значение её концентрации в зависимости от скорости газа и плотности частиц, критический расход газовой фазы [4,5]. В целом эта методика расчета эжекторов дает результаты, достаточно хорошо приближающиеся к экспериментальным, в силу того, что как раз результаты экспериментальных исследований и служили отправными данными. Однако следует отметить, что для расчета основных конструктивных параметров эжекторного узла противоточной струйной мельницы, предложены выражения, увязанные с производительностью

мельницы, выведенные на основе экспериментальных данных, которые не вполне согласуются с теоретическими посылками. При этом отметим, что размеры помольной камеры являются функциями диаметра разгонных трубок [4,5].

На наш взгляд, целесообразно определять конструктивные параметры помольной камеры, а также диаметр, длину разгонных трубок и основные поперечные сечения эжекторного узла исходя из газодинамических параметров, получаемых на основе двухскоростной модели течения смеси газа и твердых частиц.

Работу эжекторов струйной мельницы можно анализировать, используя методику, предложенную Баулиным К.К., и уточненную для расчета пневмотранспортных установок Успенским В.А. [19]. На основании выполненных исследований была предложена методика определения оптимальных параметров помольного узла струйной мельницы. Методика расчета состояла из ряда трудоемких этапов. На одном из таких этапов было получено уравнение, выражающее взаимосвязь конструктивных и режимных параметров эжекторов, и являющееся его характеристикой [7].

Однако следует отметить, что все упомянутые теории, в основном ограничивались рассмотрением процессов, протекающих в эжекторных узлах струйных мельниц. Процессы, происходящие непосредственно в помольной камере и узлах, примыкающих к ней, в виду сложности обычно не рассматриваются. Между тем в теории струйных мельниц этот вопрос является одним из основных.

Следовательно, решение вопроса повышения качественных показателей процесса измельчения в противоточной струйной мельнице и снижение энергетических затрат лежит в области теоретического обоснования и экспериментальной проверки конструктивно-технологических параметров помольной камеры и узлов, примыкающих к ней.

Любой струйный аппарат включает в себя эжектор, представляющий собой узел, в котором происходит смешение и обмен энергией двух потоков (основного и эжектируемого) и помольную камеру, в которой взаимодействуют смешанные потоки. Твердый материал перемещается газовым потоком, поэтому основным видом воздействия на частицы материала являются гидродинамические силы потока и механические силы взаимодействия частиц между собой и со стенками элементов мельницы, ограничивающими поток.

Поскольку в потоке газа имеются частицы разных размеров, то очевидно, что движение полидисперсных частиц отличается от

движения одиночной частицы. Так, мельчайшие частицы материала, скорее всего, будут строго следовать по линиям течения несущей среды, а более крупные под влиянием сил инерции смещаются по отношению к этим линиям.

Рассмотрим процесс ударного измельчения несколько подробнее (рис. 1). Движение частиц твердого материала будем считать равноускоренным и равномерно прямолинейным. Пренебрегая гравитационными силами, можно считать, что частица твердого материала в газе движется прямолинейно до тех пор, пока не произойдет ее столкновение с другой частицей или со стенкой. В процессе столкновения частицы обмениваются между собой импульсом и энергией и изменяют направление своего движения.

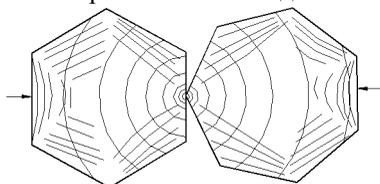


Рисунок 1 – Схема разрушения частицы материала при воздействии ударного импульса

В качестве теоретической основы формулирования механизма разрушения твердых тел многие исследователи помольных процессов используют известный в механике принцип минимальной энергии, по которому равновесное состояние деформированного тела соответствует минимуму потенциальной энергии системы [16].

Разрушение при ударе определяется скоростью движения в момент удара и происходит вследствие распространения в теле продольных и поперечных ударных волн, их отражения от свободных поверхностей и интерференции [4,5]. Диспергирование тела осуществляется в основном за счет возникновения поперечных растягивающих напряжений, создающих предельные нагрузки и местной концентрации напряжений. В результате образуется трещина, размеры которой с течением времени увеличиваются [9,10,11,12,13,14,17].

Эффективность удара пропорциональна скорости частицы, наносящей удар, поэтому из дифференциального уравнения движения частицы можно записать:

$$m \cdot \frac{dU}{dt} = \sigma \cdot F = \rho \cdot F \cdot U \cdot c_0, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжение, возникающее в теле частицы, Па;

$m$  – масса частицы материала, кг;

$U$  – скорость частицы материала в точке удара, м/с;

$\rho$  – плотность частицы материала, кг/м<sup>3</sup>;

$F$  – площадь сечения частицы материала, м<sup>2</sup>;

$c_0$  – скорость звука в материале, м/с.

Из выражения (1) следует, что величина напряжения, возникающего в теле частицы материала, будет описываться формулой:

$$\sigma = \rho \cdot U \cdot c_0 \cdot \exp \frac{\rho \cdot F \cdot c_0 \cdot t}{m} \quad (2)$$

Следовательно, волна напряжения, распространяющаяся в теле, имеет ударный фронт со скачком, равным  $\rho \cdot U \cdot c_0$ , убывающим по экспоненте. Ударная волна, достигая поверхностей частицы, отражается от них с переменной знака, при этом ударный импульс многократно пробегает частицу. Импульс сжатия отражается от поверхности частицы, противоположной точке удара, и преобразуется в импульс растяжения. Отраженные от боковых поверхностей импульсы приводят к образованию трещин, параллельных этим поверхностям. Немедленно после возникновения трещины часть импульса отражается от нее, что при достаточной энергии импульса приводит к образованию новой трещины и т.д.

В качестве одного из факторов, влияющих на условия разгона частиц до скоростей, обеспечивающих максимальные напряженные состояния частиц при столкновениях, можно рассматривать концентрацию материала.

Следующим объектом рассмотрения является механизм удара частицы материала, движущейся в газовом потоке, о стенку помольной камеры (рис. 2). В точке удара возникает волновой процесс с образованием трещиноватой зоны и последующим ее выкрашиванием.

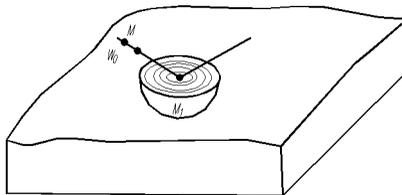


Рисунок 2 – Схема удара частицы материала о стенку помольной камеры

Процесс измельчения сопровождается уменьшением массы отдельных частиц за счет уменьшения их объёма. С уменьшением размера частиц должны изменяться условия силового нагружения их, и разрушение будет происходить в основном не за счет сжатия или удара, а за счет трения. Трение – сложный вид взаимодействия и в отличие от удара его нельзя описать законами физики. Процесс разрушения частицы представляется следующим образом (рис. 3).

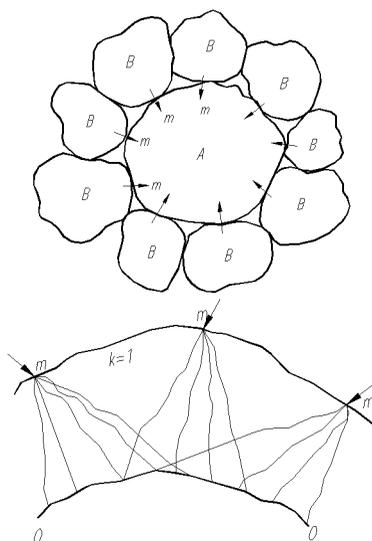


Рисунок 3 – Схема механизма разрушения частиц материала при тонком измельчении

Исследованиями показано [15,18], что твердые частицы могут разрушаться не только за счет взаимных соударений в газовом потоке, но и в результате действия на них сил потока. При этом измельчение обуславливается напряжениями сжатия и сдвига.

Однако при рассмотрении всех факторов струйного измельчения, авторами исследований принималось допущение о столкновении одиночных частиц шарообразной формы, движущихся в равновероятном направлении, что не отражает истинных явлений, происходящих в пылегазовых потоках.

Движение массы твердых полидисперсных частиц в газовом потоке в отличие от движения одиночной частицы усложняет вихревую структуру потока. Газовый поток, содержащий твердые частицы в

определенной концентрации, характеризуется наличием относительных движений частиц, накладывающихся на движения турбулентных потоков. В подобных условиях возникают силы аэродинамического взаимодействия между газом и твердым телом, а также между частичками твердого материала. Величина и характер этого взаимодействия зависят от физико-механических свойств материала, дисперсности и концентрации твердых частиц, режима движения потока [7,8].

Неправильная форма частиц и смещение центра масс вызывает вращение частиц материала, при этом механизм взаимодействия твердой и газовой фаз в движущихся пылегазовых потоках позволяет разрушаться частицам материала не только при центральном ударе, но и силами трения при вращении или при нецентральных ударах частиц. При этом благоприятные условия для истирающего разрушения создаются при соударении встречных струй, когда частицы измельчаемого материала вовлекаются в интенсивное колебательное движение.

Метод струйного измельчения осуществляется в процессе физико-механического взаимодействия частиц измельчаемого материала и энергоносителя, при этом является сложным и многофакторным. В настоящее время не известны обобщенные показатели, характеризующие измельчаемость материала независимо от способа разрушения. Поэтому, существует множество групп факторов, характеризующих способ разрушения твердого вещества. К одной из таких групп можно отнести: вид механической нагрузки, скорость ее приложения, концентрация твердого материала в газовом энергоносителе, геометрические размеры и исполнение основных элементов мельницы. Найдя же количественные соотношения главных из рассматриваемых факторов, в качестве которых могут выступать конструктивные параметры помольной камеры, можно прогнозировать результаты струйного измельчения.

#### **Список литературы:**

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. 3-е изд. М.: Изд-во Наука, 1969. 824 с.
2. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960. 824 с.
3. Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю. и др. Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984. 716 с.
4. Акунов В.И. Струйные мельницы. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1967. 257 с.

5. Акунов В.И. Струйные мельницы. Элементы теории и расчета. М.: Машгиз, 1962. 264 с.
6. Голеевский А.А. Вопросы механики струйного движения жидкостей и газов. М.: Машгиз, 1957. 824 с.
7. Горобец В.И., Горобец Л.Ж. Новое направление работ по измельчению. М.: Недра, 1977. 183 с.
8. Кармазин В.И., Горобец Л.Ж., Горобец В.И. Влияние температуры газа на разгон частиц в помольной камере струйной мельницы// Обогащение полезных ископаемых. 1970. Вып. 6. С. 33-36.
9. Карпачев Д.В., Уваров В.А., Степанов А.В. К вопросу о теории хрупкого разрушения неметаллических материалов // Сооружения, конструкции, технологии и строительные материалы XXI века: Сб. докл. II Междунар. науч.-практич. конф.-шк.-сем. молод. учен., аспирантов и докторантов. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 1999. Ч.3. С. 48-53.
10. Карпачев Д.В., Уваров В.А., Булгаков С.Б. О некоторых теоретических аспектах расчета энергии хрупкого разрушения материалов // Проблемы производства и использования мела в промышленности и сельском хозяйстве: Сб. док. Междунар. науч.-практич. конф. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2001. С. 82-87.
11. Карпачев Д.В., Уваров В.А., Булгаков С.Б. К вопросу об определении энергии, затрачиваемой на измельчение материала // Актуальные проблемы современного строительства: Сб. док. 55-ой Междунар. науч.-техн. конф. молод. учён. (аспирантов, докторантов). СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2001. Ч.1. С 35-38.
12. Карпачев Д.В. Совершенствование технологии измельчения и обогащения рудных и нерудных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 2.
13. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy. Soc. London, A221. 1920. P. 163-198.
14. Майклиток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. М.: Мир, 1970. 443 с.
15. Рааш Ю. Движение и напряженное состояние шарообразных и цилиндрических частиц в вязких потоках // Сб. тр. Европейского совещания по измельчению. М.: Стройиздат, 1966. С. 138-149.
16. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. 381 с.
17. Ревнивцев В.И., Гапонов Г.В., Зарогатский Л.П. и др. Селективное разрушение материалов. М.: Недра, 1988. 286 с.
18. Румпф Г. Об основных физических проблемах при измельчении // Сб. тр. Европейского совещания по измельчению М.: Стройиздат, 1966. С. 497-522.
19. Успенский В.А. Пневматический транспорт материалов во взвешенном состоянии. Свердловск-М.: Металлургиздат, 1952. 152 с.

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ АСПИРАЦИИ ПРИ ПЕРЕГРУЗКЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

**Киреев В.М., канд. техн. наук, доц.**

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

Технологические процессы при производстве строительных материалов, как правило, связаны с транспортированием и переработкой формовочных масс (перегрузка, дробление, смешивание и др.). Данные процессы сопровождаются интенсивным выделением пыли в атмосферу производственных помещений и характеризуются высокой дисперсностью, что является одной из основных причин возникновения у рабочих болезней пылевой этиологии: пневмокониозы (силикозы, антропокозы, асбестозы), бронхит, астма, кониотуберкулезы и др. На сегодняшний день наиболее приемлемым и универсальным способом локализации пылевыведений в этом случае являются системы аспирации – местной вытяжной вентиляции. На поддержание требуемых ПДК пыли в рабочей зоне и ПДВ на выбросе в атмосферу в разной степени тратятся как основные, так и оборотные средства предприятия. Суммарное энергопотребление систем аспирации могут достигать более 20% всего энергопотребления предприятия, что в итоге сказывается на его конкурентоспособности. Таким образом, снижение энергоёмкости систем аспирации является весьма актуальной задачей на сегодняшний день.

Система аспирации состоит, как правило, из следующих основных элементов (рис.1): аспирационное укрытие 1; сеть воздухопроводов 2,6; аппараты воздухоочистки 3 (циклон); 4 (фильтр); вентилятор 5. Как правило, системы аспирации имеют двухступенчатую систему очистки воздуха: циклон для очистки от крупнодисперсной пыли и фильтр для тонкой очистки. Данная схема весьма энергоёмка и требует значительных эксплуатационных затрат.

Потребляемая системой аспирации электроэнергия тратится на преодоление аэродинамического сопротивления системы посредством вентилятора, и на работу фильтра. В целом аэродинамическое сопротивление системы аспирации складывается из сопротивления сети воздухопроводов и аэродинамического сопротивления блока очистки. Основываясь на этом, можно сделать вывод, что наиболее перспективным направлением снижения энергоёмкости системы аспирации является использование вентилятора меньшей мощности и

применение одноступенчатой схемы очистки, не включающей в себя энергоёмкий рукавный фильтр.

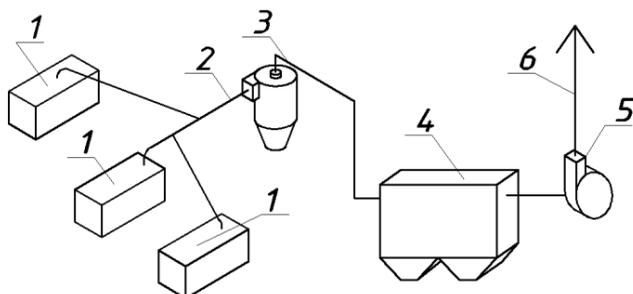


Рисунок 1 – Принципиальная схема децентрализованной системы аспирации: 1 – аспирационные укрытия; 2 – система воздухопроводов; 3 – первая ступень очистки воздуха (циклон); 4 – вторая ступень очистки воздуха (рукавный фильтр); 5 – побудитель тяги (вентилятор); 6 – выброс аспирационного воздуха в атмосферу

Потребляемая мощность вентилятора определяется следующей зависимостью:

$$N_{\Pi} = P_{\phi} \cdot Q_{\phi} / \eta_{\phi} \quad (1)$$

где  $N_{\Pi}$  – потребляемая мощность вентилятора, Вт;

$P_{\phi}$  – фактическое аэродинамическое сопротивление сети воздухопроводов системы аспирации, Па;

$Q_{\phi}$  – фактический производительность (подача) вентилятора, м<sup>3</sup>/с;

$\eta_{\phi}$  – фактический коэффициент полезного действия вентилятора.

Потери давления по длине на участках сети определяются как, Па:

$$\Delta P = \left( \lambda \cdot \frac{l}{D} + \sum \zeta_i \right) \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (2)$$

где  $l$  – длина воздуховода, м;

$D$  – диаметр воздуховода, м;

$\sum \zeta_i$  – сумма коэффициентов местного сопротивления на данном участке;

$\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;

$v$  – средняя скорость двухфазного потока по сечению воздуховода, м/с;

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, согласно (2) на практике потери давления в системе аспирации можно снизить только за счет снижения средней скорости

двухфазного потока, которая в свою очередь зависит от дисперсного составасодержащейся пыли.

Согласно [1], [2], для горизонтальных и наклонных воздухопроводов (до 60°) минимальная скорость двухфазного потока в воздуховоде, при которой не будет происходить оседание пыли в воздуховоде, м/с:

$$v = 0,77 \cdot 10^{-3} \cdot d_{max}^{0,817} \cdot D^{0,143} \left[ (\rho - \rho_0) \cdot \left( 1 + \frac{W}{100} \right) \cdot (\cos\alpha \pm 0,5\sin\alpha) \right]^{0,653} \quad (3)$$

где  $d_{max}$  – диаметр наиболее крупной частицы в дисперсном составе аспирируемой пыли, мкм;

$D$  – диаметр воздуховода, мм;

$\rho, \rho_0$  – плотность частиц материала и воздуха соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

$W$  – влажность пыли, %;

$\alpha$  – угол наклона воздуховода системы аспирации, град.

Знак “+” в выражении (3) принимается при подъёме воздуховода, знак “–” при спуске.

Согласно [3] параметр  $d_{max}$  зависит в первую очередь от конструкции используемого аспирационного укрытия и от его режима работы. Для стандартного аспирационного укрытия с одинарными стенками по [4]:

$$d_{max} = 5780 \cdot \sqrt{\frac{U_{ex}}{\rho \cdot (1 + 0,08 \frac{U_{ex} \cdot L}{U_0 \cdot H})}} \quad (4)$$

где  $L$  – длина аспирационного укрытия, м;

$H_0$  – высота аспирационного укрытия, м;

$U_{вх}$  – скорость воздуха на входе в аспирационную воронку, м/с;

$U_0$  – средняя скорость воздуха внутри укрытия, м/с;

$\rho$  – плотность пыли, кг/м<sup>3</sup>.

На сегодняшний день разработан ряд аспирационных укрытий, конструкция которых позволяет снижать параметр  $d_{max}$ . К таким аспирационным укрытиям в первую очередь относятся укрытия с двойными стенками и внутренней жёсткой перегородкой [5], а также их модификации [6]. Жёсткая перегородка создаёт дополнительные инерционные силы, действующие на частицы пыли, за счет чего происходит оседание крупных фракций, снижая тем самым параметр  $d_{max}$ . В результате исследований [7] было получено, что в среднем при использовании аспирационного укрытия с жесткой наклонной перегородкой:

$$d_{max}^{nep} = 0,46 \cdot d_{max} \quad (5)$$

где  $d_{max}^{пер}$  и  $d_{max}$  соответственно максимальный диаметр частиц пыли, удаляемой из укрытия с перегородкой и без неё.

Учитывая, что при использовании аспирационного укрытия с двойными стенками приводит к снижению требуемых объёмов воздуха, удаляемого от укрытия в среднем на 40 %, по (3) получим:

$$v^{пер} = 0,53 \cdot v^{один}. \quad (6)$$

где  $v^{один}$ ,  $v^{пер}$ —требуемая скорость двухфазного потока в воздуховоде при использовании укрытия с одинарными стенками и с использованием аспирационного укрытия с двойными стенками и наклонной жесткой перегородкой соответственно, м/с.

Таким образом, определено, что при использовании усовершенствованной конструкции укрытия требуемая скорость в воздуховоде снижается почти в два раза, что влечет снижение потерь давления в сети воздухопроводов, которые необходимо определять для каждого конкретного случая при помощи гидравлического расчёта.

Использование усовершенствованных конструкций укрытий при производстве строительных материалов позволяет в большинстве случаев отказаться от двухступенчатой схемы очистки отказавшись от фильтра [8], что еще более снизит аэродинамическое сопротивление сети аспирации. Нами был исследован характерный узел перегрузки гранитного щебня при производстве железобетонных шпал на предприятии ЗАО «Белшпала». Внедрение усовершенствованных конструкций аспирационного укрытия в данной системе позволило заменитьиспользуемый вентилятор ВДН№9 с потребляемой мощностью  $N=7,1$  кВт на вентилятор ВДН№3,5 с потребляемой мощностью  $N=1$  кВт, экономический эффект при этом составил 73587 руб.

Следует отметить, что при использовании усовершенствованных конструкций аспирационных укрытий, снижение объёмов удаляемого воздуха приведёт также к снижению требуемой производительности приточной системы вентиляции, с помощью которой поддерживается воздушный баланс помещения.

Подводя итог, можно утверждать, что наиболее перспективным направлением повышения энергоэффективности систем аспирации является использование усовершенствованных конструкций аспирационных укрытий, которые позволяют в несколько раз снизить потребляемую мощность.

#### Список литературы:

1. Кисторян, Х.А., Бабаян, А.А. Определение скорости трогания пыли в слабонаклонном воздуховоде. В кн.: Научные сообщения

- Арменпромцвета. Ереван, 1976. Вып. 2.
2. Руководство по проектированию систем отопления и вентиляции окомковательных фабрик предприятий черной металлургии. Госстрой СССР. Государственный проектный институт. Кривой Рог, 1985.
  3. Минко В.А. Комплексное обеспыливание производственных помещений при транспортировании и механической переработке сыпучего минерального сырья: дис. докт. техн. наук. Белгород, 1988. 508 с.
  4. Минко В.А., Логачев И.Н., Логачев И.Н. и др. Обеспыливающая вентиляция. Т.1: монография // под общ. ред. В.А. Минко. Белгород: Изд-во БГТУ, 2006. 460 с.
  5. Минко В.А. Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1981. 176 с.
  6. Киреев В.М., Минко В.А. Разработка аспирационных укрытий и инженерной методики их расчёта // Науч.-производ. журнал «Безопасность труда в промышленности». 2013. №2. С. 42-46.
  7. Киреев В.М., Гольцов А.Б., Минко В.А. Расчет и разработка аспирационных укрытий мест перегрузок // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. №3. С. 114-117.
  8. Киреев В.М. Совершенствование конструкций аспирационных укрытий с целью снижения запылённости при перегрузке формовочных масс в литейных цехах: дисс. канд. техн. наук. Ростов на Дону, 2013. 203 с.

## РАСЧЁТ СОПРОТИВЛЕНИЙ ВОЗНИКАЮЩИХ В ВАЛКАХ

**Королёв А.А., аспирант,  
Лукьянов Н.А., канд. техн. наук, проф.,  
Степанов М.А., канд. техн. наук, проф.,  
Дьяконов Н.А., доц.**

*Московский государственный строительный университет*

Валковые устройства применяются в различном технологическом оборудовании строительной индустрии и других перерабатывающих отраслях промышленности. Например, в многовалковых краскотёрочных машинах, в валковом оборудовании для переработки полимеров, в машинах для каландрования резины и во многом другом оборудовании [2].

В процессе нагнетания вязкоупругого и вязкопластического материала валками возникает давление, которое оказывает материал на валки. Чем меньше зазор между валками, тем больше потребуется усилия, чтобы деформировать и переместить материал.

Рассмотрим процесс нагнетания пластического материала валками одинакового диаметра.

Из схемы (рис. 1) видно, что рабочая зона между валками поделена на две части: зону прессования «П» – участок, на котором материал захватывается валками; и зону выпрессовывания «В» – участок, на котором материал выходит из зазора между валками, то есть происходит нагнетание материала.

В зоне выпрессовывания «В» создаётся полное рабочее давление. Проходя через зазор между валками, материал деформируется, и толщина его слоя уменьшается от первоначального значения  $H$  до значения рабочего зазора между валками  $h$ . При этом сами валки испытывают нормальное давление со стороны материала как в зоне прессования «П», так и в зоне выпрессовывания «В». Действие материала на валки направлено по дугам угла захвата  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , и угла выпрессовывания  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . Оно может быть представлено в виде равнодействующих сил, соответственно,  $P_{П_1}$ ,  $P_{П_2}$ ,  $P_{В_1}$  и  $P_{В_2}$ , приложенных в центре дуг захвата и выпрессовывания.

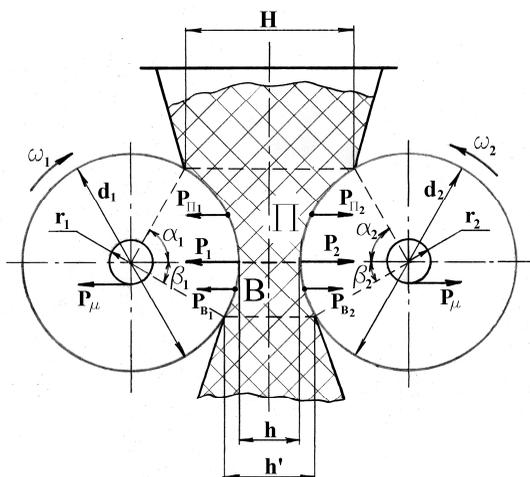


Рисунок 1 – Схема распределения усилий при валковом нагнетании пластического материала

Общее усилие со стороны материала на валки  $P_1$  и  $P_2$ , приложено в центре валков и представляет собой сумму равнодействующих сил зон прессования и выпрессовывания.

$$P_1 = P_{II_1} + P_{B_1} \quad P_2 = P_{II_2} + P_{B_2} \quad (1)$$

Так как нагнетательные валки одинакового диаметра, то силы  $P_1$  и  $P_2$  равны, то есть  $P_1 = P_2$ , поэтому определим усилие со стороны материала на один валок.

$$P = F_{II} \cdot p_{cp} + F_B \cdot p_{cp} = (F_{II} + F_B) \cdot p_{cp} \quad (2)$$

где  $F_{II}$  – площадь поверхности соприкосновения материала с валками в зоне прессования,  $m^2$ ;

$F_B$  – площадь поверхности соприкосновения материала с валками в зоне выпрессовывания,  $m^2$ ;

$P_{cp}$  – среднее давление, Па.

Площади поверхностей соприкосновения материала с валками будут зависеть от диаметра валков, размеров приёмной воронки и нагнетательной камеры.

$$F_{II} = l_{II} \cdot b \qquad F_B = l_B \cdot b \qquad (3)$$

где  $l_{II}$  – проекция дуги захвата на вертикальную ось, м;

$l_B$  – проекция дуги выпрессовывания на вертикальную ось, м;

$b$  – ширина нагнетаемого пласта материала, м.

Проекции дуг захвата и выпрессовывания зависят от величин углов, соответственно, захвата и выпрессовывания, и радиуса валка.

$$l_{II} = R \cdot \text{Sin}\alpha \qquad l_B = R \cdot \text{Sin}\beta \qquad (4)$$

где  $R$  – радиус валка, м;

$\alpha$  – угол захвата;

$\beta$  – угол выпрессовывания.

Подставим выражения 4 в уравнения 3 и найдём площади поверхностей соприкосновения материала с валками.

$$F_{II} = R \cdot \text{Sin}\alpha \cdot b \qquad F_B = R \cdot \text{Sin}\beta \cdot b \qquad (5)$$

Подставим выражения 5 в уравнение 2 и определим распорное усилие со стороны упруго-вязко-пластичного материала на нагнетательный валок, которое равно:

$$\begin{aligned} P &= (R \cdot \text{Sin}\alpha \cdot b + R \cdot \text{Sin}\beta \cdot b) \cdot p_{cp} = \\ &= R \cdot b \cdot (\text{Sin}\alpha + \text{Sin}\beta) \cdot p_{cp} \end{aligned} \qquad (6)$$

Другой величиной характеризующей течение вязкоупругих или вязкопластических масс в валковых устройствах является давление, создаваемое материалом в зазоре между валками.

Для определения величины давления материала на валки введём следующие упрощения:

1. Течение материала в зазоре между валками изотермическое и симметричное.
2. Инерционные силы малы по сравнению с вязкими силами.
3. Ускорением материала можно пренебречь.

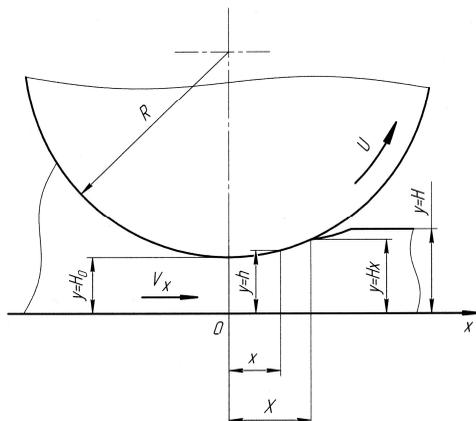


Рисунок 2 – Схема нагнетания пластичного материала цилиндрическими валками

Упруго-вязко-пластичный материал является неньютоновской жидкостью, которая подчиняется степенному закону течения. Рассмотрим валки одинакового диаметра, вращающиеся с одной и той же окружной скоростью. Так как процесс течения материала между валками симметричен относительно оси X, то достаточно рассмотреть область с положительными координатами Y (рис. 2).

Используем уравнение Мак-Келви [1] для определения давления в очаге деформации в процессе каландрования термопластичных материалов.

$$\frac{dp}{dx} = \left( \frac{2n+1}{n} \right)^n \cdot \left( \frac{U \cdot \mu_{\text{эф}}}{\tau \cdot H_0} \right)^n \cdot \frac{\tau}{H_0} \cdot \frac{(\lambda^2 - \rho^2)^n}{(1 + \rho^2)^{2n+1}} \quad (7)$$

где n – индекс течения;

U – окружная скорость валков, м/с;

$\mu_{\text{эф}}$  – эффективная вязкость, Па·с;

$\tau$  – напряжение сдвига;

$\lambda$  – значение независимой переменной  $\rho$  в точке X, в которой теряется контакт материала с валками.

Введение в уравнение 7 независимой переменной  $\rho$ , которая связана с координатой  $x$ , позволяет учесть упругое восстановление пластичного материала.

$$\lambda = \frac{X}{\sqrt{2H_0 \cdot R}} \quad (8)$$

$$\rho = \frac{x}{\sqrt{2H_0 \cdot R}} \quad (9)$$

где R – радиус валка, м;

$2H_0$  – зазор между валками, м.

Так как

$$\frac{dx}{d\rho} = \sqrt{2H_0 \cdot R} \quad (10)$$

Тогда подставив выражение 10 в уравнение 7, получим:

$$\frac{dp}{d\rho} = \sqrt{2H_0 \cdot R} \cdot \left(\frac{2n+1}{n}\right)^n \cdot \left(\frac{U \cdot \mu_{эф}}{\tau \cdot H_0}\right)^n \cdot \frac{\tau}{H_0} \cdot \frac{(\lambda^2 - \rho^2)^n}{(1 + \rho^2)^{2n+1}} \quad (11)$$

Проинтегрируем выражение 11, учитывая, что значения независимой переменной  $\rho$  лежат в пределах  $\pm\lambda$ , и получим:

$$p = \sqrt{2H_0 \cdot R} \cdot \left(\frac{2n+1}{n}\right)^n \cdot \left(\frac{U \cdot \mu_{эф}}{\tau \cdot H_0}\right)^n \cdot \frac{\tau}{H_0} \cdot \int_{-\rho}^{\rho} \varphi d\rho \quad (12)$$

где  $\varphi$  – функция, учитывающая упругое восстановление материала.

$$\varphi = \frac{(\lambda^2 - \rho^2)^n}{(1 + \rho^2)^{2n+1}} \quad (13)$$

При значении независимой переменной  $\rho = \lambda$  величина давления равна нулю, то есть  $p = 0$ . При значении  $\rho = -\lambda$  давление достигает максимума.

Тогда максимальное давление в зазоре между нагнетательными валками равно:

$$p_{\max} = \sqrt{2H_0 \cdot R} \cdot \left(\frac{2n+1}{n}\right)^n \cdot \left(\frac{U \cdot \mu_{\text{эф}}}{\tau \cdot H_0}\right)^n \cdot \frac{\tau}{H_0} \cdot \int_{-\rho}^0 \varphi d\rho \quad (14)$$

Методика определения распорных усилий и давления может найти широкое применение при расчёте и конструировании валковых устройств различного технологического оборудования в строительной, химической и других областях промышленности. От точности определения силовых параметров зависит расчёт мощности оборудования, и, как следствие, снижение энергозатрат.

#### Список литературы:

1. Мак-Келви Д.М. Переработка полимеров. М.: Химия, 1965. 442 с.
2. Николаева О.И., Бурмистров В.А. Валковые машины в процессах переработки полимерных материалов. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2010. 84 с.

## **МИНИМИЗАЦИЯ ОТРАЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ СЛОЯ ОБРАБАТЫВАЕМОГО ВЕЩЕСТВА В ПРОМЫШЛЕННЫХ СВЧ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ**

**Лаптева С.Н., ассистент**

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

В СВЧ энергетике обработка вещества производится с помощью мощного потока СВЧ электромагнитных волн. Между излучателем электромагнитных волн и обрабатываемым материалом имеется область свободного пространства, волновое сопротивление которого обычно отличается от сопротивления обрабатываемого материала. На границе раздела неизбежно возникают отражения, которые приводят в дальнейшем к нарушению режима работы генератора СВЧ и линии передачи. Кроме того, значительная амплитуда отраженной от вещества волны, означает, что она поглощается не в обрабатываемом материале, а направляется опять в излучатель. Последнее, кроме нарушения режима линии, работы генератора, вызывает так же резкое уменьшение КПД всей установки [1]. Для уменьшения коэффициента отражения может быть использован «просветляющий» слой диэлектрика с электрическими характеристиками, являющимися средним геометрическим из характеристик свободного пространства и диэлектрика, при этом толщина «просветляющего» слоя должна быть равной четверти длины волны в нем. Эта идея широко распространена в оптике [2]. Подобный подход является малопродуктивным в СВЧ энергетических установках, так как требует для каждого из обрабатываемых материалов «своего» диэлектрика достаточно большой толщины с минимальными потерями в нем.

Способ СВЧ-обработки диэлектрических материалов заключается в том, что диэлектрический материал с известной диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon$ ) и тангенсом угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg} \delta$ ) помещают в металлическую камеру. СВЧ-излучатель размещают с противоположных стороны перпендикулярно обрабатываемой поверхности диэлектрического материала, который облучают СВЧ-излучением подачей электромагнитных волн перпендикулярно его поверхности, механически устанавливают размеры  $h$  СВЧ-излучателя и компенсируют реактивную составляющую входного сопротивления.

Согласно другому способу СВЧ-обработки диэлектрических материалов обрабатываемый диэлектрический материал с неизвестной

диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon$ ) и тангенсом угла потерь ( $\text{tg } \delta$ ), помещают в металлическую камеру, СВЧ-излучатель размещают со стороны обрабатываемого диэлектрического материала, который облучают СВЧ-излучением подачей электромагнитных волн перпендикулярно его поверхности. Определяют положение сечения волноводной линии, в котором входное сопротивление равно волновому и СВЧ-излучатель располагают на расстоянии кратном целому числу длин пополю от найденного расстояния между СВЧ-излучателем и границей раздела поверхности диэлектрического материала и свободного пространства ( $l$ ).

Экспериментальная проверка этих способов может осуществляться на СВЧ-установке, схема которой представлена на рис. 1

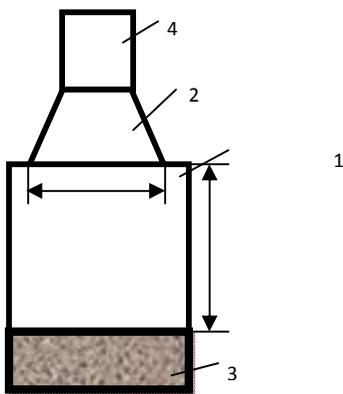


Рисунок 1 –Схема СВЧ-установки

Установка для осуществления способа СВЧ-обработки диэлектрических материалов состоит из металлической камеры 1, которая соединена с СВЧ-излучателем 2, раскрыв которого можно изменять. СВЧ-излучатель расположен напротив и перпендикулярно поверхности диэлектрического материала 3, который помещают в металлическую камеру. СВЧ-генератор 4 присоединен к СВЧ-излучателю.

Способ СВЧ-обработки диэлектрических материалов, согласно первому варианту, осуществляется следующим образом. В металлическую камеру 1 предложенной установки (рис.1) напротив и перпендикулярно СВЧ-излучателю 2 помещают в металлическую

камеру диэлектрический материал 3, например, насыпая на радиопрозрачную ленту песок, фиксируя его радиопрозрачными пенополистирольными вкладышами, которые не влияют на работу устройства, но позволяют фиксировать его в металлической камере, или помещая в нее блок пенобетона. Подобное размещение способствует тому, что диэлектрический материал облучается подачей электромагнитных волн перпендикулярно его поверхности и коэффициент поглощения стремится к максимальному значению. Подбирают размер  $h$  СВЧ-излучателя механически, что способствует тому, что вся поверхность материала подвергается облучению в процессе обработки. Используя математический пакет MathCAD и формулу полного входного сопротивления, а также, зная электрические характеристики диэлектрических веществ, получают графические зависимости нормированной активной и реактивной составляющих входного сопротивления волновода от коэффициента фазы ( $\beta l$ ). По полученным графическим зависимостям определяют значение коэффициента фазы ( $\beta l$ ), соответствующее тому, что активная составляющая входного сопротивления стремится к единице, т.е.  $R(\beta l) \rightarrow 1$ . По полученным данным коэффициента фазы определяют расстояние  $l$ , на которое и устанавливают СВЧ-излучатель. По значениям коэффициента фазы ( $\beta l$ ) определяют значение реактивной составляющей входного сопротивления и компенсируют ее вводом в волновод дополнительного реактивного сопротивления, имеющего противоположный знак по отношению к расчетному, определенному из графика. Компенсация реактивной составляющей входного сопротивления осуществляется с помощью диафрагмы или введения реактивного штыря. Подключают СВЧ-генератор 4 и облучают СВЧ-излучением подачей электромагнитных волн перпендикулярно поверхности диэлектрического материала.

Способ СВЧ-обработки диэлектрических материалов, согласно второму варианту, в случае, если неизвестны значения диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) и тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg } \delta$ ), заключается в следующем. В металлическую камеру 1 предложенной установки (рис.1) напротив и перпендикулярно СВЧ-излучателю 2 помещают в металлическую камеру диэлектрический материал 3, например, песок или блок пенобетона. Подобное размещение способствует тому, что диэлектрический материал облучается подачей электромагнитных волн перпендикулярно его поверхности и коэффициент поглощения стремится к максимальному значению. Посередине широкой стенки металлической камеры прорезана

неизлучающая щель, по которой может в продольном направлении перемещаться детекторный зонд, который подключен к ваттметру, что позволяет измерять режим работы волноводной линии. Подключают СВЧ-генератор 4 и облучают подачей электромагнитных волн перпендикулярно поверхности диэлектрического материала. Измеряют режим работы линии передачи, т.е. с помощью детекторного зонда определяют коэффициент стоячей волны, как отношение максимального и минимального значения амплитуды напряжения, которое вдоль линии меняется от сечения к сечению. В сечениях максимумов и минимумов напряжения входное сопротивление чисто активно. В других сечениях сопротивление комплексное и при переходе через максимум характер реактивности меняется. Таким образом, вдоль линии происходит изменение сопротивления. Участок линии длиной равной целому числу длин полуволн не изменяет сопротивления. Находят то сечение линии, в котором входное сопротивление равно волновому (активная составляющая волнового сопротивления). В этом сечении вычисляют реактивную составляющую волнового сопротивления по формулам. Для обработки результатов служат специальные круговые диаграммы Вольперта, по данным которых и определяется расположение сечения линии, имеющее полученное значение реактивной и активной составляющих волнового сопротивления. Реактивную составляющую входного сопротивления подбирают по модулю равной полученному ранее волновому сопротивлению, а по знаку противоположную ему. Известно, что поперечные сечения линии с одинаковым входным сопротивлением периодически повторяются через расстояние равное половине длины волны. СВЧ-излучатель располагают на расстоянии, кратном целому числу длин полуволн от найденного расположения сечения линии, т.е. располагают его на расстоянии  $l$  от поверхности диэлектрического материала. Например, для диэлектрического материала пенобетона, определено по предложенному способу расстояние от раскрытия СВЧ-излучателя до диэлектрического материала,  $l=0,16$  м такое, чтобы обеспечить максимальное поглощение электромагнитных волн в обрабатываемом слое диэлектрического материала, следовательно, снизить энергоёмкость использования СВЧ-энергии.

Известно, что все диэлектрические вещества характеризуются диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon$ ) и тангенсом угла диэлектрических потерь ( $\text{tg } \delta$ ). На практике чаще всего приходится работать с диэлектрическими веществами неизвестных электрических характеристик.

Реальные же диэлектрики, обрабатываемые в СВЧ-установках, всегда имеют большие потери электромагнитной энергии. Кроме того, в случае нечетко выраженной границы раздела сред (сыпучие материалы), угол падения электромагнитной волны для разных участков будет различный, что не дает возможности в полной мере реализовать предложенный способ. Процесс сушки занимает длительное время, а нагрев материала должен осуществляться медленно, следовательно, является энергоемким.

Оптимизация конструкции сушильной камеры по критерию максимума поглощаемой в веществе мощности обеспечит высокое качество сушки только в том случае, если в устройстве будут предусмотрены механизмы достаточно интенсивного перемешивания высушиваемого материала и удаления влажного воздуха [3]. Необходимость устройства перемешивания непосредственно следует из того факта, что интерференция прямой и отраженной от экрана волн в веществе будет давать неравномерное по толщине материала распределение амплитуды электромагнитной волны.

Предложенные же способы реализовали процесс минимизации отражения электромагнитных волн СВЧ-излучателя от слоя диэлектрических материалов, что ведет к максимальному поглощению СВЧ-энергии диэлектрическими материалами, а также снижение энергоемкости.

#### **Список литературы:**

1. Черняев Л.К. Согласование в высокочастотных трактах. М.: Сов. Радио, 1967. 67 с.
2. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В.. Электрические поля и волны. М.: Сов. радио, 1971. 240 с.
3. Маслов А.Ф., Маслов В.А. СВЧ энергетика – путь к радикальному энергосбережению // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2003. № 5. С. 173-175.

## **ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОМПРОДУКТА ПРИ ФЛОТАЦИИ МАГНИТОРУДНОГО СЫРЬЯ**

**Лозовая С.Ю., д-р техн.наук, проф.,**

**Стовпенко А.С., студент**

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

**Старчик Ю.Ю., канд.техн.наук, доц.**

*Новороссийский филиал Белгородского государственного  
технологического университета им. В.Г.Шухова*

Флотация является основным технологическим процессом обогащения многих полезных ископаемых. В настоящее время только в РФ работают сотни обогатительных фабрик, на которых флотируют руды цветных, редких и черных металлов, и других полезных ископаемых. Для многих, руд, особенно руд цветных и редких металлов, нет другого технологического процесса обогащения, который был бы в состоянии конкурировать с флотацией [1].

Основными в переработке многих типов полезных ископаемых являются флотационные методы обогащения. Они используются, например, при обогащении более 95% руд черных и цветных металлов, апатит-нефелиновых руд и других типов минерального сырья. Возрастающее значение флотационных методов обогащения в настоящее время обусловлено вовлечением в переработку бедных, тонковкрапленных и труднообогатимых руд, необходимостью комплексного и более полного их использования [1].

Для флотационного обогащения созданы сотни машин и аппаратов, из которых лишь несколько десятков нашли широкопромышленное применение. Общим для всех современных конструкций флотационных машин является использование в качестве рабочего агента такого, как воздух в виде мелких пузырьков, образуемых в пульпе тем или иным способом. Минерализация воздушных пузырьков происходит при непосредственном столкновении их с частицами, скольжении частиц по поверхности пузырьков, выделении пузырьков на поверхности частиц и в сочетании этих явлений. Относительная роль способов минерализации зависит от применяемых способов аэрации и конструкций механических флотационных машин.

Флотационные машины различаются по конструктивным признакам, способу аэрации и технологическому назначению. В

большинстве случаев их классификации за определяющий признак принимают способ аэрации.

По этому признаку флотационные машины могут быть разделены на следующие группы: механические, пневмомеханические, пневмогидравлические, пневматические, электрофлотационные, флотационные машины с изменением давления и комбинированные.

В механических флотационных машинах для аэрации пульпы используют аэрационные узлы разной конструкции и принципа действия, состоящие из импеллера и ротора.

Известен аэрационный узел (рис 1), содержащий вал для подачи воздуха с установленным на нем конусовидными импеллером с меньшим основанием вниз, имеющий прорезы в радиальных ребрах жесткости. Боковая поверхность ребер жесткости представляет собой усеченный конус. Большее основание представляет собой кольцо, на внутренней поверхности которого радиально расположены лопатки, имеющие высоту 1/3 высоты импеллера в зоне окон, образующихся между двумя соседними ребрами. Нижнее основание имеет форму глухого диска с радиальными каналами в теле диска, которые имеют радиальный переход в прорези радиальных ребер жесткости.

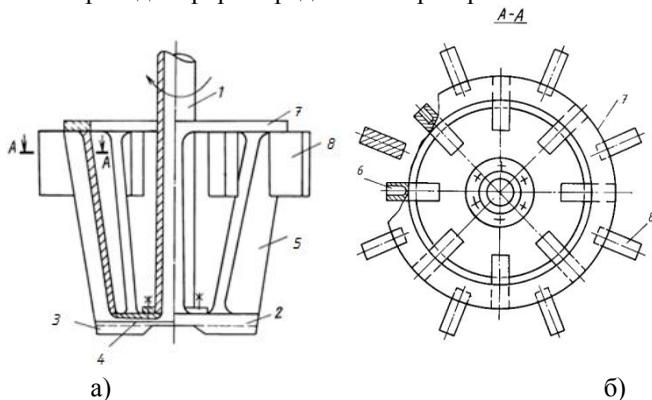


Рисунок 1 –Предлагаемый аэрационный узел флотационной машины:

- а – общий вид аэрационного узла; б– разрез А-А вид сверху;  
 1– вал; 2– глухой диск; 3– выступы; 4– каналы; 5– ребра жесткости;  
 6– прорези; 7– концентрическое кольцо; 8– лопатки

Аэрационный узел (рис.2, а) содержит полый вал 1 для подвода воздуха импеллер 2 в виде усеченного конуса с большим основанием вниз. Основание 3 глухое по периметру имеет отверстия 4. В области

отверстий 4 к основанию 3 импеллера 2 крепятся пальцы 5 с отверстиями 6 (рис.2, б).

К полному валу 1 через подшипниковый узел 7 крепится ротор 8 с лопастями 11. Ротор состоит из верхнего диска 9, который закреплен через подшипниковый узел 7, на полном валу 1 и нижнего кольца 10, соединенные между собой лопастями 11. Импеллер 2 вращается внутри ротора 8 с угловой скоростью  $\omega_1$ .

Работает аэрационный узел следующим образом. Во вращающийся полый вал 1 подается воздух, который через импеллер 2, отверстия 4 основания 3 и отверстия 6 в пальцах 5, попадает на лопасти 11 ротора 8, придавая ему вращение в сторону противоположную вращению импеллера с угловой скоростью  $\omega_2$ . Таким образом, пульпа более обильно насыщается пузырьками воздуха, которые при этом дополнительно диспергируются и равномерно распространяются во всем объеме пульпы.

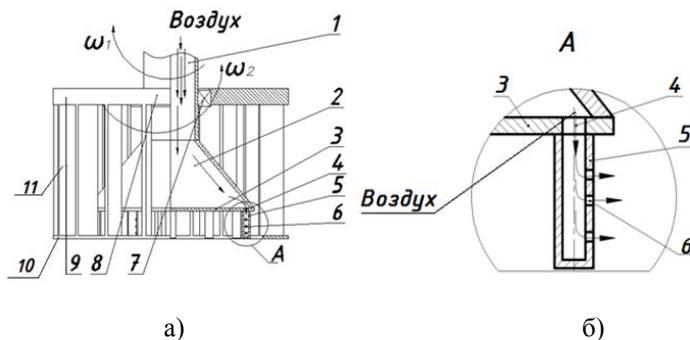


Рисунок 2 – Аэрационный узел флотационной машины

Таким образом, предлагаемая конструкция аэрационного узла флотационной машины дает нам – увеличение эффективности флотационного процесса, увеличение степени диспергирования пузырьков воздуха и более равномерное их распределение в объеме флотационной пульпы.

#### Список литературы:

1. Абрамов А.А. Флотационные методы обогащения. Учебник для вузов. М.: Недра, 1984, 383 с.
2. Лозовая С.Ю., Саблин В.С., Ткачева О.В. Экспериментальные исследования процессов гомогенизации в статическом смесителе// Вестник БГТУ им.В.Г.Шухова. 2014. №2.

## ОРГАНИЗАЦИЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СЕЛЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА

Науменко Ю.В., д-р техн. наук, доц.

*Национальный университет водного хозяйства  
и природопользования (г. Ровно)*

Диспергирование позволяет повысить скорость гетерогенных и твердофазных реакций [1,2]. Основная проблема технологии дезинтеграции состоит в парадоксальной зависимости между затратами энергии и дисперсностью материала. Она порождает противоречие между относительным совершенством современных технологий и оборудования для измельчения и чрезвычайно низкой энергетической эффективностью процессов, к. п. д. которых оценивается в 0,1-0,001% [3].

Эмпирические соотношения между энергозатратами и дисперсностью стали классическими и широко используются в производственной практике [4]. Однако ни одна из ранее опубликованных теорий и ни один из эмпирических законов измельчения не являются корректными в области тонкого та сверхтонкого диспергирования [5].

Общее выражение эмпирической зависимости энергетических затраты на снижение размеров частиц имеет вид [4,6]

$$dE = -K \frac{dl}{l^n}, \quad (1)$$

где  $E$  – удельная энергия, передаваемая единице объема разрушаемого тела и необходимая для приращения энергии заново образующейся поверхности;  $K$  – коэффициент пропорциональности;  $l$  – средний размер частицы;  $n$  – коэффициент размеров частицы и способа измельчения. Графическая интерпретация выражения (1) (рис. 1), свидетельствует о том, что закон Кика-Кирпичева является применимым для процессов дробления или грубого измельчения, закон Риттингера – для среднего измельчения, закон Бонда – для промежуточных случаев и ни один из этих законов не является пригодным для тонкого измельчения.

Основным оборудованием многотоннажного тонкого измельчения остаются традиционные барабанные мельницы. Главным их недостатком являются высокие удельная затрата энергии. Это обусловлено на первый взгляд парадоксальной ситуацией, когда

реальная прочность большинства твердых материалов является на два-три порядка меньшей теоретической, а реальная энергоёмкость их разрушения – на три и более порядка большей теоретической энергоёмкости новой поверхности.

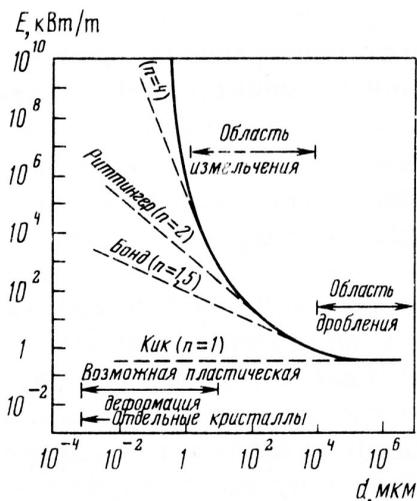


Рисунок 1 – Зависимости удельных затрат энергии  $E$  от размеров измельчаемых частиц (по [4])

Новым технологическим направлением повышения эффективности дезинтеграции является селективность измельчения [7]. Основной концепцией энергетической селективности является избирательность подвода энергии к материалу с целью минимизации энергозатрат разрушения. Принцип селективности является физической основой рациональной организации процесса измельчения, когда значение и распределение нагрузок в объеме частицы материала должны оптимально сочетаться со скоростью деформирования и продолжительностью нагрузки для минимизации затрат энергии в процессах ее разрушения.

Грубое измельчение крупных частиц целесообразно осуществлять ударным действием при создании больших импульсов, способствующих возникновению в материале предельного упругого деформирования. Зато тонкое измельчение малых частиц – стиранием и раздавливанием при создании малых импульсов, способствующих возникновению

пластического деформирования [8-10].

Принцип селективности измельчения для барабанных мельниц реализуется посредством многостадийности процесса. Селективная внешнекамерная дезинтеграция в таких мельницах предусматривает осуществлении грубого измельчения при повышенной скорости вращения, а тонкого – при пониженной [11]. Однако обоснованная методика выбора технологических параметров оборудования отсутствует.

Процесс измельчения в барабанных мельницах носит ярко выраженный случайный характер [12]. В то же время существующая теория рабочих процессов таких мельниц основывается на концепции изолированного от окружающей среды отдельного элемента загрузки камеры. Предполагается, что режим движения загрузки является двухфазным «водопадным», а измельчение осуществляется только ударным действием. В действительности картину реального установившегося движения загрузки при стационарном вращении барабана можно условно разделить на три зоны. Первая твердотельная зона возникает вблизи поверхности камеры, вторая зона движения с отделением и несвободным падением элементов – в верхней части камеры, третья зона быстрого гравитационного сдвигового потока – вблизи свободной поверхности.

Измельчение в барабанных мельницах ударным действием осуществляется на границе перехода между второй и третьей зонами загрузки. Основной процесс измельчения истиранием происходит в верхней части третьей зоны при быстром течении со значительным сдвиговым градиентом, а раздавливанием – в нижней части этой зоны при замедлении потока.

Учитывая недетерминированность факторов рабочего процесса барабанных мельниц, описать его можно только с помощью обобщенных параметров, в качестве которых могут быть приняты динамические характеристики, как критерии эффективности процесса помола.

Быстрое гравитационное течение, реализуемое в сдвиговой зоне загрузки, относится к классу быстрых сдвиговых течений, являющихся наиболее общей формой движения зернистой среды с интенсивным взаимодействием элементов. Такие течения описываются кинетической теорией плотных газов. Учет неупругости элементов в межэлементных столкновениях позволяет включить в уравнение баланса их энергии параметр «температуры» зернистой среды [13]. Она характеризует кинетическую энергию случайного хаотического движения элементов.

Выражение для температуры  $T$  сдвигового слоя загрузки имеет вид:

$$T = \left( \frac{V_{зmax} + |V_{з0}|}{h} \right)^2 \cdot \frac{R}{g},$$

где  $V_{зmax}$  – максимальная сдвиговая скорость на свободной поверхности в выбранном сечении сдвигового слоя,  $V_{з0}$  – скорость движения опорной поверхности в сечении слоя,  $h$  – толщина слоя,  $R$  – радиус камеры,  $g$  – гравитационное ускорение. Показатель температуры имеет комплексный характер и определяет степень активности взаимных перемещений элементов и интенсивность протекания в среде процессов.

На основе моделирования напряженно-деформированного состояния загрузки были определены поверхности перехода между первой и второй зонами и движения сдвигового слоя [14]. Получены результаты для четырех случаев работы барабанных мельниц и различных степеней заполнения камеры  $\kappa$ . Первый случай характеризуется относительным размером элементов загрузки  $d$  в камере диаметром  $D$  –  $d/D=0,022$  и волнистой камерой, что соответствует условиям работы шаровых или первой камеры трубных мельниц с новой футеровкой. Второй –  $d/D=0,026$  и гладкой камерой, что соответствует работе указанных мельниц с изношенной футеровкой. Третий –  $d/D=0,01$  и гладкой камерой, что соответствует работе второй камеры трубных мельниц. Четвертый –  $d/D=0,0024$  и гладкой камерой, что соответствует работе третьей камеры трубных мельниц с минипебсной загрузкой.

На рис. 2 изображены полученные зависимости температуры  $T$  от относительной скорости  $\psi_{\omega}$  при  $\kappa=0,25-045$  для четырех случаев работы мельниц. Они иллюстрируют зарегистрированный эффект возникновения двойного максимума значений  $T$  для различных  $\psi_{\omega}$ . Сравнительный анализ показывает усиление эффекта с понижением относительного размера элементов и выступов на поверхности камеры.

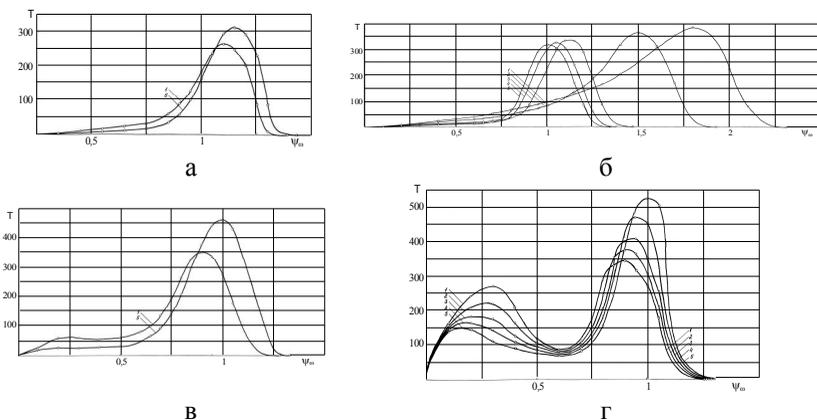


Рисунок 2 –Зависимости  $T$  от  $\psi_\omega$  при: а –  $d/D=0,022$  и волнистой камере, б –  $d/D=0,026$ , в –  $d/D=0,01$ , г –  $d/D=0,0024$  и гладкой камере: 1 –  $\kappa=0,25$ ; 2 –  $\kappa=0,3$ ; 3 –  $\kappa=0,35$ ; 4 –  $\kappa=0,4$ ; 5 –  $\kappa=0,45$ .

Полная энергия хаотического движения в поперечном направлении сдвигового слоя, определяющая стирающее действие, характеризуется комплексным параметром произведения температуры среды, как удельной энергии, на массовую долю слоя –  $T \cdot K_{за}$ , а производительность – произведением этих множителей на оборотность загрузки –  $T \cdot K_{за} \cdot K_o$ , где  $K_{за} = m_3/m$  – степень сдвиговой активации, характеризующая удельную долю третьей зоны в массе всей загрузки;  $m_3$  – масса сдвиговой зоны;  $m$  – масса всей загрузки;  $K_o = 2\pi/(t_\omega)$  – оборотность загрузки, характеризующая количество периодов ее циркуляции в течение одного оборота барабана;  $t_\omega$  – продолжительность цикла движения загрузки;  $\omega$  – угловая скорость барабана.

Приведенные графические зависимости комплексных параметров  $T \cdot K_{за}$  (рис. 3а) и  $T \cdot K_{за} \cdot K_o$  (рис. 3б), от  $\psi_\omega$  для четвертого случая работы барабанных мельниц характеризуются, по сравнению с  $T(\psi_\omega)$  (рис. 2г), постепенным переходом тихоходных максимумов значений параметров из локальных в абсолютные.

В частности, если соотношение между тихоходным и быстроходным максимумами для  $T(\psi_\omega)$ , при четвертом случае работы мельниц, составляет 0,28-0,79, то для комплексных параметров  $T \cdot K_{за}(\psi_\omega)$  – 0,66-0,85, а для  $T \cdot K_{за} \cdot K_o(\psi_\omega)$  – 0,9-1,16. Тихоходный максимум  $T \cdot K_{за} \cdot K_o$  соответствует  $\psi_\omega=0,2-0,3$ . Значение этих максимумов снижаются с ростом  $\kappa$ .

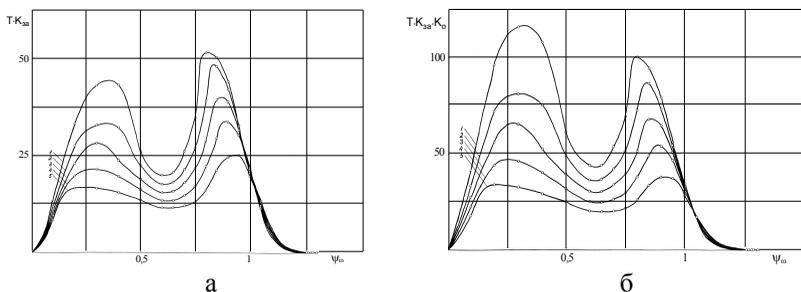


Рисунок 3 – Зависимости  $T \cdot K_{за}$  (а) и  $T \cdot K_{за} \cdot K_o$  (б) от  $\psi_\omega$  при  $d/D=0,0024$  и гладкой камере: 1 –  $\kappa=0,25$ ; 2 –  $\kappa=0,3$ ; 3 –  $\kappa=0,35$ ; 4 –  $\kappa=0,4$ ; 5 –  $\kappa=0,45$

Возникновение тихоходного максимума вызвано эффектом аномального снижения псевдовязкости загрузки [15]. При этом небольшая высота сдвигового слоя обуславливает повышенное значение температуры. В то же время возникновение среднеходового минимума температуры вызвано значительным увеличением высоты слоя и ростом массы зоны несвободного падения, осуществляющей тормозящее влияние на поток. С ростом скорости вращения уменьшается толщина слоя и повышается высота падения, что способствует ускорению сдвигового потока и возникновению быстроходного абсолютного максимума.

Были установлены диапазоны параметров реализации рациональных режимов многостадийного помола [14]: для первого этапа грубого измельчения, при повышенных скорости вращения, степени заполнения камеры и размере мелющих тел –  $\psi_\omega=0,85-1,05$ ,  $\kappa=0,45$ ,  $d/D=0,015-0,04$ , для последнего этапа тонкого измельчения, при пониженных значениях параметров –  $\psi_\omega=0,25-0,45$ ,  $\kappa=0,25$ ,  $d/D=0,002-0,01$ .

#### Список литературы:

1. Ходаков Г.С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972. 308 с.
2. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. М.: Стройиздат, 1972. 240 с.
3. Гийо Р. Проблема измельчения материалов и ее развитие. М.: Стройиздат, 1964. 112 с.
4. Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. 301 с.
5. Ходаков Г.С. Физико-химическая механика технологических

- процессов: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.chem.msn.su/rus/history/Rechbinder/20.html#author/>.
6. Андреев Е.Е., Тихонов О.Н. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению. СПб: Санкт-Петербург. гос. горн. ин-т (техн. ун-т), 2007. 439 с.
  7. Селективное разрушение минералов / В.И. Ревнивцев, Г.В. Гапонюк, Л.П. Завгородний и др.; под ред. В.И. Ревнивцева. М.: Недра, 1988. 286с.
  8. Шинкоренко С.Ф. Технология измельчения руд черных металлов. М.: Недра, 1982. 212 с.
  9. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1985. 285 с.
  10. Процессы помола и классификации в производстве цемента / В.С. Богданов, Н.П. Несмеянов, А.С. Ильин, Ю.М. Фадин. М.: Изд-во АСВ; Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004. 199 с.
  11. Подрібнювання. Енергетика і технологія / Г.Г. Півняк, Л.А. Вайсберг, В.І. Кириченко, В.В. Кириченко. Д.: НГУ, 2006. 314 с.
  12. Биленко Л.Ф. Закономерности измельчения в барабанных мельницах. М.: Недра, 1984. 200 с.
  13. Борщев В.Я., Долгунин В.Н. «Температура» зернистой среды и физические эффекты взаимодействия частиц при быстром сдвиговом течении зернистых материалов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2007. Т. 50, вып. 8. С. 78-82.
  14. Науменко Ю.В. Основи теорії робочих процесів барабаних млинів: Монографія. Рівне: НУВГП, 2014. 336 с.
  15. Ден-Гартог Дж.П. Механические колебания: Пер. с англ. / Дж.П. Ден-Гартог. М.: Физматгиз, 1960. 580 с.

## **РАЗРАБОТКА РОТОРНОГО СМЕСИТЕЛЯ С ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ РЕЖИМОМ СМЕШИВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ**

**Несмеянов Н.П., канд. техн. наук, проф.,  
Бражник Ю.В., аспирант,  
Барышева Т.А., студент**

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

Большинство строительных материалов, как в России, так и за рубежом производятся с использованием смесительного оборудования. Развитие науки в области органической химии и нанотехнологии позволило в достаточно короткие сроки создать новые классы материалов, сочетающих в себе частицы с разной дисперсией, различающейся в десятки раз, плотностью, формой и соотношением составных компонентов. Качественное перемешивание таких материалов напрямую будет влиять на потребительские свойства готового продукта. В первую очередь, к таким материалам можно отнести сухие строительные смеси для отделочных и других видов работ. Так, например, для производства финишной выравнивающей штукатурки используют 5-6 компонентов с соотношением до 0,5% и дисперсностью от 1 до 600 мкм. Поэтому качественное смешивание материалов с различным дисперсным составом и сложной рецептурой является важным этапом при производстве сухих строительных смесей.

Как показала практика, качественные сухие строительные смеси со сложной рецептурой можно получить в смесителях, использующих высокоскоростные режимы смешения с вертикальным расположением смесительного ротора. Анализ литературных, патентных и других источников [1] показал, что в смесителях данного класса быстрое и качественное перемешивание материалов происходит за счет образования псевдооживленного слоя смеси. Но, при этом, высокоскоростной режим создает движение материала по определенным замкнутым траекториям, совпадающим с направлением движения смесительного ротора, что приводит к увеличению времени смешения и ограничению равномерного распределения компонентов смеси. Таким образом, смесительное оборудование должно использовать принцип высокоскоростного режима смешивания с возможностью разрушения замкнутых траекторий движения материала.

На основании вышесказанного на кафедре механического оборудования БГТУ им. В.Г.Шухова был разработан смеситель (рис.1), в основе которого использован патент RU № 112643 U1 [2]. В конструкцию была воплощена идея создания противоточных конвективных потоков перемешиваемого материала, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Создание этих потоков обеспечивается за счет установленных спиралей на внутренней поверхности смесительного барабана [3].

Смеситель (рис.1) состоит из цилиндрического барабана 2, внутри которого консольно установлен ротор 3, закрепленный в подшипниках. На этом валу закреплены несколько рядов лопастей. В каждом ряду находятся лопасти, которые повернуты относительно друг друга на  $120^\circ$ . При этом установлены они таким образом, чтобы набрасывать смешиваемые компоненты на винтовую спираль 5, закрепленную на внутренней стенке барабана. Винтовая спираль имеет разрывы в плоскостях вращения лопастей ротора. Барабан смесителя установлен в подшипниковом узле, который в свою очередь закреплен на корпусе 1. В верхней части барабана смесителя имеется крышка, которая препятствует выходу перемешиваемых компонентов.

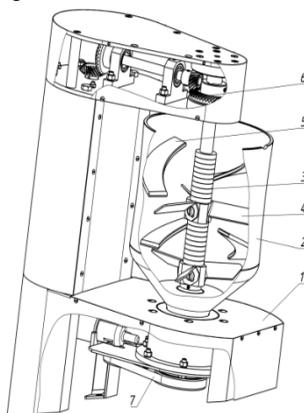


Рисунок 1– Модель смесителя: 1 – корпус, 2 – смесительный барабан, 3 – ротор, 4 – лопасть месильная, 5 – трехзаходная винтовая спираль, 6 – привод ротора, 7 – привод смесительного барабана

Как известно из анализа рынка строительных материалов, на сегодняшний день выпуск сухих строительных смесей составляет 47% от выпуска всей продукции строительной индустрии и около 1/3

выпуска приходится на предприятия малой и средней мощности. Используемое на этих предприятиях оборудование мало адаптировано под небольшие объемы выпуска продукции и большую часть времени простаивает, что является крайне неэффективным способом эксплуатации. Следовательно, задача получения качественных многокомпонентных сухих строительных смесей со сложной рецептурой с использованием смесительного оборудования, адаптированного под предприятия малого и среднего бизнеса в настоящее время особо актуальна.

#### **Список литературы:**

1. Анализ смесительного оборудования для сухих строительных смесей / В.С. Богданов, Н.П. Несмеянов, П.С. Горшков, Ю.В.Бражник // Материалы межвузовского сборника статей. Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. Вып. XI. С. 70-73.
2. Патент РФ №2011122970/05, 07.06.2011. Богданов В.С., Несмеянов Н.П., Горшков П.С. Смеситель для перемешивания сыпучих материалов// Патент России №112643.2012. Бюл.№2.
3. Воронов В.П., Несмеянов Н.П., Горшков П.С. Спирально-лопастной противоточный смеситель для производства сухих строительных смесей // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2012. №1. С.66-69.

## РАЗРАБОТКА СМЕШИВАЮЩЕГО МЕХАНИЗМА БЕТНОСМЕСИТЕЛЯ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Несмеянов Н.П., канд. техн. наук, проф.,  
Дмитриенко В.Г., канд. техн. наук, доц.,  
Матусов М.Г., аспирант

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

В настоящее время в строительной индустрии широкое распространение получили смесители принудительного действия. Свое распространение они заслужили благодаря следующим своим достоинствам: простота конструкции, универсальность применения. Но у них есть следующие недостатки: высокая удельная энергоемкость на единицу получаемой смеси, низкая эффективность перемешивания исходных компонентов за счет неравномерного распределения частиц по всему объему готового продукта, большое время, затрачиваемое на приготовление смеси [1].

С целью устранения перечисленных недостатков на кафедре «Механического оборудования» БГТУ им. В.Г. Шухова был разработан смеситель принудительного действия для получения различных бетонов, строительных растворов и смесей, с лопастями новой формы.

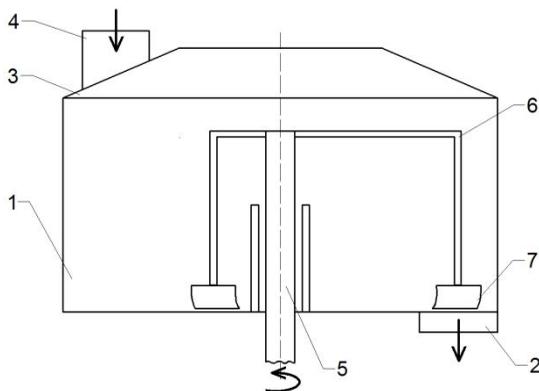


Рисунок 1 – Схема смесителя: 1 – корпус цилиндрической формы; 2 – разгрузочное устройство; 3 – крышка; 4 – загрузочное устройство; 5 – вертикальный вал; 6 – кронштейны; 7 – лопасти геликоидной формы

Разработанный смеситель (рис. 1) содержит корпус 1 цилиндрической формы с разгрузочным устройством 2, установленную на корпусе крышку 3 с загрузочным устройством 4. В корпусе соосно с осью корпуса установлен вертикальный вал 5, на котором жестко закреплены радиальные кронштейны разной длины 6, на торцах которых установлены лопасти геликоидной формы 7 (Рис. 2, 3). Длины кронштейнов определяются таким образом, чтобы в процессе вращения лопасти охватывали всю площадь корпуса [2].

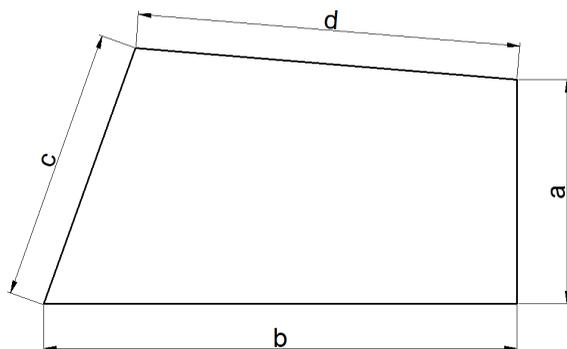


Рисунок 2 – Развертка лопасти

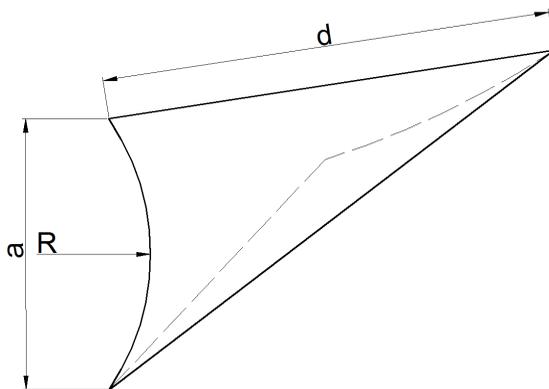


Рисунок 3 – Лопасть в аксонометрии

Смеситель работает следующим образом: исходные компоненты (например – цемент, песок, щебень и воду) загружают в корпус 1 через загрузочное устройство 4, расположенное в крышке 3. Приводом (на

рисунке не показан) приводится во вращение вертикальный вал 5 с установленными на нем с помощью радиальных кронштейнов 6 лопастями геликоидной формы 7. При вращении лопасти создают конвективные потоки материала, а расположение их на кронштейнах разной длины позволяет равномерно распределить исходные компоненты, имеющие разную плотность, по всему объему готовой смеси и обеспечивать полный охват площади корпуса. Происходит перемешивание компонентов смеси в горизонтальной и в вертикальной плоскостях при их вращении вокруг вертикального вала. После смешивания готовый продукт выгружается через разгрузочное устройство 2 расположенное в днище корпуса 1.

Созданный смеситель позволяет повысить эффективность перемешивания, благодаря чему улучшается качество готовой смеси, повышается равномерность распределения компонентов по объему готовой смеси, сокращается время, затрачиваемое на перемешивание, что приводит к повышению производительности смесителя и позволяет выпускать смеси с более высокими характеристиками.

#### **Список литературы:**

1. Бауман В.А., Клушанцев Б.В., Мартынов В.Д. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций: Учебник для строительных вузов. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1981. 324 с., ил.
2. Заявка на полезную модель 057949 Российская Федерация. Смеситель / Богданов В.С., Несмеянов Н.П., Дмитриенко В.Г., Матусов М.Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «БГТУ им. В.Г. Шухова». - № 2014135744; заявл. 02.09.2014.

## **К ВОПРОСУ ПОМОЛА МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ДЕФОРМИРОВАННЫХ В ПВИ**

**Романович А.А., канд. техн. наук, проф.,**

**Мешеряков С.А., аспирант,**

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

За рубежом широко развита технология получения цемента в помольном комплексе, состоящем из двух агрегатов пресс-валкового измельчителя и шаровой мельницы (ПВИ-ШМ) [1,2].

Известно, что использование пресс-валковыхизмельчителей (ПВИ) в технологической линии помола цемента позволяет повысить производительность помольной линии на 25-35%. Однако, выходящий из ПВИ материал имеет товарную форму в виде прессованной ленты и анизотропную текстуру (рис.1, 2), что требует с целью энергосбережения особых условий для окончательного помола.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что в ПВИ осуществляется значительная часть процесса помола материалов и при работе ПВИ в открытом цикле измельчения необходим его окончательный помол в отдельном агрегате – в частности, в шаровой мельнице.

Наиболее распространенными за рубежом являются технологические схемы, включающие в себя ПВИ, молотковую дробилку, используемую для дезагрегации спрессованного материала, и традиционную шаровую мельницу для окончательного помола шихт, работающую в открытом или замкнутом цикле измельчения [3,4]. Реализация такой схемы позволяет повысить производительность шаровой мельницы на 30% и на 15-18% снизить удельный расход электроэнергии.

Известны также способы секционированного помола материалов, при которых материал сначала измельчается рабочими валками под высоким давлением, а затем разрушается образованный агломерат во вращающемся дисковом питателе или в элеваторе с центробежной разгрузкой [5], а помол осуществляется в шаровой мельнице. Приведенные способы помола материалов позволяют повысить производительность конечного агрегата на 20-35% и снизить энергозатраты на 10-20%.



*аб*



*вг*

Рисунок 1–Исходный материал: *а* – клинкер; *в* – мергель;  
после измельчения в ПВИ: *б* – клинкер; *г* – мергель

Известны также способы секционированного помола материалов, при которых материал сначала измельчается рабочими валками под высоким давлением, а затем разрушается образованный агломерат во вращающемся дисковом питателе или в элеваторе с центробежной разгрузкой [6], а помол осуществляется в шаровой мельнице. Приведенные способы помола материалов позволяют повысить производительность конечного агрегата на 20-35% и снизить энергозатраты на 10-20%. Однако применение дополнительного агрегата для дезагломерации спрессованного материала влечет за собой повышение затрат на содержание и эксплуатацию помольного оборудования.

Фирмой «HumboldtWedag» разработан способ измельчения материалов, в котором дезагломерация и окончательный помол шихты осуществляется в одном агрегате – ШМ [2]. Мельница в этом случае имеет две камеры, первая из которых служит для разрыхления агломерата без мелющих тел, а во второй осуществляется

окончательный помол. Однако при реализации этого способа не эффективно используется объем помольного агрегата. Поэтому целесообразно проводить исследования, связанные с созданием эффективных условий в ШМ позволяющие осуществить деагломерацию помол предварительно измельченных материалов в ПВИ.

Учитывая, что измельченный в ПВИ материал, обладает специфическими свойствами, он имеет анизотропную текстуру и товарную форму в виде спрессованных пластин с максимальной прочностью в направлении силового воздействия, то эффективность процесса измельчения материалов в ШМ во многом зависит от коэффициентов загрузки первой камеры мельницы и её длины. С целью определения их рациональных величин нами были проведены экспериментальные исследования процесса помола клинкера предварительно измельченного в ПВИ.

Проведенные исследования на экспериментальной установке шаровой мельницы с размерами барабана 0,5 x 1,95 м позволили изучить влияние длины первой камеры и величины её загрузки мелющими телами на выходные показатели процесса помола.

Анализ графических зависимостей  $Q, N, q = f(\varphi_1, l_1)$  (рис. 2.), построенных по результатам экспериментов, позволил установить, что при увеличении коэффициента загрузки мелющими телами первой камеры мельницы от  $\varphi_1 = 0,149$  до  $\varphi_1 = 0,211$  потребляемая мощность возрастает пропорционально значениям  $\varphi_1$ , т.е. с  $N = 4,15 \cdot 10^3$  Вт до  $N = 4,55 \cdot 10^3$  Вт на 8,5%.

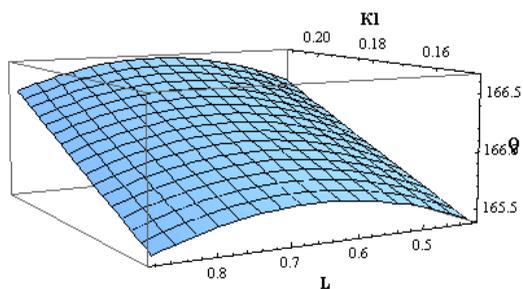
Приведенная производительность возрастает пропорционально приросту массы мелющих тел при увеличении  $\varphi_1$  от 0,149 до 0,16. В нашем случае – с  $Q = 164,1$  кг/ч до  $Q = 165,7$  кг/ч, т.е. на 1-2%. Однако, при дальнейшем увеличении  $\varphi_1$  до  $\varphi_1 = 0,211$  наблюдается уменьшение величины прироста  $Q$  – с  $Q = 165,7$  кг/ч до  $Q = 166,4$  кг/ч (менее 1%). Удельный расход электроэнергии при ( $l_1 = 0,6$  м) остается практически неизменным и равным  $q = 22,7 - 23,5$  Вт.ч/кг.

Из вышесказанного вытекает следующий вывод, что наиболее эффективно процесс измельчения, исходя из величин удельных энергозатрат, осуществляется при  $\varphi_1 = 0,16$ , что значительно ниже, чем при измельчении клинкера традиционным способом в ШМ (без ПВИ).

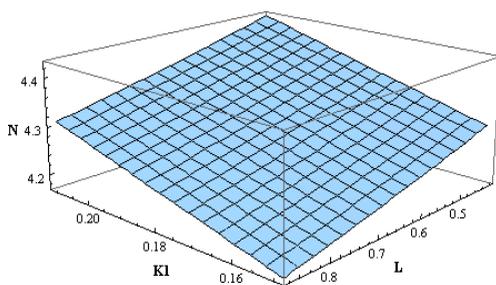
При изменении длины первой камеры (рис. 2, а) в диапазоне от  $l_1 = 0,42$  м до  $l_1 = 0,88$  м приведенная производительность изменяется по зависимости, имеющей экстремум при  $l_1 = 0,6$  м. Изменение длины

первой камеры мельницы от данного положения в ту или в другую сторону приводит к уменьшению производительности.

а)



б)



в)

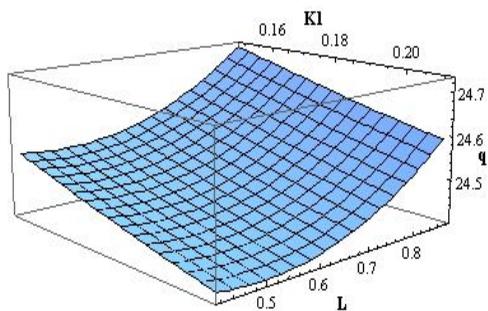


Рисунок 2– Влияние величины загрузки мелющими телами первой камеры на  $Q, N, q$  при различной ее длине: ( $\varphi_2 = 0,3$ )

При уменьшении длины первой камеры от  $l_1 = 0,6$  м до  $l_1 = 0,42$  м (рис. 2, в) наблюдается рост удельного расхода электроэнергии с  $q = 22,7$  Вт·ч/кг до  $q = 23,7$  Вт·ч/кг, т.е. на 4,5%. Увеличение длины  $l_1$  от  $l_1 = 0,6$  м до  $l_1 = 0,88$  м приводит к увеличению  $q$  до  $q = 24,9$  Вт·ч/кг – на 9,7%. Это указывает на то, что рациональная длина первой камеры, при помол клинкера предварительно измельченного в ПВИ и имеющего анизотропную текстуру, равна  $l_1 = 0,6$  м, что соответствует  $l_1 = 0,30L$ , где  $L$  – длина барабана мельницы.

Таким образом, установлено, что дезагломерация и помол предварительно измельченных в ПВИ материалов, имеющих имеет товарную форму в виде прессованной ленты и анизотропную текстуру, наиболее эффективно, исходя из величин удельных энергозатрат, осуществляется при  $\varphi_1 = 0,16$ ,  $l_1 = 0,6$  м, что соответствует  $l_1 = 0,30L$ , где  $L$  – длина барабана мельницы. Это существенно отличается от условий измельчения в традиционной шаровой мельнице, в которой  $\varphi_1 = 0,3$ , а первая камеры равна половине длины барабана ШМ.

#### Список литературы:

1. More Than 250 Roller Mills from Polysius in Use Worldwide // World Cement. 2003. Vol. 34. № 4. P. 15.
2. Пироцкий В.З. Состояние и направление развития техники измельчения и интенсификации процессов помола цемента // Обзор. Информация ВНИИЭСМ, 1973. 65 с.
3. Романович А.А., Алехин П.В., Мещеряков С.А. Определение усилия измельчения анизотропных материалов в пресс-валковом измельчителе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. №3. С. 79-82.
4. Романович А.А. Особенности процесса постадийного измельчения материалов с использованием пресс-валкового агрегата // Известия вузов. Строительство. 2007. №9. С. 88-91.
5. Богданов В.С., Хахалев П.А., Масловская А.Н. Методика проектирования энергообменных футеровок шаровых барабанных мельниц // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №1. С. 67-73.
6. Фадин Ю.М. Расчет энергии передаваемой шароматериальной загрузке наклонной перегородкой в трубной шаровой мельнице // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. №4. С. 62-65.

## РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ПРИВОДА ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ, ОСНАЩЕННОЙ ЭНЕРГООБМЕННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Романович А.А., канд. техн. наук, проф.,

Мещеряков С.А., аспирант

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

Известно [1,2], что использование пресс-валкового измельчителя (ПВИ) в технологической линии помола цемента перед шаровой мельницей позволяет значительно снизить удельный расход электроэнергии и повысить производительность помольной линии.

Однако материалы цементного производства после обработки их давлением между валками ПВИ имеет анизотропную текстуру и товарную форму в виде спрессованных пластин (рис.1) с максимальной прочностью в направлении приложения усилия, а их частицы – микродефектную структуру, что требует особых условий для его эффективного помола в шаровой мельнице (ШМ) [3-5].

*а*



*б*



Рисунок 1– Товарная форма клинкера и доменного шлака, после обработки давлением в ПВИ: *а* – клинкер; *б*– шлак

Как показали исследования [6], предварительно измельчаемый в ПВИ материал целесообразно подвергать кратковременному ударно-сдвиговому воздействию в первой камере ШМ для дезагломерации спрессованной ленты и раздавливающе-истирающему воздействию мелющих тел во второй камере для окончательного его помола. Такие условия измельчения, достаточно просто получить в ШМ, оснащенной лопастными энергообменными устройствами: лопастью двухстороннего действия (ЛДД) и лопастным эллипсным сегментом (ЛЭС). Кроме того установка лопастных энергообменных устройств (ЛЭУ) (рис.2) в

барабане ШМ позволяет включить в работу застойную зону шаровой загрузки и тем самым интенсифицировать её работу.

Это происходит потому, что мелющие тела в этих агрегатах совершают более сложное движение, перемещаясь в плоскостях, как перпендикулярно оси барабана мельницы, так и вдоль его оси.

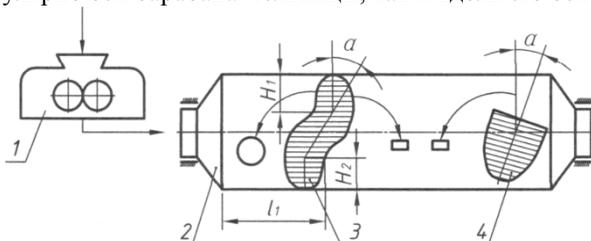


Рисунок 2– Пресс-валковый измельчитель и шаровая мельница, оснащенная ЛЭУ: 1– ПВИ, 2– барабан ШМ, 3– ЛДД, 4– ЛЭС

Однако на создание продольного движения мелющих тел необходимо передавать дополнительное количество энергии, что скажется на величине потребляемой мощности приводом. Отсутствие научно-обоснованного расчета энергетических показателей ШМ, оснащенных ЛЭУ, тормозит их внедрение в промышленность.

Известно, что на мощность шаровой мельницы существенное влияние наряду с другими факторами (массой мелющих тел, частотой вращения барабана и др.) оказывает положение центра масс шаровой загрузки.

При работе мельниц, оснащенных ЛЭУ, в отличие от традиционных, центр масс мелющей загрузки периодически меняет свое положение в зависимости от угла поворота барабана мельницы, как в горизонтальной плоскости, так и по вертикали.

Следовательно, мощность, потребляемая ШМ, оснащенной ЛЭУ, превышает мощность, потребляемую аналогичными мельницами с вертикальными перегородками, на величину, необходимую для перемещения центра масс мелющей загрузки. Определим уравнения для расчета работы сил, в результате действия которых меняется положение центра масс мелющей загрузки. Таких сил две: сила тяжести – работа совершается при перемещении центра масс по вертикали, и сила трения – работа совершается при перемещении центра масс в горизонтальной плоскости.

Мощность  $N$  за некоторый промежуток времени  $T$  определяется

$$N = \frac{A}{T}, \quad (1)$$

уравнением:

где  $A$  – работа, выполненная за тот же промежуток времени  $T$ .

Если мельница совершает  $n$  оборотов в минуту, то один оборот происходит за время, равное:

$$T = \frac{1}{n} \text{ мин} \quad \text{или} \quad T = \frac{60}{n} \text{ сек.} \quad (2)$$

Поскольку  $n = \psi n_{\text{кр}}$  (3)

где  $\psi$  – относительная частота вращения,  $n_{\text{кр}}$  – критическая

$$n_{\text{кр}} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R}}, \quad (4)$$

частота вращения,  $\text{с}^{-1}$ . Так как

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $R$  – радиус барабана мельницы,  $\text{м}$ . Тогда уравнение (2) можно записать в следующем виде:

$$T = \frac{2\pi\sqrt{R}}{\psi\sqrt{g}} \text{ сек.} \quad (5)$$

За один оборот барабана мельницы центр масс мелющей загрузки в каждой камере переместится из одного крайнего положения в другое и обратно. Для первой камеры перемещение центра масс загрузки за один оборот барабана мельницы определяется уравнением:

$$S_1 = 2|y_c - y'_c|, \quad (6)$$

где  $y_c$  и  $y'_c$  координаты центра масс мелющей загрузки в первой камере и согласно [7] вычисляются, соответственно, по формулам:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_c \tilde{V}_1 = & -\frac{\lambda_1^2}{2} \left( \chi_1 \sqrt{1 - \chi_1^2} + \arcsin \chi_1 - \frac{\pi}{2} \right) - \frac{2\lambda_1 \text{ctg} \alpha}{3} (1 - \chi_1^2)^{\frac{3}{2}} + \\ & + \frac{\text{ctg}^2 \alpha}{8} \left( \chi_1 (1 - 2\chi_1^2) \sqrt{1 - \chi_1^2} - \arcsin \chi_1 + \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}'_c \tilde{V}'_1'' = & -\frac{\lambda_1^2}{2} \left( \chi'_1 \sqrt{1 - \chi_1'^2} + \arcsin \chi'_1 - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{2\lambda_1 \text{ctg} \alpha}{3} (1 - \chi_1'^2)^{\frac{3}{2}} + \\ & + \frac{\text{ctg}^2 \alpha}{8} \left( \chi'_1 (1 - 2\chi_1'^2) \sqrt{1 - \chi_1'^2} - \arcsin \chi'_1 + \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned}$$

Перемещение центра масс мелющей загрузки за один оборот барабана ШМ во второй камере определяется по уравнению:

$$S_2 = 2|y_{c2} - y'_{c2}|, \quad (8)$$

где  $y_{c2}$  и  $y'_{c2}$  координаты центра масс мелющей загрузки во второй камере, согласно [8] вычисляются, соответственно, по формулам:

$$\tilde{y}_{c2} \tilde{V}'_2 = \frac{\text{ctg}^2 \alpha}{8} \left( \chi_2 (2\chi_2^2 - 1) \sqrt{1 - \chi_2^2} + \arcsin \chi_2 - \frac{\pi}{2} \right) - \frac{\lambda_2^2}{2} \left( \chi_2 \sqrt{1 - \chi_2^2} + \arcsin \chi_2 - \frac{\pi}{2} \right).$$

$$\tilde{y}'_{c2} \tilde{V}'_2'' = \frac{\lambda_2^2}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \chi'_2 - \chi'_2 \sqrt{1 - \chi_2'^2} \right) + \frac{2I_2 \text{ctg} \alpha}{3} \sqrt{(1 - \chi_2'^2)^3}.$$

Работа, совершаемая силой трения, равна:

$$A = |F_{\text{тр}} S| = F_{\text{тр}1} S_1 + F_{\text{тр}2} S_2 \quad (9)$$

В свою очередь, сила трения в первой и второй камерах ШМ соответственно равны:

$$F_{\text{тр}1} = f G_1 = f M_1 g = f g \gamma V_{\text{загр}1} = f g \gamma \varphi_1 V_1, \quad (10)$$

$$F_{\text{тр}2} = f G_2 = f M_2 g = f g \gamma V_{\text{загр}2} = f g \gamma \varphi_2 V_2. \quad (11)$$

где  $f$  – коэффициент трения скольжения мелющей загрузки по корпусу барабана мельницы;  $G_1, G_2$  – вес мелющей загрузки в первой и второй камерах;  $M_1$  и  $M_2$  – масса мелющей загрузки;  $\gamma$  – объемная масса мелющей загрузки;  $V_{\text{загр}1}, V_{\text{загр}2}, V_1, V_2$  – объем мелющей загрузки и полный объем камер;  $\varphi_1, \varphi_2$  – коэффициенты загрузки мелющими телами камер.

Окончательно уравнение для вычисления дополнительно потребляемой мощности будет иметь следующий вид:

$$N = \frac{\psi f g \gamma}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} \pi R^2 (\varphi_1 l_1 |y_c - y'_c| + \varphi_2 l_2 |y_{c2} - y'_{c2}|) =$$

$$= \psi f \gamma (gR)^{1/2} (\varphi_1 l_1 |y_c - y'_c| + \varphi_2 l_2 |y_{c2} - y'_{c2}|), \quad (12)$$

В результате анализа графических зависимостей (рис. 3-6), построенных по уравнению (12) и экспериментальным данным, установили влияние длины камер, величины коэффициентов их загрузки мелющими телами и угла наклона ЛЭС на дополнительно потребляемую мощность приводом (где  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N$  – соответственно, дополнительно потребляемая мощность на перемещение мелющих тел в первой, второй камерах и суммарная, полученные расчетным путем;  $N'$  – экспериментальные значения потребляемой мощности).

Из графической зависимости (рис. 3) видно, что с увеличением длины первой камеры, а, следовательно, уменьшением суммарной массы мелющих тел дополнительно потребляемая мощность уменьшается. Увеличение коэффициента загрузки первой камеры с 0,14 до 0,22 (рис.4) требует большей энергии на продольное перемещение шаров в первой камере, что сказывается на приросте мощности.

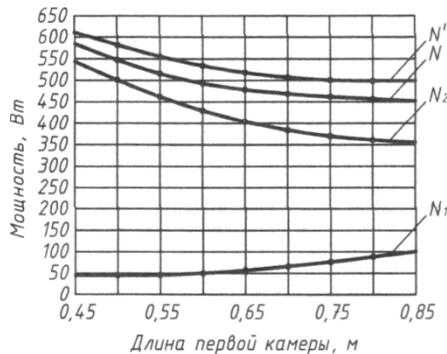


Рисунок 3– Зависимость дополнительно потребляемой мощности от длины первой камеры

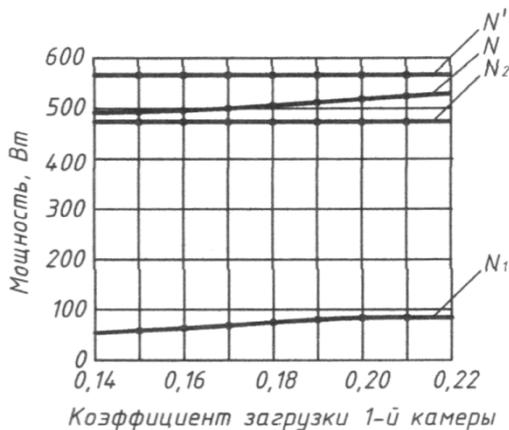


Рисунок 4— Зависимость дополнительно потребляемой мощности от величины первой камеры мелющими телами

Изменение угла наклона лопасти двойного действия и лопасного эллипсного сегмента от продольной оси барабана в диапазоне от 40 до 80° (рис. 5) позволяет увеличить зону его эффективного влияния на шаровую загрузку, что также приводит к росту дополнительно потребляемой мощности.

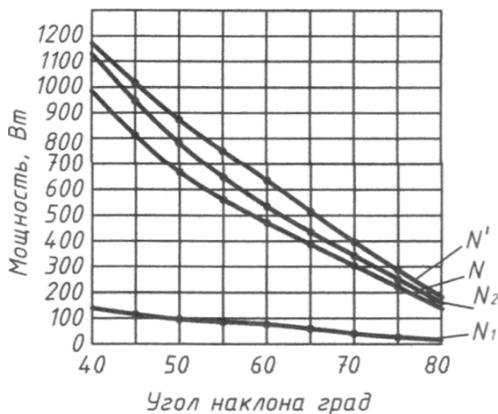


Рисунок 5— Зависимость дополнительно потребляемой мощности от угла наклона ЛЭС к оси барабана мельницы

Увеличение коэффициента загрузки второй камеры мельницы с 0,2 до 0,4 (рис.6) приводит к увеличению массы мелющих тел, что требует большей энергии на их продольное перемещение и сказывается на росте потребляемой мощности.

Таким образом, из графических зависимостей (рис. 3-6) видно, что установка в барабане мельницы энергообменных устройств позволяет интенсифицировать работу мелющей загрузки, на это указывает прирост дополнительно потребляемой мощности приводом. Изменение угла наклона лопастных энергообменных устройств к оси барабана мельницы от  $40^\circ$  до  $80^\circ$  приводит к уменьшению зоны их активного влияния на мелющие тела, что сказывается на снижении дополнительно потребляемой мощности.

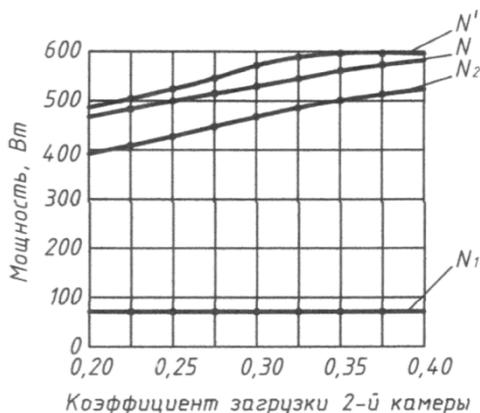


Рисунок 6— Зависимость дополнительно потребляемой мощности от величины загрузки второй камеры мелющими телами

Проведенные сравнения значений величин дополнительно потребляемой мощности приводом, полученные экспериментальным и расчетным путем по уравнению (12) показали достаточную сходимость их результатов, расхождение составляет менее 10%.

#### Список литературы:

1. Матвейнов С.В, Белобров Ю.Н. Валковый пресс-измельчитель // Горная промышленность. 1998. №2. С. 28-29.
2. More Than 250 Roller Mills from Polysius in Use Worldwide // World Cement. 2003. Vol. 34. № 4. P. 15.

3. Пироцкий В.З. Состояние и направление развития техники измельчения и интенсификации процессов помола цемента //Обзор. Информация ВНИИЭСМ, 1973. 65 с.
4. Богданов В.С., Хахалев П.А., Масловская А.Н. Методика проектирования энергообменных футеровок шаровых барабанных мельниц // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №1. С. 67-73.
5. Фадин Ю.М. Расчет энергии передоваемой шароматериальной загрузке наклонной перегородкой в трубной шаровой мельнице // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. №4. С. 62-65.
6. Романович А.А. Особенности процесса постадийного измельчения материалов с использованием пресс-валкового измельчителя // Известие высших учебных заведений. 2007. №9 (585). С. 88-91.
7. Романович А.А. К вопросу расчета мощности, потребляемой мельницей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №4. С.74-77.
8. Романович А.А. Определение центра масс шаровой загрузки первой камеры мельницы, оснащенной лопастными энергообменными устройствами // Научный вестник НГТУ. 2013. № 2(51). С. 166-171.

## **ПОТЕНЦИАЛ СОЗДАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИГЛОФРЕЗЕРНЫХ МЕТОДОВ ДЕЗИНТЕГРАТОРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

**Севостьянов В.С., д-р техн. наук, проф.,  
Михайличенко С.А., канд. техн. наук, доц.,  
Сиваченко Т.Л., соискатель,  
Попов Ф.С., аспирант**

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

Современная техника измельчения и диспергирования материалов не успевает за развитием уровня материаловедения и базируется в подавляющем большинстве применений на механические конструкции, причем их принцип действия разработан десятки лет назад [1]. Именно с этим связана не высокая эффективность этих машин.

Вторым важным недостатком существующего оборудования является его не высокая энергетическая эффективность, обусловленная тем, что размеры и конфигурация помольных органов значительно превышают размеры частиц измельчаемого материала [2]. Нагрузению подвергаются большие объемы материала, где очень велики диссипативные потери энергии и мала концентрация создаваемых в них напряжений.

В третьих, следует особо отметить проблему износа помольной гарнитуры, которая обусловлена как несовершенством единичных актов разрушения, низкой износостойкостью самих рабочих органов, отсутствием адаптации к свойствам перерабатываемых материалов [3].

Одним из новых направлений повышения эффективности помола материалов является использование метода иглофрезерного воздействия, который заключается в том, что разрушение твердых частиц осуществляется с помощью консольных частей стержневых элементов, собранных в пакеты, щетки или жгуты [5,6].

К настоящему времени разработано большое количество конструкций иглофрезерных измельчителей [7] и ведется работа по определению их технологических возможностей. Учитывая особенности этого вида оборудования и используя метод аналогий на примере иглофрезерной обработки материалов в машиностроении [8], выделим основные механизмы разрушения и дадим их оценку. На феноменологическом уровне анализа воспользуемся рисунком 1.

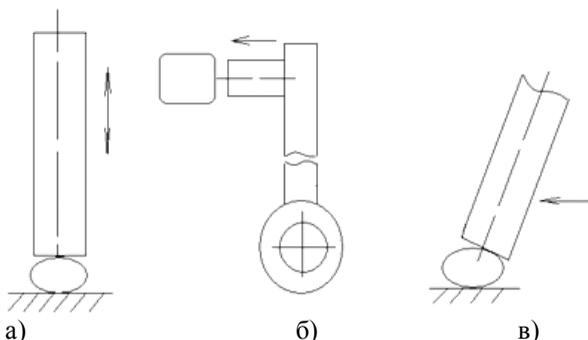


Рисунок 1– Основные механизмы иглофрезерного разрушения материала

Выбранные механизмы разрушения представляют: рис. 1. а) – свободный удар торцами стержней по частицам материала, рис. 1. б) – свободный удар по частицам материала в радиальном направлении, рис. 1. в) – истирающее – срезывающее разрушение частиц между перемещающимися параллельно друг другу торцами стержней и основанием.

Техническую реализацию этих механизмов на первом этапе их практического использования сравнительно просто можно осуществлять на базе уже освоенного промышленного выпуска металлических щёток различных конструкций, например, производство фирмы «Osborn» (Германия). Такие щётки отработаны в плане технологии их изготовления, но для целей измельчения требуется их определенная доработка.

-Во-первых, их конструкция должна быть приспособлена для надежного закрепления на приводных звеньях измельчителей.

-Во-вторых, «щёточный ворс» следует изготавливать из проволоки большего размера, а размеры щёток увеличивать.

-В-третьих, их необходимо дооснастить дополнительными элементами – лопатками, крыльчатками и т.д.

Масштабирование, увеличение размеров и производительности иглофрезерных аппаратов можно достигать методом секционирования, т.е. набором рабочего оборудования из однотипных щёток. При этом необходимо в большинстве случаев изготавливать щётки прямоугольной конструкции, что требует доработки технологии их изготовления.

Естественно, что для организации массового выпуска мельниц на основе иглофрезерных рабочих органов требуется создание производства, которое способно быстро перестраиваться и производить иглофрезерные элементы различной конфигурации под условия потребителей и свойства перерабатываемых материалов.

Особо следует остановиться на возможностях использования иглофрезерных аппаратов для дезинтеграторной обработки различных материалов. Сразу определим, что это машины для мелкофракционного помола и они не предназначены для приема исходных частиц крупностью более 5 мм. Кроме того, для их использования есть ограничения по вязкости продукта и некоторым особым условиям например, горючести и взрывоопасности при сухой обработке ряда материалов.

#### Оборудование на основе периодического сжатия частиц

Технологические аппараты такого принципа действия могут быть оснащены различными щётками: цилиндрической, торцевой, прямоугольной. Они могут работать как по сухому, так и по мокрому способам, в циклическом или непрерывном режимах работы и перерабатывать материалы любой твердости и абразивности, так как в них взаимные перемещения рабочих звеньев конструкции минимальны.

Обработка волокнистых материалов в таких устройствах затруднительна, так как в них отсутствует срезающий механизм разрушения и минимальна транспортирующая способность через рабочие зоны. Напротив, минеральные продукты таким способом измельчать наиболее эффективно, причем в них можно создавать очень высокие напряжения. Мы предполагаем, что при любом виде обработки в непрерывном режиме работы возможен некоторый проскок крупных частиц, а поэтому их целесообразно использовать совместно с классификаторами.

#### Оборудование, использующее свободный удар

Измельчители ударного действия на основе иглофрезерных рабочих элементов можно реализовать в традиционных молотковых или роторных дробилках или мельницах. Для этого бильная система оснащается стержневыми элементами, которые обращены своими торцами в сторону движения.

Измельчители ударного действия такого типа можно использовать для тонкого и сверхтонкого помола материалов твердостью до 5–6 единиц по шкале Мооса. Производительность этих машин может достигать десятков тонн в час, они могут работать при повышенной

влажности, а также в составе агрегатов для измельчения и сушки на заключительной стадии переработки сырьевых материалов.

Для создания иглофрезерных измельчителей ударного действия необходимо решить задачу закрепления на бильных устройствах стержневых элементов и создать условия для нормальной работы крайних в радиальном направлении элементов. Предполагается, что процесс измельчения на фронтальной поверхности таких «рельефных» бил будет отличаться от традиционного разрушения частиц в лучшую сторону.

#### Иглофрезерное оборудование истирающе – срезывающего действия

Оборудование такого принципа действия предназначено для переработки преимущественно мягких материалов по мокрому способу, так как твердые абразивные частицы будут способствовать интенсивному износу. Крупность исходного продукта при этом должна быть не более 8–10 мм.

Иглофрезерные измельчители испытаны при измельчении органических продуктов, в частности бумаги, древесной стружки, ПЭТ, ДВП, пенополистирола, где отмечена их хорошая технологическая эффективность даже при сухом измельчении. В процессе разработки находятся несколько агрегатов на иглофрезерного типа, которые будут использоваться для помола жидкотекучих композиций, утилизации отходов, помола алюминиевой пудры и др.

Рациональную область применения установок истирающе – срезывающего действия еще предстоит определить, для чего планируется выполнить комплекс экспериментальных и теоретических исследований.

Одним из примеров применения иглофрезерных мельниц является технология производства теплоизоляционных изделий из техногенных органических материалов.

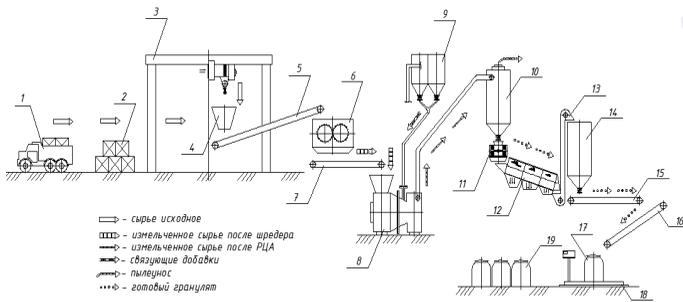


Рисунок 2 – Технологическая схема производства теплоизоляционных изделий из техногенных органических материалов

Процесс происходит следующим образом автотранспортом 1, доставляют ДО на склад сырья 2, после тельфером 3, загружают в приемный бункер 4. Далее по ленточному транспортеру 5, материал проходит стадию предварительного грубого измельчения в шредере 6.

Далее, измельченный материал попадает на экран с ячейками определенного размера, задающими величину фракции. Куски, оказавшиеся крупнее ячеек, возвращаются к режущему ротору. Далее по скребковому конвейеру 7, материал попадает в роторно-центробежный агрегат (РЦА) 8.

РЦА установка для измельчения волокнистых материалов, содержащая цилиндрические камеры измельчения, сопряженные между собой образуя общий контур и разделенные перегородкой, с расположенными внутри них роторами, оснащенные средствами для подачи исходного материала, добавок, и отвода готовой продукции. Причем ротор первой камеры установлен эксцентрично и составлен из набора дисков, закрепленных на оси со смещением относительно друг друга по винтовой линии, а ротор второй камеры составлен из закрепленных на пальцах пакетов иглофрез и расположен внутри сетчатого барабана, окаймленного цилиндрической поверхностью этой камеры, тем, что иглофрезы второй камеры выполнены из набора стержневых элементов, собранных в пакеты (в виде иглы) и жестко закрепленных одним концом на держателе.

В состав шихты добавляют также антисептики и антипирены из бункера 9, после материал проходит в циклон 10. После в грануляторе 11, происходит процесс получения гранул из измельченных волокон

путем продавливания ее прессующими вальцами через радиальные отверстия кольцевой матрицы.

Из охладительной колонки по мере ее наполнения гранулы поступают на барабанный классификатор 12, где отделяются от крошки. После элеватором 13, в бункер-дозатор 14. По ленточному транспортеру 15-16, гранулят попадает в биг-бэг 17.

Звешивание происходит на весовом дозаторе 18. После готовый гранулят отправляется на склад готовой продукции 19. Данный вид наполнителя из утилизированных древесных отходов с успехом применяется в производстве строительных материалов с улучшенными теплофизическими характеристиками.

Анализируя потенциал использования иглофрезерных агрегатов в технологии дезинтеграторной обработки дисперсных материалов можно считать, что это новый перспективный вид оборудования, который отличается большим конструктивным многообразием, широким спектром технологических возможностей и готовностью производственной базы для их промышленного производства.

#### **Список литературы:**

1. Сиваченко Л.А., Добровольский Ю.К. История развития и современный уровень техники измельчения // Вестник Бел.– Рос. ун.–та. 2012. №4. С. 69-76.
2. Колосов А.С. Некоторые вопросы моделирования и оценки энергетической эффективности процесса измельчения твердых тел // Изв. СО АН СССР. сер. Химия. Новосибирск. Наука, 1985. С. 26-39.
3. Акунов В.И. О нормальном ряде измельчителей // Научное сообщение № 32. ВНИИТИСМ. Москва. Госстройиздат, 1958. 86 с.
4. Способы совершенствования измельчителей ударного действия на основе многостержневых рабочих органов / В.С.Севастьянов, С.А.Михайличенко, Т.Н.Ильина, А.А.Макридин, Т.Л.Сиваченко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 5. С. 87-90.
5. Севастьянов В.С., Сиваченко Т.Л., Сиваченко Л.А. Штифтовый способ измельчения и его развитие // В сборнике: «Интерстроймех–2011». Могилев. БРУ, 2011. С. 196-200.
6. Сиваченко Т.Л. Штифтовые мельницы и вопросы мехатроники их развития // В сборнике: «Мехатроника, робототехника. Современное состояние и тенденции развития». Курск. ЮЗГУ, 2011. С. 97-103.
7. Серебrenицкий П.П. Обработка деталей металлическими щётками. Л.:Лениздат, 1967. 151 с.
8. Малотоннажные технологические модули для комплексной переработки природных и техногенных материалов/ А.М.Гриджин, В.С.Севастьянов, В.С.Лесовик, С.А.Михайличенко, А.А.Романович, А.В.Колесников // Нанотехника. 2007. №9. С. 45-51.

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В РОТОРНО–ЦЕНТРОБЕЖНЫХ АГРЕГАТАХ**

**Севостьянов В.С., д-р техн. наук, проф.,  
Михайличенко С.А., канд. техн. наук, доц.,  
Сиваченко Т.Л., соискатель,  
Попов Ф.С., аспирант**

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

Обобщение исследований в области механики разрушения позволяет считать, что основной прогресс в области тонкого и особенно сверхтонкого измельчения связан, по нашему мнению, с выполнением следующих условий [1,2].

1. Рациональным сочетанием энергосилового воздействия на измельчаемый материал.

2. Максимальным увеличением числа единичных воздействий на частицы обрабатываемого материала.

3. Максимальным увеличением энергонапряженности рабочего процесса.

4. Реализацией механизма разрушения по методу индивидуального зерна.

5. Оптимизацией режимов работы агрегата с учетом свойств перерабатываемого материала.

Это, конечно, далеко не полный перечень требований, необходимых для оптимизации процессов проведения дезинтеграторных технологий. Очень важно объединить их в одном агрегате, имеющем простую конструкцию, высокую износостойкость, надежность в работе и удобство в обслуживании.

Одним из возможных вариантов технического решения некоторых проблем измельчения механическим способом может быть использование в качестве измельчающих элементов упругих стержней. Конструктивно штифтовые или иглофрезерные механизмы разрушения материала представляют собой наборы стержневых элементов, закрепленных одним концом в держателе, а торцом свободного конца производящие обработку материала. Интенсивность такого воздействия определяется целым рядом факторов, но самым значимым из них является энергосиловой [4,5].

Ближайшими конструктивными аналогами, которые могут служить основой для проектирования стержневых аппаратов, являются широко

применяемые в технике щетки, скребки, гребни, иглофрезы и другие инструменты. Их технологические функции состоят, прежде всего, в реализации сдвиговых воздействий на обрабатываемые поверхности для их очистки, снятия поверхностных слоев материала или финишной обработки.

В качестве других применений стержневых элементов можно выделить гребенки и иглы в текстильной промышленности, прошивки и пробойки в кожевенном деле и множество прочих. По имеющейся доступной информации использование наборов стержневых элементов для создания помольных машин промышленного назначения нами не обнаружено [5,6].

Из всего многообразия наборов стержневых элементов, образующих щетки различных конструкций, выберем цилиндрическую, которой в качестве рабочего органа оснастим агрегат роторно-центробежного типа.

Для подтверждения возможности интенсификации процессов измельчения посредством стержневых элементов, а также для исследования функциональных возможностей и физических процессов роторно-центробежного агрегата (РЦА), с целью определения рациональных режимов его работы, были созданы две модельные установки: лабораторная установка игольчатого измельчителя (рисунок 1) и действующая лабораторная модель РЦА (рисунок 2). В дальнейшем нами были проведены необходимые экспериментальные исследования на данных моделях. Установлено, что для единичных актов измельчения параллельно уложенными цилиндрическими стержнями наблюдается значительное увеличение выхода мелких классов, т.е. происходит более эффективное разрушение, чем при раздавливании материала между плоскими параллельными поверхностями [7]. В предлагаемых вариантах измельчения за основу принят вариант, когда стержни воздействуют на материал своими торцевыми поверхностями, что связано с необходимостью многократного увеличения контактных напряжений в материале.

Проектирование стержневых аппаратов требует учета особенностей поведения рабочих элементов в зависимости от свойств перерабатываемых материалов и решения конкретных технологических задач. Используя метод аналогии, учитывающий предшествующий опыт создания и эксплуатации помольного оборудования для переработки различных видов техногенных материалов остановимся на конструкции игольчатого (щеточного) измельчителя с радиальной загрузкой.

Схема и общий вид игольчатого измельчителя с радиальным нагружением, представлен на рисунке 1, а и б.

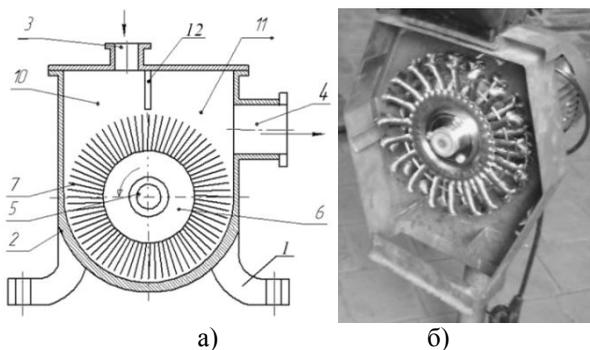


Рисунок 1—Схема и общий вид игольчатого измельчителя

Игольчатый измельчитель включает в себя основание 1, камеру для обработки материала 2 с устройствами для загрузки 3 и выгрузки 4 материала и установленным в ней с возможностью вращения ротором 5 с рабочим органом 6, оснащенный игольчатыми элементами 7. Ротор 5 установлен в опорах и через муфту связан с приводным электродвигателем. Зоны входа 10 и выхода 11 материала из рабочего пространства, где происходит процесс измельчения, разделены перегородкой 12.

Рабочий процесс такого измельчителя заключается в том, что исходный материал подается в зоны измельчения через устройство 3, где подвергается сжатию со сдвигом между торцами игольчатых элементов 7 и стенками камеры 2 для обработки. Выгрузка измельченного продукта осуществляется через выгрузочное устройство 4. Измельчитель работает в непрерывном режиме.

Роторно-центробежный агрегат (рисунок 2) состоит из следующих элементов: В корпусе жестко закреплены зубчатая оболочка 1, длина которой соответствует длине рабочей части ротора, который представляет собой вал 2, крепящийся в подшипниковых опорах. С одной стороны вала посредством шпоночного соединения, крепится шкив 3. Рабочая поверхность ротора образована цилиндрической зубчатой оболочкой 4, крепящейся на валу с помощью шпоночного соединения. Причем угол наклона режущих элементов может составлять от 3-7° к оси ротора до 12-15°.

С противоположной стороны, в конце зоны измельчения расположена насадка 5, имеющая специальный профиль, предназначенная для окончательного разрушения волокнистого материала и регулирования дисперсного состава материала на выходе из помольной зоны. В пространстве между крышкой подшипника и насадкой на валу ротора установочными винтами крепится крыльчатка 6, обеспечивающая интенсификацию выгрузки измельчаемого материала.

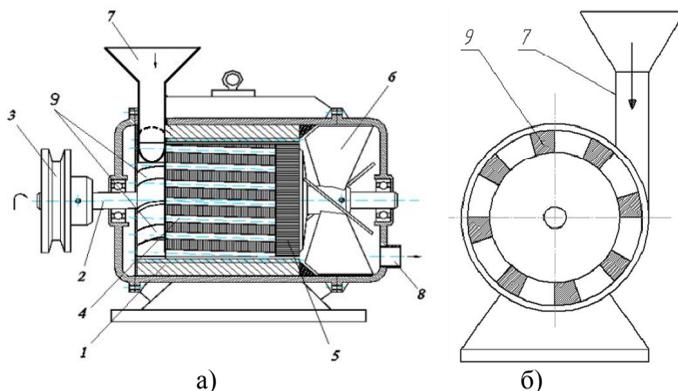


Рисунок 2—Роторно-центробежный агрегат:  
а) фронтальный вид; б) вид сбоку

При исследовании процессов измельчения на стадии поисковых экспериментов использовались следующие материалы: бумага, плотный картон, древесная стружка, твёрдые полимеры (ПЭТ), пенополистирол, древесноволокнистая плита. Разработанные лабораторные установки предназначены для среднего и тонкого помола волокнистых материалов.

Подготовка и проведение поисковых экспериментов заключались в следующем: предварительное измельчение материала до заданных размеров фракции; установка заданной частоты вращения ротора; расчёт потребляемой мощности; анализ получаемого материала. Результаты проведенных испытаний представлены в таблицах 1 и 2. Полученные результаты поисковых экспериментов позволяют сделать следующие выводы.

Частота вращения вала ротора является одним из главных факторов влияющих на качество конечной фракции измельчаемого материала.

Производительность установок также возрастает с увеличением частоты вращения вала, однако, только в определённых пределах. При дальнейшем увеличении частоты вращения вала производительность падает или увеличиваются размеры конечного продукта, что связано с конструктивными особенностями установок.

Полученные результаты поисковых экспериментов позволяют сделать следующие выводы.

Частота вращения является главным фактором влияющим на получения конечного размера фракции измельчаемого материала. Производительность установок также возрастает с увеличением частоты вращения вала, однако, только в определённых пределах, иначе производительность падает или увеличиваются размеры конечного продукта, что связано с конструктивными особенностями установок.

Частицы измельчённого материала имеют вытянутую форму, что более выражено во фракции материала полученного в результате измельчения на игольчатом измельчителе.

На макросъёмке измельчённого материала (рисунок 3) видно, что характер повреждений, наносимый установками, различается. Поверхность твёрдого полимера (ПЭТ), размолотого игольчатым измельчителем, имеет множество царапин (надрезов), что говорит об одновременном множественном контакте рабочего элемента мельницы и измельчаемой единицы материала. Полученные повреждения от центробежно-роторного агрегата в основном заметны на торцевой стороне измельчённого материала, имеют вид резаных и рваных повреждений. Из данных наблюдений можно сделать следующие выводы: центробежно-роторный агрегат имеет высокую производительность. Измельчённый материал имеет недостаточно мелкую и продольную фракцию. Игольчатый измельчитель имеет меньшую производительность и стабильность размеров получаемой фракции, однако, процессы и конструкция данной мельницы создают подходящие условия для получения дисперсного волокнистого материала. При этом игольчатый измельчитель имеет целый ряд направлений его конструктивного совершенствования, а также оптимизации технологических режимов обработки материала.

Таблица 1– Результаты поисковых экспериментов роторно-центробежного агрегата

Материал	Частота вращения, об/мин.				Исходный размер средней фракции, д×ш×в	Конечный размер средней фракции, д×ш×в	Производительность, кг/ч				Потр Вт/ч
	2						3	4	5		
1	I	II	III	IV					I	II	III
Бумага	15 00	20 00	24 00	28 00	30×30×0, 15	3×1×0,15	5, 9	7, 5	8, 1	8, 2	506, 2
ПЭТ	15 00	20 00	24 00	28 00	25×25×0, 4	2×4×0,4	2, 1	3, 8	5, 1	5, 4	577, 6
ДВП	15 00	20 00	24 00	28 00	20×20×5	2×0,1×0,1	5, 9	7, 3	8, 0	8, 05	556, 9
Пенополистирол	15 00	20 00	24 00	28 00	20×20×20	2×2×2	1, 5	2, 1	2, 8	2, 9	504, 8
Древесная стружка	15 00	20 00	24 00	28 00	30×10×3	3×0,5×0,2	6, 1	7, 7	8, 6	8, 8	587, 5

Таблица 2–Результаты поисковых экспериментов игольчатого измельчителя

Материал	Частота вращения, об/мин.	Исходный размер средней фракции, д×ш×в	Конечный размер средней фракции, д×ш×в	Производительность, кг/ч
1	2	3	4	5
Бумага	1350	35×30×0,15	4×1×0,15	13,6
ПЭТ	1350	25×25×0,4	4×8×0,4	6,8
ДВП	1350	25×20×5	3×0,1×0,1	16,2
Пенополистирол	1350	25×25×20	2×2×2	5,2
Древесная стружка	1350	35×15×3	4×0,5×0,2	17,1

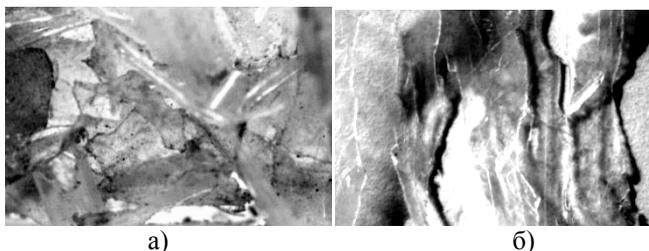


Рисунок 3—Макросъёмка измельчённого твёрдого полимера (ПЭТ) в роторно-центробежном агрегате а) и игольчатом измельчителе б)

Рационально объединив в одной установке рабочие элементы двух измельчителей можно получить искомый результат и устранить недостатки каждой из установок. В итоге мы сможем получить конечный продукт нужного качества и с минимальными производственными издержками.

#### Список литературы:

1. Колосов А.С. Некоторые вопросы моделирования и оценки энергетической эффективности процесса измельчения твердых тел // Изв. СО АН СССР, сер. Химия. Новосибирск: Наука, 1985. С. 26-39.
2. Вопросы развития техники и технологии измельчения материалов/ Л.А. Сиваченко, Е.А. Шаройкина, В.С. Севостьянов, Т.Л. Сиваченко // В сборнике: «Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов». Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. С. 315-321.
3. Способы совершенствования измельчителей ударного действия на основе многостержневых рабочих органов/ В.С. Севостьянов, С.А. Михайличенко, Т.Н. Ильина, А.А. Макридин, Т.Л. Сиваченко //Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №5. С. 87-90.
4. Севостьянов В.С., Сиваченко Т.Л., Сиваченко Л.А. Штифтовый способ измельчения и его развитие// В сборнике: международной научной технической конференции «Интерстроймех» – 2011. Могилев, 2011. С. 196-200.
5. Сиваченко Л.А., Севостьянов В.С., Сиваченко Т.Л. Вибродарные штифтовые мельницы // В сборнике: «Вибрация» 2010. Курск, 2010. С. 52-56.
6. Сиваченко Т.Л. Штифтовые мельницы и вопросы мехатроники их развития // В сборнике: «Всероссийской научной школы для молодежи». Курск, 2011. С. 97-103.
7. Сиваченко Л.А., Моисеенко А.Б., Шаройкина Е.А. Создание рессорно-стержневых технологических аппаратов на основе интенсификации контактных взаимодействий их рабочих элементов // Материалы, технологии, инструменты. Гомель: НАН РБ, 2009, Том 14. № 3. С. 115-119.

## **РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЕДИНИЧНЫХ АКТОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ**

**Севостьянов В.С., д-р техн. наук, проф.,  
Сиваченко Т.Л., соискатель**

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

Анализ развития технических систем для дизентegratorной обработки дисперсных материалов показывает [1], что главными факторами, определяющими их эффективность являются способность воздействовать на исходные системы по методу индивидуального зерна и создание в них максимальных контактных напряжений, что обеспечивается корреляцией размеров разрушаемых объектов и помольных органов.

Функционально важным свойством рабочего оборудования технологических машин является обеспечение их адаптивности к переработке различных по своим характеристикам сред. При этом следует учитывать дисперсный состав продуктов, их реологические особенности, абразивность, условия обработки, в т.ч. влажность, температуру, чистоту готового продукта, огнезрывоопасность, дефектность структуры, возможность масштабирования и т.д.

Определяющим условием при создании новых конструкций помольных агрегатов для помола является готовность научно-методической базы для их проектирования и возможности комплектации их базовых узлов и рабочих органов на основе освоенных промышленностью изделий. Наши авторские подходы к решению поставленных задач связаны с использованием технологической вариативности рабочих процессов и оборудования адаптивного действия [2,3].

Основываясь на высказанных положениях одним из вариантов повышения эффективности измельчения можно считать использование в качестве рабочих элементов металлических стержней, концы которых, с одной стороны жёстко закреплены, а вторые осуществляют воздействие на обрабатываемые материалы торцевыми частями консольных концов.

Для экспериментального подтверждения преимуществ стержневого способа измельчения выполнены поисковые испытания помола материала за счёт раздавливающего воздействия плоской поверхностью и набором параллельно установленных стержней, совершающих осевое

сжатие. Разрушению подвергались различные материалы исходной крупностью от 0,5 до 5 мм, укладываемые в форму в один слой для исключения влияния дополнительных факторов на процесс разрушения (см. рисунок 1).

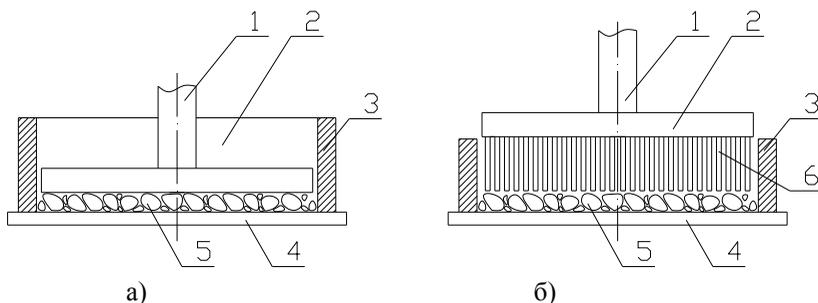


Рисунок 1 –Варианты элементарных актов разрушения: а) разрушение плоскими поверхностями, б) разрушение стержневыми элементами

В конструкции приведенных модельных устройств позициями обозначены: 1-пуансон, 2-планшайба, 3-оправка, 4-основание, 5-частицы измельчаемого материала, 6-стержневые элементы. Оснастка для проведения технологических испытаний изображена на рисунке 2.



Рисунок 2 –Оснастка для проведения технологических испытаний

Эффективность нового механизма измельчения покажем на примере разрушения частиц кварцевого песка. Для его измельчения использовали оснастку с диаметром поверхности рабочей зоны 30 мм и плотности оснащения стержневыми элементами рабочей поверхности

около 66%. Испытания проводились на гидравлическом прессе МС-500 при усилии сжатия 100 кН. На рабочую поверхность ровным слоем насыпали кварцевый песок фракций 0,315-0,63 мм, 0,63-1,25 мм и 1,25-2,5 мм в один слой толщины на максимальной крупности частиц.

Количество актов разрушения для каждого случая выбиралось из необходимости получения суммарной пробы 100 грамм для гранулометрического анализа. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1–Результаты измельчения песка при различных способах нагружения. Результаты в скобках относятся к разрушению частиц между плоскими поверхностями

Крупность частиц измельченного материала	Крупность частиц исходного материала		
	0,14-0,63	0,63-1,25	1,25-2,5
менее 0,08 %	24,5 (16,2)	20,8 (14,1)	16,3 (10,4)
0,08-0,14 %	33,8 (30,5)	27,4 (30,1)	21,8 (27,7)
0,14-0,315 %	22,5 (25,0)	24,0 (27,2)	24,5 (30,1)
0,315-0,63 %	19,2 (28,3)	21,8 (20,9)	27,4 (22,6)
0,63-1,25 %	-	4,5 (5,3)	5,2 (6,2)
1,25-2,5 %	-	1,5 (2,4)	1,8 (3,0)

Анализ полученных результатов убедительно показывает, что эффект разрушения частиц кварцевого песка лучше торцами стержней, чем плоскими поверхностями. Особенно это заметно для мелких фракций, где их выход возрастает в 1,5 и более раз. Это можно объяснить повышенными контактными напряжениями, которые создаются на торцах стержневых элементов. Отсюда можно сделать главный вывод, что технологическая эффективность стержневого (игольчатого) способа измельчения значительно выше традиционного, осуществляемого между рабочими органами с повышенной поверхностью воздействия на измельчаемый материал.

Исходя из проведенных исследований можно также предположить, что измельчение материала консольными концами стержневых или игольчатых элементов, собранных в пакеты, щетки или жгуты будет эффективно и при других видах воздействия на материал, в том числе при истирании, свободном и стесненном ударах, сдвиге и виброударном нагружении. По нашему мнению, эти механизмы будут наиболее

эффективны для переработки материалов органического происхождения и волокнистых материалов.

#### **Список литературы:**

1. Горловский И.А., Козулин Н.А. Оборудование заводов лакокрасочной промышленности. Л.: Химия, 1980. 376 с.
2. Энергосберегающие комплексы и агрегаты для утилизации техногенных материалов / В.С. Севостьянов, С.А. Михайличенко, М.В. Севостьянов, М.Н. Спирин, А.В. Колесников, А.В. Уральский // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2007. № 1. С. 85-90.
3. Сиваченко Л.А., Севостьянов В.С., Шаройкина Е.А. Вопросы развития техники и технологии измельчения материалов // В сборнике: «Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов». Белгород: БГТУ, 2010. С. 315-321.
4. Попов Ф.С., Маншин А.С., Михайличенко С.А. К вопросу утилизации волокнистых материалов. Модернизация технологического оборудования для производства дисперсного наполнителя фибробетона // В сборнике: «Экология и рациональное природопользование агропромышленных регионов». Белгород: БГТУ, 2013. С. 221-224.
5. Способы совершенствования измельчителей ударного действия на основе многостержневых ударных органов / В.С. Севостьянов, С.А. Михайличенко, Т.Н. Ильина, А.А. Макридин, Т.Л. Сиваченко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №5. С. 87-90.

## **КЛАССИФИКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ КОМПАКТИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Севостьянов М.В., канд. техн. наук, доц.,**

**Ильина Т.Н., д-р техн. наук, проф.**

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

В настоящее время во многих отраслях промышленности успешно реализуется практика вторичного использования техногенных материалов. В промышленности строительных материалов (ПСМ) переработка полидисперсных техногенных материалов может осуществляться при помощи техники и технологии компактирования: гранулирования (окатывания), экструдирования, брикетирования, прессования и др. [1,2]. Широкое многообразие компактирующего оборудования позволяет утилизировать техногенные материалы в виде гранул, пеллет, брикетов, пластин и др. с заданными физико-механическими характеристиками, определенной формы и размеров. Каждый из способов компактирования имеет свои преимущества и недостатки, а его выбор обусловлен технологическими условиями реализации и требованиями, предъявляемыми к конечному продукту.

Для реализации способа гранулирования известны грануляторы с различным техническим решением установки привода рабочих органов: вращающаяся матрица или прессующие валки. Конструкция матрицы может быть как кольцевой, так и плоской. Расположение рабочих органов как горизонтальное, так и вертикальное. Количество прессующих валков также различно.

При экструдировании применяют шнековые прессы. Процесс получения компактированной продукции в этом случае достигается путем продавливания вязко-пластичного пастообразного материала через прессующую головку определенной формы. Конструкция таких прессов также различна.

Получение брикетов существенно экономит энергетические и сырьевые ресурсы, снижая загрязнение окружающей среды. По сравнению с грануляцией, брикетирование обеспечивает получение высокопрочных и термостойких тел с заданными размерами и формой при более низкой влажности. Такой способ компактирования позволяет использовать смеси из многокомпонентных малопластичных материалов. Обжиг брикетов происходит интенсивнее за счет более тесного контакта спрессованных частиц.

Проведенный нами анализ оборудования для компактирования техногенных материалов позволил классифицировать агрегаты по группам в зависимости от дальнейшего назначения и применения продукции (рис.1). Патентный поиск на глубину 15 лет определил разнообразие технических решений с преимуществами и недостатками наиболее известных конструкций.

Среди агрегатов для окатыwania порошкообразных материалов особое место занимает разработанный нами вибрационно-центробежный гранулятор (Патент РФ № 2412753) [3]. Использование данной машины позволяет получить гранулы (окатышы) из материалов различных по плотности и грансоставу, что расширяет технологические возможности гранулятора, а также повышает эффективность и качество гранулирования. За счет изменения кинематики движения формирующих барабанов и величины динамического воздействия можно получить продукцию заданной прочности, плотности и размеров.

Для утилизации техногенных материалов, обладающих пластическими свойствами, целесообразно применять экструдеры с кольцевой или плоской матрицей (Патент РФ № 135539) [4]. На производительность и качество формования гранул в данной машине влияет наличие предуплотнительного устройства в виде подвижного и неподвижного конусов с гладкими и ребристыми поверхностями.

В области пластического формования порошкообразных материалов с различными физико-механическими характеристиками (дисперсностью, пластичностью, плотностью, сыпучестью и др.) особое внимание заслуживают многоцелевой гранулятор – экструдер (Свидетельство на полезную модель № 30244) и пресс-валковый экструдер (Патент РФ № 2207247) [5,6]. Разработанные нами конструкции комбинированного исполнения вращающейся пресс-матрицы и предуплотняющего шнека эффективно формируют порошкообразный материал.

На качество продукции и производительность влияют различные инновационные технические решения, реализованные в данных машинах: обеспечение равномерной подачи прессуемого материала и эффективного его предварительного уплотнения за счет увеличения шага шнекового предуплотнителя к зоне формования; осуществление термического подогрева уплотняемого материала съемными электронагревателями и ввода в него различных пластификаторов; обеспечение надежного захвата уплотняемого материала прессующим органом (прорезиненными валками), выдержка шихты под давлением

(наличие эксцентрично установленных осей валков) и использование при этом вибровоздействия и др.

В области полусухого формования порошкообразных материалов наиболее целесообразно использовать пресс-валковые агрегаты (ПВА).

Данный тип машин обладает рядом преимуществ по сравнению с другим прессовым оборудованием: простота конструкции и необходимая эксплуатационная надежность, высокая производительность при низких удельных энергозатратах, возможность получать спрессованные тела с заданными физико-механическими характеристиками, геометрическими размерами и формой.

В качестве примера, такой машиной в ПСМ является вальцевый пресс с протяженной зоной уплотнения материалов и съемными формующими элементами желобково-зубчатого типа (Патент РФ № 2204486) [7]. Данная разработка обладает новизной конструкции и повышает эффективность процесса предварительного уплотнения порошкообразных материалов с различными физико-механическими свойствами.

Для брикетирования техногенных материалов с невысокой насыпной массой: пылеуноса сушильных и обжиговых агрегатов; зол ТЭЦ; отходов перлитового, вермикулитового производства, деревообрабатывающей промышленности, целлюлозно – бумажных отходов и др. нами разработан ПВА для брикетирования техногенных материалов с малой насыпной массой (Патент РФ № 2473421) [8].

В отличие от известных способов повышения качества спрессованной продукции из материалов с низкой насыпной массой: увеличение плотности смеси с помощью виброуплотняющего воздействия или её предварительное уплотнение валковым способом, в данной машине процесс уплотнения материала осуществляется последовательно и многоступенчато с использованием различных технологических приёмов и устройств.

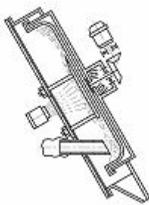
В результате постадийного уплотнения материала достигаются следующие технологические эффекты:

– удаление газообразной фазы из порошкообразного материала на стадии его подготовки, что исключает запрессовку воздуха в прессуемые тела и появление микротрещин;

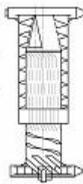
– равномерное распределение предварительно уплотненного материала по ширине рабочих органов;

### ГРАНУЛИРОВАНИЕ

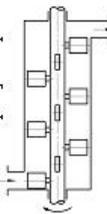
Тарельчатые грануляторы



Барабанные грануляторы

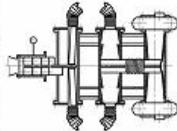


Лопастные грануляторы



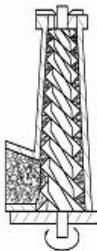
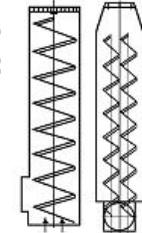
Вибрационные грануляторы

Патент РФ № 2412753

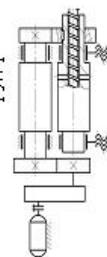


### ЭКСТРУДИРОВАНИЕ

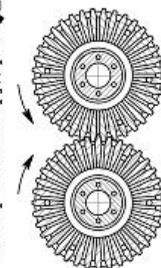
Шнековые экструдеры



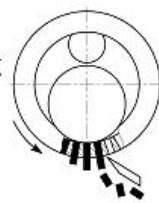
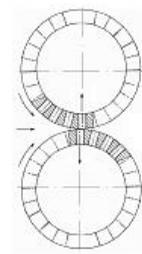
Валковые экструдеры



Шестеренные экструдеры

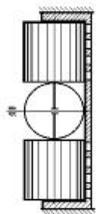
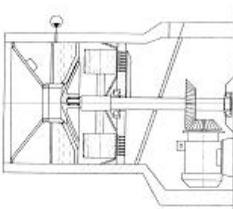


Кольцевые прессы



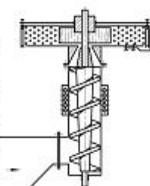
Плоскомягичные грануляторы

Патент РФ № 135539



Пресс-валковые экструдеры

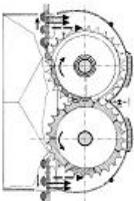
Патент РФ № 2207247



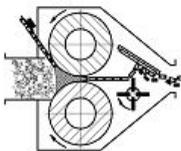
### ПРЕССОВАНИЕ

Брикетные прессы

Патент РФ № 2204486



Прокаточные машины



Пресс-валковые агрегаты

Патент РФ № 2473421

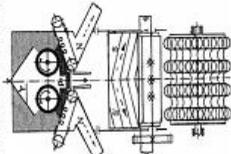


Рис. 1 Классификация технических средств для компактирования техногенных материалов

– достижение необходимого коэффициента предварительного уплотнения техногенных материалов перед их прессованием в валках пресса;

– обеспечение большей на 15-20% производительности пресс-валкового агрегата за счёт большей плотности и выхода качественных брикетов;

– создание дополнительных технологических возможностей для обработки влагонасыщенных техногенных материалов за счет удаления избыточной влаги;

–обеспечение технологических возможностей для переработки вязкопластичных техногенных материалов за счёт использования в пустотелых камерах щекового уплотнителя вибрационных устройств или теплонагревательных элементов;

– повышение прочностных характеристик спрессованных тел – брикетов за счёт получения упрочнённого их поверхностного слоя при термодогреве прессуемой массы в зонах нагнетательных валков.

Таким образом, представленная нами классификация технических средств для компактирования техногенных материалов позволяет сделать вывод о большом распространении различных типов оборудования для решения задачи утилизации. В зависимости от требований к конечному продукту применяют определенный вид агрегатов. Представленные нами патентозащищенные технические разработки для компактирования техногенных материалов обладают нестандартными техническими решениями, новизной конструкции, а главное, реализованными прототипами идей для эффективного получения качественной продукции.

#### **Список литературы:**

1. Ильина Т.Н. Процессы агломерации в технологиях переработки дисперсных материалов. Монография. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. 229 с.
2. Технические основы переработки и утилизации техногенных материалов. Учебное пособие / В.С. Севостьянов, Л.И. Шинкарев, М.В. Севостьянов, А.А. Макридин, Н.В. Солопов. Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. 269 с.
3. Патент 2412753 РФ. Вибрационно - центробежный гранулятор. Ильина Т.Н., Севостьянов М.В., Уральский В.И., Шкарпеткин Е.А. Заявл. 25.09.09; опубл. 27.02.2011, Бюл.№6.
4. Гранулятор волокнистых материалов: Пат.135539. Рос. Федерация: МПК В01J 2/20 / Севостьянов М.В., Ильина Т.Н., Осокин А.В., Севостьянов В.С., Сабитов Р.А; заявитель и патентообладатель

- Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова. - № 2013130468/05; заявл. 02.07.2013; опубл. 20.12.2013, Бюл. №35. - 2с.
5. Свидетельство на полезную модель № 30244 «Многоцелевой гранулятор» Авторы: Гридчин А.М., Севостьянов В.С., Лесовик В.С., Севостьянов М.В. и др.-Опубл.27.06.2003 в БИ № 18.
  6. Патент № 2207247 Р.Ф., В 29 В 9/06/ Пресс-валковый экструдер./ Гридчин А.М., Севостьянов В.С., Лесовик В.С., Севостьянов М.В. и др.-Опубл.27.06.2003 в БИ №18.
  7. Патент № 2204486 Р.Ф., В 30 В 11/18, В 28 В 3/14/ Вальцовый пресс для брикетирования порошкообразных материалов./ Севостьянов В.С., Зубаков А.П., Бондаренко В.Н., Новиков Э.В., Севостьянов М.В.-Опубл.20.05.2003 в БИ № 14.
  8. Пат. 2473421 Российская Федерация, МПК В28В 3/12. Способ формирования техногенных материалов и пресс-валковый агрегат для его осуществления / С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, С.В. Свергузова, Л.И. Шинкарев, М.Н. Спирин, Д.Д. Фетисов, М.В. Севостьянов, Ж.А. Свергузова, заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова, опубл. В БИ №3 27.01.2013. 10с.

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАЛЬЦЕВОГО ПРЕССА С ПРОТЯЖЕННОЙ ЗОНОЙ УПЛОТНЕНИЯ**

**Севостьянов М.В., канд. техн. наук, доц.,**

**Уваров В.А., д-р техн. наук, проф.,**

**Зубаков А.П., канд. техн. наук**

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

Проблема комплексной утилизации техногенных материалов возникла давно, с прогрессирующим ростом промышленности и наращиванием темпов развития различных производств. Особенно она актуальна и востребована в такой крупномасштабной и материалоемкой отрасли, как промышленность строительных материалов [1]. Решению вопросов комплексной утилизации техногенных материалов способом компактирования посвятило ни одно поколение ученых, занимающихся в этом направлении. Среди наиболее известных: д.т.н., проф. М.Б. Генералов, д.т.н., проф. Л.М. Сулименко, д.т.н., проф. В.В. Тимашев, д.т.н., проф. В.С. Севостьянов, д.т.н., проф. Т.Н. Ильина, д.т.н., проф. В.В. Большов и др. [2-5].

Наряду с традиционными способами утилизации техногенных порошкообразных материалов, таких как экструдирование, гранулирование, таблетирование и др., отдельное место занимает способ брикетирования [6-9].

Применение технологии брикетирования позволяет получать агломераты заданного размера и формы с необходимыми физико-механическими характеристиками, что уменьшает их потери при транспортировке, хранении, распределении при дальнейшем использовании, переработке, а также улучшает технологические, экологические и экономические показатели их применения.

Брикетированные техногенные материалы находят все большее применение в строительной отрасли, а именно при производстве строительных материалов и изделий различного назначения.

При решении возникшей проблемы в промышленности строительных материалов широко были рассмотрены различные конструктивные решения брикетного оборудования, такие как: штемпельные, кольцевые, вальцевые прессы со своими преимуществами и недостатками.

Штемпельные пресса периодического действияжимают порции порошкообразного материала движущимся штемпелем в горизонтальном матричном канале. Давление прессования, развиваемое в таком прессе, зависит от свойств материала и условий работы пресса. Обычно оно составляет от 80 до 120 МПа.

К главным недостаткам штемпельных прессующих агрегатов можно отнести: периодичность процесса прессования, большие габаритные размеры прессуемых изделий, большое число шарнирных соединений и сложная система смазки.

В случае необходимости получения изделий повышенной плотности и прочности прибегают к работе на кольцевых прессах. Процесс компактирования в прессах такого типа заключается в прокатывании тонкоизмельченного материала между эксцентрично расположенными цилиндрическими поверхностями. Давление прессования в кольцевых прессах составляет 200 МПа и более.

Особое внимание уделяется такому технически надежному оборудованию, как вальцевые пресса. К преимуществам данных агрегатов можно отнести: непрерывность процесса прессования материала, а, следовательно, высокую производительность при незначительных энергозатратах ( $q=3-5$  кВт·ч/т); достаточную эксплуатационную надежность и невысокую ремонтосложность. Особенно это проявляется при оснащении пресса съемными формирующими элементами – бандажами, что обеспечивает длительный период эксплуатации оборудования. Возможность получения качественных брикетов из порошкообразных материалов с различной степенью пластичности (при использовании специальных устройств – подпрессовщиков для предварительного уплотнения шихты) значительно расширяет область использования вальцевых прессов. Предварительное уплотнение шихты, в свою очередь, благоприятно влияет на подготовку брикетируемого материала, варьирует его исходную плотность, а, значит, позволяет изменять давление прессования. Вальцевые пресса способны производить брикеты заданной геометрической формы и размеров при отсутствии строгой синхронизации частоты вращения валков (в случае применения формирующих элементов желобково-зубчатой формы) и др.

В настоящее время известно большое разнообразие устройств для предварительного уплотнения шихты и регулирования давления прессования: валковые, шнековые, роторные, центробежные, щековые и др.[1-3,6-9]. Однако, каждое из них имеет специальное конструктивно-

технологическое назначение, требует отдельного привода и обеспечивает ограниченное значение коэффициента уплотнения шихты.

В этой связи появилась необходимость создания вальцевого пресса с протяженной зоной предварительного уплотнения материалов. Особое значение данная конструкция пресса имеет для брикетирования техногенных материалов с низкой насыпной массой.

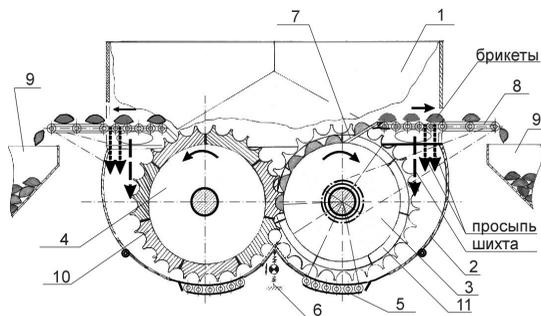


Рисунок 1 – Конструкция вальцевого пресса с протяженной зоной предварительного уплотнения шихты: 1 – загрузочный бункер; 2 – дугообразная пластина протяженной зоны уплотнения; 3,4 – вальцы; 5 – бесконечная лента; 6 – виброуплотняющее устройство; 7 – очистная гребенка; 8 – устройство возврата просыпи и удаления брикетов; 9 – бункеры готовой продукции; 10 – съемные формующие элементы зубчатого типа; 11 – съемные формующие элементы желобково-зубчатого типа

Разработанная нами и защищенная патентом конструкция вальцевого пресса с протяженной зоной предварительного уплотнения [10] имеет следующие преимущества (рис.1):

- имеет высокий коэффициент предварительного уплотнения шихты  $k_{uml.}=2,5-3$  за счет протяженных зон обезвоздушивания и деформирования материала;

- обеспечивает высокую производительность в виду наличия двухстороннего потока шихты и использования каждого из вальцов в виде формующего органа;

- повышает выход качественной готовой продукции за счет возврата просыпи в зону формования;

- обеспечивает высокое качество спрессованных брикетов за счет наличия протяженной зоны предварительного уплотнения шихты (обезвоздушивания, эффективной упаковки частиц при

вибровоздействию, снижения величины упругой деформации спрессованных тел после снятия напряжений – релаксации напряжений), а также за счет надежного выхода брикетов из желобов формирующих элементов при использовании специальных устройств;

– увеличивает степень уплотнения шихты (качество брикетов) из-за протяженного времени динамического воздействия на уплотняемый материал, выдержки его под давлением и снижения, соответственно, величины упругих деформаций после снятия напряжений и др.

В процессе разработки конструкции вальцевого пресса с протяженной зоной предварительного уплотнения шихты (ПЗУ) нами проведены теоретические исследования по изучению кинематических, конструктивно-технологических и энергосиловых параметров агрегата.

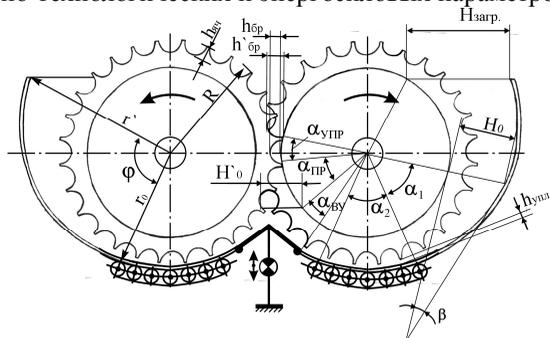


Рисунок 2 – Схема к расчету вальцевого пресса с протяженной зоной предварительного уплотнения шихты:  $R_{зуб}$  – радиус зуба;  $R_{жел}$  – радиус кольцевых впадин-желобов;  $R$  – радиус окружности выступов вальца;  $r'$  – полярный радиус, соответствующий точке спирали после поворота на угол  $\varphi$ ;  $r_0$  – полярный радиус, соответствующий начальной точке спирали;  $h_{жел}$  – глубина желоба;  $H_{загр}$  – толщина слоя материала в зоне загрузки;  $H_0$  – начальный слой брикетируемого материала;  $H_0'$  – объединенный слой материала перед зоной прессования;  $h_{упл}$  – слой уплотненного материала на выходе из зоны ПЗУ;  $h'_{бр}$  – толщина слоя материала после сжимания вращающимися вальцами;  $h_{бр}$  – упругое расширение сформованных брикетов;  $\alpha_0$  – угол начала зоны усадки материала;  $\alpha_1$  – угол предварительного уплотнения материала;  $\alpha_2$  – угол слоя уплотненного материала;  $\alpha_{вп}$  – угол в зоне виброуплотнения;  $\alpha_{пр}$  – угол зоны прессования;  $\alpha_{упр}$  – угол упругого расширения;  $\beta$  – угол захвата материала;  $\varphi$  – угол внешнего трения материала

Производительность вальцевого прессы определяется по формуле:

$$Q_{ВП} = m_{БР} \cdot z_{ЯЧ} \cdot n_{ВАЛ},$$

где  $m_{БР}$  – масса одного брикета, кг;

$z_{ЯЧ}$  – количество формирующих ячеек на поверхности вальца;

$n_{ВАЛ}$  – частота вращения валцов,  $c^{-1}$ .

$$z_{ЯЧ} = \frac{\pi \cdot D}{b} \cdot \frac{B}{l} \cdot \Psi,$$

где  $D$  – диаметр валцов, м;  $b$  – ширина ячейки, м;  $B$  – ширина вальца, м;  $l$  – длина ячейки, м;  $\Psi$  – коэффициент использования поверхности валцов ( $\Psi = 0,92$ ).

Мощность, расходуемая на брикетирование материала в вальцовом прессы с протяженной зоной уплотнения, определяется из выражения:

$$N_{\Sigma} = 2(N_{УПЛ} + N_{СТАБ} + N_{КР. max} + N_{ТР}) + 2(N_{КЛ} + N_{ТРАН}) + N_{ВУ},$$

где  $N_{УПЛ}$  – мощность привода ПВА, расходуемая на предварительное уплотнение шихты, включая расход мощности на преодоление сил трения уплотняемого материала о неподвижную поверхность дугообразной направляющей пластины;

$N_{СТАБ}$  – мощность привода ПВА, расходуемая на продвижение уплотненного материала в зоне стабилизации;

$N_{КР. max}$  – мощность привода ПВА, расходуемая на прессование материала;

$N_{ТР}$  – мощность привода ПВА, расходуемая на преодоление трения в подшипниках опоры вальца;

$N_{КЛ}$  – мощность привода, расходуемая на классификацию брикетов;

$N_{ТРАН}$  – мощность привода ПВА, расходуемая на транспортировку брикетов;

$N_{ВУ}$  – мощность привода устройства виброуплотнения материала.

$$N_{УПЛ} = P_{X_{cp}}^{OT} \cdot B_{ВАЛ} \cdot R \cdot \alpha_1 \cdot \omega_{ВАЛ} \cdot (h_{УПЛ} - h_{ПЛ}) \cdot f_{ТР},$$

где  $P_{X_{cp}}^{OT}$  – среднее значение давления, создаваемого в зоне предварительного уплотнения материала,  $H/M^2$ ;  $B_{ВАЛ}$  – ширина вальца, м;  $R$  – радиус окружности выступов вальца, м;  $\alpha_1$  – угол предварительного уплотнения материала, рад;  $\omega_{ВАЛ}$  – угловая скорость вращения валцов,

рад/с;  $f_{TP}$  – коэффициент внешнего трения уплотненного материала о поверхность бесконечных лент и боковые стенки камеры стабилизации.

$$N_{СТАБ} = \frac{(\rho_{УПЛ} \cdot h_{УПЛ} \cdot B_{ВАЛ} \cdot \alpha_2 \cdot R \cdot g \cdot P_{X_{CP}}^{OП}) \cdot f_{TP} \cdot r_0 \cdot \omega_{ВАЛ}}{\eta},$$

где  $\rho_{УПЛ}$  – объемная масса уплотненного материала, кг/м<sup>3</sup>;  $h_{УПЛ}$  – толщина слоя уплотненного материала, м;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>;  $P_{X_{CP}}^{OП}$  – среднее значение давления, создаваемого в зоне стабилизации материала, Н/м<sup>2</sup>;  $\eta$  – к.п.д. привода.

$$N_{КР.маx} = \frac{P_{\alpha_H MAX} \cdot B \cdot R_{CP} \cdot \sqrt{R_{CP}} \cdot \sin \alpha_H \cdot \omega_{ВАЛ}}{\eta},$$

где  $P_{\alpha_H MAX}$  – максимальное усилие прессования, соответствующее нейтральному углу  $\alpha_H$ .

$$N_{TP} = \frac{\sqrt{(P_{\alpha_H MAX} \cdot \cos \alpha_H)^2 + G_{ВАЛ}^2} \cdot \mu \cdot r_{Ц.ВАЛ} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{ВАЛ}}{\eta},$$

где  $G_{ВАЛ}$  – масса валка, кг;  $\mu$  – коэффициент трения в подшипниковых опорах узлов;  $r_{Ц.ВАЛ}$  – радиус цапф валков.

$$N_{КЛ} = \frac{(G_{РОЛ} \cdot z_{РОЛ} + m_{БР} \cdot z_{БР}) \cdot \mu \cdot r_{Ц.РОЛ} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{ВАЛ} \cdot i_{ЦЕП.ПЕР.}}{\eta_{РЕМ.ПЕР.}},$$

где  $G_{РОЛ}$  – масса ролика, кг;  $z_{РОЛ}$  – число роликов, используемых для классификации брикетов;  $m_{БР}$  – масса одного брикета, кг;  $z_{БР}$  – число брикетов, одновременно находящихся на классифицирующих роликах;  $r_{Ц.РОЛ}$  – радиус цапф роликов, м;  $i_{ЦЕП.ПЕР.}$  – передаточное отношение цепной передачи;  $\eta_{РЕМ.ПЕР.}$  – к.п.д. ременной передачи.

$$N_{ТРАН} = \frac{\pi \cdot K}{102 \cdot \eta} \cdot (P \cdot D \cdot n_{ВАЛ} \cdot i_{ЦЕП.ПЕР.} \cdot \eta_{ЦЕП.ПЕР.})$$

где  $K$  – коэффициент неучтенных потерь,  $K=1,2$ ;  $\eta$  – к.п.д. передачи,  $\eta = \eta_{РЕМ.ПЕР.} \cdot \mu_{ленты}$ , где  $\eta_{РЕМ.ПЕР.}$  – к.п.д. ременной передачи;

$\mu_{ленты}$  – коэффициент сцепления ленты с ведущим роликом;  $D$  – диаметр вала, м;  $P$  – окружное усилие на ободу ведущего ролика, Н.

Мощность привода виброуплотняющего устройства определяется мощностью, затрачиваемой на запуск эксцентрикового привода ( $N_0$ ), и мощностью, потребляемой в режиме установившихся колебаний ( $N_{II}$ ).

$$N_{BV} = N_0 + N_{II}$$

Мощность, затрачиваемая для запуска эксцентрикового привода,

$$N_0 = \frac{A^2 K}{t_m \eta_m},$$

равна:

где  $A$  – эксцентриситет эксцентрикового вала, м;

$K$  – суммарная жесткость упругой системы;

$t_m$  – время вывода эксцентрикового привода в режим установившейся работы, с;

$\eta_m$  – к.п.д. передачи во вспомогательном устройстве (фрикционной муфты и т.д.)

Потребляемая мощность привода виброуплотняющего устройства

$$N_{II} = \frac{A_{uml} v}{\eta_{п.у.}},$$

равна:

где  $A_{uml}$  – работа, совершаемая виброуплотняющим устройством в процессе уплотнения шихты, Дж;

$v$  – частота колебаний рабочей поверхности виброуплотняющего устройства, с<sup>-1</sup>;

$\eta_{п.у.}$  – к.п.д. привода виброуплотняющего устройства.

В результате проведенных нами экспериментальных исследований по изучению условий прессования пылеуноса вращающихся печей мелоизвесткового цеха [11] и получению спрессованных брикетов было установлено, что спрессованные тела полностью соответствуют необходимым физико-механическим характеристикам, удовлетворяющим требованиям производства:

Предел прочности при сжатии –  $\sigma_{сж} \geq 120$  Н/бр.

Сохранность при сбрасывании с высоты –  $H \geq 2$  м.

Истираемость – не более (10 ÷ 15) %.

Термостойкость – при  $T=600-700^\circ\text{C}$ .

Таким образом, нами разработана конструкция вальцевого пресса с протяженной зоной предварительного уплотнения шихты, произведены теоретические исследования основных кинематических, конструкторско-технологических и энергосиловых параметров данного агрегата. Техническое и технологическое исполнение вальцевого пресса обладает рядом преимуществ по сравнению с известными аналогами в области брикетирования.

#### Список литературы:

1. Технические основы переработки и утилизации техногенных материалов. Учебное пособие / В.С. Севостьянов, Л.И. Шинкарев, М.В. Севостьянов, А.А. Макридин и др. Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. 263 с.
2. Генералов М.Б., Классен П.В., Степанова А.Р. и др. Расчет оборудования для гранулирования минеральных удобрений. М.: Машиностроение, 1984. 192 с.
3. Сулименко Л.М., Альбац Б.С. Агломерационные процессы в производстве строительных материалов // Производственное издание. ВНИИЭСМ. 1994. 297 с.
4. Тимашев В.В., Сулименко Л.М., Альбац Б.С. Агломерация порошкообразных силикатных материалов. Монография. М. Стройиздат, 1978. 136 с.
5. Ильина Т.Н. Процессы агломерации в технологиях переработки дисперсных материалов. Монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. 229 с.
6. Равич Б.М. Брикетирование руд. М. Недра. 1982. 183 с.
7. Крохин В.Н. Брикетирование углей. М. Недра, 1984. 224 с.
8. Лазарев А.В., Лыкин Б.Г., Демьянов Е.С. и др. Технология производства торфяных брикетов. М. Недра, 1984. 264 с.
9. Елишевич А.Т. Брикетирование полезных ископаемых. М.: Недра, 1989. 300 с.
10. Патент № 2204486 Р.Ф., 7 В 30 В 11/18, В 28 В 3/14/ Вальцовый пресс для брикетирования порошкообразных материалов/ Севостьянов В.С., Зубаков А.П., Бондаренко В.Н., Новиков Э.В., Севостьянов М.В.-Опубл.20.05.2003 в БИ № 14.
11. Севостьянов В.С., Зубаков А.П., Михайличенко С.А., Евтушенко Е.И., Рубанов Ю.К., Севостьянов М.В. Технологический комплекс для утилизации отходов производства извести // III Международная научно-практическая конференция-школа-семинар молодых ученых, аспирантов и докторантов, посвященная памяти В.Г. Шухова //Современные проблемы строительного материаловедения. Изд-во БелГТАСМ, 2001. Ч.2. С. 227-232.

## ЦЕНТРОБЕЖНАЯ ПРОТИВОТОЧНАЯ МЕЛЬНИЦА С СЕЛЕКТИВНЫМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕМ МАТЕРИАЛА

Семикопенко И.А., канд. техн. наук, проф.,  
Вялых С.В., аспирант,  
Смирнов Д.В., аспирант,  
Горбань Т.Л., аспирант,  
Трофимов И.О., студент

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

Основным недостатком мельниц ударного действия является повышенный износ ударных элементов, который является лимитирующим фактором при выборе оборудования для измельчения абразивных материалов [1].

Одним из основных типов оборудования, реализующего самоизмельчение частиц во встречных потоках, являются центробежные противоточные мельницы. Несмотря на то, что в данных мельницах относительная скорость движения измельчаемого материала составляет 200-300 м/с, имеет место недостаточная эффективность помола материала в тангенциальном канале [2]. Это обусловлено наличием различных по величине частиц в потоке измельчаемого материала, сходящих с роторов. Мелкие частицы, находясь во встречных потоках, смягчают соударение крупных частиц, чем снижают эффективность их измельчения. В данной статье дано описание конструкции центробежной противоточной мельницы, обеспечивающей разделение материала перед его измельчением в тангенциальном канале. Центробежная противоточная мельница (рис.1) содержит два корпуса 1, размещенных в одной плоскости и соединенных между собой тангенциальным каналом 2, общим для обоих корпусов. В каждом корпусе имеется выполненный с возможностью вращения в направлении соответствующего выходного отверстия канала ротор 3. На роторе закреплены разгонные лопатки 4, изогнутые в сторону вращения ротора 3. В тангенциальном канале 2 имеется выгрузочный патрубок 5, равноудаленный от оси вращения роторов 3. Загрузочные патрубки 6 в каждом корпусе для подачи измельчаемого материала расположены на дуге окружности, равной  $50...280^{\circ}$ , считая от прямой, проходящей через центры вращения роторов 3 и радиусом, равным  $1/4...3/4$  радиуса ротора с центром на вертикальной оси последнего. На верхней плоскости каждого ротора 3 торцом к вогнутой поверхности

каждой разгонной лопатки 4 жестко закреплен клиновидный выступ 7 (рис.2, 3). Высота клиновидного выступа 7 под загрузочным патрубком 6 равна  $0,1 \dots 0,2 d_{max}$  и на периферии ротора  $0,5d_{max} \dots 1,0d_{max}$  и ширина равна  $0,5 \dots 1,0 d_{max}$ . Высота каждой разгонной лопатки 4 больше  $2d_{max}$ , где  $d_{max}$  – максимальный размер загружаемого материала.

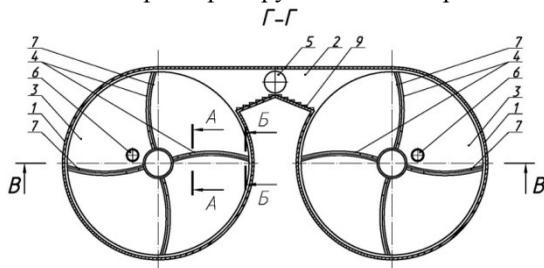


Рисунок 1 – Центробежная противоточная мельница

Центробежная противоточная мельница работает следующим образом. Измельчаемый материал, например известняк, через загрузочные патрубки 6 одновременно подается на разгонные лопатки 4 обоих роторов 3. Ввиду того, что загрузочные патрубки 6 смещены относительно оси вращения ротора 3, измельчаемый материал в каждый промежуток времени попадает только на одну из разгонных лопаток 4. Мелкие частицы, попадая на клиновидные выступы 7, перемещаются вдоль их вертикальной поверхности и сходят с плоскости ротора 3 на его периферии. Крупные частицы, миновав клиновидные выступы, попадают на разгонные лопатки 4 и за счет центробежной силы направляются в тангенциальный выгрузочный канал 2. Благодаря клиновидным выступам 7, крупные частицы перемещаются по их горизонтальным поверхностям, а мелкие частицы перемещаются по их вертикальным поверхностям и поверхностям роторов 3. Таким образом, происходит раздельный по высоте вылет крупной и мелкой фракций в тангенциальный выгрузочный канал 2, благодаря чему эффективность соударений крупных частиц повышается. Скорость частиц, направляемых навстречу друг другу в тангенциальный выгрузочный канал 2, превышает скорость разрушения частицы материала, в результате чего происходит измельчение. В зависимости от свойств и размера измельчаемого материала загрузочные патрубки 6 смещаются относительно оси вращения ротора 3 так, чтобы частицы отбрасывались в тангенциальный выгрузочный канал 2.

Частицы, отклонившиеся от основного потока, направляются на отбойные плиты 9, находящиеся в тангенциальном выгрузочном канале 2 и после соударения с отбойными плитами направляются в готовый продукт.

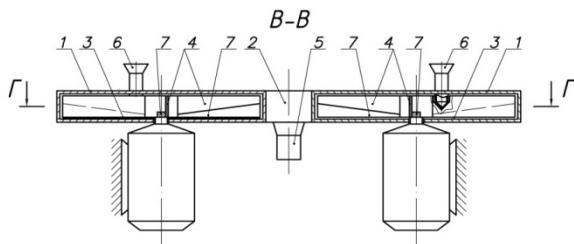


Рисунок 2 – Центробежная противоточная мельница, поперечный разрез

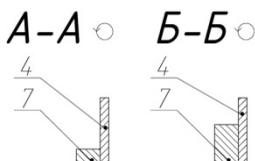


Рисунок 3 – Расположение клиновых выступов на верхней плоскости роторов

Наличие клиновых выступов, жестко закрепленных на верхней плоскости каждого ротора, обеспечивает повышение качества готового продукта по гранулометрическому составу, что повышает эффективность процесса измельчения.

#### Список литературы:

1. Хинт И.А. Основы производства силикальцитных изделий. М.:Изд-во Госстройиздат, 1962. 602 с.
2. Методика расчета расхода воздуха в центробежно-ударной мельнице / Н.В. Клочков, В.Н. Блиничев, С.П. Бобков, А.В. Пискунов // Известия вузов. Химия и химическая технология. 1982. №2. С.230-232.
3. Семикопенко И.А., Воронов В.П., Пензев П.П. Теоретические исследования скорости движения частиц материала вдоль поверхности ударного элемента мельницы дезинтеграторного типа// Известия ВУЗов. Строительство.2008. № 11-12.С. 93-96.
4. Семикопенко И.А., Воронов В.П., Горбань Т.Л. Движение частиц материала вдоль поверхности криволинейной лопатки ротора// Вестник БГТУ им.В.Г.Шухова. 2015. №1.

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШНЕКОВЫХ ЛЕНТОЧНЫХ ПРЕССОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

**Струков В.Г., доц.,  
Струков К.В., аспирант,  
Смоляков М.Г., студент,  
Соловьев С.В., студент**

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

Для повышения сравнительного анализа зависимостей износа  $N_R$  и скорости изнашивания  $V_R$  от наработки и их влияния на изменение показателей работоспособности при работе пресса с серийным и опытным шнеками произведем построение совмещенной диаграммы конструкционной износостойкости (рис. 1).

Износ серийного шнека (рис.1) за расчетный период ( $t=140$  ч) более чем в 4 раза превышает величину износа опытного шнека и в 3 раза его предельное значение  $N_{\Pi}=9-10$  мм (точки 1\* на графиках).

Выполнение лопастей шнека по клотоиде обеспечивает уменьшение затрат энергии на трение. Один и тот же износ для серийной и новой конструкции шнеков достигается при различных значениях наработки (точки 2-х на графиках); при  $N_R=5$  мм значения наработки составляют соответственно  $t_c=56$ ч и  $t_o=16$ ч, при этом энергоемкость формования серийного шнека  $K_w=0,014$  кВт.ч/шт.

Серийный износ лопастей нового шнека за межремонтный период ( $t=140$  ч) по данным ОАО «Победа» составляет 6-8 мм, тогда как для серийного шнека он достигает 27-33 мм, таким образом относительная износостойкость равна  $\varepsilon=3,14-5,5$ , что хорошо подтверждает результаты теоретических исследований. Клотоидальная форма лопастей с подкрепленным краем создает запас на износ и сохраняется в процессе эксплуатации пресса. Это снижает трудоемкость восстановления лопастей, увеличивает ресурс шнеков до замены в 6-8 раз и повышает их прочность.

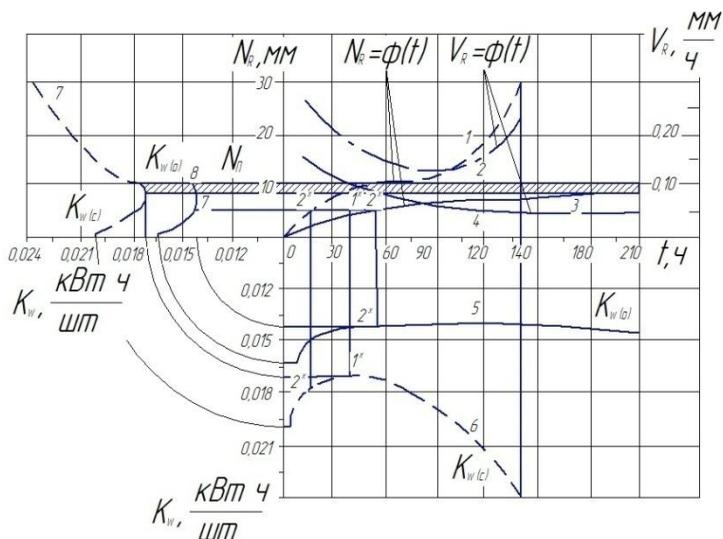


Рисунок 1 –Сравнительная диаграмма конструкционной износостойкости шнеков прессов: – серийный шнек; \_\_\_\_\_ – шнек клотоидальная форма лопастей

Шнек новой конструкции в сравнении с серийной обеспечивает большую эффективность прессования особенно при пониженных влажностях керамической массы (рис. 2). Анализ графиков зависимостей  $K_v = \phi(\beta)$  и  $K_w = \phi(\beta)$  показывает, что с уменьшением влажности керамической массы  $\beta$  скорость экструзии, приходящейся на единицу мощности  $K_v$  уменьшается, а энергоёмкость процесса формования  $K_w$  увеличивается. При влажности керамической массы  $\beta = 14-15\%$  значения параметра  $K_v$  при работе пресса с опытным шнеком в 1,31-1,25 раза выше, чем при работе пресса с серийным шнеком, соответственно во столько же раз снижается энергоёмкость  $K_w$ . Полученные статистической обработкой высокие значения коэффициентов корреляции ( $\tau_{xy}^c = 0,945$ ,  $\tau_{xy}^o = 0,930$ ) указывают на тесную связь параметров  $K_v$  и  $K_w$  с влажностью формуемой керамической массы.

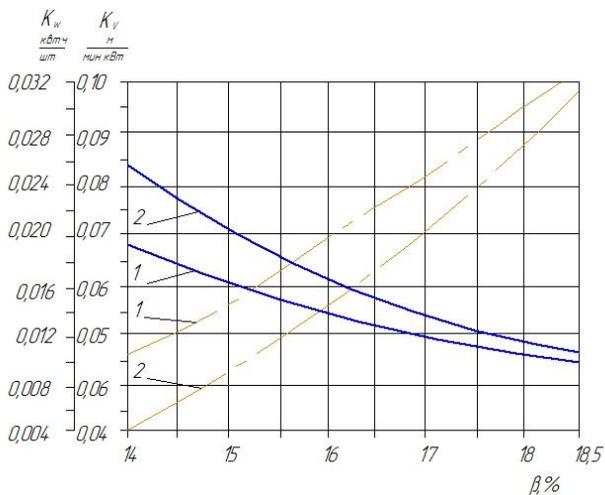


Рисунок 2 – График зависимости энергоёмкости  $K_W$  скорости экструзии, приходящейся на единицу мощности  $K_V$  от влажности формуемой керамической массы  $\beta$ : 1– модернизированный шнек; 2– серийный шнек

Оценку влияния конструкции шнека на его производительность определим путем построения внешних (интегральных) характеристик шнеков, показывающих зависимость между производительностью  $\Pi$  и давлением прессования  $q$ .

Характеристика опытного шнека имеет меньший отрицательный угол наклона, чем характеристика серийного шнека. Производительность опытного шнека, таким образом, меньше зависит от величины сопротивления (противодавления) вследствие того, что клотоидальная форма способствует снижению обратного потока и проворачивания керамической массы. В отличие от любой кривой клотоида является идеальной переходной кривой о динамической и энергетической точек зрения, что хорошо подтверждается данными эксперимента и полученными характерными осциллограммами расхода мощности при работе пресса СМК-28 «А» с опытным и серийным шнеками [1-6].

Выполненный в соответствии с действующими ГОСТами анализ качества формуемых изделий показал, что опытный шнек обеспечивает повышение марочности выпускаемого кирпича, в среднем, на одну - две

марки, прочности на сжатие и изгиб, а также морозостойкости, что соответствует теоретическим выводам.

Полученные результаты испытаний подтверждены опытом эксплуатации новых шнеков на различных кирпичных заводах страны. Выполнены сравнительные исследования износа и параметров процесса формирования шнеками стандартной и новой конструкции с клотоидальной формой лопастей на различных заводах стройматериалов РФ, которые показали преимущества новых шнеков по увеличению ресурса более чем в 4-5 раз, повышению прочности, снижению энергоемкости формирования и повышению качества выпускаемых изделий.

#### **Список литературы:**

1. Определение оптимального парка станков при ремонте строительных машин / В.В. Абрамов, Е.В. Ефремов, В.П. Смирнов, В.Г. Струков // Вестник БГТУ им.В.Г. Шухова. 2005. №11. С. 135-138.
2. Механическое оборудование производства тугоплавких неметаллических и силикатных материалов и изделий / В.С. Севостьянов, В.С. Богданов, Н.Н. Дубинин, В.И. Уральский. М.: ИНФРА-М, 2005. 432 с.
3. Абиев Р.Ш., Струков В.Г. Надежность механического оборудования и комплексов: учеб. для студентов вузов. СПб.: Проспект Науки, 2012. 224 с.
4. Основы расчета машин и оборудования предприятий строительных материалов и изделий: учебник / В.С. Богданов, Р.Р. Шарапов, Ю.М. Фадин, И.А. Семикопенко, Н.П. Несмеянов, В.Б. Герасименко. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 680с.
5. Сапожников М.Я. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий. М.: Машгиз, 1962. 520 с.
6. Влияние угла наклона образующей шнековой лопасти вертикального винтового конвейера на коэффициент выдачи материала / В.А. Евстратов, Б.Г. Гасанов, Н.Н. Евстратова, А.В. Рудь // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №5. С. 67-70.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ЦЕМЕНТНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

Трулёв А.В., ассистент,

Коновалов В.М., канд. техн. наук, доц.,

Кузнецов В.А., д-р техн. наук, проф.

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

Повышение эффективности тепловой работы цементных вращающихся печей является актуальной задачей. Однако, ввиду высоких температур в рабочем газовом пространстве и постоянного вращения корпуса, изучение тепловых процессов во вращающихся печах затруднено, а параметры высокотемпературных процессов горения и теплообмена, как правило, не поддаются прямому измерению, и в литературе обычно не обсуждаются.

В связи с этим, исследование тепловых процессов, протекающих во вращающихся печах, целесообразно изучать посредством их математического моделирования. В основе трехмерной математической модели лежат дифференциальные уравнения турбулентного движения газообразной среды, переноса компонентов газообразной среды и радиационно-конвективного теплообмена [1], которые можно представить в следующем обобщенном виде:

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u_i \Phi}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \kappa \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) = S_v,$$

где  $\Phi$  – искомая функция;  $u$  – компонента скорости по  $i$ -й оси координат  $x_i$ ; индекс  $i=1, 2, 3$  (применяется суммирование членов уравнения по повторяющемуся индексу);  $\kappa$  – коэффициент переноса;  $S_v$  – источник, соответствующий единице объема.

Процессы горения природного газа в диффузионном факеле осуществляются при бесконечно большой скорости химических реакций, так что скорость окисления топлива лимитируется только скоростью подвода окислителя к фронту пламени. Поэтому при компьютерном моделировании горения размеры диффузионного факела во вращающейся печи определялись численным решением дифференциальных уравнений переноса топлива и воздуха. Особое внимание было уделено совершенствованию методов компьютерного моделирования сложного радиационно-конвективного теплообмена, формирующего температурное поле и имеющего важнейшее значение

для теплоотдачи от факела горящего топлива к обжигаемому в печах технологическому материалу.

Граничные условия к уравнениям переноса количества движения и конвективного переноса теплоты формулировались в основе модифицированной гипотезы пристенной турбулентности Прандтля. Уравнения массопереноса решались при условии непроницаемости стен печи для газовой среды. К уравнениям радиационно-конвективного теплообмена поставлены граничные условия, учитывающие переизлучение стен на клинкер и нестационарную аккумуляцию теплоты стенами печи.

Дифференциальные уравнения, составляющие математическую модель, приведены к дискретному виду при помощи метода конечных объемов. Дискретные аналоги дифференциальных уравнений приведены к следующей форме:

$$a_P \Phi_P = \sum a_{nb} \Phi_{nb} + d_P,$$

где  $a_P$  и  $a_{nb}$  – коэффициенты уравнения, вычисляемые в расчетном узле сетки  $P$  и в соседних узлах сетки соответственно;  $\rho$  – плотность среды,  $d_P$  – свободный член уравнения.

На основе уравнений и усовершенствованных алгоритмов математической модели была разработана компьютерная программа, позволяющая учитывать наличие в печи слоя технологического материала, а также размеры и форму выходного сечения топливного сопла горелки. Компьютерная цветовая палитра, соотношенная в программе с вычисленными значениями температуры и концентрации топлива, позволяет наглядно изобразить диффузионный факел горящего природного газа на экране монитора. Установка курсора компьютерной «мыши» на любой точке расчетной области приводит к появлению на экране локальных значений основных параметров горения.

В качестве базового варианта рассматривалась цементная вращающаяся печь «мокрого» способа производства с диаметром корпуса 5 м, производительностью 72 т/ч по клинкеру при расходе природного газа 12200 м<sup>3</sup>/ч. Рассчитывались тепловые процессы в зонах спекания и охлаждения клинкера на участке длиной 40 м в горячем конце печи. Подача на горение воздуха, нагретого до 410°C, предусматривалась с избытком 10% по всему свободному поперечному сечению печи.

Форма факела является определяющей для тепловой работы вращающихся печей. Обычно выделяют два вида факела: относительно короткий «жесткий» факел, образующийся при скорости вылета

природного газа из топливного сопла более 300 м/с, и длинный «вялый» факел, образующийся при скорости вылета топлива менее 200 м/с.

Как показало компьютерное моделирование, благоприятные условия для предотвращения чрезмерного перегрева клинкера в цементной печи при «мокром» способе производства создаются удлинением области горения. Однако «вялый» факел, образующийся при вылете природного газа вдоль оси печи со скоростью 150 м/с, поднимается под действием архимедовой выталкивающей силы к верхней образующей печи и стелется по поверхности футеровки [2]. Так как при этом смешение топлива с воздухом затруднено, то процесс горения по длине факела затягивается и, в результате, как показывает опыт эксплуатации цементных вращающихся печей, возникает недожог природного газа.

Увеличение скорости вылета топлива из топливного сопла горелки приводит к образованию более короткого факела в газовом пространстве печи. Работа на коротком «жестком» факеле позволяет, как правило, предотвратить недожог топлива. Однако при этом возрастает тепловое напряжение в зоне горения, что приводит к перегреву клинкера в зоне спекания и увеличивает опасность пережога футеровки.

Преимущества «жесткого» и «вялого» факела можно реализовать, применяя двухканальную горелку с центральным круглым каналом и соосным с ним кольцевым каналом при переменном ее наклоне относительно оси печи, компенсирующим воздействие на факел выталкивающей силы [3]. При соотношении площадей сопел на выходе из этих каналов в пределах от 1,5 до 2,5 долю расхода топлива через кольцевой канал горелки допускается изменять от 50 до 100%.

Поскольку скорость вылета топлива обратно пропорциональна площади сопла, то на любом режиме работы горелки природный газ будет выходить через центральное сопло с пониженной скоростью, способствуя созданию удлиненного факела. Одновременно струи газообразного топлива на выходе из кольцевого канала, сохраняющие более высокую скорость вылета, формируют требуемые геометрические параметры факела горящего топлива и оптимальное изменение температуры газообразной среды по его длине.

Рассматривались два варианта организации вылета топлива из выходного сопла кольцевого канала горелки. Предполагалось, что при сплошном поперечном сечении кольцевого сопла, расположенного по окружности этого канала, будет лучше обеспечиваться устойчивость формы и положения факела в рабочем пространстве печи. Исследовался

также способ подачи топлива отдельными струями по окружности кольцевого канала, чередующимися с закрытыми участками сопла, что могло бы способствовать лучшему воспламенению и смешению с воздухом центральной низкоскоростной топливной струи.

В численных экспериментах с помощью компьютерной программы определялся предельный угол наклона двухканальной горелки, при котором конец факела совмещался с осью вращающейся печи, как показано на рис. 1. Такой подход к анализу численных результатов позволил дать однозначную оценку способности скоростной струи стабильно поддерживать форму, длину и устойчивое положение диффузионного факела в пламенном пространстве печи.

Скорость вылета природного газа из сплошного кольцевого сопла составляла от 215 м/с (рис. 1, *а*) до 430 м/с (рис. 1, *б*) при разных расходах топлива через каналы горелки. Скорость истечения через центральное сопло при этом изменялась от 107 м/с до нуля, а длина факела во вращающейся печи уменьшалась от 39,5 м до 28,5 м.

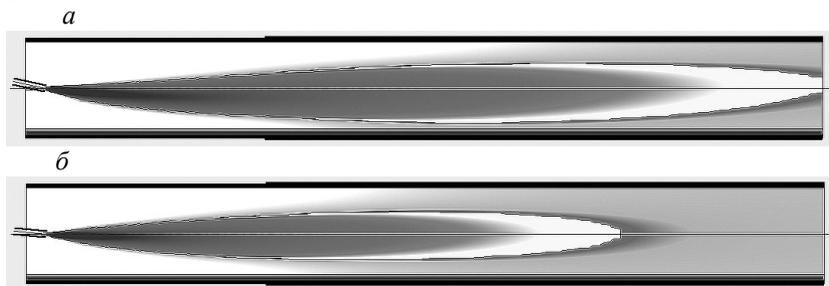


Рисунок 1 – «Предельное» положение факела при 50% (*а*) и 100% (*б*) подаче природного газа через сплошное кольцевое сопло горелки и при углах наклона горелки к оси печи: *а* – 12°; *б* – 5,5°

Предельные углы наклона двухканальной горелки со сплошным кольцевым соплом представлены кривой 1 на рис. 2 в зависимости от доли топлива подаваемого через кольцевой канал горелки. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что для совмещения «жесткого» факела с осью печи требуется применять сравнительно большие углы наклона двухканальной горелки, выполненной по первому варианту. Объясняется это тем, что при истечении всего природного газа через сплошное кольцевое сопло часть импульса топливной струи бесполезно затрачивается на образование возвратных вихрей в приосевой области.

Предельные углы наклона при выполнении двухканальной горелки по многосопловой конструктивной схеме, в которой набор отдельных

сопел занимает примерно половину окружности кольцевого канала, представлены кривой 2 на рис. 2. В этом случае через промежутки между отдельными топливными струями воздух, подаваемый на горение, вовлекается ими в начале диффузионного факела в приосевую область факела. В результате потеря импульса струями сводится к минимуму, смешение топлива с воздухом интенсифицируется, «жесткий» факел укорачивается до 23 м, а предельный угол наклона горелки при подаче всего топлива через кольцевой канал уменьшается до 3,5°.

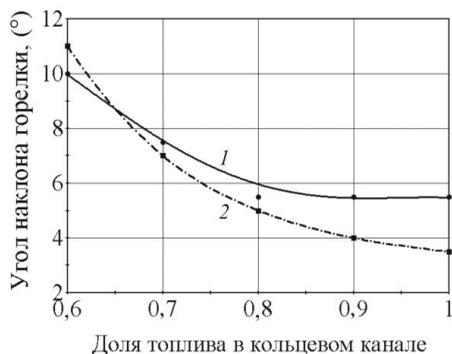


Рисунок 2 – Предельные углы наклона горелки при истечении топлива из кольцевого канала через: 1 – сплошное сопло, 2 – набор сопел

Таким образом, двухканальная горелка с переменным углом наклона позволяет регулировать в широком диапазоне длину диффузионного факела природного газа в цементной вращающейся печи «мокрого» способа производства. Как показали обширные компьютерные расчеты, рабочие углы наклона горелки к продольной оси печи могут быть уменьшены примерно вдвое относительно их предельных значений.

#### Список литературы:

1. Трубаев П.А., Кузнецов В.А., Беседин П.В. Методы компьютерного моделирования горения и теплообмена во вращающихся печах. Белгород: Изд-во БГТУ: БИЭИ, 2008. 230 с.
2. Кузнецов В.А., Рязанцев О.А., Трулев А.В. Численное моделирование горения и теплообмена в цементной вращающейся печи // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 4. С. 161-164.
3. Трулев А.В., Коновалов В.М., Кузнецов В.А. Способ регулирования параметров горения газообразного топлива, патент №2517463.

## ВЛИЯНИЕ ВАРЬИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЦЕНТРОБЕЖНОГО СЕПАРАТОРА

**Уваров В.А., д-р техн. наук, проф.,  
Шарапов Ринат Р., аспирант,**

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

С целью определения основных параметров процесса разделения в центробежном сепараторе обрабатывались результаты эксперимента с применением методов математического планирования [1,2]. В качестве основного плана эксперимента при проведении экспериментов нами принят центральный композиционный ротатбельный план (ЦКРП 2<sup>3</sup>) полного факторного эксперимента (ПФЭ). Исследуемые факторы и их уровни варьирования факторов представлены в таблице.

Таблица 1 – Исследуемые факторы и уровни варьирования ПФЭ ЦКРП 2<sup>3</sup>

Факторы	Кодовое обозначение	Интервал варьирования	$X = -1,682$ (звездный уровень)	$X = -1$ (нижний уровень)	$X = 0$ (средний уровень)	$X = +1$ (верхний уровень)	$X = +1,682$ (звездный уровень)
Расход сепарационного воздуха, $L, \text{ м}^3/\text{ч}$	$X_1$	50	216	250	300	350	384
Частота вращения ротора, $n, \text{ об/мин}$	$X_2$	240	600	760	1000	1240	1400
Степень перекрытия шибера, $\mu, \%$	$X_3$	24	20	36	60	84	100

На рис. 1, 2 и 3 представлены результаты исследования процесса разделения тонкодисперсных порошков в центробежном сепараторе, определяемые производительностью  $Q$  этого аппарата по продукту, размером менее 80 мкм. Уравнение регрессии, выражающее зависимость производительности  $Q$  центробежного сепаратора от расхода сепарационного воздуха, просасываемого через корпус

сепаратора  $L$  ( $X_1$ ), частоты вращения ротора  $n$  ( $X_2$ ) центробежного сепаратора и степени перекрытия шиберов  $\mu$  ( $X_3$ ) устройства направления сепарационного воздуха в систему аспирации в кодированном виде имеет вид:

$$Q = 314 + 24,2 X_1 - 38,5 X_2 + 8,3 X_3 + 2,1 X_1 X_2 + 3,7 X_1 X_3 - 6,2 X_1^2 + 6,4 X_2^2 - 2,5 X_3^2.$$

На рис. 1 представлены результаты исследования функции  $Q$  ( $L$ ) при различных значениях параметра  $\mu$ , равных 36% и 100% и при различных значениях частоты вращения ротора центробежного сепаратора тонкодисперсного материала.

При степени перекрытия шиберов устройства направления сепарационного воздуха в систему аспирации  $\mu$ , равном 36%, частоте вращения ротора сепаратора, равной 600 об/мин (см. рис. 1, а, линия 1) и расходе сепарационного воздуха  $L$  в центробежном сепараторе, равном 216 м<sup>3</sup>/ч производительность  $Q$  классификатора составила 340 кг/ч. При увеличении параметра  $L$  до 250 м<sup>3</sup>/ч производительность сепаратора  $Q$  возрастает до 362,9 кг/ч. Увеличение параметра  $L$  до 300, 350 и 384 м<sup>3</sup>/ч, также увеличивает производительность сепаратора  $Q$  до 386,1, 396,1 и 397,1 кг/ч, соответственно. Такая же тенденция сохраняется с увеличением  $L$ , а при дальнейшем увеличении частоты вращения (см. рис. 1, а, линии 2, 3 и 4) параметр  $Q$  уменьшается.

При максимальной частоте вращения  $n$  ротора сепаратора, согласно плану эксперимента, равной 1400 об/мин (линия 5), мы получаем самые низкие значения параметра  $Q$ . Это видно по линии, которая проходит ниже всех линий, характеризующих работу центробежного сепаратора при различных частотах вращения ротора (линии 1, 2, 3, и 4). Например, при минимальном расходе сепарационного воздуха  $L$ , равном 216 м<sup>3</sup>/ч производительность  $Q$  центробежного сепаратора минимальна и составляет 198,6 кг/ч. С увеличением расхода сепарационного воздуха до 250 м<sup>3</sup>/ч производительность центробежного сепаратора увеличивается до 226,3 кг/ч. При увеличении расхода  $L$  сепарационного воздуха через центробежный сепаратор до 300 м<sup>3</sup>/ч выход готового продукта увеличивается до 256,5 кг/ч. Дальнейшее увеличение параметра  $L$  до 350 м<sup>3</sup>/ч определяет выход готового продукта в 274,4 кг/ч. И при максимальном расходе сепарационного воздуха  $L$  производительность сепаратора также максимальна и равна 279,4 кг/ч.

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением расхода воздуха через центробежный сепаратор возрастает и производительность аппарата за счет увеличения давления сепарационного воздуха на частицы разделяемого материала.

При увеличении степени перекрытия шибера  $\mu$  устройства направления сепарационного воздуха в систему аспирации до 100%, частоте вращения  $n$  ротора сепаратора, равной 600 об/мин (см. рис. 1, б, линия 1) и расходе сепарационного воздуха  $L$  в центробежном сепараторе, равном 216 м<sup>3</sup>/ч производительность  $Q$  классификатора составила 341 кг/ч.

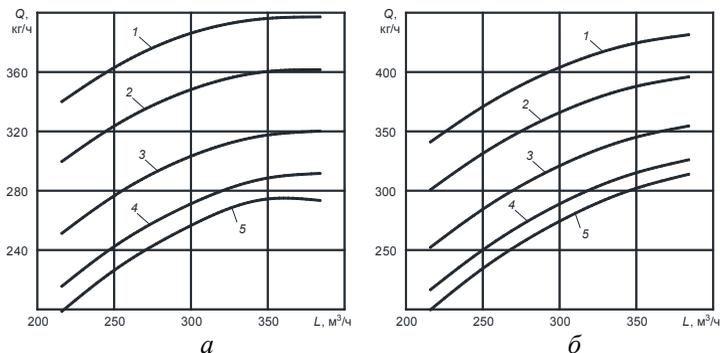


Рисунок 1 – Экспериментальные зависимости  $Q(L)$ : а –  $\mu = 36\%$ ; б –  $\mu = 100\%$ : 1– $n = 600$  об/мин; 2– $n = 760$  об/мин; 3– $n = 1000$  об/мин; 4– $n = 1240$  об/мин; 5– $n = 1400$  об/мин

При максимальном значении частоты вращения  $n$  ротора сепаратора согласно плану эксперимента, равной 1400 об/мин производительность центробежного сепаратора самая маленькая (см, рис. 1, б, линия 5). Например, при минимальном значении параметра  $L$  и  $\mu = 100\%$  производительность центробежного сепаратора составляет 199,6 кг/ч. Увеличивая расход сепарационного воздуха при неизменной частоте вращения до 250 м<sup>3</sup>/ч производительность воздушного классификатора увеличивается на 17,3% до значения, равного 234,1 кг/ч. С увеличением расхода сепарационного воздуха  $L$  в исследуемом аппарате до 300, 350 и 384 м<sup>3</sup>/ч производительность  $Q$  классификатора возросла до значений 274,2, 302 и 313,8 кг/ч, соответственно. Сравнивая значения параметра  $Q$  на обоих графиках (рис. 1, а и б), видим, что при прочих равных условиях производительность центробежного сепаратора тонкодисперсного порошка в режиме его разделения при  $\mu = 36\%$  всегда ниже, чем при  $\mu = 100\%$ . Это можно объяснить тем, что при большем разрежении в

корпусе центробежного сепаратора бóльшая часть мелких частиц порошка переходит в готовый продукт.

С целью определения влияния частоты вращения  $n$  ротора на производительность центробежного сепаратора тонкодисперсного порошка с использованием уравнения регрессии нами получены результаты, представленные на рис. 2, при значениях параметра  $\mu$ , равных 20%, 100% и при различных значениях расхода сепарационного воздуха  $L$ .

При минимальных разрежении  $\mu$  в корпусе сепаратора (20%) и расходе  $L$  сепарационного воздуха, равного  $216 \text{ м}^3/\text{ч}$  (см. рис. 2, *а*, линия 1) и при минимальной частоте вращения ротора, равной 600 об/мин параметр  $Q$  составил 334 кг/ч. С увеличением частоты вращения ротора сепаратора до 760 об/мин выход готового продукта из воздушного классификатора снижается до 293,6 кг/ч. При последовательном увеличении частоты вращения ротора сепаратора с шагом 240 об/мин (до 1000 и 1240 об/мин), производительность центробежного сепаратора снижается, о чем указывают точки, характеризующие эти частоты вращения. Например, при  $n = 1000$  об/мин производительность составляет 245,2 кг/ч, а при  $n = 1240$  об/мин производительность снижается на 17% до 209,6 кг/ч. При максимальном значении частоты вращения, согласно принятого плана эксперимента, равной 1400 об/мин, производительность составляет 192,6 кг/ч.

При максимальном уровне параметра  $L$ , равном  $384 \text{ м}^3/\text{ч}$  наблюдается и максимальная производительность центробежного сепаратора (линия 5) при прочих значениях  $\mu$  и  $n$ . При минимальном значении параметра  $n$ , равном 600 об/мин, производительность центробежного сепаратора составляет 382,6 кг/ч. С увеличением частоты вращения, согласно плану экспериментов, до значений равных 760, 1000, 1240 и 1400 об/мин производительность центробежного сепаратора снижается и соответственно составляет 347, 305,7, 277,1 и 264,9 кг/ч. Анализ представленных зависимостей, характеризующих производительность  $Q$  исследуемого классификатора в зависимости от параметра  $n$  показывает, что при любых прочих условиях увеличение частоты вращения ротора сепаратора снижает производительность  $Q$  центробежного сепаратора.

При максимальном разрежении  $\mu$  в корпусе сепаратора (100%) и минимальном расходе  $L$  сепарационного воздуха, в сравнении с условиями, когда параметр  $\mu$  минимален, наблюдается незначительный рост производительности центробежного сепаратора. Например, при параметре  $L$  равном  $216 \text{ м}^3/\text{ч}$  (см. рис. 2, *б*, линия 1) и при частоте

вращения ротора, равной 600 об/мин производительность сепаратора  $Q$  составляет 340,9 кг/ч. С ростом частоты вращения ротора сепаратора до 760 об/мин производительность сепаратора снижается до 300,6 кг/ч, т.е. на 13,4%. Дальнейшее увеличение параметра  $n$  с шагом 240 об/мин с 760 до 1240 об/мин снижает производительность центробежного сепаратора на 19,2% и 16,5% до, соответственно, 252,2 и 216,5 кг/ч. При максимальном значении частоты вращения ротора сепаратора, равном 1400 об/мин, производительность воздушного классификатора снижается до 199,6 кг/ч.

При максимальном значении расхода сепарационного воздуха  $L$ , равном 384 м<sup>3</sup>/ч (линия 5) производительность центробежного сепаратора в этой серии экспериментов также максимальна и с увеличением частоты вращения ротора сепаратора от 600 до 1400 об/мин, через отсечки в 760, 1000 и 1240 об/мин производительность центробежного сепаратора  $Q$  составляет 431,4, 395,9, 354,5, 325,9 и 313,8 кг/ч.

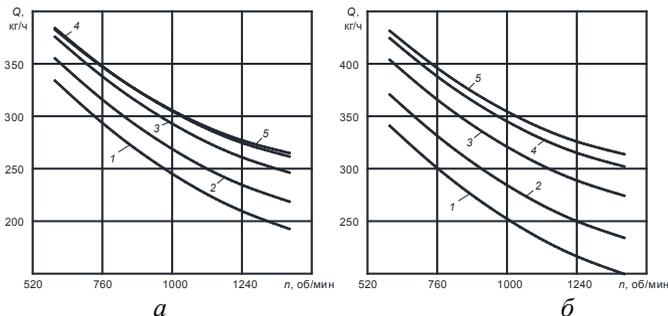


Рисунок 2 – Экспериментальные зависимости  $Q(n)$ :  $a - \mu = 20\%$ ;  
 $b - \mu = 100\%$ : 1– $L=216$  м<sup>3</sup>/ч; 2– $L=250$  м<sup>3</sup>/ч; 3– $L=300$  м<sup>3</sup>/ч;  
 4– $L=350$  м<sup>3</sup>/ч; 5– $L=384$  м<sup>3</sup>/ч

Таким образом, увеличение частоты вращения  $n$  ротора центробежного сепаратора при равных прочих условиях уменьшает производительность исследуемого аппарата в режиме разделения тонкодисперсных порошков.

На рис. 3, представлены результаты исследования степени перекрытия шибера  $\mu$  устройства направления сепарационного воздуха в систему аспирации и различных параметрах  $L$ , равных 250 и 350 м<sup>3</sup>/ч в зависимости от частоты вращения  $n$  ротора сепаратора на производительность центробежного сепаратора тонкодисперсных порошков  $Q$ .

Линия 1 (см. рис. 3, а,) характеризует производительность центробежного сепаратора при  $n = 600$  об/мин и  $L = 250$  м<sup>3</sup>/ч. При минимальной степени перекрытия шиберов  $\mu$  устройства направления сепарационного воздуха в систему аспирации, равной 20% производительность центробежного сепаратора  $Q$  составила 355, 2 кг/ч. С увеличением параметра  $\mu$  до 36% производительность центробежного сепаратора возрастает до 370 кг/ч. Дальнейшее перекрытие шиберов до 60% увеличивает производительность сепаратора на 2% до 370 кг/ч. Максимальная производительность наблюдается при параметре  $\mu$  равном 84% и составляет 372,1 кг/ч. При максимальном уровне перекрытия шиберов, равном 100% производительность центробежного сепаратора снижается на 0,4% до 370,7 кг/ч, видимо за счет того, что при большем уровне разряжения, создаваемом при максимально открытом шибере, большая часть мелкой фракции переходит в грубый продукт, снижая тем самым параметр  $Q$ . Максимальный рост производительности составляет 4,6%.

При максимальной частоте вращения  $n$  ротора сепаратора (см. рис. 3, а, линия 5), при том же значении параметра  $L$  при проведении экспериментальных исследований получены следующие значения  $Q$ : при  $\mu = 20\%$   $Q = 218$  кг/ч; при  $\mu = 36\%$   $Q = 226,3$  кг/ч; при  $\mu = 60\%$   $Q = 233,4$  кг/ч; при  $\mu = 84\%$   $Q = 235,5$  кг/ч; при  $\mu = 100\%$   $Q = 234,1$  кг/ч.

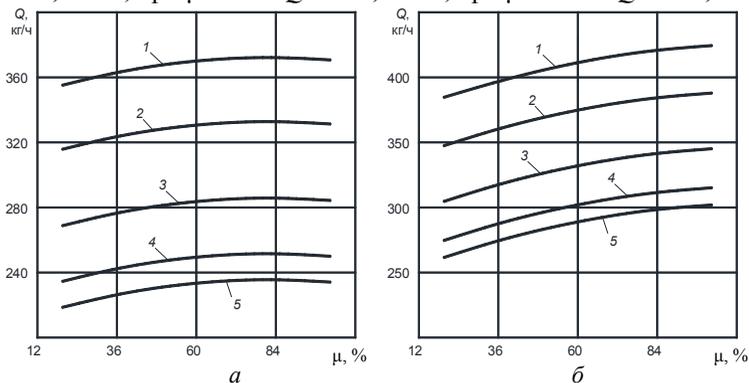


Рисунок 3– Экспериментальные зависимости  $Q$  ( $\mu$ ): а –  $L = 250$  м<sup>3</sup>/ч;

б –  $L = 350$  м<sup>3</sup>/ч; 1– $n = 600$  об/мин; 2– $n = 760$  об/мин;

3– $n = 1000$  об/мин; 4– $n = 1240$  об/мин; 5– $n = 1400$  об/мин

При увеличении расхода  $L$  сепарационного воздуха через сепарационную систему до 350 м<sup>3</sup>/ч (см. рис. 3, б) производительность сепарационной системы в целом растет. При минимальной частоте

вращения ротора сепаратора  $n$ , равной 600 об/мин (линия 1) и параметре  $\mu$ , равном 20% производительность воздушного классификатора составляет 384,7, кг/ч. При увеличении параметра  $\mu$  до 36, 60 и 84% выход готового продукта составляет, соответственно, 396,8, 411,3 и 420,8 кг/ч. При максимальном значении параметра  $\mu$ , равном 100% производительность центробежного сепаратора также максимальна и составляет 424,4 кг/ч, что на 10,3% превышает первоначальное значение  $Q$ .

Такая же тенденция сохраняется при  $n = 1240$  об/мин (см. рис. 3, б, линия 4). При всех выше определенных значениях  $\mu$  с возрастанием, производительность воздушного классификатора соответственно составила 274,7, 287,5, 302, 311,5 и 315, 1 кг/ч. Отклонение между минимальным и максимальным значениями составляет 14,7%. При максимальном параметре  $n$  (1400 об/мин), которую характеризует линия 5 (см. рис. 3, б) при соответствующих значениях  $\mu$  продуктивность центробежного сепаратора составляет соответственно 261,6, 274,4, 288,4, 298,4 и 301,9 кг/ч, а отклонение между минимальным и максимальным значениями составляет 15,4%.

На основании экспериментальных данных, представленных на рис. 1, 2 и 3 для зависимости  $Q = f(L, n, \mu)$  сделаны следующие выводы:

– с увеличением расхода сепарационного воздуха  $L$  через центробежный сепаратор до уровня 384 м<sup>3</sup>/ч наблюдается повышение производительности воздушного классификатора в режиме разделения тонкодисперсного продукта;

– с увеличением частоты вращения  $n$  ротора центробежного сепаратора его производительность в режиме разделения снижается, что объясняется возрастанием усилий действующих на частицы разделяемого материала;

– с увеличением степени перекрытия шиберов  $\mu$  устройства направления сепарационного воздуха в систему аспирации, независимо от других факторов, производительность центробежного сепаратора возрастает.

#### Список литературы:

1. Шарапов Р.Р. Шаровые мельницы замкнутого цикла: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. 270 с.
2. Шарапов Р.Р., Уваров А.А. Аспирационные режимы шаровых мельниц замкнутого цикла и их влияние на кинетику измельчения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2008. № 4. С. 58-60.

## ВЛИЯНИЕ РАСХОДА СВЕЖЕГО ВОЗДУХА НА РАЗРЕЖЕНИЕ В КОРПУСЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО СЕПАРАТОРА

Уваров В.А., д-р техн. наук, проф.,  
Шарапов Ринат Р., аспирант

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

Повышение эффективности разделения является основной задачей всех производителей сепарационной техники. Современные типы воздушных сепараторов обладают весьма высокой эффективностью, которая по утверждению авторов, достигает 70...75% [1,2,4]. При этом различные производители уперлись в этот порог и уже более 2-х десятков лет не могут увеличить эффективность разделения в аппаратах третьего поколения [3,5]. Для исследования процесса разделения порошков создана сепарационная установка (рис. 1), реализующая условия факторного эксперимента.



Рисунок 1 – Динамический центробежный сепаратор

Для повышения эффективности разделения нами предлагается увеличить разрежение в камере сепарации. Для этого необходимо сепарационный воздух, часть или весь направить в аспирационную систему сепаратора. Изменение этого режима возможно установкой шиберов после патрубка сброса сепарационного воздуха и установкой патрубка подачи свежего воздуха, установленного по ходу сепарационного воздуха перед сепаратором. В поисковом эксперименте, проводились исследования влияния на разрежение в камере сепарирования динамического сепаратора степени перекрытия  $\mu$  шиберов смешивающей коробки, которая изменялась от 0 до 100% и расхода сепарационного воздуха  $L$ , изменяемого от 200 до 400 м<sup>3</sup>/ч при постоянной частоте вращения ротора сепаратора, равного 1240 об/мин.

На рис. 2 представлено влияние на разрежение в камере сепарирования динамического сепаратора степени перекрытия  $\mu$  шиберов устройства направления сепарационного воздуха в аспирационную систему и расхода сепарационного воздуха  $L$ .

Линия 1 характеризует разрежение в камере сепарирования динамического сепаратора при расходе сепарационного воздуха  $L$ , равного 200 м<sup>3</sup>/ч в зависимости от различного уровня раскрытия  $\mu$  шиберов смешивающей коробки. Например, при полностью закрытом шибере ( $\mu = 0$ ) разрежение почти равно 0 Па. С увеличением степени перекрытия шиберов до 20%, за счет увеличения подсоса свежего воздуха разрежение в камере сепарирования динамического сепаратора возрастает до 22 Па. Дальнейшее увеличение параметра до  $\mu$  40% увеличивает параметр  $\beta$  до 45 Па. При  $\mu = 60\%$  разрежение  $\beta$  в камере сепаратора составляет 68 Па. При перекрытии шиберов до 80% разрежение возрастает до 83 Па. При максимальном перекрытии шиберов до 100% наблюдается максимальное разрежение в камере сепарирования динамического сепаратора, равное 96 Па. При этом весь сепарационный воздух сбрасывается в сепарационный фильтр.

При увеличении расхода сепарационного воздуха  $L$  до 250 м<sup>3</sup>/ч (линия 2) разрежение в камере сепаратора при перекрытии шиберов возрастает. Например, при расходе воздуха, равном 250 м<sup>3</sup>/ч (линия 1) при полностью закрытом шибере ( $\mu = 0$ ) разрежение, как и в предыдущем случае ( $L = 200$  м<sup>3</sup>/ч) почти равно 0 Па. С увеличением перекрытия шиберов до 20% параметр  $\beta$  увеличивается до 27 Па. Дальнейшее перекрытие шиберов до 40% вызывает рост разрежения в камере сепаратора до 53 Па. С дальнейшим увеличением подачи свежего воздуха, за счет перекрытия шиберов до 60% и 80% разрежение в камере сепаратора увеличивается соответственно до 77 и 100 Па. При

полностью закрытом шибере, равном 100% и максимальном количестве свежего воздуха, подаваемого в сепарационную систему, разрежение в сепарационной камере также максимальное и равно 117 Па.

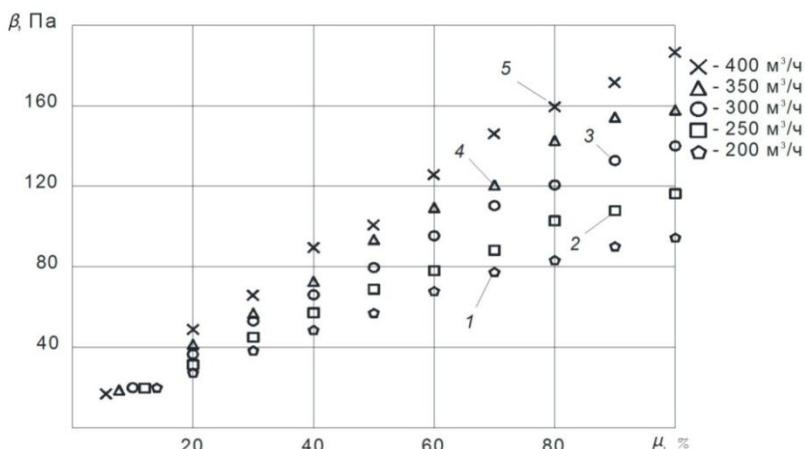


Рисунок 2 – Влияние на разрежение  $\beta$  в камере сепарирования динамического сепаратора степени перекрытия  $\mu$  шибера смешивающей коробки: 1 –  $L = 200 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 2 –  $L = 250 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 3 –  $L = 300 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 4 –  $L = 350 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 5 –  $L = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$

При максимальном расходе сепарационного воздуха  $L$ , равном  $400 \text{ м}^3/\text{ч}$  (линия 5) наблюдается максимальное разрежение в камере сепаратора при прочих других параметрах системы. Например, при максимально закрытом шибере ( $\mu = 0$ ) разрежение в сепарационной камере несколько более 0 Па. С увеличением степени перекрытия шибера до 20%, за счет увеличения подсоса свежего воздуха разрежение в камере сепарирования рассматриваемого сепаратора возрастает до 44 Па. Дальнейшее увеличение параметра до  $\mu$  40% вызывает увеличение параметра  $\beta$  до 88 Па. При  $\mu = 60\%$  разрежение  $\beta$  в камере сепарирования сепаратора составляет 126 Па. При перекрытии шибера до 80% разрежение уже возрастает до 161 Па. При максимальной перекрытии шибера до 100% в камере сепарирования динамического сепаратора наблюдается максимальное разрежение, равное 184 Па. В этом случае весь сепарационный воздух сбрасывается в сепарационный фильтр, и заменяется свежим воздухом, поступающим через патрубок свежего воздуха.

Таким образом, представленные на рис. 2 данные, показывают, что перекрытие шибера, при котором сепарационный воздух частично или полностью направляется в систему аспирации сепаратора и замещается свежим воздухом, поступающим через патрубок, существенным образом влияет на аэродинамические параметры сепарационной системы, что позволяет проектировать центробежные сепараторы, обеспечивающие большую эффективность разделения тонкодисперсных порошков по крупности с гарантированными технологическими свойствами.

Экспериментально установлено, что изменяя количество воздуха, возвращаемого в сепаратор, при неизменном его объеме, проходящем через сепаратор, можно изменять аэродинамические параметры работы самого сепаратора и изменять его технико-экономические показатели, такие как производительность, эффективность разделения, зерновой состав готового продукта и т.д.

#### **Список литературы:**

1. Walter H. Duda. Cement – Data – Book. 1985. Vol. 1. 617 p.
2. Установка пневматической классификации шпата / В.Б. Пономарев, С.Ф. Шишкин, В.Я. Дзюзер, А.В. Катаев // Огнеупоры и техническая керамика. 2010. № 10. С. 28-31.
3. Furukawa T., Onuma E., Misaka T. A new large-scale air-classifier O-SEPA – its principle and operating characteristics. Int. Symp. on powder technology. Kyoto. 1981.
4. Шарапов Р.Р. Шаровые мельницы замкнутого цикла: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. 270с.
5. Шарапов Р.Р., Уваров А.А. Аспирационные режимы шаровых мельниц замкнутого цикла и их влияние на кинетику измельчения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2008. № 4. С. 58-60.

## НАКЛОННАЯ МЕЖКАМЕРНАЯ ПЕРЕГОРОДКА ДЛЯ ТРУБНОЙ СЕПАРАТОРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

**Фадин Ю.М., канд. техн. наук, проф.,**

**Герасименко В.Б., доц.,**

**Лапина О.А., студент,**

**Герасименко А.А., студент**

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

С целью повышения эффективности процесса измельчения за счёт предотвращения перехода измельчаемого материала из одной камеры трубной сепараторной мельницы в другую разработана двойная наклонная межкамерная перегородка для трубной сепараторной мельницы [9].

На рис. 1 показана схема трубной сепараторной мельницы с двухсторонним питанием, в которой установлена двойная наклонная межкамерная перегородка (сечение А-А, сечение Б-Б). На рис. 2 показана схема трубной сепараторной мельницы с двойной наклонной межкамерной перегородкой, повернутой относительно положения мельницы, показанного на рисунке 1 на  $180^\circ$  (половину оборота барабана мельницы) (сечение В-В, сечение Г-Г).

Двойная наклонная межкамерная перегородка состоит из перфорированных элементов 1 и 2, между которыми образована полость 3. В полости 3 на корпусе 4 мельницы выполнены отверстия 5, через которые измельченный материал выходит в бункер 6. Перегородка делит корпус 1 мельницы на две камеры: камеру 7 и камеру 8, в каждой из которых находятся мелющие тела, соответственно 9 и 10. Отверстия 2 на перфорированном элементе 1 располагаются на противоположной стороне по отношению к отверстиям 12, выполненным на перфорированном элементе 2 (рис. 1 А-А, Б-Б). Измельчаемый материал одновременно подаётся в каждую из камер 7 и 8 мельницы через полые цапфы, соответственно 13 и 14.

Через половину оборота корпуса мельницы перегородка займёт положение, показанное на рис. 2. При этом отверстия 2 на перфорированном элементе 1 займут верхнее положение (сечение В-В), а на перфорированном элементе 2 (отверстия 12) займут нижнее положение в сечении Г-Г.

При вращении корпуса 1 мельницы с наклонной межкамерной перегородкой, вследствие изменения длины нижней рабочей части

каждой из камер, уровень мелющих тел в каждой из камер в течение цикла изменяется от минимального до максимального. Вследствие этого зона контакта мелющих тел 9, находящихся в камере 7 с перфорированным элементом 1 перегородки, ограничена поверхностью 15. Зона контакта мелющих тел 10, находящихся в камере 8 с перфорированным элементом 2, ограничена поверхностью 16 (в сечении Б-Б). Причём форма поверхности контактов мелющих тел с каждым из перфорированных элементов 1 и 2 симметрична, но расположена на противоположных участках перфорированных элементов, как показано на рис. 1.

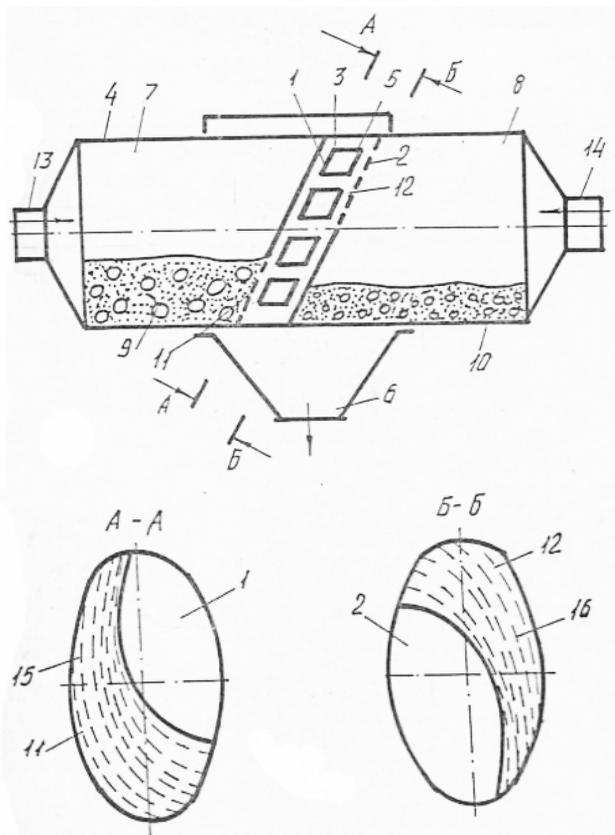


Рисунок 1 – Схема трубной сепараторной мельницы с двухсторонним питанием

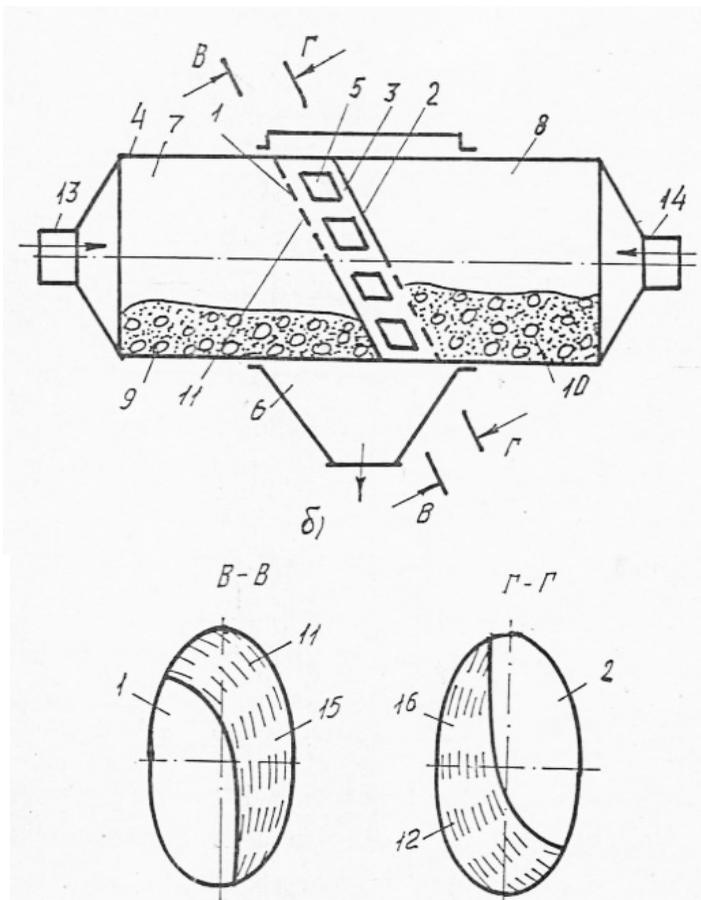


Рисунок 2 – Схема трубной сепараторной мельницы с двойной наклонной межкамерной перегородкой

С целью создания условий одностороннего прохождения измельчаемого материала через каждый из перфорированных элементов 1 и 2 перегородки отверстия 11 и 12 выполнены только в зонах контакта мелющих тел 9 и 10 с поверхностью перфорированных элементов, соответственно зоны 15 и 16 (сечения А-А, Б-Б).

В положении корпуса мельницы, показанном на рис. 1, измельчаемый материал из камеры 7 через отверстия 11 в

перфорированном элементе 1 перемещается в плоскость 3, откуда через отверстия 5 поступает в бункер 6. В камеру 8 из камеры 7 и полости 3 измельчаемый материал не проходит, так как в данном и любом другом положении корпуса мельницы напротив отверстий 2 в перфорированном элементе 1 находится зона перфорированного элемента 2, на которой отверстия отсутствуют.

В положении корпуса мельницы, показанном на рис. 2 измельчаемый материал из камеры 8 через отверстия 12 в перфорированном элементе 2 поступает в полость 3, а затем через отверстия 5 в бункер 6. Из камеры 8 и полости 3 измельчаемый материал не проходит в камеру 7, так как в данном и любом другом положении корпуса 4 мельницы напротив отверстия 12 в перфорированном элементе 1 всегда находится зона без отверстий.

Вследствие этого измельчаемый материал одновременно из обеих камер 7 и 8 мельницы поступает в полость 3 и оттуда через отверстия 5 выводится в бункер 6. Предотвращение перехода измельчаемого материала из камеры 7 в камеру 8, и наоборот, повышает эффективность процесса измельчения, предотвращается переизмельчение материала.

Кроме этого, каждый из перфорированных элементов 1 и 2 в соответствующей камере 7 и 8 мельницы осуществляют внутримельничную классификацию частиц измельчаемого материала. Готовый продукт проходит через отверстия 11 и 12 в полость 3 и затем через отверстия 5 в бункер 6, а недоизмельченный материал скатывается вдоль поверхности перфорированных элементов 1 и 2, возвращаясь в соответствующие камеры 7 и 8 на доизмельчение.

Максимальное использование внутреннего объема корпуса мельницы достигается при минимальном расстоянии между перфорированными элементами 1 и 2 перегородки, которое определяется размером отверстий 5 в корпусе 4, суммарная площадь которых должна обеспечивать беспрепятственное прохождение измельчаемого материала из камер 7 и 8, полости 3 в бункер 6.

Если отверстия 2 на перфорированном элементе 1 расположены в той же зоне, что и отверстия 12 на перфорированном элементе 2, то измельчаемый материал из камеры 7 и полости 3 будет переходить через отверстия 12 в перфорированном элементе 2 в камеру 8. При этом измельчаемый материал из камеры 8 в полость 3 не поступает. Это существенно снижает эффективность процесса измельчения материала в трубной мельнице с двухсторонним питанием.

Если отверстия 12 на перфорированном элементе 2 расположены в той же зоне, что и отверстия 11 на перфорированном элементе 1, то

измельчаемый материал из камеры 8 и полости 3 будет переходить через отверстия 11 в перфорированном элементе 1 в камеру 7. При этом измельчаемый материал из камеры 7 в полость 3 не поступает. Это также существенно снижает эффективность процесса измельчения вследствие забивания материалом 7 (в первом случае забивалась измельчаемым материалом камера 8).

Таким образом, выполнение отверстий 11 и 12 на каждом из перфорированных элементов происходит по одинаковой схеме. Например, если отверстия на перфорированном элементе 2 (сечение Б-Б) выполнены в той же зоне, что и отверстия 2 на перфорированном элементе 1 (сечение А-А), и наоборот, то измельчаемый материал перемещается только в одном направлении из камеры 7 в камеру 8, и наоборот. Одновременно измельчаемый материал из камер 7 и 8 в полость 3 не поступает. Это затрудняет процесс измельчения и эффективность работы трубной сепараторной мельницы при её двухстороннем питании.

Использование изобретения особенно эффективно при помоле многокомпонентных материалов, например цемента, включающего клинкер (40-60%) и шлак (60-40%), которые обладают существенно различной размолоспособностью. В этом случае один из компонентов направляется в одну камеру, а другой в другую, где происходит их независимое измельчение. При помоле шлакопортландцемента в лабораторной мельнице при её двухстороннем питании производительность мельницы возросла на 20%.

Трубная сепараторная мельница, оснащённая двойной наклонной межкамерной перегородкой, обеспечивает предварительную классификацию измельчаемого материала, что снижает нагрузку на сепаратор, позволяет интенсифицировать аспирационный режим, повысить пропускную способность, что в целом интенсифицирует процесс измельчения.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Одним из направлений совершенствования трубных шаровых мельниц является использование наклонных перегородок для придания мелющей загрузке поперечно-продольного движения мелющих тел [1-8]. В мире в основном используются трубные шаровые мельницы замкнутого цикла с сепараторами. Нами предложена двойная наклонная межкамерная перегородка для сепараторных трубных шаровых мельниц с целью отбора готового материала посередине мельницы, так как количество готового материала более 50% и он препятствует дальнейшему измельчению.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № НК-14-41-08042/14р\_офи\_м.*

#### **Список литературы:**

1. Богданов В.С. Барабанные мельницы с поперечно-продольным движением мелющих тел: Автореф. дис. ... док. техн. наук: 05.02.16 / В. С. Богданов. Белгород: БТИСМ, 1986 48 с.
2. Математическое описание движения загрузки в ТШМ при сверхкритических скоростях вращения барабана / В.С. Богданов, Ю.М. Фадин, В.П. Воронов, П.Н. Вентелеенко // Вестник БГТУ им В.Г. Шухова. 2008. № 3. С.41-43.
3. Математическое описание движения мелющих тел в области влияния наклонной перегородки / В.С. Богданов, Ю.М. Фадин, С.С. Латышев, Д.В. Богданов // МНПК «Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройиндустрии», ч.3 «Эффективные материалы, технологии и машины в строительстве». Белгород, 2010. С. 38-42.
4. О возможности продольных перемещений трубных мельниц с несложными перегородками / В.С. Богданов, Н.Д. Воробьев, В.С. Платонов, И.Н. Шевченко // Цемент. 1985. №12. С. 17-19.
5. Повышение эффективности работы шаровых барабанных мельниц / В.С. Богданов, Ю.М. Фадин, С.С. Латышев, Д.В. Богданов, О.Р. Соловьев // Строительные дорожные машины. 2006. № 11. С. 21-23.
6. Фадин Ю.М. Расчет максимального радиуса зоны влияния наклонной перегородки в трубной шаровой мельнице // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 2. С. 82-84.
7. Фадин Ю.М. Расчет средневзвешенного диаметра мелющего шара трубной шаровой мельницы при водопадном режиме работы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. №1. С. 78-80.
8. Фадин Ю.М. Расчет энергии, передаваемой шароматериальной загрузкой наклонной перегородки трубной шаровой мельницы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 4. С. 62-64.
9. А.с. №1814919 (СССР) «Межкамерная перегородка трубной мельницы» (Богданов В.С., Фадин Ю.М., Юдин К.А., Ельцов М.Ю.), Б. И. №18, 1993.

## МЕЖКАМЕРНАЯ ПЕРЕГОРОДКА ТРУБНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

**Фадин Ю.М., канд. техн. наук, проф.,**

**Латышев С.С., канд. техн. наук,**

**Донецкий Р.В., студент,**

**Лапина О.А., студент**

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

Целью предлагаемого решения является повышение эффективности процесса измельчения материалов и качества готовой продукции. Указанная цель достигается тем, что сегмент загрузочной части расположен под углом 135-150° к продольной оси барабана, сегмент разгрузочной части установлен вертикально и оба они соединены горизонтальной секцией, причем высота сегментов соответственно равна 0,5-0,6 и 0,5-0,4D мельницы, а длина горизонтальной секции равна 1-1,4D корпуса мельницы.

Предлагаемая перегородка содержит три элемента – наклонный сегмент у загрузочной части, вертикальный сегмент у разгрузочной части и соединяющую их горизонтальную секцию. Поэтому возникают новые свойства: наряду с возникающим продольно-поперечным перемещением шароматериальной загрузки образуется три четко выраженных участка, воспроизводящих соответственно три скоростных режима движения загрузки – водопадный с продольно-поперечным перемещением, смешанный режим, каскадный режим с малой продольно-поперечной составляющей. Загрузка осуществляет продольно-поперечное перемещение, но не во взаимно противоположных направлениях навстречу друг другу и, естественно, значительно снижаются колебания напряжений на опорах мельницы, благодаря наличию горизонтальной перфорированной секции обеспечивается большее уравнивание. Существенно меняется кинематика движения мелющих тел, увеличивается вынос готового продукта аспирационным воздухом, предотвращая излишнюю агломерацию, а также снижается гидравлическое сопротивление и нагрузка на вентилятор, что в совокупности приводит к повышению эффективности процесса измельчения. На рис 3.а представлена схема трубной шаровой мельницы с трехсекционной перегородкой. На рис. 1.б представлена схема трубной мельницы через 1/2 оборота барабана мельницы.

Трубная мельница состоит из корпуса 1, загрузочной крышки 2, разгрузочной крышки 3, наклонного эллипсного сегмента 4, вертикального сегмента 5, горизонтальной секции 6.

Наклонный эллипсный сегмент 4 и вертикальный сегмент 5 состоят из набора прутьев, расположенных параллельно и сваренных между собой, ширина щелей между прутьями равна 8-12 мм. Горизонтальная секция 6 может изготавливаться сварной – из стального прутка или литой – из набора отдельных деталей, ширина щелей аналогична ширине щелей сегментов. Крепление прутков и деталей осуществляется любым известным способом.

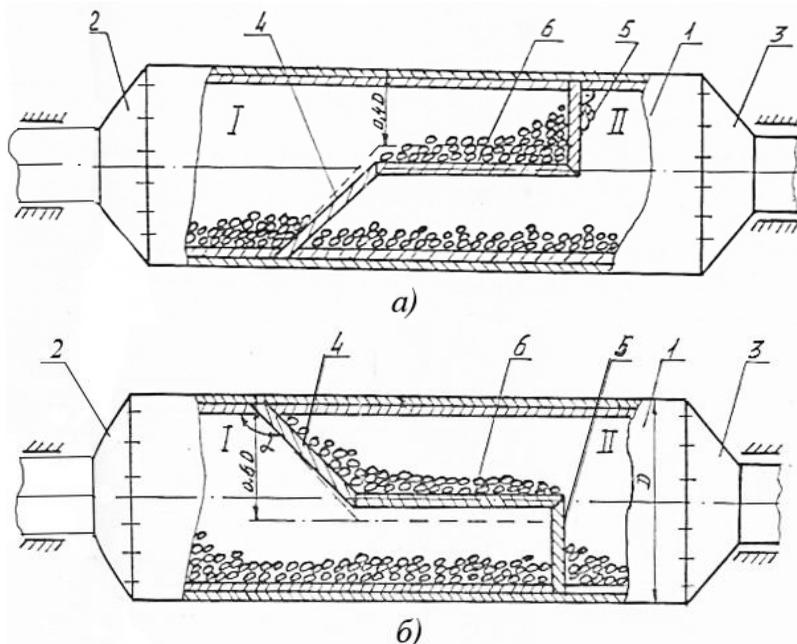


Рисунок 1 – Схема трубной шаровой мельницы с трехсекционной перегородкой

Угол наклона эллипсного сегмента 4 равен  $\alpha = 135-150^\circ$  к продольной оси барабана. Если угол  $\alpha < 135^\circ$ , например,  $\alpha = 130^\circ$ , то коэффициент сцепления мелющих тел с сегментом уменьшается настолько, что продольно-поперечное движение мелющих тел незначительно и существенного влияния на эффективность измельчения

не оказывает. Если  $\alpha > 150^\circ$ , например,  $\alpha = 155^\circ$ , то зона влияния наклонного сегмента увеличивается так, что мелющие тела действуют на загрузочную крышку мельницы и попадают в цапфу, закрывая проход поступающему материалу. При этом отодвинуть межкамерную перегородку трубной мельницы нельзя, так как расстояние от наклонного сегмента до загрузочной крышки является оптимальным и определяется по формуле для относительного радиуса зоны влияния наклонной перегородки

$$\lambda_p = \frac{l_p}{R}, \quad (1.1)$$

$$l_p = \frac{l_{pa} + l_{pi}}{2}$$

где

$l_{pa}, l_{pi}$  – соответственно максимальное и минимальное значение радиуса зоны влияния наклонной перегородки, м;

$R$  – внутренний радиус корпуса мельницы, м.

Наличие перфорированной горизонтальной секции, соединяющей два сегмента, служит не только для того, чтобы разделить мельницу на две камеры, т.е. разделить мелющие тела, а в основном для более интенсивного истирания измельчаемого материала, так как за один оборот мельницы на измельчаемый материал на этом участке воздействуют мелющие тела первой и второй камеры, но и способствует выносу готового продукта аспирационным воздухом.

Сегмент 5 установлен вертикально. Даже при незначительном его отклонении от вертикали (например,  $\beta = 88^\circ$  или  $\beta = 92^\circ$ ) закручивается помол материала вследствие возрастания скорости продвижения материала по длине мельницы. Движение мелющей загрузки преимущественно должно быть направлено в поперечном направлении при незначительном продольно-поперечном движении, возникающем при скатывании части мелющих тел с горизонтальной секции.

При высоте сегмента 5 большее  $0,5D$ , мелющие тела будут падать с горизонтального участка, что приведет к переизмельчению материала, продольное движение мелющих тел незначительно. При уменьшении высоты сегмента 5 до  $0,34D$ , продольного движения мелющих тел практически нет, т.к. высота мелющих тел смешанного участка приблизительно равна высоте мелющих тел, находящихся у вертикального сегмента, поэтому здесь преобладает поперечное движение мелющих тел.

Высота наклонного эллипсного сегмента 4 находится в пределах  $0,5-0,6D$ , что способствует увеличению продольно-поперечного движения мелющей загрузки первой камеры, и, соответственно, увеличению воздействия мелющих тел на измельчаемый материал и повышения эффективности использования площади просеивающей поверхности. Увеличение высоты наклонного сегмента 4 с  $0,5$  до  $0,6D$ , целесообразно при трудноразмалываемом материале (клинкере). В этом случае необходимо уменьшить скорость его продвижения по длине мельницы. При высоте наклонного сегмента 4 более  $0,6D$ , уменьшается высота сегмента 5, образуются застойные зоны, помол загрубляется.

Длина горизонтальной секции выбирается равной  $1-1,4$  диаметра барабана мельницы. В процессе работы материал в мельнице располагается по участкам согласно режима работы мелющей загрузки. В случае длины участка со смешанным режимом измельчения меньшей диаметра барабана мельницы ( $L < D$ ) нарушается позонное воздействие мелющей загрузки на материал, не происходит интенсификации процесса измельчения, снижается избирательность режимов работы мелющей загрузки (водопадного, смешанного, каскадного). При длине горизонтальной секции более  $1,4D$ , соответственно уменьшаются длины участков с водопадным или каскадным режимом измельчения, что приведет к загрузлению помола (см. акт лабораторных испытаний).

При получении цемента использование трубной шаровой мельницы с трехэлементной перегородкой дает прирост производительности.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В России в 2013 году было произведено свыше 65 млн. т. цемента, – это самый высокий показатель с 1991 года. Совершенствование трубных шаровых мельниц идёт по нескольким направлениям. Одно из которых это совершенствование внутримельничных устройств [6].

### **Список литературы:**

1. Новое внутримельничное классифицирующее устройство для шаровых трубных мельниц / В.С. Богданов, Ю.М. Фадин, В.Г. Дмитриенко, С.С. Латышев, И.С. Сыроватский // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2003. № 6. Ч. III. С. 254-257.
2. Богданов В.С., Шарапов Р.Р. Особенности измельчения клинкера в трубных шаровых мельницах замкнутого цикла измельчения с внутрибарабанными энергообменными устройствами // Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном материаловедении: Сб. докл. Всес. конф. Белгород, 1989. С. 5-6.

3. Повышение эффективности работы трубных мельниц открытого цикла измельчения / В.С. Богданов, Ю.М. Фадин, С.С. Латышев и др. // Цемент и его применение. 2005. №1. С. 49-53.
4. Богданов В.С., Фадин Ю.М., Латышев С.С. Трубная шаровая мельница с двухступенчатым внутримельничным устройством // «Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов». Белгород, 2010. С. 82-83.
5. Шаровая трубная мельница с внутримельничным рециркуляционным устройством / Ю.М. Фадин, С.С. Латышев А.П. Галицкий, С.Н. Богомазов // Межвузовский сборник статей. Белгород, 2008. С. 99-101.
6. А. С. №1720187 (СССР) «Двойная наклонная межкамерная перегородка для трубной сепараторной мельницы» (Богданов В.С., Богданов Н.С., Севостьянов В.С., Шиманский В.Е., Фадин Е.М.).

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОПОРНОГО УЗЛА МОДУЛЯ НА СМЕЩЕНИЕ ОСИ ВОССТАНАВЛИВАЕМОГО ВАЛА

**Федоренко М.А., д-р техн. наук, проф.,**

**Маркова О.В., аспирант**

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

При обработке крупногабаритных валов передвижными станочными модулями [2-5] необходимо предварительно рассчитать погрешности установки режущего инструмента относительно оси вращения восстанавливаемого вала. Неопределенность расположения оси вала и режущего инструмента приводит при ремонте к нарушению круглости обработанной поверхности. Несущие узлы роликов в динамическом и статическом состоянии под действием нагрузки деформируются и необходимо учитывать величину этой деформации, её влияние на формирование круглости и определить методику расчета.

Ролик опорного узла станочного модуля включает в себя наружную обойму, подшипник и вал. При сборке этот узел имеет зазоры, в результате чего при установке восстанавливаемого вала на ролики, в связи с большой его массой, происходит их смещение, величина которого влияет на точность установки резца из-за смещения оси.

Перемещения ролика опорного узла станочного модуля (рис. 1) складываются из  $\Delta_0 = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$ , где  $\Delta_1$  – перемещение наружной обоймы к наружному кольцу подшипника;  $\Delta_2$  – перемещение наружного кольца и шариков к внутреннему кольцу подшипника;  $\Delta_3$  – перемещение внутреннего кольца к валу опоры.

Действующая на подшипниках радиальная нагрузка воспринимается телами качения в области, ограниченной дугой не более  $180^\circ$ .

При определении нагрузок, действующих на каждое тело качения, нужно принять следующие допущения: геометрические размеры колец и тел качения выполнены точно, в соответствии с требованиями, установленными нормативно-технической документацией; радиальный зазор в подшипнике можно принять равным нулю; кольца подшипника не деформируются под действием нагрузки; тела качения расположены симметрично, и таким образом, воспринимают одинаковую нагрузку.

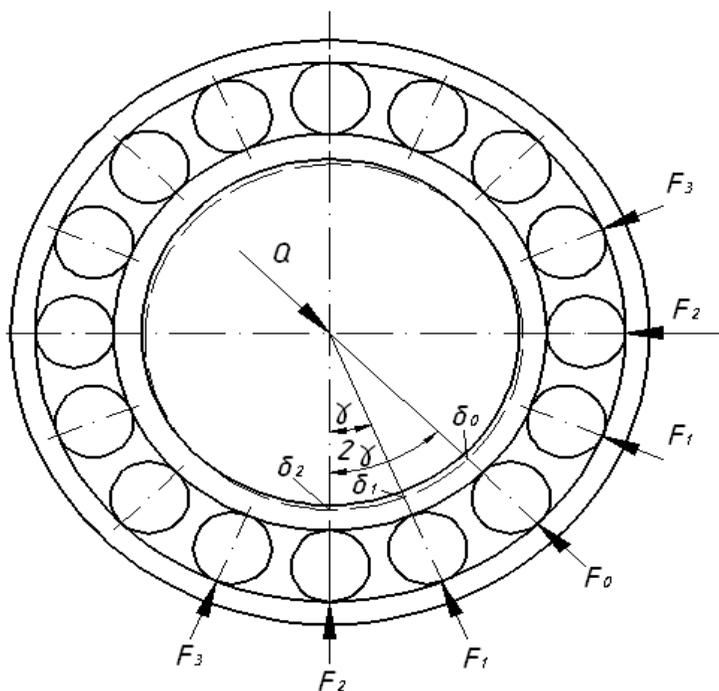


Рисунок 1 – Деформация колец и распределение сил по шарикам

В результате уравнение значения силы, действующей на тела качения будет следующего вида:

$$Q = F_0 \left( 1 + 2 \sum_{i=1}^n \cos^2 i\gamma \right)$$

На основании вышеприведенного уравнения имеем:

$$F_0 = \frac{kQ}{N}$$

$$F_i = \frac{kQ}{N} \cos^2 i\gamma$$

Упругие перемещения в соединениях корпус – наружное кольцо и вал – внутреннее кольцо, определяются по следующим формулам:

$$\Delta_2 = 2qk / \pi D, \Delta_3 = 2qk / \pi d,$$

где  $q = Q/B$  – нагрузка на единицу ширины каждого кольца;

$d, D$  – внутренний и наружный диаметры подшипника;

$k = 0,5C / p_i^{0.5}$  – коэффициент податливости, который

определяется в зависимости от усилия  $P_i$  запрессовки;

$C$  – коэффициент, который характеризует плоский стык.

Сила запрессовки подсчитывается по формуле:

$$\text{для вала} - F_B = \mu p_B \pi d B,$$

$$\text{для корпуса} - F_K = \mu p_K \pi D B,$$

где  $\mu$  – коэффициент трения сопрягаемых функциональных поверхностей;  $p_B, p_K$  – давления посадки на вал и в корпус, которые можно определить по формулам [1]

$$p_B = (H_B / 2d) \left[ 1 - (d / d_1)^2 \right] \cdot 2.08 \cdot 10^5,$$

$$p_K = (H_K / 2D) \left[ 1 - (D_2 / D)^2 \right] \cdot 2.08 \cdot 10^5,$$

где  $d_1$  и  $D_2$  – соответственно наружный диаметр внутреннего кольца и внутренний диаметр наружного кольца подшипника.

Средний натяг при установке подшипника рассчитывается по формуле:

$$H = (H_{\max} + H_{\min}) / 2.$$

Таким образом, общее перемещение опорного узла станочного модуля будет равно сумме всех перемещений в этом узле. В зоне контакта вала с опорными роликами возникают значительные напряжения.

Условия равновесия внутреннего кольца подшипника, нагруженного от вала радиальной силой  $Q$ , которая определяется по формуле:

$$Q = F_0 + 2F_1 \cos \gamma + 2F_2 \cos 2\gamma + \dots + 2F_n \cos n\gamma,$$

где  $F_i$  – силы, действующие на кольцо от  $i$ -го тела качения;  $\gamma$  – угловой шаг тел качения.

Под действием радиальной нагрузки  $Q$  в местах сопряжения тел качения с кольцами возникнут упругие деформации, в результате которых внутреннее кольцо подшипника переместится по направлению действия нагрузки  $Q$  на некоторую величину  $\Delta_0$ . Упругие деформации дорожек качения колец и тел качения в местах их взаимного контакта можно определить по уравнению Герца:

$$\delta_i = cF^{\frac{3}{2}},$$

для шарикоподшипников:

где  $c$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от модуля упругости и коэффициента Пуассона, материала сопряженных деталей и кривизны их поверхностей в начальной точке контакта. На перемещение  $i$ -го тела качения оказывает влияние перемещение центрального тела, они связаны между собой соотношением:

$$\Delta_i = \Delta_0 \cos i\gamma$$

Сопряженные поверхности деталей должны быть изготовлены с высокой точностью, прочностью и установленной, согласно чертежа, высокой поверхностной твердостью.

В связи с тем, что подшипники устанавливаются на ступени валов, то к сопрягаемым посадочным поверхностям предъявляются жесткие требования по точности изготовления: овальность и конусность посадочных мест не должны превышать половины величины допуска на диаметр, а шероховатость поверхности ступеней вала, которые являются посадочными поверхностями под подшипник, должна находиться в пределах 0.32...1.25 мкм.

Внешние нагрузки передаются на вал от сопрягаемых деталей. Конструкция станочного модуля рассчитана для обработки крупногабаритных деталей, имеющих большую массу, поэтому каждый опорный узел имеет два подшипника. Следовательно, смещение вала можно записать [1]

$$\delta = \left[ K + \frac{0.1}{bd} \left( 1 + \frac{d}{D} \right) \right] P,$$

$$K = \frac{0.7 + 0.2d}{\sqrt[3]{P}};$$

где  $K$  – коэффициент;

$d$  и  $D$  – соответственно внутренний и наружный диаметр колец подшипника;

$P$  – радиальная нагрузка.

Результаты расчетов деформации опорного узла приведены в табл.1.

Таблица 1 – Расчет деформации опорного узла станочного модуля

P=2000	$k_1$	1.246	1.167	1.484	1.643	1.484	1.643
P=3000	$k_2$	1.089	1.019	1.297	1.435	1.297	1.435
P=4000	$k_3$	0.989	0.926	1.178	1.304	1.178	1.304
	$d/D_i$	0.714	0.636	0.643	0.667	0.563	0.556
	$b/d_i$	0.213	0.186	0.267	0.240	0.333	0.340
	$b_i d_i$	1200	910	2160	2400	2700	3400
P=2000	$\Delta_1$	0.356	0.420	0.226	0.228	0.172	0.150
P=3000	$\Delta_2$	0.467	0.550	0.296	0.299	0.225	0.197
P=4000	$\Delta_3$	0.565	0.666	0.358	0.362	0.273	0.239

На основании проведенных расчетов был построен график (рис. 2).

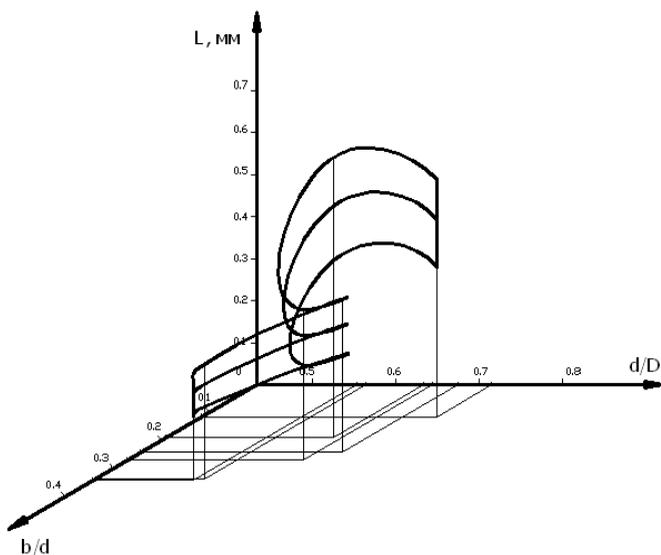


Рисунок 2 – График деформации опорного узла

Итак, зная величины смещений в подшипнике, можно провести расчет линии установки режущего инструмента, при условии ее прохождения через ось вращения вала, чем обеспечить точность обработки.

#### **Список литературы:**

1. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1979. 702 с.
2. Патент на изобретение № 2003113096/02, 05.05.2003. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А. Способ обработки крупногабаритных валов без их демонтажа. Патент России № 2242346.2004.
3. Патент на полезную модель № 2008104754/22, 07.02.2008. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Федоренко Т.М. Станок для обработки цапф помольных мельниц. Патент России № 75339.2008.
4. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Федоренко Т.М. Исследование обеспечения необходимой шероховатости поверхности крупногабаритных вращающихся деталей приставными станочными модулями // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2008. № 2. С. 35-38.
5. Федоренко М.А., Федоренко Т.М., Бондаренко Ю.А. Восстановление работоспособности цапф помольных мельниц с применением переносного станка // Технология машиностроения. 2009. № 3. С. 20-21.

## ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕПАРАТОРА КИПАЮЩЕГО СЛОЯ

**Харламов Е.В., ст. преподаватель,  
Шарапов Р.Р., д-р техн. наук, проф.,  
Харламова В.В., ст. преподаватель**

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

Обогащение магнетитовых кварцитов на горно-обогатительных комбинатах Курской магнитной аномалии сопровождается накоплением огромных количеств «хвостов» обогащения – нерудных материалов с остаточным содержанием магнита до 7-8% [1].

Образуемые этими материалами отвалы наносят серьезный ущерб окружающей среде. Ликвидация и утилизация отвалов горно-обогатительного производства представляет собой актуальную, но очень сложную проблему. Одним из направлений ее решения является использование отходов обогащения железной руды, содержащих до 93% тонкоизмельченного кварцевого песка (кварцита) в строительстве, в частности – дорожном, а также в производстве строительных материалов и изделий. Получаемый железорудный концентрат может использоваться как наполнитель и пигмент при изготовлении красок специального назначения [2]. Для разделения железосодержащего минерального сырья разработан сепаратор кипящего слоя [3-7], в котором магнитное извлечение магнетитовых частиц происходит из кипящего слоя исходного сыпучего материала (рис. 1).

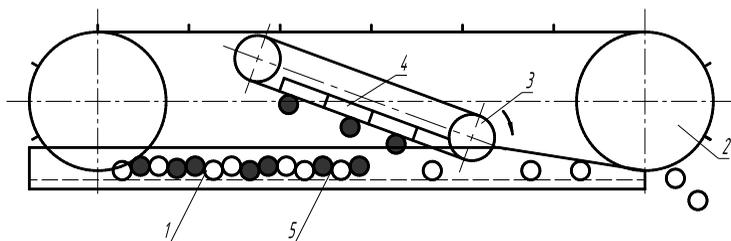


Рисунок 1 – Конструктивно-технологическая схема сепаратора кипящего слоя: 1 – аэрожелоб; 2 – скребковый конвейер; 3 – транспортирующий конвейер; 4 – магнитная система; 5 – кипящий слой материала; ● – частицы магнетита; ○ – частицы кварцита

Предложенный способ разделения железосодержащего сыпучего материала имеет ряд существенных преимуществ:

- процесс разделения происходит в воздушной среде (сухое разделение), что позволяет обойтись без сложных систем водоснабжения и шламового хозяйства;

- аэродинамическое псевдооживление материала из-за отсутствия движущихся деталей намного проще и надежнее вибропсевдооживления;

- простая система управления процессом разделения путем изменения параметров загрузочного устройства, угла наклона магнитной системы и характеристик кипящего слоя.

Параметры кипящего слоя сыпучего материала тесно связаны с физико-механическими свойствами частиц [8-11]. Разделяемый материал представляет собой двухкомпонентную механическую смесь частиц магнетита и немагнитных частиц кварцита (песка).

Извлекающая способность сепаратора кипящего слоя сухого разделения зависит от характеристик магнитной системы, физико-механических свойств частиц разделяемой смеси, а также геометрических параметров рабочей зоны. Коэффициент извлечения магнитных частиц  $\eta$  определяется соотношением их массопотоков на входе в активную зону  $G(x_A)$  и на выходе из нее  $G(x_B)$  (рис. 2):

$$\eta = 1 - \frac{G(x_B)}{G(x_A)} \quad (1)$$

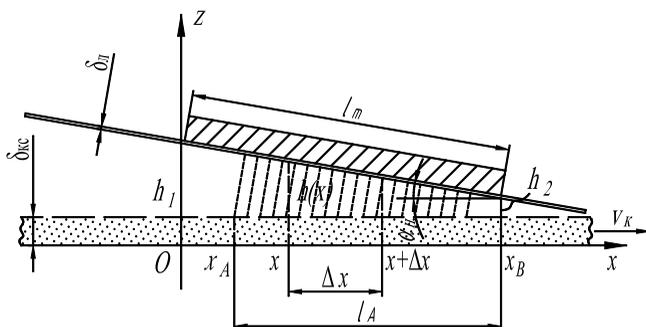


Рисунок 2 – Расчетная схема для вывода коэффициента извлечения магнетитовых частиц

Рассмотрим продольное сечение рабочей зоны сепаратора.

По транспортирующему лотку в рабочую зону сепаратора кипящего слоя сухого разделения со скоростью  $v_k$  поступает слой минеральной смеси с содержанием магнитных частиц  $f_M$ . Рассмотрим фракцию извлекаемых магнитных частиц со средним размером  $d$ . Начиная с отметки  $x_A$  происходит извлечение этих частиц и заполнение ими пространства между кипящим слоем материала и лентой транспортного конвейера.

Концентрация магнитных частиц в аэродисперсном потоке магнитных частиц распределена по высоте рабочей зоны очень неравномерно: она резко убывает от максимального значения в кипящем слое до минимального значения в зоне осаждения на ленту транспортного конвейера. Будем считать, что распределение концентрации частиц во всех поперечных сечениях рабочей зоны одинаково, а концентрация магнитных частиц в зоне осаждения  $C_{oc}$  вдоль всего активного участка выражается одним и тем же соотношением:

$$C_{oc} = \chi C, \quad (2)$$

где  $C$  – средняя по поперечному сечению концентрация частиц,  $\chi \ll 1$  эмпирический коэффициент неоднородности распределения частиц, который определяется путем обработки экспериментальных данных.

Рассмотрим часть рабочей зоны сепаратора кипящего слоя сухого разделения, находящуюся между поперечными сечениями, проходящими через точки  $x$  и  $x+\Delta x$  (см. рис. 2). В результате осаждения магнитных частиц их концентрация снижается от  $C(x)$  до  $C(x+\Delta x)$ . Запишем уравнение материального баланса магнитных частиц для выделенной части рабочей зоны:

$$G(x) - G(x + \Delta x) = \chi C(x) v_{oc} b \frac{\Delta x}{\cos \alpha_n} = \chi \frac{G(x) v_{oc} \Delta x}{h(x) v_k \cos \alpha_n}. \quad (3)$$

Здесь  $\Delta x / \cos \alpha_n$  – отрезок ленты транспортирующего конвейера, соответствующий  $\Delta x$ ,  $G(x)$  – массопоток магнитных частиц, проходящий через поперечное сечение рабочей зоны, соответствующее координате  $x$ :

$$G(x) = C(x) b h(x) v_k, \quad (4)$$

где  $h(x)$  – высота этого сечения:

$$h(x) = h_1 - x \operatorname{tg} \alpha_n, \quad (5)$$

где  $b$  – ширина поперечного сечения.

Выразив изменение массопотока магнитных частиц через его дифференциал:

$$G(x) - G(x + \Delta x) = -(G(x + \Delta x) - G(x)) \approx -dG(x), \quad (6)$$

получим:

$$\frac{dG}{G} = -\frac{\chi v_{oc} dx}{v_k (h_1 - x \operatorname{tg} \alpha) \cos \alpha_n}. \quad (7)$$

После интегрирования получим окончательное выражение для фракционного коэффициента извлечения магнитных частиц в экспериментальном сепараторе кипящего слоя сухого разделения:

$$\eta(d) = 1 - \left( \frac{0,015}{1,115\delta - \frac{\ln(0,183 \cos \alpha)}{52,34 \cos \alpha}} \right)^{\frac{4,472 \cdot 10^{-4} d^2 (50\delta^2 - 0,15\delta + 0,0224)}{v_k \sin \alpha_n}}. \quad (8)$$

Для исследования зависимости полного коэффициента извлечения магнитных частиц от толщины исходного слоя разделяемой смеси положим в формуле (8)  $d = 29,8$  мкм,  $\alpha = 15^\circ$ ,  $v_k = 0,02$  м/с. Тогда получим:

$$\eta = 1 - \left( \frac{0,015}{1,115\delta + 0,034} \right)^{76,72(50\delta^2 - 0,15\delta + 0,0224)}. \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что с увеличением толщины слоя разделяемой смеси коэффициент извлечения возрастает (рис. 3). Это объясняется как увеличением магнитодвижущей силы, так и повышением концентрации частиц в зоне осаждения. Максимальное расхождение находится в точке  $\delta = 3$  мм и составляет 5,9%.

Зависимость коэффициента извлечения магнитных частиц от скорости движения скребкового конвейера следует из формулы (8) при  $d = 29,8$  мкм,  $\sigma = 0,008$  м,  $\alpha_n = 15^\circ$ :

$$\eta = 1 - 0,347 \frac{0,037}{v_k}. \quad (10)$$

Согласно формулы (10) коэффициент извлечения магнитных частиц с увеличением скорости перемещения скребкового конвейера падает (рис. 4), что объясняется уменьшением времени пребывания смеси в активной зоне сепаратора кипящего слоя сухого разделения. Максимальное расхождение теоретических и экспериментальных

значений коэффициента извлечения наблюдается при скорости перемещения  $v = 0,028$  м/с и составляет 5,16%.

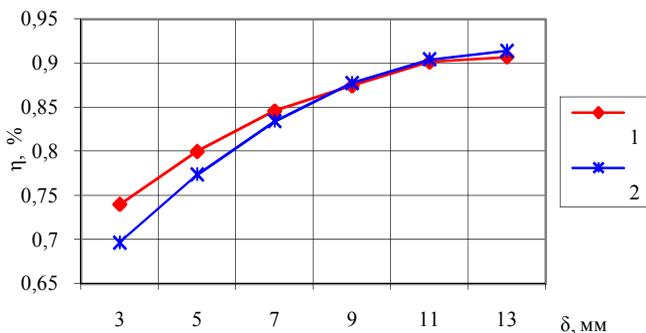


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента извлечения магнитных частиц от толщины слоя разделяемой минеральной смеси: 1 – значения, посчитанные по формуле 9; 2 – экспериментальные значения

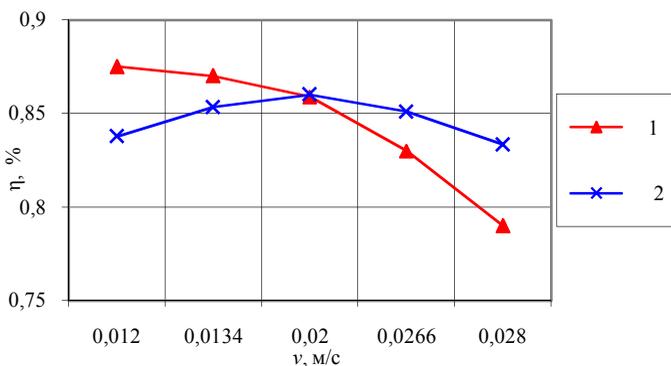


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента извлечения магнитных частиц от скорости движения скребкового конвейера: 1 – значения, посчитанные по формуле 10; 2 – экспериментальные значения

Зависимости коэффициента извлечения магнитных частиц в основной области значений конструктивно-технологических параметров сепаратора  $\sigma$ ,  $v_k$  и  $\alpha_n$  качественно и количественно хорошо (с точностью до 5,9%) согласуются с кривыми, полученными в

результате проведения факторного эксперимента. Отсутствие участков возрастания и неэкстремальный характер теоретических кривых и по-видимому объясняется приближенным характером применяемых в настоящее время инженерных методов описания магнитных полей сепараторов и свойств сыпучих материалов в состоянии кипящего слоя.

#### Список литературы:

1. Кармазин В.И., Кармазин В.В. Магнитные методы обогащения. М.: Недра, 1984. 215 с.
2. Уваров В.А. Оптимизация параметров работы пневмоструйной протivotочной мельницы // Омский научный вестник. 2006. №2 (35). С. 17-19.
3. Полезная модель № 93785 Российская Федерация, МПК В 65 G 29/00. Харламов Е.В. Сепаратор // Полезная модель России № 2009147741/22; 2010. Бюл. № 13.
4. Агрегат для получения строительных материалов из отвалов горно-обогатительных комбинатов КМА / Е.В. Харламов, Р.Р. Шарапов, В.Г. Шаптала, В.В. Шаптала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 3. С. 82-85.
5. Харламов Е.В., Шарапов Р.Р., Степанов М.А. Метод разделения железосодержащего минерального сырья // Научное обозрение. 2013. № 12. С. 99-101.
6. Моделирование процесса разделения в магнитно-аэродинамическом сепараторе / Е.В. Харламов, Р.Р. Шарапов, В.Г. Шаптала, В.В. Шаптала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 91-95.
7. Харламов Е.В., Шарапов Р.Р., Степанов М.А. Методика расчета аппарата для разделения железосодержащего минерального сырья // Механизация строительства. 2014. № 6 (840). С. 28-32.
8. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. М.: Недра, 1978.
9. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник. / под ред. И.П. Мухлеванова, Б.С. Самина, В.Ф. Фролова. Л.: Химия, 1986. 352с.
10. Разумов И.М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов. М.: Химия, 1972. 240 с.
11. Постоянные магниты: Справочник / А.Б. Альтман, А.М. Гербергер, П.А. Гладынов и др.; под ред. Ю.М.Пятина. М.: Энергия, 1980. 448 с.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ДВУХВАЛЬНОГО ЛОПАСТНОГО СМЕСИТЕЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Чемеричко Г.И., канд. техн. наук, проф.,  
Порядина Е.В., студент

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

Смесители непрерывного действия являются достаточно эффективным видом смесительного оборудования на предприятиях, использующих непрерывную технологию производства. Это единственно возможные для применения смесительные машины.

Перемешивание материалов является одной из основных операций при производстве строительных материалов и изделий, так как от нее в значительной мере зависит качество выпускаемой продукции. В различных технологических процессах требуется создать однородную массу, состоящую из нескольких компонентов. В других случаях необходимо обеспечить максимально полный и равномерный по всему объему контакт смешиваемых компонентов [1,3].

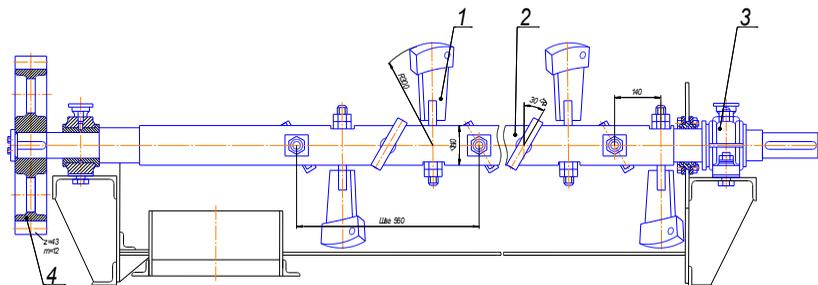


Рисунок 1 – Лопастной вал с модернизацией: 1 – лопасть; 2 – вал;  
3 – подшипник; 4 – зубчатое колесо

Двухвалынные смесители непрерывного действия (рис. 1) широко применяются в промышленности строительных материалов для перемешивания различных материалов. С этим связан и основной недостаток: в связи с абразивностью перемешиваемой смеси, лопасти, особенно их торцовые грани, быстро изнашиваются, вследствие чего увеличивается зазор между корпусом смесителя и лопастью, снижается производительность. В связи с этим, каждую из лопастей смесителя

необходимо наплавлять дорогостоящими электродами или заменять каждую лопасть на новую, что занимает много времени [1,2].

Предлагаемый подход к решению проблемы для двухвального смесителя – использование кожухов для быстрой замены изношенных лопастей [4]. Такое техническое решение позволяет значительно снизить трудозатраты на замену лопастей, снизить время простоя оборудования во время планового или капитального ремонта оборудования и повысить надёжность и долговечность работы лопасти смесителя.

Суть предлагаемой модернизации состоит в следующем: лопасть выполняют в виде сборки непосредственно из пластины лопасти с хвостовиком (рис. 2) и кожуха (рис. 3), соединенным посредством фиксатора 2 (рис. 2).

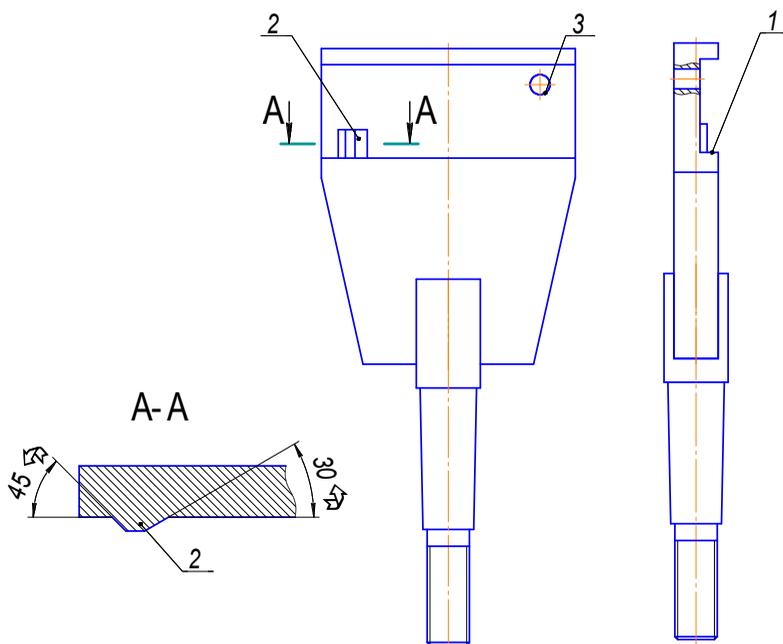


Рисунок 2 – Пластина с хвостовиком: 1 – паз направляющий; 2 – фиксатор; 3 – отверстие

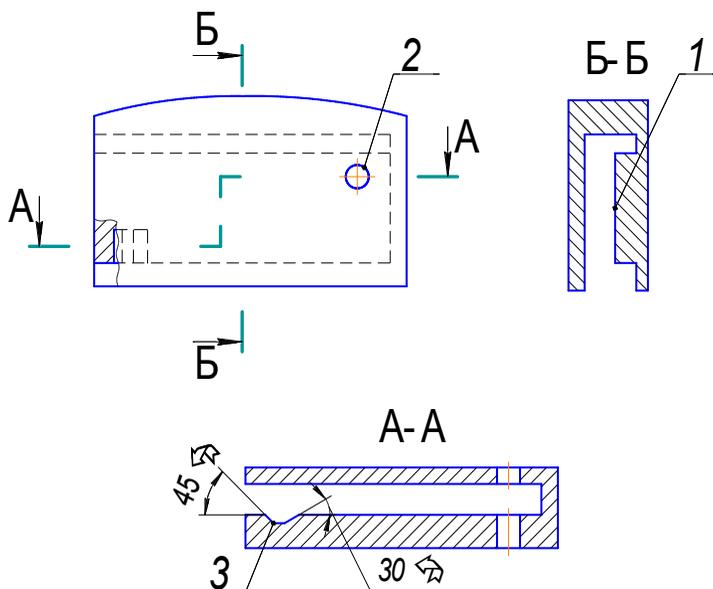


Рисунок 3 – Сменный кожух: 1 – выступ; 2 – отверстие; 3 – паз

Для этого пластину лопасти изготавливают с поперечным направляющим пазом 1 (рис. 2), а кожух – с выступом 1 (рис. 3). При этом выступ кожуха должен входить по направляющим паза пластины лопасти и соединяться с ней при помощи фиксатора 2 (рис. 2). Фиксатор выполняется в виде шипового соединения, который в поперечном сечении имеет форму трапеции с разными углами наклона боковых сторон, а именно  $45^{\circ}$  и  $30^{\circ}$ .

При предельном износе кожуха, приводящий к снижению производительности смесителя, кожух заменяется. Для этого надо пропустить через отверстия 2 и 3 кожуха и пластины, которые в сборке расположены с перекрытием, любой стержень и повернуть его до совмещения осей отверстия пластины и отверстий кожуха. При этом относительного перемещения кожуха и пластины будет достаточно для выхода шипа из паза. Затем стержень вынимается из отверстий, и дальнейший съем кожуха производится без усилий.

При такой конструкции кожух является сменным и позволяет продлить срок службы лопастей смесителя в 1,5-2 раза. Так же увеличивается коэффициент использования смесителя с повышением производительности.

### **Список литературы:**

1. Сапожников М.Я., Дроздов Н.Е. Справочник по оборудованию строительных материалов. М.: Стройиздат, 1970. 487 с.
2. Богданов В.С., Шарапов Р.Р., Фадин Ю.М., Семикопенко И.А., Несмеянов Н.П., Герасименко В.Б. Основы расчета машин и оборудования предприятий строительных материалов и изделий: Старый Оскол: ТНТ, 2013. 680 с.
3. Воронов В.П., Несмеянов Н.П., Горшков П.С. Спирально-лопастной противоточный смеситель для производства сухих строительных смесей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. №1. С. 66-69.
4. Патент СССР № 3315173/29-33, 15.06.81. Барер Б.Я., Кашевник Б.Л., Райцев Л.М. Лопасть смесителя // Патент СССР №1009780. 1983. Бюл. № 13.

## ОСОБЕННОСТИ ЛИНИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ЩЕЛЕВЫХ ПОЛОВ

Юдин К.А., канд. техн. наук, доц.,  
Кулаков Л.С.

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

В настоящее время в России высока потребность в изделиях из сборного железобетона.

Широкому применению в строительстве сборного железобетона способствуют следующие его качества:

– высокая индустриальность изготовления и монтажа конструкций, что позволяет резко сократить сроки и затраты труда в строительстве и, по существу, свести строительство зданий и сооружений к высокомеханизированному их монтажу;

– универсальность свойств железобетонных изделий, что предполагает варьирование технологическими приёмами и материалами и получение изделий с различными физико-механическими свойствами по прочности, теплопроводности, износостойкости, стойкости к ядерному излучению и т.п.;

– высокая долговечность железобетона по сравнению с другими конструкционными материалами, например металлом и древесиной и т.д.;

– возможность значительного расширения производства сборного железобетона за счет использования больших запасов сырьевых материалов (песка, щебня, вяжущих веществ, искусственных пористых заполнителей), а также различных отходов производства (металлургических и топливных шлаков, золы и др.).

Часто бывает нецелесообразно использовать обычные плиты перекрытия для строительства зданий и сооружений. Плиты перекрытия для вспомогательных помещений, решетки полов свинарников и так называемые щелевые полы пользуются спросом и изготовлены из высококачественного железобетона, по специальной технологии.

Высокое качество продукции достигается с помощью контроля над всем производственным процессом.

Такие полы изготавливаются из тяжелого бетона класса по прочности на сжатие В22,5 (марки М300), марки по водонепроницаемости не ниже W2, марки по морозостойкости не ниже F25. Применяемый бетон удовлетворяет требованиям ГОСТ 26633-91.

Материалы, применяемые для приготовления бетона, соответствуют требованиям действующих стандартов: -портландцемент ГОСТ 30515-97 ;-песок ГОСТ 8736-93; -щебень ГОСТ 8267-973;-вода ГОСТ 23732-79.

Щелевые полы армируются плоскими сетками из арматурной стали классов А-III ГОСТ 5781-82 и арматурной проволоки Вр-I ГОСТ 6727-80. Качество поверхностей и внешний вид соответствует требованиям, установленным ГОСТ 13015.0-83.

Линия по производству панелей перекрытия представляет собой комплекс оборудования работающего по конвейерной схеме. В этот комплекс входят:

1. Бетоноукладчик с ленточным питателем на стационарной раме.
2. Портал подвижный для перемещения поддонов.
3. Портал неподвижный, где хранятся поддоны.
4. Стенд доводки поддонов.

Для конвейерных и поточно-агрегатных технологических линий применяют бетоноукладчики с ленточными питателями (рис. 1). Ленточный конвейер 1 с приводным и натяжным барабанами, бортами, удерживающими на ленте бетонную смесь и скребками, очищающими ленту, захватывает бетонную смесь из бункера 2, который закреплен на стационарной раме. Смесь продвигается в копильник 3 и выдается равномерным слоем по всей ширине формы (2 м). Поднимая или опуская устройством 4 заслонку 5, регулируют толщину слоя бетонной смеси. Вследствие того, что высота выходной щели бункера больше выходной щели копильника, в нем образуется подпор, обеспечивающий постоянную толщину выдаваемого слоя материала независимо от уровня заполнения бункера[1,2].

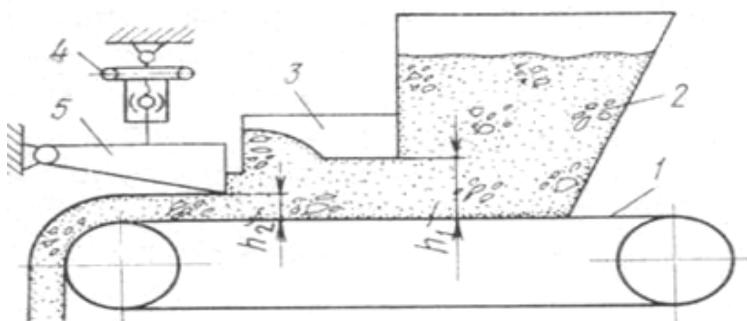


Рисунок 1 – Схема бетоноукладчика с ленточным питателем

На стационарной раме также закреплен виброформовочный стол с формой.

Для щелевых полов используют специальные металлические формы с получаемыми “щелями” шириной не более 20 мм. Эти формы закупаются у специализированных предприятий-смежников.

Наиболее проблемным элементом линии по производству щелевых полов является портал подвижный.

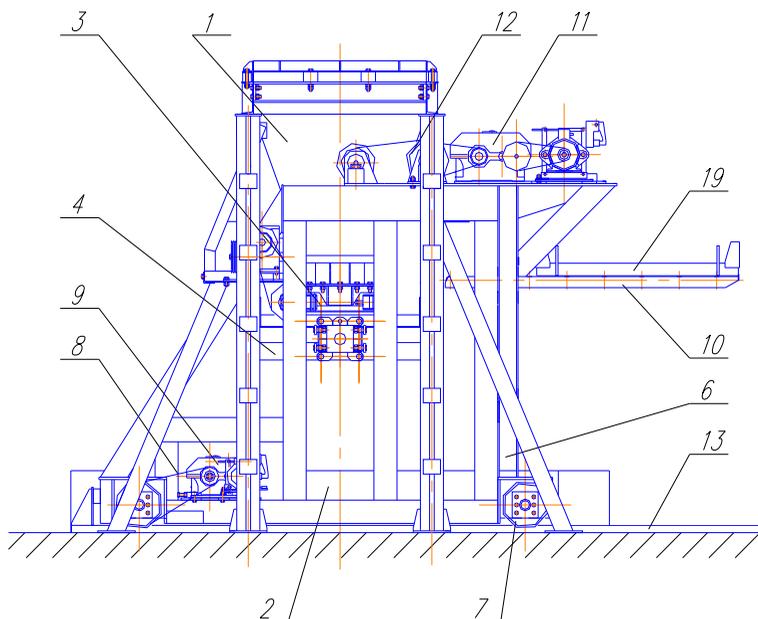


Рисунок 2 – Портал подвижный с бетоноукладчиком

Портал подвижный с бетоноукладчиком (рис. 2) предназначен для перемещения форм от бетоноукладчика до портала неподвижного и от портала неподвижного до стопки отформованных поддонов 19. Он состоит из самоходной рамы 6 сварной конструкции, опирающийся на четыре колеса 7, из которых два приводные. Вращение приводным колесам передается через клиноременную передачу 8 от привода 9 и зубчатых передач, ведомые шестерни которых укреплены на ходовых колесах. Портал перемещается по рельсовому пути. Также на самоходной раме расположены вилы 10, перемещающиеся вверх и вниз

и вращающиеся вокруг своей оси. Для перемещения вил на раме 6 установлен привод 11 с барабаном и блоком 12. Вращение вил вокруг своей оси позволяет переворачивать поддон с формой, что позволяет освободить форму от готового изделия и в последующем использовать ее. После освобождения формы подвижный портал по рельсам 13 перемещается к portalу неподвижному, где накапливаются поддоны с готовыми изделиями.

Совмещение портала подвижного с бетоноукладчиком позволяет рационально организовать процесс и сократить площади размещения оборудования.

#### **Список литературы:**

1. Богданов В.С., Шарапов Р.Р., Фадин Ю.М., Семикопенко И.А., Несмеянов Н.П., Герасименко В.Б.: Основы расчета машин и оборудования предприятий строительных материалов и изделий: учебник. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 680 с.
2. Журавлев М.И., Фоломеев А.А. Механическое оборудование предприятий вяжущих материалов и изделий на базе их. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб., и доп. М.: Высшая школа, 1983. 232 с.

О МЕХАНО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ НА  
ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА РАЗНОРОДНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ  
ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Абрамов В.В., д-р техн. наук, проф.,  
Ракунов Ю.П., канд. техн. наук, доц.,  
Капырин П.Д., канд. техн. наук, ст. преподаватель  
*Московский государственный строительный университет*

Установление кинетических закономерностей и характера формирования контакта при твердофазном взаимодействии позволяет управлять технологическими процессами (выглаживанием, резанием, сваркой, прессованием, спеканием и др.), центральным моментом является вопрос феноменологического анализа кинетических кривых «сшивания» связей в соответствии с закономерностями развития контактных площадок и течением металла контактных площадок микровыступов как основного активирующего фактора.

Представленное сопоставление кинетических кривых образования физического контакта, пластической деформации микровыступов и развития схватывания меди с  $\alpha$ -корундом (рис. 1) показывает, что они имеют вид кривых сигмоидного типа.

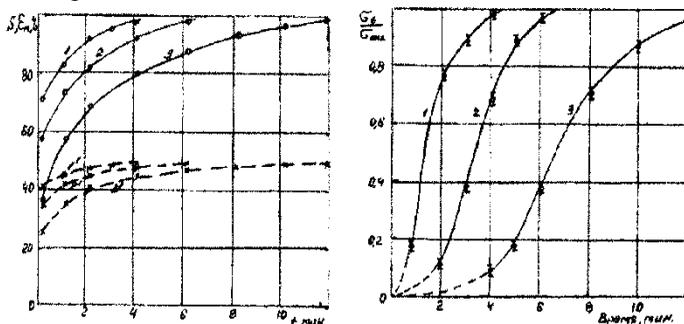


Рисунок 1 – Сопоставление кинетических кривых образования физического контакта, пластической деформации микровыступов и развития схватывания меди с  $\alpha$ -корундом;  $T=1173$  К; кривые: 1 –  $\sigma_n = 20$  МПа; 2 – 15 МПа; 3 – 10 МПа – кривые образования физического контакта; 1', 2', 3' – кривые пластической деформации микровыступов

Низкие температуры процесса (ниже 0,5 температуры плавления корунда) и затрудненность диффузионных процессов не приводит к изменению состава конденсированных фаз, и твердофазная топохимическая реакция становится полностью локализованной на поверхности раздела.

С представленных позиций предлагается следующее объяснение развития контактного взаимодействия разнородных материалов в твердом состоянии при термомеханическом воздействии.

При смятии и пластическом течении металла микровыступов из его внутренних объемов, где металл физически чист, происходит перемещение и поставка атомов с некомпенсированными связями на поверхность в зону пятна контакта; возникающие «разрывы» металла на контактных площадках являются активными поверхностями с некомпенсированными связями и подготовленными к взаимодействию с аналогичными атомами ответной поверхности твердого материала.

О высокой химической активности внутренних объемов металла и корунда свидетельствует факт схватывания атомов металла на поверхности контактных площадок с атомами внутренних объемов корунда, вышедших на поверхность в зону контакта при образовании полос и пачек скольжения (рис. 2). В этом месте образуются мостики схватывания, металл которых при последующем разделении поверхностей остается на корунде. На поперечных профилограммах отпечатка полосы скольжения корунда на металле видно, что полоса скольжения при выходе на поверхность образовала деформационный микровыступ и продеформировала металл контактной площадки микровыступа вглубь, а на образовавшейся поверхности ступенек произошло схватывание атомов корунда и металла.

Учитывая, что на 1-м и 2-м этапах смятия микровыступов имеется только их осадка без заметного пластического течения металла поверхности контактных площадок, отсутствие пластической деформации в приконтактных объемах более твердого материала и наличие на его поверхности хемосорбированного кислорода с высокой энергией связи, образование активных атомов на контактной поверхности «твердого» материала в этот период времени не происходит. В связи с этим на первых двух этапах смятия микровыступов образования прочных химических связей не происходит, а на кинетических кривых «сшивания» будет наблюдаться период задержки образования прочных связей.

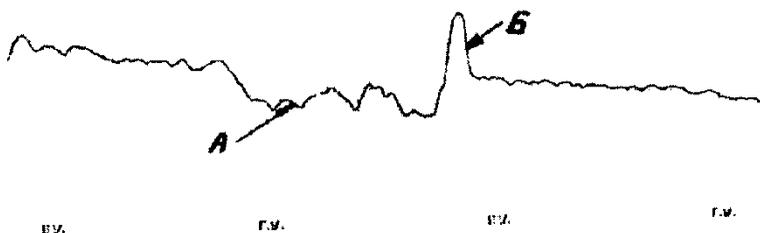


Рисунок 2 – Поперечная профилограмма отпечатка полосы скольжения сапфира на меди после разрушения соединения. ВУ- 40 000; ГУ- 1000 крат

После периода задержки наступает этап интенсивного «сшивания» связей, что соответствует 3-му и 4-му этапам смятия. При этом относительная площадь физического контакта превышает 60% от номинального значения, а отношение  $\tau$  к  $\sigma$  на контактных площадках достигает необходимых значений, обеспечивающих перемещение материальной точки в пятне контакта от симметрии к периферии, то есть обеспечивается пластическое течение металла на контактных площадках микровыступов. С одной стороны, оно поддерживает высокий уровень активности атомов металла и выхода на поверхность в зону контакта активных атомов, с другой – такое течение металла способствует разрыву связей хемосорбированного кислорода с более твердым материалом и его удалению. Кроме того, пластическое течение поверхностного слоя металла контактных площадок за счет эстафетной передачи деформации приводит к возникновению пластической деформации в более твердом материале и его активации. В этих условиях на поверхности более твердого материала образуются активные атомы, которые, находясь в состоянии физического контакта, вступают во взаимодействие и образуют прочные химические связи за счет структурного кислорода корунда; атомы металла компенсируют частично незаполненные связи ионов кислорода в кристаллической решетке корунда. Интенсивность накопления сильных связей в этот период времени имеет максимальное значение и сохраняется практически постоянной до окончания пластического течения металла на контактных площадках (3-й и 4-й этапы смятия): изменение длительности 3-го этапа смятия приводит к изменению интенсивности «сшивания» связей, то есть изменению угла наклона кинетической кривой.

При контактном взаимодействии материалов в твердом состоянии под действием термомодеформационного воздействия необходима пластическая деформация как мягкого, так и твердого материалов. Однако их роль в общем процессе взаимодействия различна. Роль пластической деформации мягкого материала сводится не только к образованию физического контакта, активации собственной поверхности, удалению сорбированного кислорода с поверхности более твердого материала, но и созданию условий для возникновения и развития пластической деформации в более твердом материале. Пластическая деформация более твердого материала является определяющей в активации поверхности и развитии схватывания. Начало интенсивного схватывания будет определяться длительностью периода задержки развития пластической деформации в более твердом материале. Совершенно очевидно, что в этом случае на поверхности последнего должны наблюдаться следы пластической деформации, например полосы и пачки скольжения. В области контактной площадки, охваченной пачкой скольжения, и происходит образование мостиков схватывания.

Таким образом, запаздывание второй стадии взаимодействия в контакте разноименных пар материалов будет определяться протеканием двух взаимосвязанных параллельных процессов, а именно: влиянием интенсивности образования физического контакта при смятии микровыступов «мягкого» металла на удаление комплекса адсорбции с поверхности более «твердого» материала и влиянием напряжений, возникающих на границе раздела мягкое – твердое вследствие протекания внутризеренной сдвиговой деформации в приконтактных объемах микровыступов, на развитие пластической деформации в более твердом материале. Совместное протекание этих процессов приводит к активации атомов ответной поверхности более твердого материала и образованию на границе раздела сильных химических (металлических) связей. В связи с изложенным выше совершенно ясно, что на поверхности более твердого металла должны наблюдаться следы пластической деформации.

#### **Список литературы:**

1. Абрамов В.В., Шоршоров М.Х., Алехин В.П. О механизме взаимодействия при сварке давлением с нагревом разнородных металлов // Управление сварочными процессами. Тула: ТПИ, 1980. С. 43-53.

2. Касьян М.В., Абрамов В.В., Мирзаев К.М. К вопросу о механизме контактного взаимодействия сапфирового инструмента с металлами в процессе их отделочной обработки // Резание труднообрабатываемых материалов. Ереван: АН Арм. ССР, 1975. Вып. 4. С. 18-23.
3. Абрамов В.В., Джагури Л.В. О роли термической и механической составляющих в активации контактных поверхностей при термомеханическом воздействии // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2003. № 5. С. 35-39.
4. Абрамов В.В., Ракунов Ю.П., Батищев В.В. О механизме контактного взаимодействия сапфирового инструмента с металлами в процессе их чистовой отделочной обработки // Проблемы устойчивости и безопасности системы жизнеобеспечения в сфере ЖКХ. М.: Граница, 2010. С. 29-43.
5. Абрамов В.В., Ракунов Ю.П., Батищев В.В. О кинетических закономерностях контактного взаимодействия материалов при деформационном и термомеханическом воздействии // Вестник Волгогр. Гос. архит.-строит. ун-та. Сер: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч.2. Строительные науки. С. 62-70.
6. Абрамов В.В. Кинетика взаимодействия разнородных материалов в твердом состоянии и разработка совмещенного технологического процесса выглаживания и получения неразъемного соединения: автореф. дис... д-ра техн. наук. М.: МАТИ им. К.Э. Циолковского, 1990. С. 40.

## АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ИЗДЕЛИЙ С МИКРООТВЕРСТИЯМИ

Бойко А.Ф., д-р техн. наук, доц.,

Блинова Т.А., канд. техн. наук

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

Получение микроотверстий, особенно высокого класса точности, является сложной технологической задачей [1,3,4]. Стала актуальной задача создания нового более эффективного электроэрозионного оборудования для обработки микроотверстий. Для разработки требований к новому оборудованию потребовался конструкторско-технологический анализ изделий, подлежащих обработке на этом оборудовании. Анализ изделий типа инструмента для микросварки и микропайки представлен в работе [2]. В данной статье анализируются другие типы изделий с микроотверстиями массового и серийного производства.

Все микроотверстия в зависимости от диаметра  $d$  условно разбиваются на три группы:  $d > 0,1$  мм,  $d = 0,1 - 0,01$  мм,  $d < 0,01$  мм. При уменьшении размеров отверстий их обработка усложняется, изменяются приёмы и оборудование для осуществления технологического процесса. По форме микроотверстия различаются по следующим признакам:

1. Цилиндрические (рис. 1). Такие отверстия содержат следующие изделия: распылители, фильтры, дроссели, детали электронных приборов, атравматические хирургические иглы.

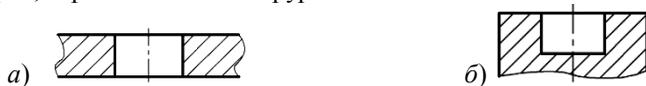


Рисунок 1 – Виды цилиндрических отверстий:

$a$  – сквозные;  $b$  – глухие

2. Цилиндрические с заходным конусом (рис. 2). Изделия, имеющие данные отверстия: инструмент для микросварки и микропайки, фильеры, детали электронных приборов.



Рисунок 2 – Виды цилиндрических отверстий с заходным конусом: *а* – с параллельными торцами; *б* – со скошенным торцом

3. Сложной формы (рис. 3). Данную форму отверстий можно наблюдать в волочильном инструменте и у фильер.

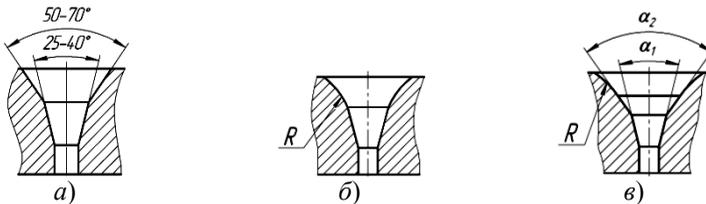


Рисунок 3 – Виды отверстий сложной формы: *а* – с двумя аходными конусами; *б* – с заходным конусом и радиусным круглением; *в* – с двумя заходными конусами и радиусным скруглением

Большой номенклатуре обрабатываемых деталей сопутствует большое многообразие обрабатываемых материалов: твёрдый сплав, нержавеющая сталь, медицинская инструментальная сталь, вольфрам, молибден, никель, латунь, медь, ковар, константан, хром, тантал, алюминий, цирконий, ниобий и др. Наибольшим количеством наименований обрабатываемых материалов отличается электронная промышленность при производстве различных изделий электронной техники. При таком многообразии материалов значительно усложняются задачи исследований и оптимизации разнообразных процессов обработки микроотверстий. И в этом случае существенно возрастает роль методических технологических разработок, обладающих универсальностью.

Из проведенного в работе [2] конструкторско-технологического анализа инструмента для микросварки и микропайки следует, что наиболее проблемной является задача получения микроотверстий требуемых параметров, необходимого качества и с минимальной трудоемкостью.

Вторым массовым изделием, в котором требуется получить микроотверстия, являются атраumaticкие иглы. Они предназначены

для малотравмирующего сшивания различных тканей человеческого организма при проведении хирургических операций, особенно на глазах, сердце, сосудах, желчевыводящих путях, нервных волокнах, при пластических операциях и др.

Атравматическая игла состоит из игольчатого наконечника и шовной хирургической нити, завальцованной в микроотверстии на нерабочем торце иглы. Игольные наконечники изготавливаются из специальной высокопрочной стали медицинского назначения ЗИ-90 ТУ 14-4-1272-84 (Россия) или марки 455 (США), обеспечивающей упругость и сохранность формы острия рабочей части иглы во время операции. Конфигурация рабочей части игольного наконечника в зависимости от назначения бывает нескольких типов: шпательная – с трапецеидальной формой поперечного сечения острия, режущие – с треугольной формой поперечного сечения, колющие – поперечное сечение иглы в виде круга (рис. 4).

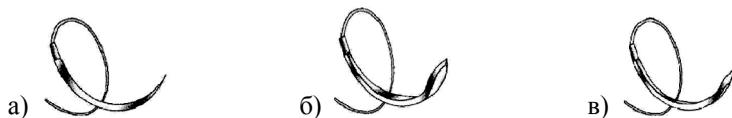


Рисунок 4 – Конфигурации рабочих частей наконечников атравматических игл: *a* – колющие иглы; *б* – шпательобразные иглы; *в* – режущие иглы

Колющие иглы – это иглы без режущих кромок, круглые с коническим остриём. В офтальмологии данные иглы применяются при наложении шва – держателя на глазодвигающие мышцы для фиксации глазного яблока. Эта игла минимально травмирует ткани, в данном случае склеру и мышцы. В пластической хирургии применяется для сшивания хрящевых тканей.

Иглы с боковыми режущими кромками – эти иглы называются шпательобразными. Оригинальная форма этих игл, уплощённых на всём протяжении, исключает прорезание тканей, характерное для многих типов режущих игл. Иглы с боковыми режущими кромками разработаны специально для глазной хирургии. Такая игла проникает между тонкими слоями ткани, например, склеры или роговицы и проходит в некой плоскости, расслаивая волокна ткани без их повреждения. Оптимальная ширина, форма и оточенные края такой иглы обеспечивают максимальную лёгкость прохождения через ткань и хороший контроль.

Режущие иглы – это иглы с тремя режущими кромками. Режущие кромки специально заострены, чтобы прорезать себе путь через жёсткие, труднопрокальываемые ткани. Этот тип иглы является оптимальным для сшивания кожи, где нить должна проводиться через плотную, неоднородную, сравнительно толстую соединительную ткань. У офтальмологов он нашёл применение на операциях при окулопластике.

Игла имеет твёрдость 48...53HRC и шероховатость поверхности Ra 0,2 мкм.

Важное значение для данной работы представляет капиллярное отверстие в торце иглы, предназначенное для завальцовки хирургической нити (рис. 5). В зависимости от типоразмера иглы это отверстие также имеет различные размеры. Традиционными способами механической обработки большинство этих отверстия получить невозможно. Поэтому стоит проблема в альтернативном недорогом способе получения данных отверстий и улучшении существующего способа получения отверстий электроэрозионным способом.

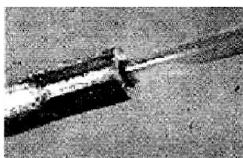


Рисунок 5 – Фото завальцовки нити

Шероховатость отверстия и торцевой поверхности иглы составляет Ra 6,3 мкм. Допуск соосности отверстия и наружной цилиндрической поверхности иглы составляет 0,01...0,1 мм в зависимости от типоразмера иглы.

Иглы оснащаются хирургической нитью различных типов: нерассасывающиеся (крученая и плетеная; мононить полипропиленовая, полиамидная, нейлон); рассасывающиеся (кетгут; полигликолид; капроаг и др.).

Обобщая конструкторские особенности атравматических игл, можно сделать следующие выводы:

– материал игл – высоколегированная медицинская сталь ЗИ-90, сложна в обработке механическими методами; при электроэрозионной обработке склонна к шлакованию, особенно при обработке в керосине, поэтому требуются тщательные технологические исследования по определению оптимальных режимов обработки и состава рабочих сред;

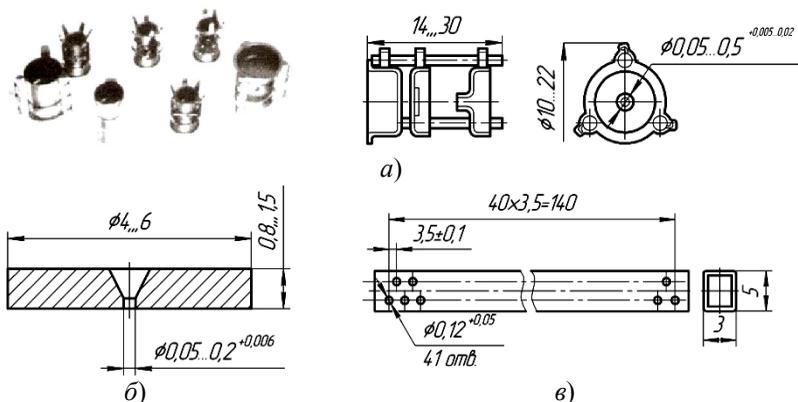
– диапазон диаметров микроотверстий широк: от 0,033 мм до 0,6 мм; вероятно для верхнего диапазона диаметров (свыше 0,3 мм) целесообразно использование механических методов получения отверстий; для диаметров менее 0,3 мм предпочтительнее электроэрозионный способ прошивки;

– допуск на диаметр микроотверстия в зависимости от типоразмера равен 0,015...0,07 мм, что, в общем, не представляет собой проблему для электроэрозионного метода прошивки, за исключением случаев прошивки глубоких отверстий;

– соотношение глубины микроотверстия к диаметру составляет  $h/d = 7...16$ ; видно, что верхний диапазон соотношения (свыше 10) будет проблематичным как при механической обработке, так и при электроэрозионной прошивке в керосине;

– допуск на несоосность микроотверстия и наружного диаметра иглы достаточно жесткий и составляет 0,02 мм (для  $d < 0,1$  мм), что потребует тщательной выверки положения инструмента относительно обрабатываемой иглы с применением оптических средств контроля.

Еще одну группу обрабатываемых изделий с микроотверстиями, относящихся к серийному типу производства, представляют детали электронных приборов, изготавливаемые в основном в электронной промышленности. Некоторые типовые детали электронных приборов, в которых прошиваются микроотверстия, показаны на рис. 6.



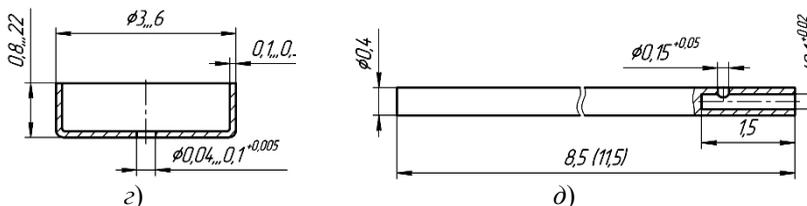


Рисунок 6 – Типовые детали электронных приборов: *а* – анодные узлы видиконов, иконоскопов, потенциалоскопов, супертиконов; *б* –фокусирующая диаграмма электронного микроскопа; *в* – волновод (СВЧП); *г* – аноды ЭОС; *д* – вывод ЭВП

Обобщенная характеристика малых отверстий в деталях электронных приборов дана в табл. 1.

Таблица 1 – Общая характеристика малых отверстий в деталях электронных приборов

Наименование параметра	Характеристика
1. Материал деталей электронных приборов	медь, ковар, никель, молибден, нержавеющая сталь, константан, вольфрам тантал и др.
2. Диаметр малых отверстий, мм	0,04...0,5 <sup>+0,005...0,05</sup>
3. Общая глубина отверстий, мм	0,05...2,0
4. Относительная глубина отверстий, $H/d$	1...15
5. Точность относительного расположения отверстий	0,01...0,05
6. Шероховатость поверхности в отверстиях, Ra, мкм	0,8...0,2

Из анализа обрабатываемых деталей электронной промышленности следует, что особенностями этой группы являются:

- большое многообразие материалов;
- наибольшая глубина прошиваемых отверстий до 15 диаметров, т.е. на части деталей с микроотверстиями глубиной более 10 диаметров электроэрозионная прошивка отверстий на оборудовании с RC-генератором импульсов и рабочей жидкостью в виде керосина будет проблематичной;
- шероховатость обработанной поверхности в некоторых отверстиях Ra до 0,2 мкм, что получить на вышеуказанном

оборудовании с приемлемой производительностью проблематично;  
– для некоторых деталей с множеством микроотверстий и жесткими требованиями к межцентровому расстоянию необходимо оборудование с отсчетными устройствами координатного стола, имеющими дискретность не хуже 0,005 мм.

#### **Список литературы:**

1. Библиотечка электротехнолога. Выпуск 2. Электроразрядная обработка материалов/ Е.М. Левинсон [и др.]. Л.: Машиностроение, 1971. 256 с.
2. Бойко А.Ф., Блинова Т.А. Краткий анализ конструкции и технологии производства инструмента для микросварки и микропайки // Международный научно-исследовательский журнал: сб. по результатам XXII заочной науч. конф. ResearchJournalofInternationalStudies. Екатеринбург. 2013. Ч. 1. 12(19). С.45-48. ISSN 2303-9868.
3. Красников В.Ф. Микротехнология // Машиностроитель. 1972. №11. С.41-43.
4. Левинсон Е.М. Отверстия малых размеров. Л.: Машиностроение, 1977. 152 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРОШИВКЕ МАЛЫХ ОТВЕРСТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ С ИНДУКТИВНОСТЬЮ В РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ

**Бойко А.Ф., д-р техн. наук, проф.,**

**Пузачева Е.И., аспирант,**

**Жуков Е.М., канд. техн. наук, доц.**

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

В работе [1,2] установлено, что так как при электроэрозионной прошивке малых отверстий используют импульсы электрического тока малых энергий (от единиц до сотен микроджоулей), то дефектный слой от физико-химических изменений в поверхностном слое несущественен. Поэтому в данной работе исследовалась зависимость шероховатости обработанной поверхности  $Ra$  от энергии импульсов  $E$  и величины индуктивности  $L$  высокой добротности в разрядной цепи генератора импульсов, а так же анализировался эффект взаимодействия этих двух факторов  $E$  и  $L$ . В работе [1,2] таких исследований не проводилось, так как использовался генератор коротких биполярных пик – импульсов без дополнительной индуктивности в разрядной цепи.

Исследования проводились на модернизированном электроэрозионном станке модели 04ЭП-10МФ2, в качестве рабочей жидкости использовалась обычная водопроводная вода, в качестве образцов использовались квадратные прутки 5x5x15мм из нержавеющей стали X18H10T, рабочие поверхности которых отполировывались до шероховатости не хуже  $Ra = 0,05-0,08$ мкм. Полученная шероховатость замерялась на профилографе-профилометре АБРИС ПМ-7 в трех сечениях. Находилось среднее значение шероховатости. Перед замером прибор откалибровывался с помощью прилагаемого образца шероховатости. Отклонение при этом не превышало 0,5%. В соответствии с выбранными факторами: энергии импульсов  $E$  и величина индуктивности  $L$ , в качестве исходной математической модели была выбрана следующая зависимость:

$$Ra = C \cdot E^{\alpha} \cdot L^{\beta} \quad (1)$$

Для определения постоянных параметров модели  $C, \alpha, \beta$  была проведена серия экспериментов с использованием метода

математического планирования эксперимента [3]. Ниже приведены результаты исследований.

В эксперименте были приняты следующие условия (таблица 1)

Таблица 1

Уровни факторов	Натуральные значения факторов		Кодированные значения факторов	
	$E$ , мкДж	$L$ , мкГн	$x_1$	$x_2$
верхний	1282,05	8,21	+1	+1
средний	351,1	3,51	0	0
нижний	96,15	1,5	-1	-1

Исходная математическая модель (1) в результате логарифмирования линейризуется и приводится к виду:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2, \quad (2)$$

где  $y = \ln Ra$ ,  $y = \ln C$ ,  $b_1 = \alpha$ ,  $b_2 = \beta$ ,  $x_1$  и  $x_2$  – кодированные значения факторов.

Кодирование переменных  $x_1$  и  $x_2$  осуществлялась по следующим уравнениям преобразования:

$$x_1 = \frac{2(\ln E - \ln E_{\max})}{\ln E_{\max} - \ln E_{\min}} + 1 = 0,7721 \ln E - 4,5254, \quad (3)$$

$$x_2 = \frac{2(\ln L - \ln L_{\max})}{\ln L_{\max} - \ln L_{\min}} + 1 = 1,1765 \ln L - 1,4770, \quad (4)$$

Натуральные значения факторов среднего уровня (см.таблицу1) определялись по формулам:

$$E_{cp} = e^{0,5(\ln E_{\max} + \ln E_{\min})} = 351,1 \text{ мкДж}$$

$$L_{cp} = e^{0,5(\ln L_{\max} + \ln L_{\min})} = 3,51 \text{ мкГн}$$

Для определения взаимного влияния факторов  $x_1$  и  $x_2$  и возможного повышения точности математической модели (2) результаты опытов представим полиномом вида:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2, \quad (5)$$

где  $b_{12}$  – коэффициент взаимодействия факторов  $x_1$  и  $x_2$ .

Для определения коэффициентов уравнения (5) был проведен полнофакторный эксперимент типа  $2^2$ . Матрица планирования и результаты эксперимента представлены в табл.2.

Таблица 2

№ опыта	Натуральные значения факторов		Кодированные обозначения факторов				$\ddot{y}_j$
	Е,мкДж	L,мкГн	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_{12}$	
1	1282,05	8,21	+1	+1	+1	+1	-0,1650
2	96,15	8,21	+1	-1	+1	-1	-0,7549
3	1282,05	1,5	+1	+1	-1	-1	0,3516
4	96,15	1,5	+1	-1	-1	+1	-0,1852

В данном эксперименте для компенсации влияния случайных погрешностей и повышения точности математических моделей было применено равномерное дублирование опытов. При этом все строки матрицы планирования имели одинаковое число параллельных опытов  $n=3$ . Обработка результатов эксперимента:

1. По результатам эксперимента (см. табл.2) определяем коэффициенты уравнения (5):

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j = -0,1884; \quad b_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \cdot x_1 = 0,2817;$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \cdot x_2 = -0,2716; \quad b_{12} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \cdot x_1 \cdot x_2 = 0,0133;$$

где  $y_j$  – значение выходного параметра в  $j$  – том опыте эксперимента из  $N = 4$  опытов;  $x_1, x_2$  – кодированные значения факторов по матрице планирования.

Тогда уравнение регрессии примет вид:

$$y = -0,1884 + 0,2817 \cdot x_1 - 0,2716 \cdot x_2 + 0,0133 \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (6)$$

2. После проверки статистической значимости уравнение регрессии примет вид:

$$y = -0,1884 + 0,2817 \cdot x_1 - 0,2716 \cdot x_2, \quad (7)$$

Полученное уравнение регрессии (7) раскодируем с помощью уравнений преобразования (3) и (4), которое после упрощения и потенцирования примет вид:

$$Ra = 0,3458 \cdot E^{0,2175} \cdot L^{-0,3195}, \quad (8)$$

По модели (8) был построен объемный график зависимости шероховатости от энергии импульсов и индуктивности.

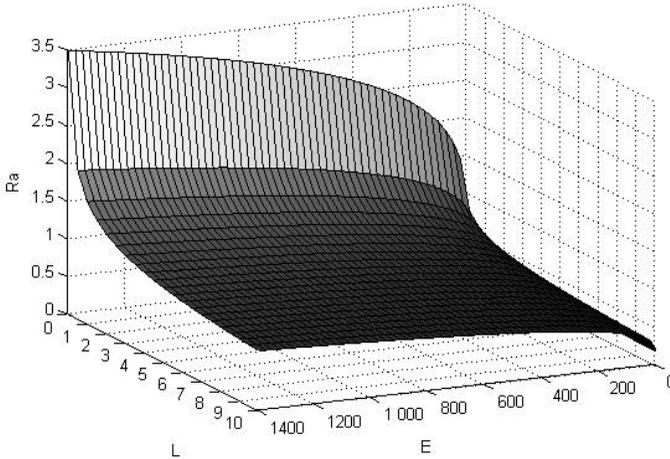


Рисунок 1

Полученная математическая модель (8) и график, показывают, что шероховатость поверхности в большей степени зависит от индуктивности, причем эта связь обратная. От энергии импульсов зависимость прямая и относительно меньшая.

В ряде случаев максимально возможная производительность электроэрозионной прошивки отверстий ограничивается требованиями по шероховатости, а точность, как правило, обеспечивается автоматически выбранными режимами. К этой группе относится большая номенклатура деталей электронных приборов с глубиной микроотверстий до 10 диаметров. Для обработки отверстий этой группы оптимальное сочетание режимов обработки – энергии  $E$  и индуктивности  $L$ , целесообразно рассчитывать по интерполяционной модели вида (8), которую в связи с наличием двух факторов удобнее привести к дискретно-табличному виду (см. табл.3).

Таблица 3 – Значения шероховатости отверстий Ra, мкм при обработке в воде нержавеющей стали X18H10T

Энергия импульсов, мкДж	Индуктивность в разрядной цепи, мкГн						
	1,5	2,37	3,65	4,96	8,21	15,16	25,6
6,41	0,455	0,393	0,343	0,311	0,264	0,217	0,184
14,1	0,540	0,467	0,407	0,369	0,314	0,258	0,218
21,15	0,590	0,510	0,444	0,403	0,343	0,282	0,238
30,13	0,637	0,551	0,480	0,435	0,370	0,304	0,257
64,1	0,751	0,649	0,565	0,512	0,436	0,352	0,303
96,15	0,820	0,709	0,617	0,560	0,476	0,392	0,331
211,54	0,974	0,841	0,733	0,664	0,566	0,465	0,393
301,28	1,051	0,908	0,791	0,717	0,611	0,502	0,425
352,56	1,088	0,940	0,819	0,742	0,632	0,520	0,439
641,03	1,239	1,071	0,933	0,846	0,720	0,586	0,500
1282,05	1,441	1,245	1,084	0,983	0,837	0,688	0,582

Выбирая по таблице ближайшее меньшее значение Ra относительно заданного чертежом детали, определяют требуемое оптимальное сочетание режимов обработки: энергия импульсов и индуктивность в разрядной цепи, с помощью которых обеспечивается наибольшая производительность. Например, при заданной шероховатости  $Ra = 0,64 \text{ мкм}$ , имеет ближайшее меньшее табличное значение  $Ra_{\text{табл}} = 0,617 \text{ мкм}$ , которому соответствуют оптимальные режимы:  $E_{\text{опт}} = 96,15 \text{ мкДж}$ ,  $L_{\text{опт}} = 3,65 \text{ мкГн}$ .

Выводы:

1. Введение в разрядную цепь генератора импульсов индуктивности высокой добротности в значительной степени снижает шероховатость обработанной поверхности при электроэрозионной прошивке малых отверстий. Причем, степень влияния индуктивности на шероховатость выше степени влияния энергии импульсов.

2. Полученная интерполяционная математическая модель зависимости шероховатости обработанной поверхности от энергии импульсов и индуктивности позволяет с помощью дискретно-табличного метода определять с высокой точностью оптимальные режимы обработки, при которых обеспечивается наибольшая производительность при соблюдении требований по шероховатости.

### **Список литературы:**

1. Бойко А.Ф. Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 314с.
2. Погонин А.А., Бойко А.Ф., Домашенко Б.В. Исследование переходных процессов при параллельном соединении транзисторных ключей в генераторах импульсов электроэрозионных станков // Вестник БГТУ им.В.Г.Шухова. 2005. №11. С.368-376.
3. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184с.

## **АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ УПЛОТНЕНИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ**

**Бондаренко Ю.А., д-р техн. наук, проф.,**

**Антонов С.И., аспирант**

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

Развитие промышленности Российской Федерации в современных условиях рыночных отношений требует разработки и внедрения передовых новых технологических процессов производства продукции, нового высокопроизводительного технологического оборудования, эффективных методов обслуживания и диагностики состояния промышленного оборудования в условиях эксплуатации, новых методов и способов модернизации и реставрации устаревшего оборудования.

Одним из основных факторов повышения эффективности работы оборудования промышленности строительных материалов является его надежность, зависящая в частности от качества монтажных работ, своевременной профилактики, технического обслуживания и капитального ремонта, от изменения конструкции отдельных узлов и агрегатов, обеспечивающих длительную безотказную работу оборудования и экономию энергоресурсов.

Повышенный расход энергетических ресурсов связан во многих случаях с несовершенством конструкции обжиговых агрегатов, со значительными потерями тепла, которые приводят к нарушению технологических процессов производства сырья.

Поэтому разработка новых технологических процессов и прогрессивных конструкций, обеспечивающих повышение надежности и оптимизацию технических и экономических показателей функционирования оборудования промышленности строительных материалов, является актуальной.

Между неподвижной частью вращающейся печного агрегата и вращающимся разгрузочным концом, а также между загрузочным концом и стенкой дымовой камеры, в печь и камеру поступает наружный воздух, имеющий температуру гораздо ниже, чем газы в печном агрегате. Это в значительной мере снижает тепловую эффективность печи. Воздух, поступающий в печной агрегат в направлении разгрузочного конца, уменьшает температуру газов в печи, а воздух, поступающий в дымовую камеру, понижает разрежение в печи. Эти негативные процессы ведут к уменьшению

производительности печного агрегата и к увеличению расхода топлива при производстве выпускаемой продукции. С целью снижения подсоса наружного воздуха в рабочую зону печного агрегата, на печь устанавливается уплотнительное устройство.

Уплотнительные устройства устанавливаются на загрузочном и разгрузочном концах вращающейся печи, таким образом, устраняя подсосы наружного воздуха в печь, через зазоры, которые возникают при эксплуатации печного агрегата из-за неточности его установки, перемещения вдоль оси, радиального биения, деформации в результате работы при высоких температурах. Тепловой режим в печи может нарушаться также в соответствии с климатическими условиями, в которых она эксплуатируется, и применяемым вспомогательным оборудованием, работа которого зависит от многих факторов, например, атмосферного давления, влажности, температуры воздуха и т.д.

Газы, которые отходят из печи, выбрасываются вентиляторами (дымососами), рассчитанными на объем газа, проходящей через печь и создания в ней разрежения. Имеющийся зазор обеспечивает подсос наружного воздуха, в результате чего объем газа увеличивается, дымососы не успевают выбрасывать газы из печи и она «запирается», вследствие чего на разгрузочном конце печи, через зазоры происходит выброс горячих газов и пыли, что приводит к нарушению технологического режима эксплуатации.

Количество подсасываемого в печной агрегат воздуха находится в прямой зависимости от площади кольцевого зазора, коэффициента воздухоувлечения, от общей площади всех отверстий, а также от перепада давлений или тяги в головке печи, плотности воздуха при температуре на входе и др. По результатам проведения исследований некоторых авторов предотвращение подсосов воздуха дает 50-75 тыс. долларов годовой экономии на одну вращающуюся печь, например, по данным Дмитриева А.М. [9], на печи диаметром 4,5 м при подсосе воздуха 7 ... 8% от общего количества, удельный расход топлива возрастает на 3,5 ... 4 кг/т.кл. Вальтер Г. Дуда в опубликованной работе [10] приводит расчет дополнительного расхода топлива при подсосе воздуха на разгрузочном конце печи, на основании которого можно сделать вывод, что для поддержания технологического режима получения продукции, при кольцевом зазоре шириной 4 см на вращающемся печном агрегате диаметром 4 м, требуется избыточный расход угля 21 т/сут.

Проблему предотвращения подсоса воздуха на разгрузочном конце вращающейся печи рассматривали многие исследователи и

конструкторы. Поэтому в настоящее время известны ряд разработок различных типов уплотнений. Все разработки направлены на повышение работоспособности этих уплотнительных устройств в условиях эксплуатации, но в промышленности применения не нашли. При работе вращающейся цементной печи функциональные поверхности уплотнительного устройства находятся под воздействием разнообразных факторов, основные из которых: высокая температура газов, находящихся в печи, высокая температура корпуса печи, радиальные и осевые перемещения печи, вредные примеси, которые содержатся в газе печи; кратковременного «выброса» пламени и внешних факторов, основными из которых являются атмосферные осадки и температура окружающей среды. Совокупность этих внутренних и внешних факторов, согласно статистики, приводит к негативным последствиям а именно, к разрушению уплотнительного устройства при его работе в период менее одного года.

Значительная часть уплотнительных устройств известных конструкций не предотвращают подсоса воздуха. Во многих случаях уплотнительные устройства имеют сложную пространственную конфигурацию, что осложняет их производство, ремонт, техническое обслуживание. Известны случаи применения специальных материалов, применяемых для изготовления деталей, входящих в конструкцию уплотнительного устройства, что значительно повышает стоимость и трудоемкость изготовления этих уплотнений. В связи с тем, что уплотнительные конструкции имеют большие габаритные размеры, то и площади трения при сопряжении элементов уплотнительных устройств и непосредственно цементной печи значительные, в местах контакта происходит интенсивный износ, который увеличивается при недостаточной точности изготовления поверхностей сопряжения. На увеличение износа функциональных поверхностей уплотнительных устройств большое влияние оказывает и высокая температура от воздействия и контакта с газами, находящимися в печи.

Из-за интенсивного разрушения уплотнительных устройств, часто конструктивной особенностью их является изготовление элементов, входящих в их состав, из металла, имеющего толщину до двадцати миллиметров, что значительно увеличивает металлоемкость изделия и делает эти устройства практически неремонтоспособными ремонта в условиях эксплуатации в силу Известные и применяемые в настоящее время разработки уплотнительных устройств предназначены для печей определенного типоразмера и их нельзя использовать на печи, имеющей другие габаритные размеры.

Уплотнительные устройства известных конструкций работоспособны при условии, если корпус печи в месте базирования и контакта уплотнения имеет правильную цилиндрическую форму, отсутствует биение при вращении, не имеет значительного осевого перемещения, трущиеся поверхности деталей уплотнения смазываются и очищаются от пыли, периодически проводится осмотр деталей уплотнения и изнашивающиеся детали своевременно удаляются [2,6].

Энергосберегающее уплотнение [1,3,5,6], снижающее подсосы воздуха, улучшает режим работы холодильника, уменьшается расход топлива, в результате чего стабилизируется процесс горения и интенсифицируется технологический процесс обжига, повышает температуру факела.

Недостаточная герметичность уплотнений между холодным концом печи и пыльной камерой является одним из основных факторов, приводящих к значительным потерям энергетических ресурсов, как и низкое качество изготовления уплотнения горячего конца [8]. Однако и в этом случае подсосы воздуха увеличивают расход электроэнергии, поскольку повышение объема отходящих газов требует роста мощности дымососа и электрофильтров.

Поэтому разработка технологических, оптимальных по конструкции и работоспособных и ремонтпригодных в эксплуатации уплотнительных устройств является необходимой и актуальной для промышленности строительных материалов.

#### **Список литературы:**

1. Вращающаяся цементная печь. Патент на полезную модель № 106344 кл. МПК F27B 7/24, № 2010145601/02, заявл. 09.11.2010, опубл. 10.07.2011 г. Бюл. № 19. 0,24/0,08. Федоренко М.А., Аулов В.Г., Санина Т.М., Бондаренко Ю.А.
2. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Санина Т.М. Энергосберегающие методы восстановления работоспособности оборудования промышленности строительных материалов (монография). Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. 162 с.
3. Вращающаяся цементная печь. Патент на полезную модель № 121561 кл. МПК F 27 В 7/00, № 2012110443/15, заявл. 19.03.2012, опубл. 27.10.12 г. Бюл. № 30. 0,23/0,12. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Санина Т.М. Маркова О.В.
4. Федоренко М.А. Конструктивно-технологические методы и способы восстановления работоспособности цементных вращающихся печей (монография). Белгород: Изд-во БГТУ, 2007.

5. Федоренко М.А. Лепестковое уплотнительное устройство для цементных вращающихся печей // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2007. № 3. С. 67-69.
6. Система устранения выброса пыли в атмосферу / М.А. Федоренко, Ю.А. Бондаренко, Т.М. Санина, В.Г. Афонин, С.И. Антонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 2. С. 67-68.
7. Методы предотвращения коррозионного разрушения поверхностей уплотнения / М.А. Федоренко, Т.М. Санина, В.Г. Аулов, О.В. Маркова // Технология машиностроения. 2013. № 5. С. 37-39.
8. Исследование процессов выброса клинкерной пыли в атмосферу / М.А. Федоренко, Ю.А. Бондаренко, Т.М. Санина, В.Г. Афонин, В.Г. Аулов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 5. С. 76-78.
9. Дмитриев А.М., Фридмаш И.А. Возможности снижения расхода топлива при мокром производстве цемента: учебник. М.: Цемент, 1978. №7. С. 24-25.
10. Вальтер Г. Дуда. Цемент. пер. с англ. М.: Стройиздат, 1982. 464 с.
11. Цементная вращающаяся печь с рекуператорными холодильниками. Патент на полезную модель. № 71745 кл. МПК F27B 7/00, № 2007115831/22, заявл. 25.04.2007, опубл. 20.03.2008 г. Бюл. № 8.0,24/0,12. Федоренко М.А, Бондаренко Ю.А.
12. Устройство возврата клинкерной пыли в холодильник. Патент на полезную модель № 132007 кл. МПК B23B 5/00, № 2013112707/02, заявл. 21.03.2013, опубл. 10.09.2013 г. Бюл. № 25.0,23/0,12. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Санина Т.М.
13. Устройство вращения крупногабаритных вращающихся агрегатов для сушки и обжига сыпучих материалов. Патент на полезную модель № 135096 кл. МПК F27B 7/26, № 2013121112/02 заявл. 07.05.2013, опубл.

## **ПРОБЛЕМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ПЕЧНЫХ АГРЕГАТОВ**

**Гетьман Ю.А., студент,  
Маслова И.В., канд. техн. наук, доц.,  
Шипилов И.П., студент,  
Шипилов К.П., студент**

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

Вопросы восстановления точности формы бандажей и роликов опорных узлов цементных печей не теряют своей актуальности, так как, направлены на повышение долговечности узлов, износостойкости контактных поверхностей и повышения экономической эффективности печи в целом. Цементная печь – уникальное, крупногабаритное, дорогостоящее оборудование, ремонт и восстановление которого являются трудоемкими и ресурсоемкими процессами. Наиболее ответственной и наименее долговечной частью цементной печи являются ее опорные узлы, которые в результате действия избыточных нагрузок и наличия первоначальных дефектов приводят к отклонениям в работе цементной печи от номинальных режимов, и зачастую требуют внеплановых ремонтных работ, стоимость которых может быть соизмерима со стоимостью новых опорных узлов. В реальных условиях эксплуатации технологического оборудования скорость износа сопряженных деталей может быть определена статистическим методом. Для этого необходимо проработать детали с нормальной нагрузкой в течение 150...200 часов.

Вращающиеся печи работают в абразивной среде и при высокой температуре, и, несмотря на хорошее уплотнение пыль, образующаяся в процессе работы, проникает в сопряжения трущихся деталей.

В состав опорных узлов вращающейся цементной печи входят бандажи и опорные ролики, от состояния которых зависит расход электроэнергии, износ корпуса печи и ее футеровки. Под бандажом понимают металлические кольца, надеваемые на части машин для увеличения их прочности или уменьшения износа. Бандаж вращающейся обжиговой печи представляет собой крупногабаритное стальное кольцо, охватывающее ее корпус и опирающееся на опорные ролики. Они служат для придания необходимой жесткости корпусу вращающегося агрегата.

В процессе эксплуатации происходит износ рабочих поверхностей деталей. Одним из методов восстановления работоспособности вращающихся крупногабаритных деталей с нестационарной осью вращения является механическая обработка с целью придания детали необходимой формы. Точение наружной поверхности осуществляется по безрамной технологии, которая заключается в использовании приставных станков для обработки наружной поверхности.

Для обеспечения и повышения точности обработки предлагается устройство станочного модуля с возможностью ориентирования резца по нормали к обрабатываемой поверхности, которое позволяет вести обработку наружной поверхности крупногабаритных вращающихся деталей в процессе безостановочной работы агрегата.

На продольном суппорте станочного модуля установлен поворотный механизм, несущий поперечный суппорт с резцедержателем и возможностью поворота, привод поперечной подачи и червячное колесо, взаимодействующее с червяком, закрепленном на продольном суппорте и связанным с приводом углового положения. При этом станочный модуль снабжен схемой управления, включающей устройство измерения формы и положения, устройство обработки и хранения информации и связанный с ним блок управления, соединенный с приводами поперечного и углового перемещений.

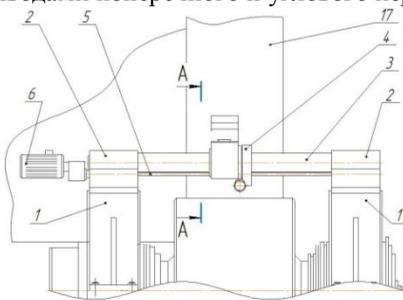


Рисунок 1 – Общий вид станочного модуля

Привод поперечной подачи обеспечивает изменение вылета резца в зависимости от изменения глубины резания, связанной с погрешностями поверхности обрабатываемой детали.

Для срабатывания поворотного механизма и необходимого поперечного перемещения резца в полезной модели служит схема управления этими движениями. Устройство измерения формы и положения, входящее в эту схему, измеряет поверхность бандажа,

определяет погрешность формы бандажа в каждый момент времени и снабжает информацией устройство обработки и хранения информации, которое управляет приводами поперечной подачи и углового положения режущего инструмента, обеспечивая тем самым ориентирование его по нормали к обрабатываемой поверхности.

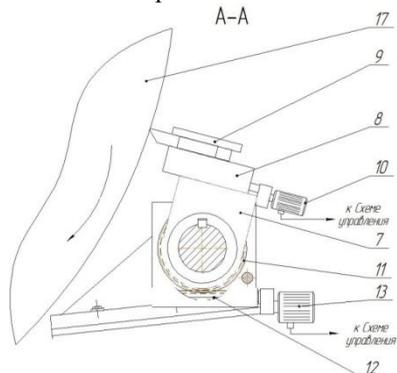


Рисунок 2 – Поперечный разрез станочного модуля

Станочный модуль содержит опорные стойки 1 с разрезными головками 2, в которые устанавливается направляющая 3. На направляющей 3 установлен подвижный продольный суппорт 4. Перемещение продольного суппорта 4 осуществляется с помощью ходового винта 5, кинематически связанного с двигателем 6. Продольный суппорт 4 снабжен поворотным механизмом 7, установленным на выступающей части продольного суппорта 4 с посадкой, обеспечивающей возможность вращения поворотного механизма 7 относительно продольного суппорта 4. На направляющей поворотного механизма 7 установлен поперечный суппорт 8 с резцедержателем 9. На поворотном механизме 7 закреплен двигатель поперечной подачи 10, связанный ходовым винтом с поперечным суппортом 8. На одном из торцов поворотного механизма 7 жестко закреплено червячное колесо 11, находящееся в зацеплении с червяком 12, установленным в продольном суппорте 4 и кинематически связанным с двигателем углового положения 13.

Жесткое закрепление червячного колеса 11 обеспечивает возможность поворота поворотного механизма 7 вместе с червячным колесом при передаче вращения на червячное колесо.

Управление станочным модулем может осуществляться на персональном компьютере, на котором установлено программное

обеспечение, позволяющее давать команду на рабочий элемент станка для перемещения резцедержателя, в зависимости от полученной информации от устройства определения формы.

Устройство определения формы производит измерение геометрических параметров наружной поверхности крупногабаритных вращающихся деталей либо контактным, либо бесконтактным методом. Бесконтактный способ определения формы можно осуществить, направив на поверхность объекта световой луч в форме правильной геометрической фигуры, параметры которого можно легко определить.

Станочный модуль для восстановительной обработки позволит производить ремонт вращающихся деталей в процессе их непрерывной работы, что повысит скорость производственного процесса, сократит материальные и временные затраты на ремонт деталей и их дорогостоящую замену, а согласно экономическим расчетам целесообразнее осуществлять восстановительный ремонт наружных поверхностей вращающихся крупногабаритных деталей с нестационарной осью вращения, нежели производить замену крупногабаритных рабочих элементов печных агрегатов.

#### **Список литературы:**

1. Маслова И.В., Блудов А.Н. Обоснование использования управляемого процесса при восстановлении формы крупногабаритного тела вращения, не имеющего стационарную ось вращения// Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2012. № 3. С.76-79.
2. Пат. 101952 Российская федерация, МПК, Н 23 Н 5/00. Маслова И.В.,Погонин Д.А., Хуртасенко А.В., Чепчуров М.С. Станочный модуль для восстановительной обработки бандажей и роликов/ заявитель и патентообладатель: ГОУ ВПО Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. - № 2010138151/02; заявл. 14.09.2010; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4. 6с.
3. Маслова И.В. Восстановительная обработка бандажей с использованием управляемого станочного модуля // 3<sup>ья</sup> Международная научно-техническая конференция. Модернизация Машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения (ТМ-2011), г. Брянск, 19-20 мая 2011 г.
4. Маслова И.В., Хуртасенко А.В. Использование управляемого станочного модуля с бесконтактным определением формы детали при восстановительной обработке бандажей вращающихся цементных печей // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб.ст./под ред. В.С. Богданова. Белгород, 2011. Вып.Х.С. 193-195.

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТА БАНДАЖА И РОЛИКА**

**Гончаров М.С., аспирант,  
Хуртасенко А.В., канд. техн. наук, доц.,  
Шрубченко И.В., д-р техн. наук, проф.**  
*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова*

Для эффективной эксплуатации бандажей и роликов в течение нормативного срока, необходимо обеспечить соблюдение требований к форме и расположению пятна контакта. Эти поверхности качения модифицируют путем мех. обработки специальными переносными станками. При этом возникает задача определения такой формы поверхности качения, которая обеспечит требуемые условия контакта, а также раскрытия механизма формирования образующей при обработке поверхностей качения мобильным оборудованием [1,2,3].

Одним из возможных инструментов решения этих задач является компьютерное моделирование контактных взаимодействий бандажа и ролика. Процесс формализации этого явления не является однозначным и требует специального рассмотрения.

На первый взгляд, достоверные результаты можно получить в том случае, если учесть влияние всех физических процессов возникающих при функционировании ТБ. Но такой подход приводит к громоздким моделям, противоречащим ресурсам современных компьютеров. Кроме того, многопараметрические зависимости в виду их сложности зачастую не позволяют выяснить причины негативных явлений и ориентируют лишь на устранение их последствий.

Поэтому упрощение модели является необходимым. На этом пути очевидно возможное исключение только тех факторов, которые не оказывают существенное влияние на рассматриваемое явление. В противном случае моделирование приводит к недостоверным результатам.

Для рассматриваемой задачи следует учитывать влияние следующих факторов: 1) длина и диаметр барабана, его угол наклона к горизонту, количество роликоопор и наличие гидроупоров; 2) скорость и плавность вращения, расположение и конструкция привода; 3) температура внутри и снаружи корпуса барабана и его тепловые деформации; 4) конструкция роликоопоры, способ ее закрепления и особенности фундамента.

В общем случае роlikоопора представляет собой опорный ролик, напессованный на ось, которая опирается на подшипники качения или скольжения. Обе роlikоопоры корпусами подшипников установлены на раму опоры ТБ. Кроме ролика все перечисленные детали опоры можно не учитывать только в том случае, если они обладают существенной жесткостью, т.е. их упругие деформации не влияют на положение ролика в пространстве при всех режимах работы. Такие же обязательные требования относятся к раме и фундаменту. При этом является принципиальным и не подлежит упрощению расположение в пространстве оси вращения ролика.

Таким образом, учитывая все перечисленные допущения, будем рассматривать контакт только двух стальных (сталь 30ГСЛ по ГОСТ, коэффициент Пуассона  $\mu=0,3$  и модулем продольной упругости  $E=2 \cdot 10^5$  МПа) твердых тел с выпуклыми цилиндрическими поверхностями (рис. 1).

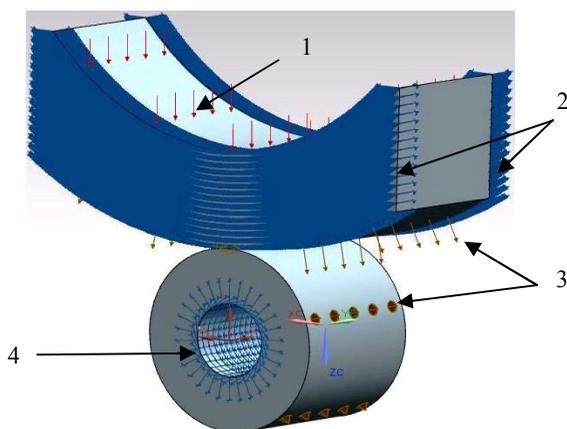


Рисунок 1 – Расчетная модель: 1- нагрузка, 2- ограничение бандажа по торцевым граням, 3- контакт поверхность-поверхность, 4- ограничение ролика: цилиндрический шарнир

Бандаж представим в виде цилиндрического сегмента, ограниченного двумя параллельными, вертикальными плоскостями. Радиусы наружной и внутренней поверхности, а также ширина сегмента соответствуют размерам реальной конструкции бандажа. Например, при

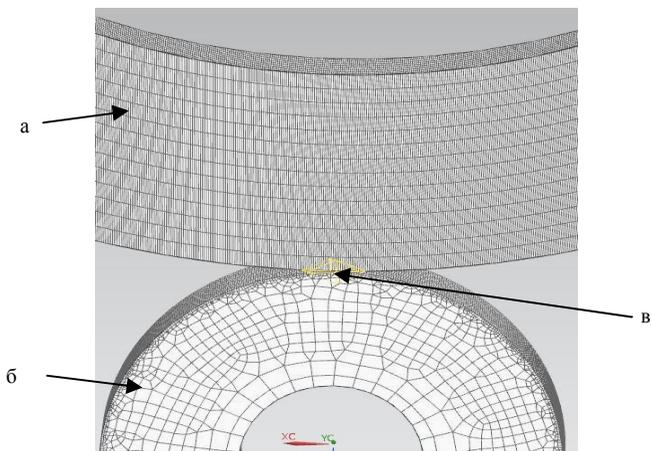


Рисунок 2 – Конечно-элементные сетки  
 а- сетка бандажа размер элемента 80 мм; б- сетка ролика размер  
 элемента 80 мм; в- параметр сетки 580 элементов на ребре

проведении расчетов принимали: бандаж длиной 1000 мм, внешний диаметр – 6100 мм, внутренний диаметр – 4550 мм.

Ролик моделируется полым цилиндром с размерами: длиной 1100 мм, внешний диаметр – 1500 мм, внутренний диаметр – 600 мм.

На следующем этапе построения модели выполняем сборку деталей. При этом последовательными действиями обеспечиваем линейный контакт детали, заданное расположение их осей вращения и симметричное расположение бандажа относительно ролика.

Создаем конечно-элементную модель с помощью NX Advanced Simulation Расширенная симуляция (Siemens PLM Software Inc.) [4]. В качестве решателя выбираем NxNastran. В качестве ограничения ролика выбираем закрепление – цилиндрический шарнир, т.е. фиксируем перемещение по всем осям координат. Для бандажа задаем закрепление по торцевым граням – допускаем только поступательное перемещение в вертикальном направлении, остальные степени свободы исключаем.

Между деталями выбран тип объекта симуляции контакта поверхность-поверхность. В качестве исходной области обозначена внешняя цилиндрическая грань бандажа, а конечной областью выбрана внешняя цилиндрическая грань роликкоопор (рис. 1).

Так как нагрузка от ТБ действует на внутреннюю поверхность бандажа, считаем, что она равномерно распределяется по внутренней

поверхности сегмента и направлена вертикально вниз. Величину нагрузки определяем или экспериментальным способом, или из рекомендаций и нормативных данных. В качестве примера считаем, что  $F = 4 \text{ МН}$  [5].

На следующем этапе задаются важные для конечно-элементного анализа размеры 3D гексаэдральной сетки. Параметры сетки могут быть разными для каждой из деталей и, кроме того, разной в отдельных частях этих деталей. Это дает возможность подробно анализировать напряженно-деформированное состояние только в интересующих точках поверхности. Решатель Nastran позволяет формировать ячейки сетки разного размера внутри и снаружи тела. Для этого задаем для ролика сетку с размером элемента 80 мм, но с гораздо большим (580 элементов) числом элементов на ребре. При этом сходимость процесса разбиения обеспечивается за счет возможности формирования ячеек треугольной формы. Тогда на поверхности ролика получаем сетку с мелкими ячейками (рис. 2). Таким же способом задаем сетку для бандажа.

Кроме того, для получения равномерного распределения напряжений контактной зоны в свойствах контакта «поверхность-поверхность» задаем параметры таким образом, чтобы в диапазоне поиска все зазоры и проникновения были обработаны как соприкосновения.

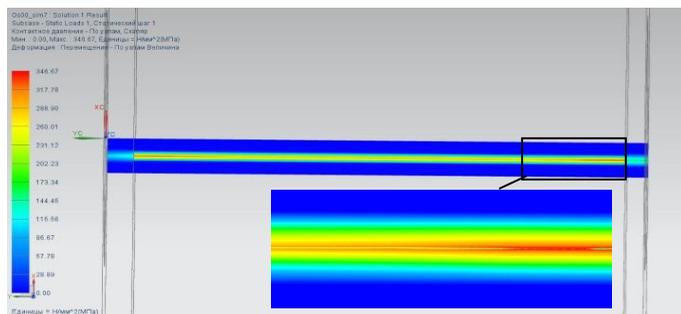


Рисунок 3 – Карта контактных давлений при параллельных осях

На этом построение конечно-элементной модели заканчивается. Процесс расчета может занимать разное время, которое, как правило, связано с количеством элементов гексаэдральной сетки. После его окончания результаты находятся в специальном «контейнере», который содержит следующие данные: перемещение по узлам, напряжение по

элементам, напряжение по элементам/узлам, сила реакции по узлам, трассировка контакта по узлам, сила контакта по узлам, контактное давление по узлам.

Для оценки интенсивности износа рабочих поверхностей бандажа и ролика рационально использовать данные по контактным давлениям. Их можно использовать как в графическом, так и в табличном виде.

Наиболее наглядно контактные давления представлены в виде карты распределения напряжений по площадке контакта (рис. 3). Величина напряжений обозначена определенным цветом, палитра которого в качестве масштаба указывается на этом же изображении. Пятно контакта имеет прямоугольную форму. Темная окантовка светлой середины соответствует зоне, узлы которой вошли в результаты, но напряжения в них отсутствуют. Например, результаты расчета для перечисленных выше исходных данных показывают, что максимальное давление контакта 346,67 МПа.

Проверим этот результат на модели Герца, полученной им для случая контакта двух стальных цилиндров ( $\mu=0,3$ ) и многократно испытанной на практике. Контактные напряжения [6]:

$$\sigma_H = 0,418 \cdot [F \cdot E \cdot (d_1 + d_2) / (d_1 \cdot d_2 \cdot b)]^{0,5},$$

где  $F=4$  МН – нагрузка;  $E=2 \cdot 10^5$  МПа – модуль упругости;  $d_1=1.5$  м;  $d_2=6.1$  м – диаметры соответственно ролика и бандажа;  $b=1$  м – длина контакта. Получаем:  $\sigma_H = 346,647$  МПа, т.е. расхождение результатов, составляет не более 2%.

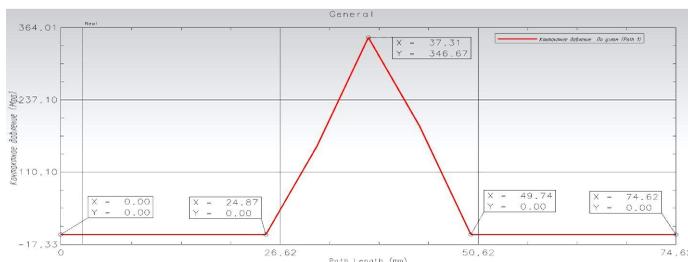


Рисунок 4 – График контактных напряжений в узлах сетки на ребре бандажа

Кроме того, в навигаторе постпроцессора можно использовать функции для построения графиков. Например, для оценки размеров пятна контакта можно использовать график распределения напряжений по узлам сетки на ребре бандажа (рис. 4). Из него следует, что ширина

площадки контакта  $B = 49,74 - 24,87 = 24,87$  мм, тогда площадь пятна контакта  $A = 24,87 \cdot 1000 = 24,87 \cdot 10^3$  мм<sup>2</sup>.

Численные значения поля напряжений можно получить, используя вкладку распознавания результатов. При этом напряжения импортируются, например, в MicrosoftExcel (MicrosoftCorporation) в виде таблицы с возможностью последующей обработки. Например, из такой таблицы получаем закономерность распределения напряжений в опасном сечении по длине линии контакта (рис. 5, кривая 0°).

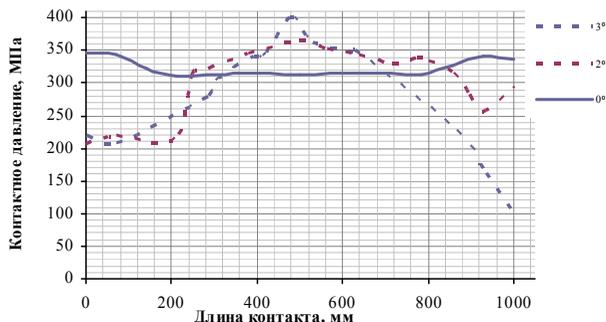


Рисунок 5 – Распределение максимальных напряжений по длине контакта

Полученные графики показывают, что только на концах бандажа вследствие концентрации напряжения увеличиваются, оставаясь постоянными в остальных точках.

Все выше описанные результаты можно получить и в том случае, если оси бандажа и ролика не лежат в одной плоскости. Такое перекашивание часто встречается на практике вследствие разных причин (ошибок монтажа, неквалифицированного обслуживания, ошибок регулировки положения ТБ и т.д.). В качестве примера выполнены вычисления при повороте бандажа на 3° и 2°.

Результаты расчетов (рис. 5) показывают: 1) длина пятна контакта при повороте осей от 0 до 3° не изменяется; 2) наименьшие напряжения возникают на концах контактной линии, а по ее длине изменяются не равномерно; 3) максимальные напряжения возникают в центре поворота осей и на 25-30% превышают напряжения при параллельных осях.

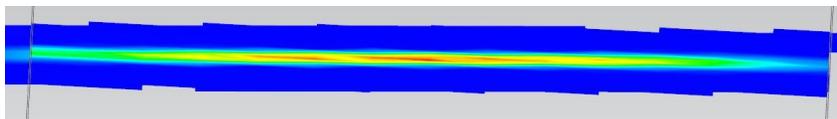


Рисунок 6 – Карта контактных давлений при повороте бандажа на 3°

Площадка контакта большей части не существенно отклоняется от прямоугольной формы при заданном повороте осей. Ее ширина не изменяется (рис. 6), но само пятно контакта явно несимметрично относительно оси бандажа. Зона малых напряжений (меньше 100 МПа) на правом конце площадки демонстрирует тенденцию изменения формы контакта от прямоугольного к несимметричному эллипсу. Вместе с тем, очевидно, что такое неравномерное распределение напряжений не будет стабильным, т.к. приведет к неизменному износу и изменению формы контактных поверхностей.

#### **Список литературы:**

1. Шрубченко И.В. Технологические основы обеспечения формы и условий контакта поверхностей качения опор технологических барабанов при обработке мобильным оборудованием: Автореф. дис. д-ра техн. наук. М., 2007. 44 с.
2. Шрубченко И.В. Технологические основы обеспечения формы и условий контакта поверхностей качения опор технологических барабанов при обработке мобильным оборудованием: дисс. докт. техн. наук. М., 2007. 373 с.
3. Ушаков Р.Н., Погонин А.А., Шрубченко И.В. Определение формы поверхностей крупногабаритных деталей, имеющих бесцентровую схему базирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2005. №11. С.421-423.
4. Гончаров П.С., Артамонов И.А., Халитов Т.Ф., Денисихин С.В., Сотник Д.Е. NXAdvancedSimulation. Инженерный анализ. М.: ДМК Пресс, 2012. 504с.
5. Боганов А.И. Вращающиеся печи цементной промышленности. М.: Машиностроение, 1965. 320 с.
6. Лоскутов Ю.А., Максимов В.М., Веселовский В.В. Механическое оборудование предприятий по производству вяжущих строительных материалов: Учебник для техникумов промышленности строительных материалов. М.: Машиностроение, 1986. 376 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Гончаров М.С., аспирант,  
Шрубченко И.В., д-р техн. наук, проф.,  
Мурыгина Л.В., канд. техн. наук,  
Щетинин Н.А., аспирант

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

Для обработки поверхностей качения бандажей и опорных роликов вращающихся печей в настоящее время широко применяется мобильное оборудование. Наиболее совершенным из них является универсальный встраиваемый станок, разработанный на кафедре технологии машиностроения БГТУ им. В.Г. Шухова [1]. Значительные по размерам обрабатываемые поверхности требуют назначения наиболее производительных режимов, таких как глубина резания и подача. Однако, применение таких достаточно жестких режимов, может приводить и к значительным деформациям, возникающим в технологической системе, а, следовательно, и к увеличению погрешности обработки поверхностей [2]. С целью прогнозирования получаемой погрешности и определения рациональных режимов обработки разработана модель для исследования напряженно-деформированного состояния технологической системы. Создана 3-D модель универсального встраиваемого станка УВС-01 с помощью программного обеспечения *SolidWorks 2013*. Станок для обработки может устанавливаться на правый либо левый опорный ролик (рис. 1).

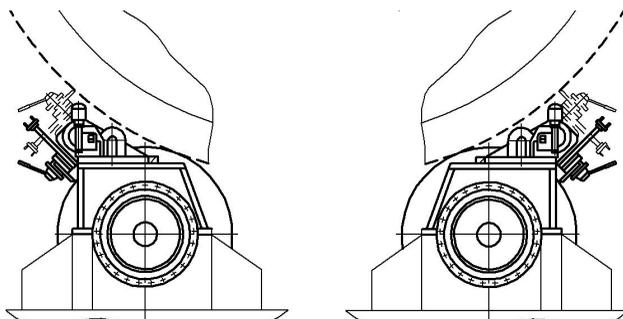


Рисунок 1 – Возможные схемы установки станка

Таким образом, оказываются возможными схемы с различным относительным направлением вращения обрабатываемых поверхностей. Учитывая то, может осуществляться обработка поверхностей качения бандажей или опорных роликов, направление и точка приложения силы резания может также изменяться (рис. 2). Чтобы обеспечить стабильную жесткость в различных направлениях, а так же с целью повышения технологичности, направляющую предложено выполнить с круглым сечением (рис. 3), со шпонкой на всей длине.

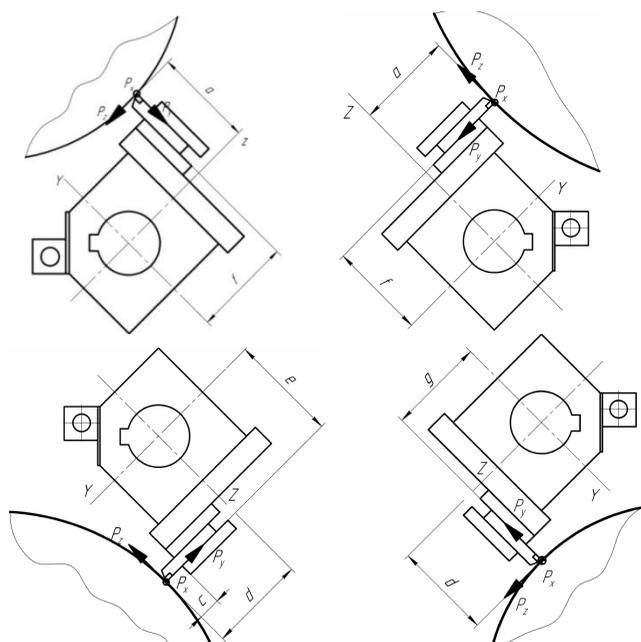


Рисунок 2 – Направление действия сил резания для возможных схем установки станка

Стойки правая и левая предназначены для установки станка на базовые плоскости сменных технологических наладок и несут направляющую (рис. 3 и 4).

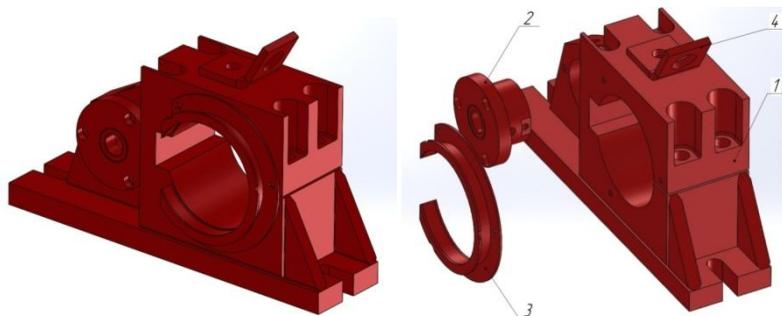


Рисунок 3 – Общий вид стойки правой

Основными элементами стойки правой являются: корпус 1, опора винта 2, кольцо стойки 3 и грузозахватный элемент 4. Стойка левая отличается опорой 2 ходового винта и расположением кольца стойки 3.

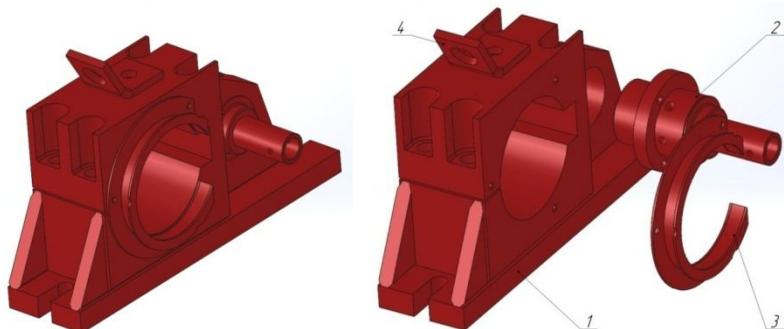


Рисунок 4 – Общий вид стойки левой

Продольный суппорт (рис. 5) предназначен для установки поперечного суппорта и обеспечения продольной подачи станка посредством перемещения по направляющей. Основными элементами продольного суппорта являются корпус 1, гайка маточная 2, вкладыши 3, и кольца 4. Продольный суппорт содержит две базовые плоскости, для установки поперечного суппорта, соответственно нижнюю – для условий обработки поверхностей опорных роликов и верхнюю – для условий обработки бандажей. Плоскости для базирования поперечного суппорта содержат центрирующие выточки и кольцевые T-образные проточки, либо 4 резьбовых отверстия.

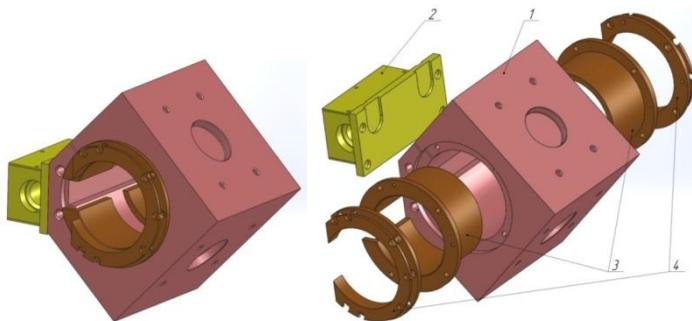


Рисунок 5 – Общий вид суппорта продольного

Поперечный суппорт предназначен для установки режущего инструмента и обеспечения его поперечных перемещений. Для упрощения конструкции и увеличения жесткости, суппорт выполнен с однопозиционным резцедержателем. Таким образом, сформирована 3-Dмодель станка УВС-01 (рис. 6).

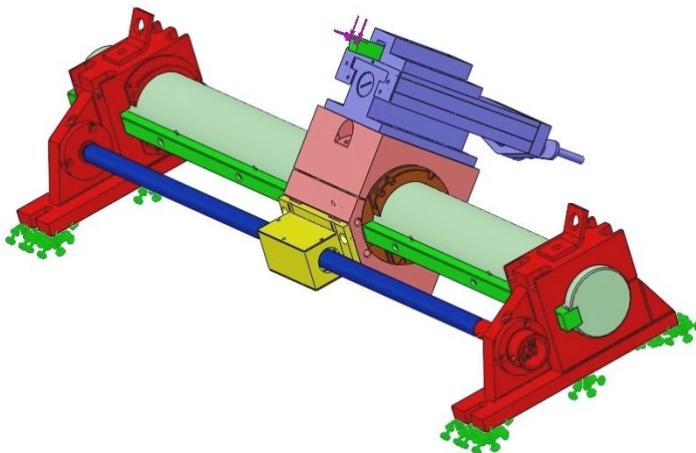


Рисунок 6 – Система с назначенными ограничениями и нагрузками

Вводим ряд ограничений на перемещение отдельных элементов станка. В основном это касается стоек, при помощи которых станок устанавливается на базовые поверхности сменных технологических наладок. Нагружаем режущую кромку инструмента силами, соответствующими силам, возникающим при резании по различным

возможным схемам, и строим сетку конечных элементов (рис. 7).

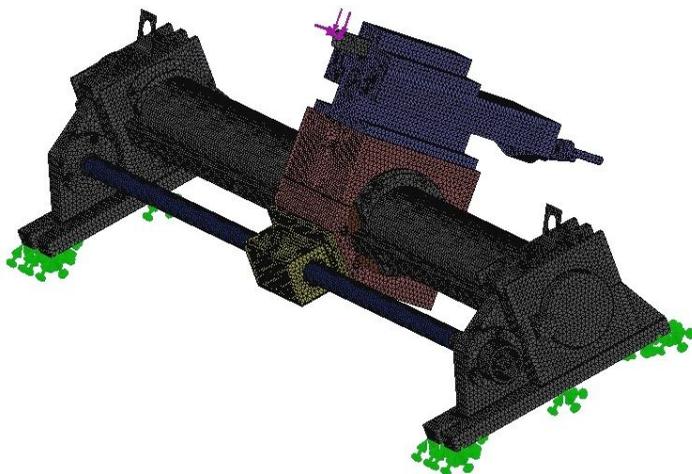


Рисунок 7 – Сформированная сетка конечных элементов

Для упрощения процесса вычислений при моделировании, стойки станка можно заменить наложением соответствующих ограничений. Вместо левой стойки – ограничение на осевые перемещения направляющей и ее поворот относительно оси. Вместо правой стойки – ограничение только на поворот относительно оси и, оставляем подвижность направляющей в осевом направлении. На рис. 8 представлена система с наложением вышеприведенных ограничений и приложением сил резания.

В результате расчета получаем напряженно-деформированное состояние элементов станка и отжатия вершины резца, при различных осевых положениях относительно обрабатываемой поверхности. Представленная модель позволяет прогнозировать возникающие напряжения в отдельных элементах станка и величины деформаций для различных возможных схем обработки. Это позволяет, прежде всего, выбрать оптимальную схему установки станка относительно опорных роликов, при которой деформации элементов технологической системы окажутся минимальными. Модель позволяет также варьировать возможными конструктивными изменениями самого станка и отдельных его элементов, таких как форма и размеры направляющей, стоек станка и других, что важно для оптимизации конструкции.

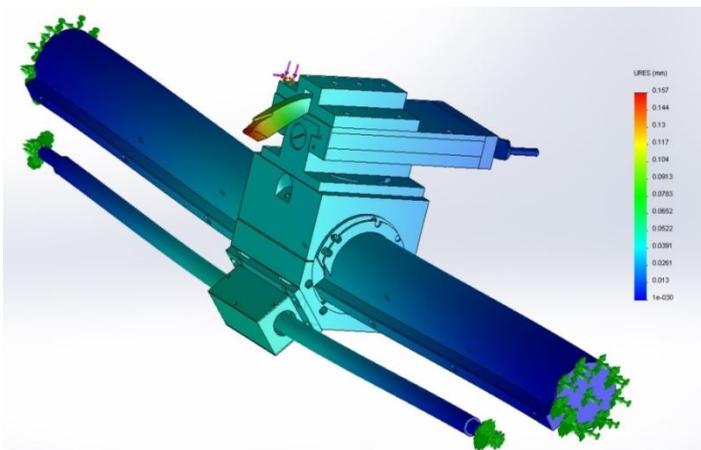


Рисунок 8 – Система с заменой стоек станка соответствующими ограничениями

Изменение нагружений системы позволяет оценить величину получаемой погрешности и определить соответственно рациональные режимы, при которых возможна наиболее производительная обработка с заданной точностью.

#### Список литературы:

1. Расчет и конструирование деталей и узлов металлообрабатывающих станков: учеб. пособие / А.Т. Калашников, А.А. Погонин, И.В. Шрубченко. Белгород: Изд-во БГТУ, 2003 158 с.
2. Шрубченко И.В. Технологические основы обеспечения формы и условий контакта поверхностей качения опор технологических барабанов при обработке мобильным оборудованием: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.02.08: защищена 25.04.07. / Шрубченко Иван Васильевич; Московский авиац. ин-т. М., 2007, 44 с.
3. Шрубченко И.В., Мурыгина Л.В., Рыбалко В.Ю., Щегинин Н.А. Исследование изменений напряженно-деформированного состояния бандажей при их реконструкции из плавающего типа во вварной // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2013. №5. С. 91-96.
4. Основы технологии машиностроения / под ред. В.С. Корсакова. М.: Машиностроение, 1976. 416 с.
5. ОСТ 22-170-87 Бандажи вращающихся печей. Введен 01.07.87 до 01.07.92 М., 1982. 96 с.
6. Чуб Е.Ф. Реконструкция и эксплуатация опор с подшипниками качения: Справочник. М.: Машиностроение, 1981. 365 с.

## **ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ**

**Дашкевич В.Г., канд. техн. наук,  
Стасевич Г.В., ст. науч. сотр.,  
Ковальчук А.В., мл. науч. сотр.,  
Щербаков В.Г., мл. науч. сотр.,  
Гегеня Д.В., мл. науч. сотр.**

*Филиал Белорусского национального технического университета  
«Научно-исследовательская часть»*

Научно-исследовательская лаборатория упрочнения стальных изделий филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть» с 1966 года занимается исследованиями в области химико-термической обработки материалов и получением на поверхности стальных изделий покрытий различного функционального назначения. В составе лаборатории 14 научных работников, из них 3 доктора и 4 кандидата наук.

Коллективом лаборатории изучены и детально описаны процессы борирования, силицирования, карбидизации, карбонитрирования, алитирования, цинкования, хромирования и другие, а также процессы многокомпонентного насыщения на основе бора, хрома, кремния и алюминия. Изучены термодинамика, химизм, кинетика и механизмы формирования диффузионных слоев, в том числе при многокомпонентном насыщении, исследованы закономерности формирования свойств многослойных композиций, получаемых с использованием химико-термической и вакуумной ионно-плазменной обработки, а также процессы нанесения защитных покрытий.

Лабораторией разработано и детально исследовано более 100 диффузионных слоев моно- и многоцелевого назначения для различных условий эксплуатации ряда металлических материалов (износостойкие, антикоррозионные, жаростойкие, кавитационностойкие и другие). Разработанные способы обработки металлических изделий защищены десятками авторских свидетельств и патентов Республики Беларусь. Разработанные технологические процессы и среды регламентированы ГОСТ –90 «Термодиффузионное упрочнение и защита металлических изделий» и ТУ ВУ 100232486.028-2008 «Среды порошковые насыщающие».

Большинство научных направлений, сформированных на протяжении деятельности лаборатории, не теряют актуальности и в

настоящее время. Основные разработки направлены на создание научных основ получения термодиффузионных покрытий функционального назначения, формирование научных основ и принципов получения порошковых сред для химико-термической обработки с использованием метода внепечной металлотермии, разработку технологических принципов регенерации полученных порошковых сред для создания безотходных технологических процессов, исследование и оптимизацию поверхностной термической обработки металлов и сплавов с использованием индукционного нагрева и других. В лаборатории упрочнения стальных изделий продолжается развитие теоретической и инструментальной базы создания новых высокоэффективных процессов поверхностного упрочнения металлических материалов. В данной статье представлены некоторые перспективные разработки последних лет.

1. Разработанный процесс поверхностного термодиффузионного легирования бором по стабильности и своим технико-экономическим показателям не уступает и даже превосходит однотипные, разработанные зарубежными фирмами BorTecGmbH (Германия), WorldwideAlloySurfacingInc (США). Экономическая эффективность порошкового насыщения борированием определяется кратностью использования смеси и используемым борсодержащим веществом. В случае использования наших насыщающих сред стоимость обработки не уступает жидкостному. Возможности термодиффузионного упрочнения деталей с отверстиями диаметром до 50 мкм при их глубине до 200 мм. Гарантируются равномерность покрытия по толщине, отсутствие таких дефектов как шелушение, отслаивание, скалывание, налипание насыщающей смеси. Максимальные габаритные размеры обрабатываемых деталей ограничиваются лишь объёмом нагревательной камеры термического оборудования. Как правило, длина изделий не превышает 500 мм.

Толщина диффузионного слоя в зависимости, назначения и технологических параметров процесса изменяется от 50 до 400 мкм; а микротвердость может достигать 2000 HV. Показатель шероховатости поверхности детали в результате обработки сохраняется на уровне исходного – 8-й класс. Дополнительную механическую обработку (при необходимости) рекомендуется осуществлять с использованием алмазного инструмента или его аналогов. Технология термодиффузионного поверхностного легирования бором применима во многих отраслях промышленности, где речь идет об абразивном износе поверхностей деталей машин. К ним можно отнести сельское хозяйство,

добывающая отрасль, машиностроение и другие. Технология заключается в борировании в порошковых смесях, содержащих определенные компоненты, при печном нагреве в герметизируемом контейнере. Подбор состава насыщающей смеси и управление температурно-временными параметрами насыщения позволяют получить высоких физико-механические и эксплуатационные свойства обрабатываемой поверхности, отсутствие скальваемости диффузионного слоя и других дефектов.

Предлагаемая технология и состав насыщающих смесей позволяет значительно повысить износостойкость деталей, что обуславливается высокой твердостью и абразивной стойкостью поверхностного слоя после борирования. Наша технология борирования является экономичной и производительной, обеспечивает получение высоких физико-механических и эксплуатационных свойств деталей, работающих в условиях абразивного износа.

2. Термодиффузионное цинкование – один из наиболее перспективных способов нанесения защитных покрытий на стальные, чугунные или медные изделия. Эти покрытия имеют свойства не достижимые другими видами цинкования и поэтому являются особенно предпочтительными в ряде областей эксплуатации. Применяются для защиты от коррозии различных металлоизделий, эксплуатирующихся в жестких коррозионно-эрозийных условиях.

Покрытия, полученные методом термодиффузионного цинкования, имеют существенные преимущества по сравнению с покрытиями, полученными методом горячего оцинкования, так как процесс протекает при более низких температурах и это позволяет цинковать термообработанные, в том числе пружинные стали, без потери их механических свойств. Покрытия, полученные в порошке цинка, имеют самую высокую твердость из всех известных цинковых покрытий и низкий коэффициент трения, поэтому они хорошо противостоят абразивному износу и деформации, гайки не ослабевают в процессе эксплуатации. Сопряженные детали не нужно механически обрабатывать (прорезать резьбу после нанесения покрытия). Гладкая матовая поверхность служит прекрасной основой для прочного сцепления с краской, резиной, клеем, не требуя при этом специальных грунтовых покрытий. Некоторые преимущества:

– Диффузионные цинковые покрытия состоят из слоев железо-цинк (от 7 до 20% железа) образующихся путем термодиффузии цинка в поверхность изделий в процессе их нагревания в присутствии цинкового порошка.

– Покрытие может наноситься на все виды деталей, изготовленных из стали или чугуна с размерами до 200×200×500 (В×Н×L) мм.

– По требованию заказчика толщина покрытия может изменяться в пределах от 10 до 100 мкм и более.

– Покрытие однородно по толщине, точно воспроизводит профиль изделия в целом и отдельных деталей на нем (резьбу, маркировку и т.д.), формируется в сложных профильных пазах, отверстиях, каналах и т.п.

3. Получение наплавочных материалов термодиффузионным легированием. Многие детали в различных областях промышленности, особенно в машиностроении, подвергаются интенсивному истиранию и быстро выходят из строя. Для уменьшения износа детали подвергают наплавке или упрочняют другими методами.

Одними из перспективных направлений в разработке наплавочных материалов является использование процесса термодиффузионного легирования. Слой, получаемый на поверхности материала, может влиять или даже регламентировать структуру и свойства наплавленного слоя. Научными сотрудниками лаборатории ведутся активные работы по использованию поверхностно-легированного материала в качестве наплавочного сплава. В этой работе можно выделить следующие направления:

– поверхностное легирование флюсующе-упрочняющими элементами порошков чугунов, в том числе чугунной стружки (стружки чугунов: ИЧХ28Н2, СЧ20);

– поверхностное легирование флюсующе-упрочняющими элементами стальных порошков (самофлюсующиеся порошки: ПР-сталь 45, ПР-10Р6М5, ПР-Х18Н9);

– поверхностное легирование флюсующе-упрочняющими элементами стальных проволок (проволоки: У7, сталь 08).

*Диффузионно-легированные порошковые материалы для наплавки.* Отличительная особенность – использование в качестве исходного компонента отходов производства в виде стружки или дробы. При этом достигается резкое снижение затрат на наплавочный материал. Применяется такой материал, как правило, для индукционной наплавки. Порошковую шихту наносят на обрабатываемую поверхность слоем заданной толщины, затем индуктором разогревают поверхность детали и порошок. Формируется износостойкая наплавка толщиной порядка 1,0 – 2,0 мм. Пористость полученных слоев

составляет порядка 3–5%. При использовании чугушной дроби структура наплавленного слоя имеет участки доэвтектического, эвтектического и заэвтектического строения, твердость наплавленных слоев 50...60 HRC.

*Присадочные прутки и проволока для наплавки.* Отличительная особенность – введение легирующих элементов в количестве, необходимом для достижения требуемых физико-механических свойств и износостойкости деталей. В целях создания наплавочного материала для деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания, перспективным являются борсодержащие поверхностно-легируемые проволоки разработки наших сотрудников.

4. Совместно с коллективом НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ под руководством Ф.Ф. Комарова разработан комплексный способ поверхностного упрочнения стальных изделий с использованием химико-термической обработки и вакуумных ионно-плазменных технологий (нанесение высокотвердого покрытия). Способ позволяет в 4,5–5,1 раза повысить микротвердость, в 4,1-7,0 раза износостойкость и более чем в 2,5 раза коррозионную стойкость изделий из конструкционных сталей путем формирования на их поверхности нового композиционного материала.

В качестве предварительной обработки используется низкотемпературная нитроцементация в порошковых смесях, которая обеспечивает повышение усталостной прочности на 50–80%, резкое повышение сопротивления изнашиванию по сравнению с цементацией и азотированием. Получаемые на поверхности нитридные и карбидные фазы даже при отсутствии смазочного материала не проявляют склонности к схватыванию и последующему катастрофическому изнашиванию. Для последующего нанесения твердого покрытия она обеспечивает появление протяженного переходного слоя с постепенно нарастающей твердостью между материалом изделия и покрытием. В качестве покрытия используется нитрид титана, который широко распространен, дешев и обладает высоким уровнем триботехнических характеристик. Покрытие может легироваться алюминием.

Существенным преимуществом предлагаемой комбинированной обработки является возможность ухода от стандартной объемной упрочняющей обработки и финишных доводочных операций. Области эффективного использования: инструментальное производство, штамповочное производство и технология пластмасс, подшипниковое производство, механообработка и прецизионная механика, ткацкая и текстильная промышленность, детали общего машиностроения.

## **ПЕРЕНОСНОЙ СТАНОК ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВКЛАДЫШЕЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ**

**Дуганов В.Я., канд. техн. наук, доц.,  
Воронкова М.Н., канд. техн. наук, доц.,  
Архипова Н.А., доц.**

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

В связи с интенсивной работой мельниц и непрерывной нагрузкой на подшипники, по истечению определенного срока эксплуатации, возникают всевозможные неисправности: естественный износ баббитового слоя, трещины, отколы, отставание и выдавливание баббита, износ заплечиков и упорного бурта корпуса подшипника, его отколы и трещины, отколы и трещины армировки, ослабление армировки и образование зазоров между нею и корпусом, что вызывает необходимость «реставрации» подшипника. Для этого, как правило, используется наплавка баббита.

После образования на корпусе подшипника слоя баббита, необходимой толщины, перед производителем ремонта встает задача обработки внутреннего диаметра вкладыша в заданный размер. Традиционно ее решением является либо шабрение, либо механическая обработка на карусельном или горизонтально-расточном станке соответствующего типоразмера. Такая механическая обработка с базированием изделия по буртикам на корпусе подшипника обеспечивает требуемую точность посадочного диаметра.

Диаметр вкладышей таких подшипников может достигать трех метров с допуском не более 0,3 мм на диаметр, а допуск на отклонение формы рабочей поверхности не более 0,5 мм.

На предприятиях, эксплуатирующих такое оборудование в цехах или на горно-обогатительных комбинатах, крупных станков, позволяющих вести расточку посадочного диаметра подшипников таких габаритов, как правило, нет. Обработка рабочей поверхности подшипника, залитой баббитом, производится ручным шабрением с использованием шаблонов.

На кафедре технологии машиностроения БГТУ им. В.Г.Шухова по заказу ремонтного управления компании «Алроса» разработан переносной станок для механической обработки внутренней цилиндрической поверхности подшипников скольжения.

Подробно конструкция переносного станка представлена на рис.1 и рис. 2.

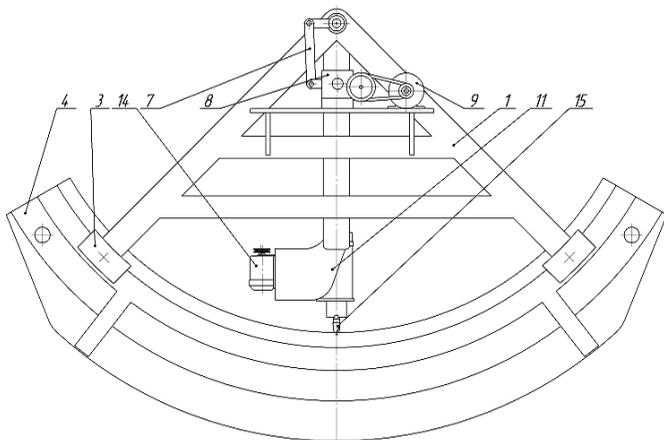


Рисунок 1 – Общий вид станка

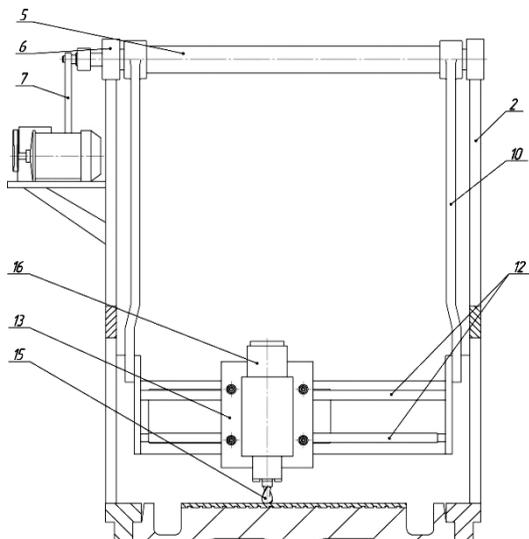


Рисунок 2 – Поперечный разрез станка

Переносной станок содержит корпус 1, выполненный в виде двух плоских рам 2. Каждая плоская рама 2 в нижней части имеет два опорных элемента 3, выполненных, например, в виде башмаков. Опорные элементы предназначены для установки переносного станка на обрабатываемом изделии 4.

В верхней части плоские рамы 2 соединены приводным валом 5, который опирается на подшипниковые узлы 6 плоских рам 2. Приводной вал 5 является конечным звеном кривошипно-коленного механизма 7 привода маятниковой круговой подачи. Кроме того, в привод входят редуктор 8 и электродвигатель 9. На приводном валу 5 жестко закреплена качающаяся рама 10. В нижней части рамы 10 размещен рабочий узел 11. Рабочий узел 11 имеет направляющие 12, на которых установлена подвижная каретка 13. Подвижность каретки 13 обеспечивается за счет кинематической связи ее с приводом продольного перемещения 14. Подвижная каретка 13 оснащена обрабатывающим лезвийным инструментом 15, например фрезой. Обрабатывающий инструмент 15 получает рабочее движение от привода главного движения 16.

Процесс обработки осуществляется в следующей последовательности. Переносной станок устанавливается опорными элементами 3, закрепленными на плоских рамах 2 корпуса 1, на имеющиеся кольцевые проточки корпуса подшипника скольжения 4 и закрепляется на нём, например, при помощи болтов. Затем включается привод главного движения 16 обрабатывающего лезвийного инструмента 15.

После включения привода маятниковой круговой подачи вращательные движения от электродвигателя 9 через редуктор 8 передаются на кривошипно-коленный механизм 7 и преобразуются им в маятниковые колебания приводного вала 5. Так как качающаяся рама 10 жестко закреплена на приводном валу 5, то она вместе с рабочим узлом 11 и обрабатывающим лезвийным инструментом 15 также получает маятниковые колебания. Амплитуда качания рабочего узла 9 при маятниковой круговой подаче должна превышать длину обрабатываемой поверхности изделия 4.

При этом корпус станка, выполненный в виде двух плоских рам с опорными элементами, позволяет осуществить надежное базирование устройства на обрабатываемую деталь, что в значительной степени влияет на точность обработки. Приводной вал с кривошипно-коленным механизмом и качающейся рамой обеспечивает маятниковую круговую подачу рабочего узла, что позволяет вести обработку поверхности с

требуемым радиусом и точностью формы. Применение лезвийного инструмента позволяет получить более высокую точность обработки по сравнению с гибкой абразивной лентой. Рабочий узел с подвижной кареткой и приводом продольного перемещения кроме точности формы детали в поперечном сечении, прямолинейности образующей цилиндрической поверхности, обеспечивают также высокую производительность обработки за счет применения механизированных приводов.

После завершённого цикла круговой подачи относительно детали включается привод 14 (рис. 2) продольных перемещений. В результате этих действий обрабатывающий лезвийный инструмент 15 совершает маятниковые качения на требуемом радиусе подшипника скольжения и перемещается при этом вдоль его оси вместе с кареткой 13 по направляющим 12 со скоростью, определяемой приводом продольных перемещений.

После окончания всего цикла обработки измеряется радиус подшипника и при необходимости после настройки положения обрабатывающего инструмента обработка повторяется.

#### **Список литературы:**

1. Стюарт М. Джонс, Витас Свалбонас. Крупногабаритные мельницы измельчения компании Metso Minerals // Горная промышленность. 2004. №6. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mining-media.ru/ru/article/drobilka/1351-krupnogabaritnye-melnitsy-izmelcheniya-kompanii-metso-minerals> (дата обращения: 15.09.2014).
2. Дуганов В.Я. Определение собственных частот колебаний массивного вращающегося кольца при ремонтной обработке // Ремонт, восстановление, модернизация. 2014. №6. С. 40-42.
3. Пат. 110319 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В23С 1/20. Переносной станок для обработки вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения / Дуганов В.Я., Безуглый П.В., Иванов И.Ю.: заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2011115626/02.; заявл. 20.04.2011; опубл. 20.11.2011. Бюл. № 32.
4. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Санина Т.М., Афонин В.Г., Антонов С.И. Технология обработки торцов барабанов вращающегося оборудования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №4. С. 65–66.

## **СПОСОБ ВЫВЕРКИ ОСИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ ПРИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМ РЕМОНТЕ**

**Дуганов В.Я., канд. техн. наук, доц.,  
Хуртасенко А.В., канд. техн. наук, доц.,  
Архипова Н.А., доц.**

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

На многих предприятиях цементной, горнорудной и нефтехимической промышленности в качестве технологического оборудования используются вращающиеся печи. Эти агрегаты могут достигать размеров свыше 7 метров в диаметре и длины более 200 метров.

В процессе эксплуатации агрегата под действием значительных динамических нагрузок происходит неравномерный износ базовых поверхностей, деформации, а иногда и разрушение корпуса. Все эти явления вызывают дополнительные погрешности, как формы самих базовых поверхностей, так и пространственного положения корпуса агрегата.

Для обеспечения требуемой работоспособности печного агрегата выполняется восстановительная механическая обработка поверхностей опор с помощью специального оборудования [1]. Такая обработка базовых опорных роликов и бандажей, жёстко связанных с корпусом, помимо исправления формы поверхности приводит к изменению геометрических размеров опорных деталей, что влияет на точность базирования самого агрегата на опорах и требует последующей выверки печи и корректировки ее положения для обеспечения прямолинейности оси и теоретического угла наклона печи. Любое отклонение от прямолинейности оси печного агрегата приводят к деформации корпуса, усиленному износу роликов, бандажей и вкладышей подшипников, разрушению огнеупорной футеровки и увеличенному расходу электроэнергии.

Точность установки корпуса печи на роликоопорах зависит от следующих факторов: прямолинейности оси вращения, параллельности осей опорных роликов оси вращения, фактического угла наклона печи.

На кафедре технологии машиностроения БГТУ им. В.Г. Шухова разработан и внедрен на ряде предприятий России и стран СНГ способ выверки оси вращения печи [2]. Предлагаемый способ направлен на повышение срока службы и производительности обжиговой печи за

счёт обеспечения прямолинейности оси вращающейся печи и расположения её под проектным углом наклона.

Сущность способа заключается в том, что производится установка опорных роликов, обеспечивающая параллельность их осей вращения. Затем производится обработка специальным станком поверхностей катания опорных роликов и бандажей, замеряются их диаметры и определяется фактическое положение оси печи. При этом рассчитывается фактическое положение центров бандажей с учётом геометрических параметров каждого бандажа и соответствующей роликоопоры.

Реализация выверки оси печи выполняется в соответствии с приведенной ниже методикой.

1) Производится геодезическая выверка координат осей всех опорных роликов относительно прямоугольной системы координат, параллельной осевым плоскостям, одна из которых вертикальная.

2) Если по результатам выверки осей вращения роликов будут выявлены отклонения от их параллельности между собой и от проектного угла наклона печи, то производится корректировка положения соответствующих осей до их параллельного положения относительно остальных.

3) Производится анализ формы всех бандажей и роликов с целью выявления необходимости исправления формы рабочих поверхностей, и выполняется восстановительная обработка для обеспечения требуемой формы бандажей и роликов.

4) На следующем этапе производится замер диаметров каждой пары опорных роликов и определение диаметров соответствующих бандажей, например по методу трёх точек [3].

5) Далее, на основании данных геодезической выверки координат осей, обозначенных на рис. 1  $A$  и  $B$ , всех опорных роликов и измерения их диаметров, а также зная диаметры соответствующих бандажей, для каждой роликоопоры производится определение фактического положения точки центра каждого бандажа, обозначенного буквой  $O$ , путём определения координат центра  $x_{0_i}$  и  $y_{0_i}$  из системы уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d_{A_i} + D_i}{2} &= \sqrt{(x_{A_i} + x_{0_i})^2 + (y_{A_i} - y_{0_i})^2} \\ \frac{d_{B_i} + D_i}{2} &= \sqrt{(x_{B_i} + x_{0_i})^2 + (y_{B_i} - y_{0_i})^2} \\ x_{B_i} - x_{A_i} &= \sqrt{\left(\frac{D_i - d_{A_i}}{2}\right)^2 - (y_{0_i} - y_{A_i})^2} + \sqrt{\left(\frac{D_i - d_{B_i}}{2}\right)^2 - (y_{A_i} - y_{B_i})^2} \end{aligned} \right. ,$$

где  $d_{A_i}$  – диаметр левого ролика на  $i$ -й опоре;  $D_i$  – диаметр  $i$ -го бандажа;  $x_{A_i}$  и  $y_{A_i}$  – координаты оси левого ролика;  $d_{B_i}$  – диаметр правого ролика на  $i$ -й опоре;  $x_{B_i}$  и  $y_{B_i}$  – координаты оси правого ролика;  $x_{0_i}$  и  $y_{0_i}$  – координаты центра бандажа.

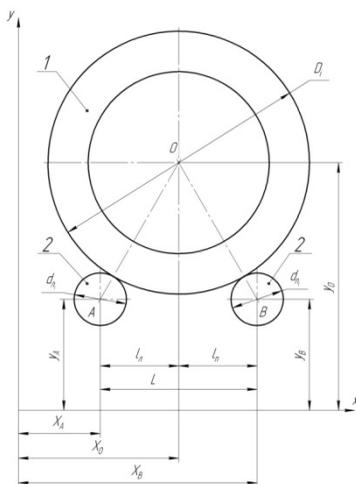


Рисунок 1 – Расчетная схема определения координат опор:  
1 – бандаж, 2 – опорный ролик

б) Затем полученные точки проецируются на взаимно перпендикулярные плоскости, одна из которых вертикальная, а вторая наклонена под проектным углом наклона печи (рис. 2 б, в).

Соединяя проекции центров бандажей между собой, получаем ломаные линии, изображающие проекции искривлённой оси обжиговой печи на вертикальную плоскость (рис. 2 б) и горизонтальную наклонную плоскость (рис. 2 в.). При этом  $\Delta x_{0_i}$  и  $\Delta y_{0_i}$  – величины отклонений фактического положения центра каждого бандажа на указанных плоскостях.

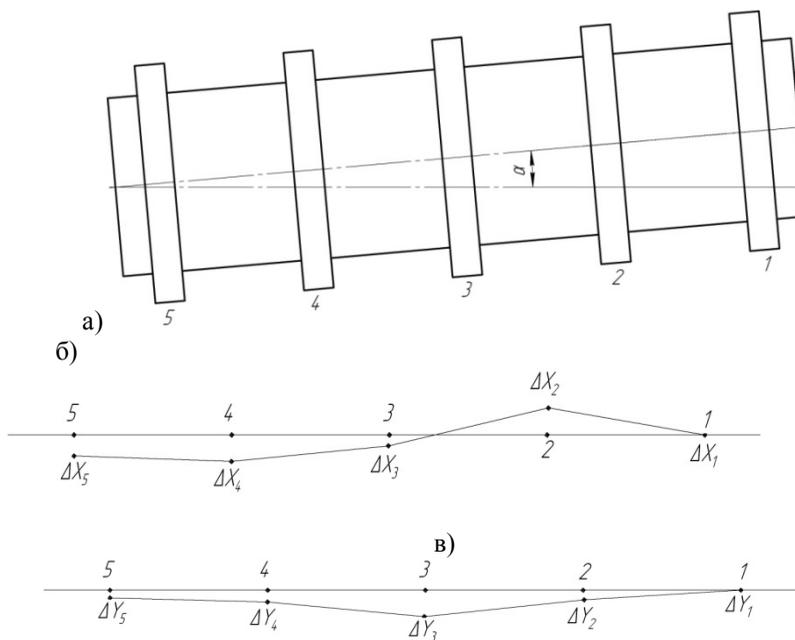


Рисунок 2 – Схемы положения оси печного агрегата:  
 а – фронтальная проекция печи; б – проекция фактического положения оси печи в вертикальной плоскости; в – проекция оси печи в плоскости, перпендикулярной вертикальной и проведенной под проектным углом

7) Имея проекции фактического положения оси на две плоскости и зная величины  $x_{0_i}$  и  $y_{0_i}$  на каждой из роликоопор, производится подсчёт величин  $l_{A_i}$  и  $l_{B_i}$  (см. рис. 1) определение направления перемещения опорных роликов, обеспечивающих выпрямление оси печи.

Так как положение оси печи определено в двух плоскостях, то расчёт перемещений для исправления положения оси печи ведётся по нижеследующим формулам, где учтены отклонения центров бандажей в двух плоскостях:

$$l_{A_i} = \left( \frac{L_i}{2} + \Delta x_{0_i} \right) - \sqrt{\left( \frac{D_i + d_{A_i}}{2} \right)^2 - \left[ \sqrt{\left( \frac{D_i + d_{B_i}}{2} \right)^2 - \left( \frac{L_i}{2} \right)^2} - \Delta y_{0_i} \right]}$$

$$l_{B_i} = \left( \frac{L_i}{2} + \Delta x_{0_i} \right) - \sqrt{\left( \frac{D_i + d_{B_i}}{2} \right)^2 - \left[ \sqrt{\left( \frac{D_i + d_{A_i}}{2} \right)^2 - \left( \frac{L_i}{2} \right)^2} - \Delta y_{0_i} \right]}$$

где  $l_{A_i}$  – необходимое смещение левого ролика;  $L_i$  – расстояние между осями роликов;  $\Delta x_{0_i}$  – искривление оси вращения печи в горизонтальной плоскости;  $D_i$  – диаметр бандажа;  $d_{A_i}$  – диаметр левого ролика;  $d_{B_i}$  – диаметр правого ролика;  $\Delta y_{0_i}$  – искривление оси вращения печи в вертикальной плоскости;  $l_{B_i}$  – необходимое смещение правого ролика.

Поскольку в качестве исходных данных при расчёте берутся фиксированные положения осей роликов, которые в неподвижной системе координат связаны с центрами вращения бандажа минимальным количеством составляющих звеньев размерной цепи – радиусами роликов и бандажа, то смещение центра бандажа от теоретической оси может быть определено с максимальной точностью.

Построение проекции фактического положения оси печи на две координатные плоскости позволяет выявить величины смещения оси на всех роликоопорах, проанализировать распределение технологической нагрузки по длине печи и произвести регулировку с минимальным перемещением. Кроме того, полученные ломаные линии проекций оси,

являются по существу расчётными схемами, поскольку произвести точный расчёт корпуса печи на прочность, можно рассматривая его как многоопорную балку трубчатого сечения.

В связи с большой трудоёмкостью расчётов величин перемещений и самих перемещений, они могут быть выполнены с помощью компьютерных программ.

После определения расчетных перемещений роликов осуществляется регулировка их положения, обеспечивающая расположение центров всех бандажей на одной прямой линии, проведенной под проектным углом наклона печи из центра первого бандажа. Регулировка положения производится перемещением каждого ролика в зависимости от величины необходимого смещения  $l_{A_i}$  и  $l_{B_i}$ .

В соответствии с результатами расчетов следует определить оптимальное положение оси печи. При регулировки оси печи путём смещения роликоопор необходимо следовать ниже следующим рекомендациям: угол наклона оси печи должен быть равен проектному; ролики опор, находящихся вблизи привода печи должны перемещаться с учётом выдержки оптимальных радиальных зазоров в зубчатом зацеплении венцовой и подвенцовой шестерён; перемещения первой и последней роликоопор должны обеспечить правильное технологическое положение горячего и холодного концов печи.

В связи с большой трудоёмкостью расчётов величин перемещений и самих перемещений, они выполняются в специальных компьютерных программах. При этом выбирается оптимальное положение оси печи с точки зрения минимальных перемещений роликоопор. Если имеется опасность нарушения геометрии зацепления в венцовой и подвенцовой шестернях, то необходимо наложить ограничения на перемещение роликоопор, находящихся рядом с приводом.

С учётом указанных рекомендаций приведенная методика позволяет добиться требуемого положения оси а, следовательно, обеспечить надёжную и долговечную работу вращающейся печи.

#### **Список литературы:**

1. Пат. 2468322 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup>F27В 7/22. Способ обеспечения прямолинейности оси вращающейся печи / Дуганов В.Я., Маслова И.В., Хуртасенко А.В.: заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2011112925/02.; заявл. 04.04.2011; опубл. 27.11.2012. Бюл. № 33.

2. Хуртасенко А.В. Технология восстановительной обработки крупногабаритных деталей с использованием методов активного контроля: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. 144 с.
3. Маслова И.В., Блудов А.Н. Обоснование использования управляемого процесса при восстановлении формы крупногабаритного тела вращения, не имеющего стационарную ось вращения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. №3. С. 76-79.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕРЫВИСТОГО РЕЗАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ С НЕОДНОРОДНЫМ ПРИПУСКОМ

Дуюн Т.А., д-р техн. наук, доц.,  
Гринек А.В., канд. техн. наук, доц.,  
Хакимов Л.Р., магистр,  
Никольская В., магистр,  
Баранов Д.С., студент

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

Процесс автоколебаний при механической обработке приводит к значительному снижению качества обработанной поверхности: повышению шероховатости и снижению точности формы деталей. В особенности это касается обработки деталей с неоднородным припуском, поэтому при их обработке назначение технологических режимов необходимо проводить с учетом вибрационных процессов [1,2]. Коллекторы электрических машин постоянного тока состоят из чередующихся медных и изоляционных пластин, то есть резание носит прерывистый характер.

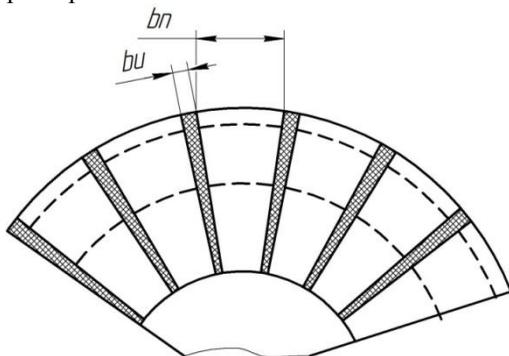


Рисунок 1 – Фрагмент сечения коллектора:  $b_u$  – толщина изоляционной прокладки;  $b_n$  – толщина коллекторной пластины

Процесс резания в случае токарной обработки будет характеризоваться импульсным изменением параметров резания. Выражение, описывающее закон изменения во времени тангенциальной

составляющей силы резания при точении прерывистой поверхности коллектора:

$$P_z(t) = \begin{cases} P_z & \text{при } 0 \leq t \leq T - \frac{b_n}{v} \\ k \cdot P_z & \text{при } T - \frac{b_n}{v} < t \leq T \end{cases} \quad (1)$$

где  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н;  $t$  – время, с;  $v$  – скорость резания, м/с;  $T$  – период колебания силы резания, с;  $b_n$  – толщина изоляционной прокладки, м;  $k$  – коэффициент, учитывающий изменение силы резания при резании изоляционного материала.

Импульсное изменение параметров резания силы резания (1) может стать причиной вынужденных колебаний, параметры которых превышают допустимые значения, а в некоторых случаях вызвать резонансные автоколебания.

Условия, определяющие отсутствие автоколебательного процесса [3,4]:

1. Частота вынуждающей силы  $f_B$  не должна совпадать с первой собственной частотой  $f_c$  изгибных колебаний резца, т.е.

$$f_B \leq (0,7 - 0,75)f_c \quad (2)$$

2. При действии динамической составляющей силы резания максимальная амплитуда  $Z_{\max}$  колебаний резца не должна превышать определенного значения  $Z_{\text{доп}}$

$$Z_{\max} \leq Z_{\text{доп}} \quad (3)$$

3. Для предотвращения проявления эффекта связи мод колебаний, необходимо, чтобы собственные частоты подсистемы инструмента, соответствующие двум взаимно перпендикулярным направлениям (осям), не были близки друг к другу, т.е.

$$f_c / f_{\text{пс}} < 0,9 \quad (4)$$

где  $f_{\text{пс}}$  – фактическое значение собственной частоты продольных колебаний державки резца.

4. Необходимо предотвращение возможности развития автоколебаний, т.е. соблюдение неравенства

$$\frac{b_n + b_u}{v} \geq (\tau_3 + T_{\text{зам}}) \quad (5)$$

где  $b_p$  – толщина коллекторной пластины, м;  $b_n$  – толщина изоляции, м;  $v$  – скорость резания, м/с;  $\tau_3$  – время запаздывания, характеризующее отставание изменения силы резания при врезании в очередную коллекторную пластину, с;  $T_{зам}$  – время затухания силы резания, с.

Ниже рассмотрена возможность обеспечения каждого из четырех перечисленных критериев. Частота вынуждающей силы будет равна частоте изменения импульсов силы резания, которая зависит от частоты вращения коллектора и числа его коллекторных пластин, Гц:

$$f_B = \frac{n \cdot m}{60}, \quad (6)$$

где  $n$  – частота вращения коллектора, об/мин;  $m$  – число коллекторных пластин.

Приняты следующие критерии допустимой величины амплитуды колебаний:

1. Для черновой обработки амплитуда не должна превышать 8 мкм при частоте возмущающей силы 150÷2000 Гц и 1,2 мкм при частоте возмущающей силы 2000÷4500 Гц, а также не превышать 0,25 величины поля допуска.

2. Для чистовой обработки амплитуда не должна превышать 0,125 величины поля допуска и не превышать величины шероховатости поверхности  $Ra$ [5, 6].

Рассмотрим возможность соблюдения 4 критерия (5) о предотвращении возможности развития автоколебаний.

Период колебания силы резания:

$$T = \frac{b_p + b_n}{v}, \quad (7)$$

где  $b_p$  – толщина коллекторной пластины, м;  $b_n$  – толщина изоляции, м;  $v$  – скорость резания, м/с.

Время запаздывания:

$$\tau_3 = (2,6 \cdot \xi - 1) \cdot 10^{-6}, \quad (8)$$

где  $\xi$  – коэффициент продольной усадки стружки.

Время затухания системы  $T_{зам}$  при условии, что система придет в состояние покоя при снижении амплитуды вибраций в 10 раз:

$$T_{\text{зам}} = \frac{2,3 \cdot \sqrt{4 \cdot \pi^2 + \delta^2}}{\delta \cdot \omega_0} \quad (9)$$

где  $\delta$  – логарифмический безразмерный декремент колебаний;  $\omega_0$  – круговая собственная частота незатухающих колебаний резца, 1/с.

Собственная частота незатухающих колебаний определяется собственной частотой изгибных колебаний и безразмерным коэффициентом затухания:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_C}{\sqrt{1 - \eta^2}} \quad (10)$$

где  $f_C$  – собственная частота изгибных колебаний, Гц;  $\eta$  – безразмерный коэффициент затухания.

Безразмерный коэффициент затухания определяется на основании безразмерного декремента колебаний:

$$\eta = \frac{\delta}{\sqrt{4 \cdot \pi^2 + \delta^2}} \quad (11)$$

где  $\delta$  – безразмерный декремент колебаний.

По зависимостям суммарного времени запаздывания и затухания колебаний системы от вылета резца для различных размеров державок резца сделан вывод о том, что период колебания силы резания и время затухания колебаний системы лежат в очень близких пределах. После преобразования выражения (7) с учетом формул (8) и (9) получим зависимость для определения скорости резания, м/с, при которой возможно появление автоколебаний. Для увеличения производительности в формуле (9) изменим условие снижения амплитуды вибраций с 10 на 5:

$$v_{\text{max}} = \frac{120 \cdot \delta \cdot \omega_0 \cdot b_{II}}{10^{-3} \cdot (2,6 \cdot \xi - 1) \cdot \delta \cdot \omega_0 + 1,6 \cdot \sqrt{4 \cdot \pi^2 + \delta^2}} \quad (12)$$

Величина скорости резания, вычисленная по формуле (12) характеризует пороговое значение скорости резания, при превышении которого может возникнуть автоколебательный процесс.

Для управления технологическими режимами разработана структурная схема управления скоростью резания для токарной

обработки коллекторов [7]. На рис. 1 показана структурная схема технологического процесса обработки коллектора.



Рисунок 1– Структурная схема технологического процесса обработки коллектора

Объект управления ОУ1 включает в себя параметры, непосредственно влияющие на технологическую систему: силу резания, радиальное смещение суппорта под действием сил резания, амплитуду колебаний резца. Объект управления ОУ2 включает производственные показатели качества, связанные с процессами в технологической системе: точность формы коллектора, шероховатость обработанной поверхности, производительность процесса. Управляющим воздействием является частота вращения шпинделя.

На рис. 2 показана функциональная схема управления технологическими режимами.

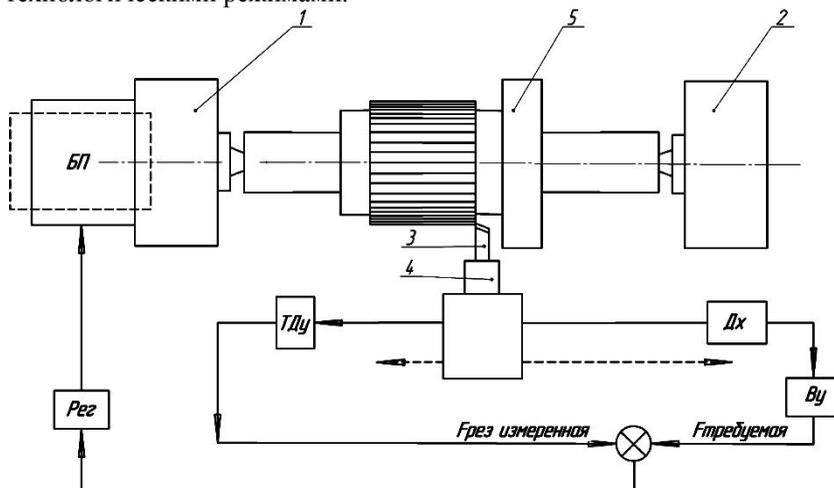


Рисунок 2– Функциональная схема технологического процесса обработки коллектора: 1 – передняя бабка станка; 2 – задняя бабка станка; 3 – резец; 4 – суппорт; 5 – коллектор в сборе с якорем на валу; БП – бесступенчатый привод вращения передней бабки; Рег – регулятор скорости вращения привода; ТДу – тензодатчик однокомпонентный; ВУ – вычислительное устройство; Дх – датчик осевого положения резца

Система управления (рис. 2) состоит из датчика осевого положения суппорта с резцом Дх, вычислительного устройства ВУ, которое определяет оптимальную силу резания, динамометра ТДу (однокомпонентного тензодатчика) для измерения силы резания в процессе резания. Сигнал о силе резания с тензодатчика направляется в блок сравнения, где сравнивается с рассчитанными значениями

оптимальной силы. Сигнал рассогласования попадает на регулятор Рер бесступенчатого привода передней бабки станка БП и на блок числового управления станком, и изменяются скорость резания.

Разработана математическая модель токарной обработки токосъемной поверхности коллектора, описывающая периодический закон изменения силы резания. Определены условия безвибрационного резания, обеспечивающие максимально производительный процесс.

Определены оптимальные с точки зрения производительности процесса и критериев безвибрационного резания технологические режимы. Разработана функциональная схема управления скоростью резания.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № НК-14-41-08044/14р\_офи\_м.*

#### **Список литературы:**

1. Васин С.А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при тчении и фрезеровании. Серия «Библиотека инструментальщика». М.: Машиностроение, 2006. 384 с.
2. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.
3. Duyun T.A., Grinek A.V. Tangential component of the Cutting Force in the turning the contact surface on an direct-current motors collector. Russian engineering Research, 2009: 29 (10): P. 1067-1069.
4. Duyun T.A., Grinek A.V., Rybak L.A. Methodology of Manufacturing Process Design, Providing Quality Parameters and Minimal Costs. World Applied Sciences Journal, 2014: 3 (8) P. 958-963.
5. Дуюн Т.А., Гринек А.В., Сахаров Д.В. Моделирование и оптимизация технологических процессов изготовления изделий с использованием метода динамического программирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. №3. С. 61-65.
6. Набилкин А.Ю., Кравченко С.А., Бирюков В.П. Компьютерная система измерения тангенциальной силы резания при токарной обработке // Информационные технологии, системы автоматизированного проектирования и автоматизация: сб. науч. тр. II Всерос. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2010. С. 36-41.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ**

**Дуюн Т.А., д-р техн. наук, доц.,  
Гринек А.В., канд. техн. наук, доц.,  
Хакимов Л.Р., магистр,  
Никольская В., магистр,  
Манжос Р.В., магистр**

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

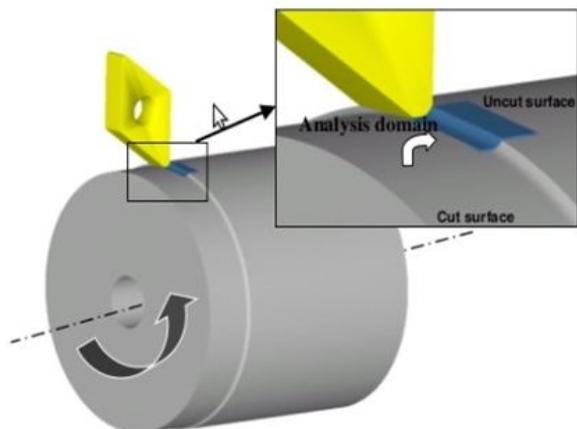
Экспериментальные исследования процессов механической обработки традиционно основываются на математической обработке статистических данных, полученных в ходе проведения эксперимента или наблюдения за реальным процессом, системой. Однако полученные результаты могут быть использованы только для узкого диапазона параметров процесса, объекта или системы при которых проводился эксперимент. До 60...70% деталей в машиностроении обрабатываются резанием. Во многих случаях работоспособность данных деталей определяется качеством обработки. В силу сложного характера явлений, происходящих при обработке деталей резанием, общая теория этого процесса на сегодняшний день отсутствует, поскольку современные методики проектирования процессов резания являются эмпирическими и соответствуют современным требованиям. В связи с этим, разработка новых технологических процессов требует проведения большого объема экспериментальных исследований. Избежать этого можно применением современных систем автоматизированного моделирования технологических процессов, основанных на методе конечных элементов.

Поскольку при резании имеет место сложное объемное напряженно-деформированное состояние заготовки, то при вычислительном эксперименте целесообразно использовать программный модуль численного трехмерного моделирования. Для сокращения времени расчета моделирования, процесс резания осуществлялся только для сектора заготовки. Для моделирования и анализа процесса стружкообразования при обработке деталей точением, было установлено следующие условия:

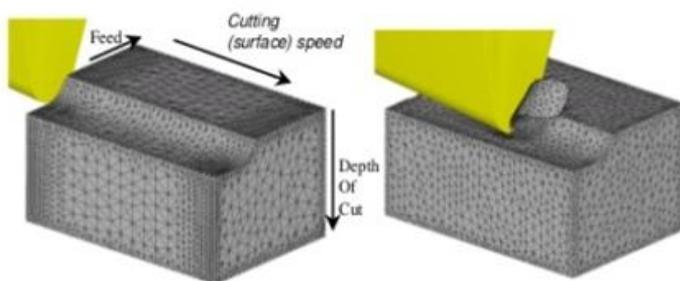
– для процесса моделирования используется деформация модели по криволинейной траектории;

– в процессе расчета учитываются лишь заготовка и режущий инструмент.

Схема процесса резания приведена рис.1.



а)



б)

Рисунок 1 – Общая схема резания: а – связь схемы резания с расчетной моделью; б – численная модель и параметры резания

*Заготовка (табл. 1).* Моделируется из пластичного материала Сталь 45. Теплопроводность, теплоемкость и температурная деформация, изменяются по линейному закону. Минимальная температура – 20°C, максимальная – 800°C.

Таблица 1 – Физико-механические свойства материала заготовки

Параметр	Значение при температуре 20°С	Значение при температуре 800°С
Теплопроводность, (Вт/(м* К))	51,9	33
Теплоемкость, Дж /кг /К	486	874,4
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7826	7826
Температурная деформация, м	1.19e <sup>-5</sup>	1.49e <sup>-5</sup>
Коэффициент Пуассона	0.25	0.25
Модуль Юнга, МПа	210000	210000

**Режущий инструмент** (табл. 2). Используется режущий инструмент с ромбической пластиной. Материал пластины: карбид вольфрама.

Таблица 2 – Физико-механические свойства материала инструмента

Параметр	Значение
Теплопроводность, (Вт/(м* К))	84
Теплоемкость, Дж /кг /К	180,7
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	15800
Температурная деформация, м	1.49e <sup>-5</sup>
Коэффициент Пуассона	0.32
Модуль Юнга, МПа	450000

В начальный момент времени происходит деформирование материала без разрушения до момента возникновения в зоне контакта напряжений. За преувеличение критического значения происходит отделение материала и дальнейшее движение режущего инструмента.

Процесс резания, разбивается на три стадии:

1) начальный момент обработки без разрушения материала (чистая деформация);

2) момент врезания и неустановившийся режим резания, характеризующийся изменением силы резания;

3) установившийся режим резания, при котором сила резания не изменяется или изменяется в определенном диапазоне.

Комплексный анализ процесса резания включает в себя (рис. 2):

– анализ динамических характеристик и изменения силы резания: изменение тангенциальной, радиальной и осевой составляющих сил резания;

- распределение температурных полей: тепловое поле в заготовке и инструменте;
- процесс формирования и схода стружки;
- рабочие и остаточные напряжения в поверхностном слое детали.

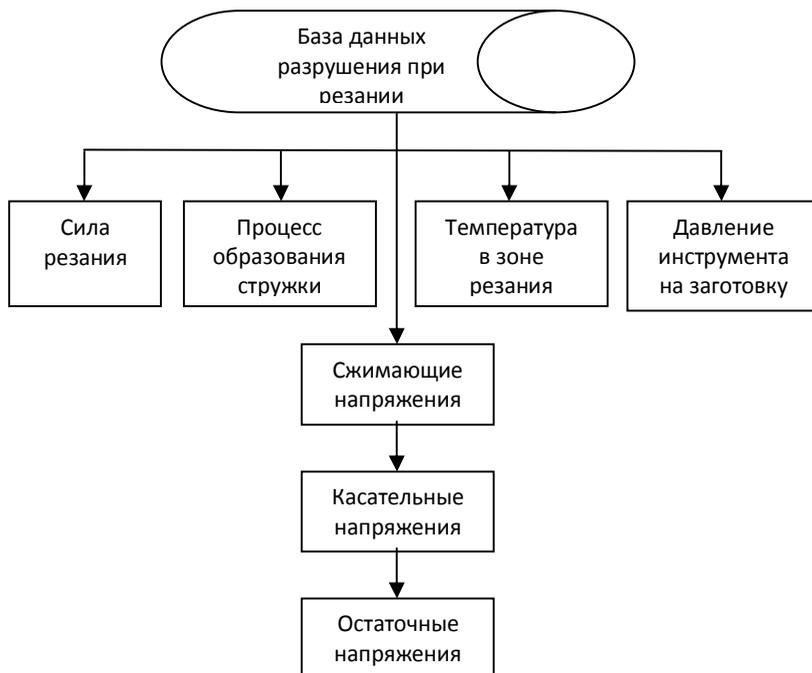


Рисунок 2 – Результаты моделирования процесса резания

В результате моделирования процесса продольного точения заготовки стали марки Сталь 46 с выбранными режимами были получены тепловые зоны образования стружки (рис.3).

На рис. 4 показаны графики изменения силы резания в радиальном, осевом и тангенциальном направлениях в момент врезания в заготовку, стабилизации процесса резания.

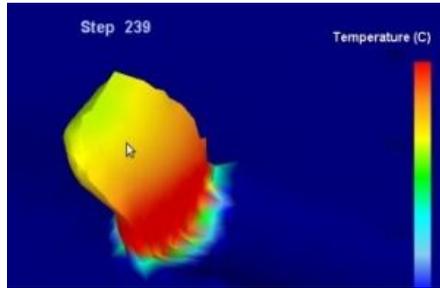


Рисунок 3 –Тепловые зоны образования стружки

Колебания всех составляющих силы резания напрямую связаны с характером стружкообразования обрабатываемого материала детали.

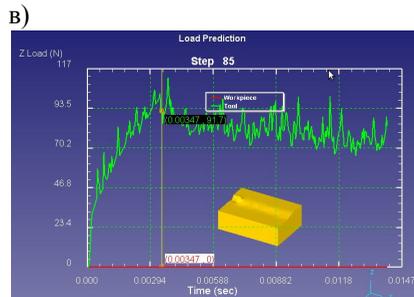
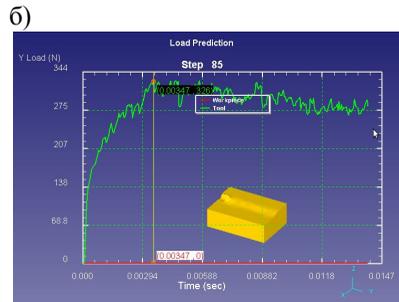
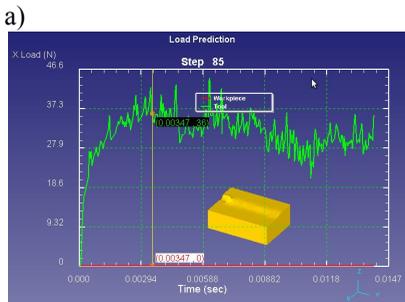


Рисунок 4 – Графики изменения силы резания по оси Y (а), X (б) и по оси Z (в) во времени

Численное решение математической модели в специализированном программном комплексе позволило быстро и эффективно оценить распределение температурных полей в заготовке и инструменте, смоделировать процесс стружкообразования, оценить характер изменения сил резания при врезании.

На основе моделирования определены характеристики изменения сил резания в момент врезания инструмента, неустановившегося и установившегося резания.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № НК-14-41-08044/14р\_офи\_м.*

#### **Список литературы:**

1. Ковальчук Д.П. Моделювання процесу різання методом кінцевих елементів в середовищі DEFORM 3D // АРТЕХ інжинирингова компанія 2012. № 4. <http://www.artech-eng.ru/index.php/2009-10-21-12-20-41.html>
2. Paiva A.; Paiva E., Ferreira J., Balestrassi P., Costa S. 2009. A multivariate mean square error optimization of AISI 52100 hardened steel turning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 7-8: 631-643.
3. Singh Dilbag, Rao P. 2007. Optimization of Tool Geometry and Cutting Parameters for Hard Turning. Materials and Manufacturing Processes, 22 (1): 15-2.
4. Duyun T.A., Grinek A.V. 2009. Tangential component of the Cutting Force in the turning the contact surface on an direct-current motors collector. Russian engineering Research: 29 (10): 1067-1069.
5. Дуюн Т.А., Гринек А.В., Сахаров Д.В. Моделирование и оптимизация технологических процессов изготовления изделий с использованием метода динамического программирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. №3. С. 61-65.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПЕРВОГО РОДА В ДЕТАЛЯХ МАШИН ПОСЛЕ АЛМАЗНО-ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ШЛИФОВАНИЯ

**Мочалов В.Д., канд. техн. наук, проф.**

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

Одним из наиболее распространенных методов определения остаточных напряжений является метод Н.Н. Давиденкова [1,2]. Сущность его заключается в том, что с поверхности исследуемого образца постепенно удаляются слои металла. По измерению деформации образца рассчитываются остаточные напряжения. Метод Н.Н. Давиденкова позволяет установить характер распределения остаточных напряжений на глубине образца от нескольких микрометров до нескольких миллиметров, в чем его преимущества. Преимущество этого метода состоит еще и в том, что измерению подлежит не деформация растяжения или сжатия, а деформация изгиба, величина которой при рациональном выборе толщины удаляемых слоев вполне достаточна для точного измерения. К недостаткам следует отнести неравномерную скорость травления образца, имеющего разные физико-механические характеристики компонентов. Поэтому более достоверные результаты получаются для однородных и однофазных металлов. При изучении распределения остаточных напряжений в поверхностных слоях обработанных кольцевых изделий по методу Н.Н. Давиденкова вводятся следующие допущения, которые были учтены нами при исследовании:

1. Осевые остаточные напряжения весьма малы, если высота кольца составляет  $1/5$  его диаметра.

2. Радиальные остаточные напряжения, составляющие незначительную часть тангенциальных, как правило, не определяются из-за малой толщины слоя, искаженного шлифованием.

3. Остаточные напряжения в каждом удаленном слое распределены равномерно и равны постоянной величине.

С целью изучения тангенциальных остаточных напряжений первого рода в поверхностных слоях закаленной стали Х12М производилось алмазно-электроэрозионное шлифование по наружному диаметру специально подготовленных образцов из этой стали. Заготовки для образцов были выбраны одной плавки и термообработаны по стандартной технологии. Для каждого опыта

изготавливались четыре кольца (наружный диаметр 51мм, внутренний диаметр 44мм. высота кольца 10мм), которые одновременно шлифовались на оправке. Шлифование осуществлялось алмазными кругами АСВ 100/80, 160/125, 200/160 на связках М1 и МВ1 при относительной концентрации алмаза равной 100. Механические режимы шлифования изменялись в следующих пределах: скорость резания от 20 до 40 м/с, глубина резания от 0,005 до 0,025 мм/дв.х, продольная подача от 0,25 до 1,25 м/мин. Скорость вращения изделия была равна 20 м/мин (0,333 м/с). Электрическое напряжение изменялось от 0 до 14В.

Определение остаточных напряжений производилось по методу Н.Н. Давиденкова. Для этой цели из трубных заготовок вырезались кольца (образцы) с припуском по наружному диаметру для окончательного шлифования, термообрабатывались (каждая сталь по своим режимам) и шлифовались на определенных режимах. После этого производился замер кольца, затем его разрезали по образующей и вновь измеряли. Удаляя с поверхности образца наружный слой металла методом электролитического травления, измеряли деформации по наружному диаметру. В результате определялось суммарное напряжение любого слоя по сечению кольца. В общем случае формула для расчета напряжений при снятии наружных слоев имеет вид:

$$F_{0(a)} = E \left\{ \frac{2 \cdot \bar{\sigma}_p}{D_{cp}^2} \left( \frac{h}{2} - a \right) - \frac{1}{3} \cdot \frac{(h-2)^2}{D_{(a)}^2} \cdot \frac{d\bar{\sigma}}{da} - \frac{4}{3} \cdot \frac{(h-a) \cdot \bar{\sigma}_{(a)}}{D_{(a)}^2} + \frac{2}{3} \frac{a}{D_{(a)}^2} S \bar{\sigma}_{(\varepsilon)} \cdot d\varepsilon \right\}$$

где  $a$  – толщина слоя (удаленного);

$h$  – радиальная толщина кольца;

$\bar{\sigma}_p$  – изменение диаметра кольца после разрезки его по образующей;

$\bar{\sigma}_{(a)}$  – изменение диаметра кольца в процессе стравливания слоя  $a$ ;

$\bar{\sigma}_{(\varepsilon)}$  – изменение диаметра кольца в процессе стравливания слоя  $\varepsilon$ ;

$D_{cp}$  – средний диаметр осевой окружности кольца;

$D_{(a)}$  – диаметр осевой окружности кольца после стравливания слоя  $a$ ;

$E$  – модуль упругости материала.

Вычисление диаметров производилось по формулам:

$$D_{cp} = D_n - h$$

$$D_{(a)} = D_n - h - a$$

где  $D_n$  – наружный диаметр кольца.

Установка для травления колец и записи их деформации, представленная на рис. 1, состоит из следующих частей: 1 – электролитическая ванна, 2 – крепежное приспособление для удержания кольца в определенном положении, 3 – прибор для фиксирования изменения диаметра кольца, 4 – источник питания для электротравления, 5 – исследуемое кольцо, 6 – держатель, 7 – подвижная лапка, 8 – пластина с наклеенными на неё тензодатчиками (ТД), 9 – цинковый электрод.

Установка позволяет непрерывно в процессе травления образца измерять деформацию с автоматической записью кривой в координатах "время-деформация". Дрейф нуля самописца в течение 1 часа составляет 0,1 мкм.

В процессе травления исследуемое кольцо служит анодом, а катодом является электрод 9. Питание электрической цепи для обеспечения процесса травления осуществляется от стабилизатора постоянного тока типа П138. Плотность тока при травлении составляла  $1\text{А/см}^2$ . Деформация кольца в процессе травления измеряется с использованием специальной электросхемы, собранной на базе малоинерционного и высокочувствительного прибора *MotorKompensator*.

Принцип работы прибора 3 состоит в следующем: в процессе электротравления последовательно удаляются слои металла с наружной поверхности кольца. С удалением этих слоев снимаются и остаточные напряжения, существовавшие в них, вследствие чего изменяется диаметр кольца. Деформация от изменения диаметра кольца передается механически на пластину 8, с датчиками сопротивлений, в результате чего сопротивление последних изменяется, и сигнал записывается на самописце. Предварительно производилась тарировка самописца с помощью специального тарировочного приспособления с микронным индикатором.

В связи с тем, что в процессе измерения деформации травится только половина кольца, а также, учитывая тот факт, что нагружение при тарировке производится сосредоточенной силой, был рассчитан коэффициент поправки равный 0,89 для деформации, фиксируемой прибором 3.

Подготовка образцов к исследованию производилась следующим образом: шлифованные по наружному диаметру кольца размечались, затем измерялись с точностью 0,001 мм на горизонтальном длиннотере тип ИКУ-2 и после этого разрезались по образующей (рис. 2). Разрезка колец производилась на эрозионном станке. Замеры диаметров  $D_n$  и  $d$

(до и после разрезки) производились в одном и том же сечении, а именно, по осевой АВ. Толщина стравленного слоя рассчитывалась по изменению веса образца до и после травления. Взвешивание образцов производилось на аналитических весах типа АДВ-200М с точностью 0,001 гр. Перед установкой образца в приспособление его поверхность обезжиривалась и часть поверхности, не подлежащая травлению, покрывалась клеем БФ-2. После этого образцы сушились на воздухе, затем на слой клея наносился лак ОК-20, и вновь осуществлялась сушка образцов. Перед началом электролитического травления, образцы погружались в ванну с электролитом на некоторое время для того, чтобы образец принял температуру электролита во избежание дополнительных тепловых напряжений.

Для электролитического травления закаленной стали Х12М применялся электролит следующего состава: 1 литр дистиллированной воды, 100 гр. сернокислого цинка и 50 гр. химически чистого хлористого натрия.

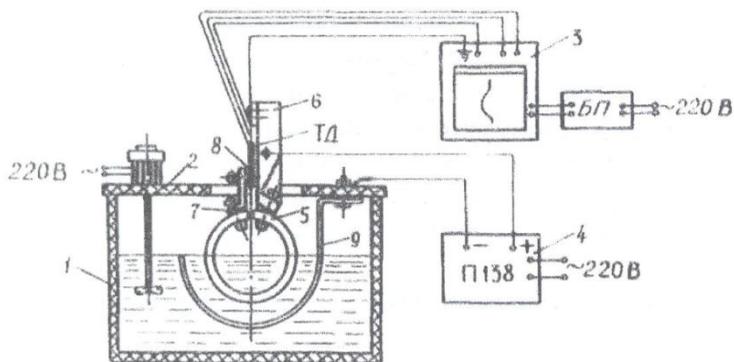


Рисунок 1– Схема установки для исследований остаточных напряжений

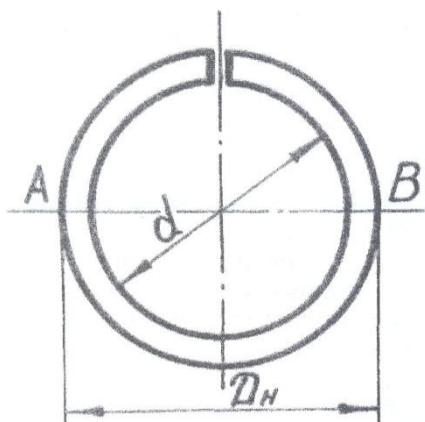


Рисунок 2—Эскиз образца для определения остаточных напряжений

Достоинством такого электролита является отсутствие травления металла в электролите без подвода тока, возможность травления в холодном электролите без повышения температуры в процессе травления. Электролит в процессе травления перемешивался с помощью механической мешалки. После окончания травления, образцы очищались от лака и клея, промывались и взвешивались. По разности весов кольца до и после травления определялась величина удаленного слоя.

В результате травления наружной поверхности кольца получалась экспериментальная кривая в условных координатах. Началом координат выбиралась начальная точка кривой, имеющая нулевые координаты ( $x_k$ ,  $t_k$ ), которые фиксировались в виде взаимно-однозначно составляющих пар чисел на специальном бланке. Координаты каждой из точек по вертикали ( $x_k$ ), характеризуют толщину стравленного слоя, по горизонтали ( $t_k$ )— деформацию образца. Начальные точки имеют координаты  $x_0 = 0$ ,  $t_0 = 0$ . Кроме того, в бланк вписывались параметры эксперимента.

В машинных переменных это  $b$ ,  $a$ ,  $l$ ,  $e$ ,  $p$ ,  $s$ ,  $v$ .

где  $b$  —(в общепринятых переменных  $-bp$ ) ~ изменение диаметра после разрезки кольца по образующей, мм;

$a(h)$  —толщина рабочей части образца до начала травления, мм;

$l$  ( $D_{cp.}$ ) —средний диаметр кольца, мм;

$e(E)$ —модуль упругости стали, кгс/мм<sup>2</sup> (ГПа);

$p$  — скорость удаления слоев, мм/дел;

$S$ —тарировочная чувствительность самописца, мм/дел;

$v$  – число точек по кривой.

Данные, внесенные в этот бланк, использовались для вычисления остаточных напряжений на ЭВМ. Результаты расчета на ЭВМ выдаются в виде вычисленных в расчетных точках значений толщины стравленного слоя и соответствующих значений остаточных напряжений (в машинных переменных  $-u$ ). В машинных переменных формула для расчета остаточных напряжений в общем виде выглядит следующим образом:

$$u = (\bar{b}, a, l, e, b, s, p, x_k, t_k)$$

Имеющиеся в формуле для расчета остаточных напряжений члены в виде  $\frac{dt}{dx}$  и  $\int t \cdot dx$  приближались так:

$$\frac{dt_k}{dx_k} \sim \frac{t_{k+1} - t_{k-1}}{x_{k+1} - x_{k-1}}$$

$$\int_0^{x_k} t \cdot dx \approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (x_i - x_{i-1}) \cdot (t_i + t_{i-1})$$

С учетом вписанных в бланк указанных параметров приближений и того, что тарировочная чувствительность  $S$  должна быть умножена на поправочный коэффициент 0,89 из формулы Давиденкова была получена следующая формула в машинных переменных для расчета остаточных напряжений на ЭВМ:

$$u = e \left\{ \frac{(a - 2 \cdot x_k \cdot p) \cdot \bar{b}}{l^2} - \frac{0,89(a - 2 \cdot x_k \cdot p)}{3(l - x_k \cdot p)^2} \cdot \frac{S(t_{k+1} - t_{k-1})}{p(x_{k+1} - x_{k-1})} - \frac{3,56 \cdot t_k \cdot S(a - x_k \cdot p)}{3 \cdot (l - x_k \cdot p)^2} + 0,89 \cdot S \cdot p \cdot \sum_{i=1}^k \frac{(t_k + t_{k-1}) \cdot (x_k - x_{k-1})}{3 \cdot (l - x_k \cdot p^2)} \right\}$$

#### Список литературы:

1. Подзей А.В. Технологические остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1973. 216с.
2. Мочалов В.Д., Мочалова Я.В., Беззубенко Н.К. Качество поверхности и усталостная прочность стали ШХ15 после алмазно-электроэрозионного шлифования// Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2007. № 3. С. 79-80.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДАРОВИБРОЗАЩИТЫ ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ УПРУГОГО ЗВЕНА

**Прокопов Е.Е., канд. техн. наук, доц.**  
*Государственный университет-учебно-научно-  
производственный комплекс (г. Орел)*

Прерывистый режим работы упругого звена виброзащитной системы – эффективный способ гашения колебаний, заключающийся в периодическом уменьшении жесткости, когда восстанавливающая сила отталкивает объект виброзащиты от положения равновесия и её увеличении, когда восстанавливающая сила стремится вернуть объект в исходное состояние [1]. При этом выбор и обоснование алгоритмов работы упругого звена прерывистого действия, связывается с изменяющимися априорными ситуациями, которые выражаются через компоненты состояния системы.

Эффективное торможение объекта при увеличении жесткости ( $c = c_2$ ) будет происходить, если основание и объект движутся в противоположные стороны, а также при движении их в одном направлении, когда скорость объекта больше скорости основания, то есть при соблюдении условий:

$$\delta \cdot \dot{y} < 0, \delta \cdot \dot{y} > 0 \text{ è } |\dot{x}| > |\dot{y}| \quad (1)$$

Для уменьшения передачи воздействий (усилий) на объект при движении основания и объекта в одном направлении, когда скорость объекта меньше скорости основания, то есть при соблюдении условий:

$$\delta \cdot \dot{y} > 0 \text{ è } |\dot{x}| < |\dot{y}|, \quad (2)$$

наиболее рациональным является уменьшение жесткости ( $c = c_1$ ).

Совокупность априорных ситуаций (1), (2) представима в виде свертки информации предписывающей, соответственно, периодическое изменение жесткости при выполнении условий [2]:

$$\tilde{n} = \begin{cases} \tilde{n}_1 & \text{è } \delta(\delta - \dot{y}) < 0 \\ \tilde{n}_2 & \text{è } \delta(\delta - \dot{y}) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

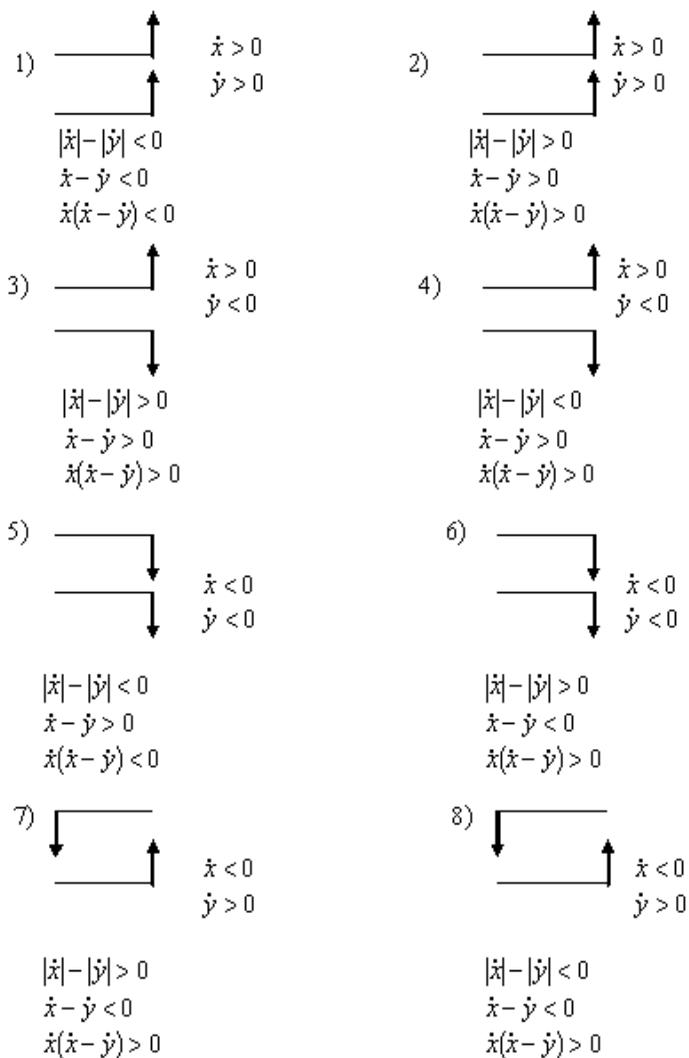


Рисунок 1 – Анализируемые априорные ситуации

В плане физической реализации, особую ценность представляют те алгоритмы переключений жесткости, которые выражаются через

компоненты состояния системы – в доступной для воспроизведения форме.

Наиболее просто отслеживать компоненты состояния системы в относительном движении, когда программируемые условия переключения жесткости соотносятся со сменой знака относительного смещения и относительной скорости. Из сопоставления осциллограмм стационарных колебаний установлено, что в области зарезонансных частот момент смены знака абсолютной скорости и относительного смещения объекта совпадают. С этих позиций априорные ситуации вида  $\ddot{\delta} \cdot (\delta - \dot{y}) \dot{e} \dot{e} (y-x) \cdot (\dot{x}-\dot{y})$  эквивалентны, так как определяют один и тот же алгоритм переключения жесткости:

$$\tilde{n} = \begin{cases} c_1 \ddot{\delta} \dot{e} \dot{e} (y-x)(\delta - \dot{y}) < 0 \\ \tilde{n}_2 \ddot{\delta} \dot{e} \dot{e} (y-x)(\delta - \dot{y}) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

Непосредственно перед выполнением предписания  $y - x = 0$  относительное смещение и относительная скорость имеют противоположные знаки, т.е. согласно управлению (4) жесткость максимальна ( $c_2$ ). Отсюда, каждый раз при выполнении предписания  $y - x = 0$  жесткость становится минимальной ( $c_1$ ). Здесь моменты обращения в ноль относительных величин смещения и скорости отслеживаются простыми средствами без привлечения электронного слежения, и как следствие, становится возможным реализовывать управление жесткостью посредством предписаний, зафиксированных в конструкции системы.

Для оценки переходных процессов работы упругого звена виброзащитной системы в условиях ударных нагрузок [3], когда имеются значительные перегрузки, рассмотрены отклики системы на кинематическое возмущение единичными полуволнами, длина которых задана в долях от длины волны единичной частоты (0,5T; T), а также колебания подрессоренного груза при движении по неровной дороге, профиль которой описывается уравнением [4]  $y = h \cdot (1 - e^{-\gamma})$ , где  $h$  – предел, к которому стремится высота профиля;  $\gamma$  – параметр, характеризующий профиль. В последнем случае процесс ударного воздействия задается кинематическим воздействием, близким к ступенчатому.

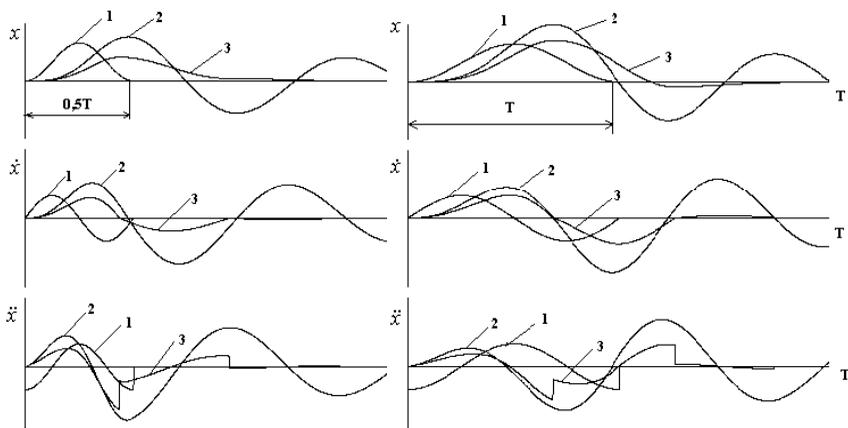


Рисунок 2 – Отклики виброзащитных систем на возмущение единичными полуволнами длиной  $0,5T$  и  $T$  соответственно:

1 – полуволна; 2 – пассивной виброзащитной системы; 3 – виброзащитной системы с упругим звеном прерывистого действия

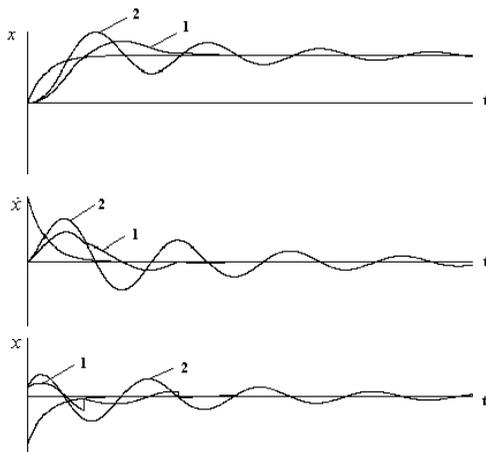


Рисунок 3 – Осциллограммы колебания поддрессоренного груза при движении по неровной дороге: 1 – виброзащита с упругим звеном прерывистого действия; 2 – пассивная виброзащита

Как видно из графиков на рисунке 2, ударная нагрузка может оказаться безопасной, если длительность её действия мала по сравнению с периодом  $T$  свободных колебаний системы. Кроме того, если длительность ударной нагрузки составляет менее полупериода собственных колебаний, то максимальное перемещение защищаемого объекта наблюдается после действия ударного импульса.

Анализа откликов (рисунок 2) и осциллограмм (рисунок 3) подтвердил способность виброзащитной системы с упругим звеном прерывистого действия гасить колебания в переходных режимах. При минимальном количестве переключений время переходных процессов уменьшается до времени длительности единичного импульса. Кроме того, оценивая эффективность ударовиброзащиты по коэффициенту динамичности при ударе [5-7], можно утверждать, что система с упругим звеном прерывистого действия в 1.5-2 раза эффективнее, чем системы пассивной виброзащиты, и гарантировано обеспечивает значение коэффициента динамичности меньше единицы.

#### Список литературы:

1. Чернышев В.И., Прокопов Е.Е. К вопросу синтеза оптимальных алгоритмов переключений параметров жесткости виброзащитных систем с непрямым управлением // Сб. научных трудов VII Всероссийской научной конференции по проблемам нелинейных колебаний механических систем. ННГТУ, Нижний Новгород, 2005. С.399-401.
2. Чегодаев Д.Е., Шатилов Ю.В. Управляемая виброизоляция. Самара, 1995. 144 с.
3. Прокопов Е.Е. Исследование нестационарных режимов работы виброзащитных систем с непрямым управлением жесткости // Сб. научных трудов VII научно-технической конференции «Вибрация - 2005. Вибрационные машины и технологии». В 2 частях. Ч.2. КГТУ, Курск, 2003. С.67-70.
4. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Л.: Машиностроение, 1976. 320 с.
5. Круглов Ю.А., Туманов Ю.А. Ударовиброзащита машин, оборудования и аппаратуры. Л.: Машиностроение, 1986. 222 с.
6. Бабицкий В.И. Теория виброударных систем. М.: Наука, 1978. 352 с.
7. Ковалева А.С. Управление колебаниями и виброударными системами. М.: Наука, 1990. 256 с.

## **СВОЙСТВО УПРАВЛЯЕМОСТИ ПРОЦЕССОВ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА**

**Сторублев М.Л., канд. техн. наук, доц.**

*Юго-Западный государственный университет (г. Курск)*

Развитие определенных тенденций в области управления качеством обусловило внедрение на машиностроительных предприятиях систем менеджмента, в том числе и интегрированных, с целью получения предприятиями определенных выгод и преимуществ.

В соответствии с требованиями международных стандартов ИСО серии 9000 [1,2], организация должна поддерживать процессы систем менеджмента в управляемом состоянии. В [1] не содержится требований к другим системам качества, но его требования позволяют согласовывать и интегрировать системы экологического менеджмента, менеджмента профессионального здоровья и безопасности и т.д. с системами менеджмента качества. Таким образом, в любой момент времени процессы интегрированных систем менеджмента (ИСМ) должны находиться в управляемом состоянии для достижения запланированных целей и показателей качества. Как показал анализ литературных и интернет источников, в настоящее время определения свойства управляемости процессов систем менеджмента (интегрированных систем менеджмента) не существует.

Согласно [3] объект называется управляемым, если существует управляющее воздействие, которое переводит его из начального состояния в заданное конечное состояние за конечное время  $\Delta t$ .

Из данного определения следует, что для обеспечения управляемости процессов ИСМ необходимы: четкое понимание того, посредством каких показателей выполняется оценка состояния процесса ИСМ; выбор управляющего воздействия (параметра) или их совокупности, посредством целенаправленного изменения которых возможен перевод процесса в требуемое состояние; возможность оценки времени, за которое процесс ИСМ перейдет в требуемое состояние.

Согласно ГОСТ ISO 9001-2011 [1] для оценки процессов систем менеджмента качества рекомендуется использовать показатели результативности и эффективности. Таким образом, заданное конечное состояние процесса ИСМ предполагается оценивать на основании данных о результативности и/или эффективности, причем на машиностроительных предприятиях в большей степени выполняется оценка результативности процессов.

Если в момент времени  $t$  значение критериев результативности и/или эффективности процесса ИСМ соответствует установленным требованиям, то процесс результативен и/или эффективен, в противном случае необходимо посредством изменения входных параметров процесса ИСМ перевести процесс за время  $\Delta t$  в требуемое состояние.

Вопрос выбора управляющих параметров процессов ИСМ достаточно подробно отражен в работах [4-13].

В [14,15] для оценки качества процессов систем менеджмента предлагается оценивать гибкость процесса (зрелость). Гибкость процесса отражает его способность приспосабливаться к изменениям за счет совершенства его организации, управляемости, наличия обратных связей и мониторинга результатов. При изменении внешних условий (входов) такой процесс способен быстро перестроиться, не снижая результативность и эффективность [15]. Причем одним из количественных критериев оценки гибкости является время реагирования процесса на изменение требований к результатам процесса и его параметрам, т.е. времени на перестройку процесса.

Перевод процессов к заданному моменту времени  $t$  в такое состояние при котором значения критериев результативности и/эффективности достигли целевых показателей можно рассматривать как цель управления процессами ИСМ, что соответствует удовлетворению потребностей потребителей процессов и достижению поставленных целей.

Таким образом, если процесс ИСМ в результате целенаправленного изменения входных параметров способен перейти в требуемое (конечное) состояние  $S(t)$ , то процесс обладает свойством гибкости.

Результат воздействия процесса (процессов) на процесс (процессы) проявляется как сразу, так и через определенные интервалы времени. При управлении процессами организации, в том числе и процессами ИСМ, необходимо знание интервала времени, через который проявляется результат воздействия на процесс, что позволит своевременно принимать управленческие решения. Поэтому количественная оценка гибкости процессов ИСМ по времени, как параметра, определяющего управляемость, необходима при управлении процессами ИСМ [9].

Как показано в работе [9] для управления входными параметрами процесса ИСМ необходимы ресурсы, поэтому для принятия решения о проведении корректирующих действий владельцу процесса следует оценить обеспеченность процесса ресурсами. Если в распоряжении владельца процесса ресурсов больше чем их необходимо для

достаточного изменения входных параметров процесса, то возможно посредством управления входными параметрами перевести процесс ИСМ в требуемое состояние к заданному моменту времени  $t$ .

В реальных условиях функционирования на машиностроительных предприятиях ИСМ быстро перестроить процесс, т.е. перевести в требуемое состояние не представляется возможным ввиду особенностей и структурной сложности процессов ИСМ, а также их взаимодействия.

Поэтому при оценке гибкости процессов ИСМ по времени необходимо учитывать затраты времени на поиск и перераспределение ресурсов.

Пусть  $t_0$  – момент времени соответствующий начальному состоянию процесса ИСМ,  $\Delta t$  – интервал времени, который необходим для перевода процесса в состояние  $S(t)$ ,  $\Delta t_n$  – интервал времени необходимый для поиска и перераспределения ресурсов между процессами, тогда если не выполняется условие

$$Q_v \geq Q_p \quad (1)$$

то для обеспечения управляемости процесса ИСМ необходимо выполнение неравенства

$$t - t_0 \geq \Delta t + \Delta t_i \quad (2)$$

Для определения интервала времени  $\Delta t$ , который необходим для перевода процесса в состояние  $S(t)$ , предлагается использовать модели нестационарных временных рядов с распределенным лагом, построенные на основании данных о результативности процессов ИСМ. Целесообразность применения таких моделей для определения моментов времени, соответствующих наиболее сильному воздействию процесса на процесс, показана в работах [6,9,16].

Согласно современной концепции управления качеством, управляемость процесса – это важнейшее свойство любого процесса менеджмента качества, описывающее возможность перевести процесс из одного состояния в другое.

На основании вышеизложенного под управляемостью процесса ИСМ будем понимать его способность в результате целенаправленного изменения входных параметров переходить из начального состояния в конечное состояние, при котором достигаются заданные значения показателей результативности и/или эффективности, за конечное время.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-2554.2013.8*

### Список литературы:

1. ГОСТ ISO 9001-2011. Системы менеджмента качества. Требования [Текст]. Введ. 2013 – 01 – 01 М.: Стандартиформ, 2012. 36 с.
2. ГОСТ ISO 9000-2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь [Текст]. Введ. 2013 – 01 – 01 М.: Стандартиформ, 2012. 32 с.
3. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: Учебное пособие для вузов / под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. М.: Высш. шк., 2004. 616 с.
4. Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л. Применение информационных методов в управлении процессами системы менеджмента качества // Информатика и системы управления. 2009. №2(20). С. 86-92.
5. Емельянов С.Г., Сторублев М.Л., Сазонов С.Ю. Математическое и методическое обеспечение управления качеством продукции на основе анализа данных о взаимодействии процессов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. №6 (39). Часть 2. С. 144-149.
6. Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л. Моделирование процессов систем менеджмента качества: монография. Курск: ЮЗГУ, 2012. 168 с.
7. Сторублев М.Л., Аникеева О.В. Выбор управляющих параметров при повышении результативности процессов интегрированных систем менеджмента на основе применения информационных методов // Системный анализ в проектировании и управлении. Часть 1: Сб. научных трудов XVII Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург: Политехнический ун-т, 2013. С. 96-97.
8. Сторублев М.Л. Оценка управляемости процессов интегрированных систем менеджмента на основании данных об их состоянии // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия техника и технологии. 2013. №1. С. 150-156.
9. Сторублев М.Л., Аникеева О.В., Ивахненко А.Г. Модель оценки гибкости процессов интегрированных систем менеджмента по времени при обеспечении их управляемости // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. №5(50). С. 126-132.
10. Сторублев М.Л. Повышение управляемости технологических процессов нанесения гальванических покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. №4(112). С. 37-43.
11. Сторублев М.Л., Ивахненко А.Г. Методика повышения управляемости технологических процессов // Качество в производственных и социально-экономических системах: сборник научных трудов 2-ой Международной научно-технической конференции, в 2-х томах. Курск: ЮЗГУ, 2014. Т.1. С. 283-287.
12. Сторублев М.Л. Методика выбора управляющих параметров процессов интегрированных систем менеджмента на основе

- многокритериального анализа процессов // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции, в 3-х томах. Курск: ЮЗГУ, 2014. Т.2. С. 175-179.
13. Сторублев М.Л. Выбор управляющих параметров процессов интегрированных систем менеджмента на основе многокритериального анализа процессов с учетом значимости критериев их оценки // Новые материалы и технологии: состояние вопроса и перспективы развития: сборник материалов Всероссийской молодежной научной конференции. 24-26 июня 2014 г. Саратов: ООО «Издательский Центр «Наука», 2014. С. 127-131.
  14. Всеобщее управление качеством: учебник для вузов / О.П. Глудкин, Н.М. Горбунов, И.А. Гуров, В.Ю. Зорин; под ред. О.П. Глудкина. М.: Радио и связь, 1999. 600 с.
  15. Системы, методы и инструменты менеджмента качества: учебное пособие / М.М. Кане, Б.В. Иванов, В.Н. Корешков, А.Г. Схиртладзе. СПб.: Питер, 2008. 560 с.
  16. Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л. Управление процессами организации на основе данных о результативности // Методы менеджмента качества. 2009. №5. С. 8-12.

## **АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, СНИЖАЮЩИХ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Федоренко М.А., д-р техн. наук, проф.,  
Антонов С.И., аспирант**

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

Характерной особенностью эксплуатации вращающихся печей промышленности строительных материалов является то, что оно работает под открытым небом и подвержено всем воздействиям окружающей среды.

Предприятие, в производственном процессе которого задействованы вращающиеся печи при средней производительности *2 млн. т.* в год расходует топлива в пределах *300...450 тыс. т.* топлива и *220...250 млн. кВт* электроэнергии. Применение морально и технически устаревшего оборудования приводит к снижению его работоспособности, износостойкости, и как следствие к длительным простоям в ремонтах и значительным перерасходам энергетических носителей. Оборудование, применяемое в промышленности строительных материалов, рассчитано на много тоннажное производство, а при его проектировании не учитываются климатические условия эксплуатации.

Одними из основных конструктивных особенностей цементных вращающихся печей являются:

- рабочие узлы оборудования, отвечающие за выполнение служебного назначения, конструктивно представлены в виде вращающихся, цилиндрических тел;
- наличие высоких температур, необходимых для обеспечения технологического процесса изготовления материалов (высокая температура в средней части агрегата, которая достигает до  $1200^{\circ}\text{C}$ );
- расположение оси вращения вращающихся печей под углом к горизонту;
- большие массы и габаритные размеры вращающихся печей, а также узлов и деталей, входящих в их конструкцию (диаметр бандажей может быть более восьми метров, а длина печи достигает до *220 м* при массе более *1400 тонн*);
- рабочие узлы оборудования находятся в постоянном вращении;

– к конструктивным элементам деталей и сборочных узлов предъявляют жесткие требования по точности изготовления и сборке узлов и агрегатов;

– длительные вибрации конструкции из-за расположения печи на бетонных опорах, высота которых может быть до 20м;

– эксплуатация производится в условиях высокой запыленности под открытым небом;

– корпус печи имеет сравнительно невысокую жесткость;

– уплотнительные устройства, установленные на оборудовании, также находятся под воздействием больших перепадов температур и функционируют при наличии большого количества абразивной пыли [5,8,6] и др.

В случае, если функционально связанные узлы цементной печи (рис. 1) обозначить в последовательности их базирования, то получим представленную координатную систему ее узлов.

К оборудованию промышленности строительных материалов предъявляются повышенные требования по обеспечению точности расположения оси вращения в условиях эксплуатации при наличии больших динамических нагрузок и значительных вибраций. Поэтому в процессе изготовления деталей, сборки узлов, монтажа конструкции и ремонта оборудования необходимо обеспечивать довольно жесткие требования, связанные с точностью установки пространственного положения рабочих органов оборудования и особенно расположения оси вращения корпуса печи и связанных с ней осей вращения агрегатов в силу того, что оборудование имеет большие габариты и массы.

Одним из основных технологических требований для оборудования промышленности строительных материалов является обеспечение и сохранение пространственного положения оси вращения печи, а также совпадение теоретической оси вращения с эксплуатационной в течении всего периода функционирования оборудования. Помимо этого ее эксплуатационная ось вращения должна сохранять параллельность осям вращения остальных узлов и агрегатов, вращающихся синхронно с ней [2,4].

Соблюдение жестких требований по точности является исключительно важной функциональной задачей, так как это обеспечивает надежную и безотказную эксплуатацию оборудования.

Для обеспечения качественной работы печи необходимо соблюдать исполнение следующих технических условий и мероприятий: обеспечить прямолинейность оси вращения корпуса

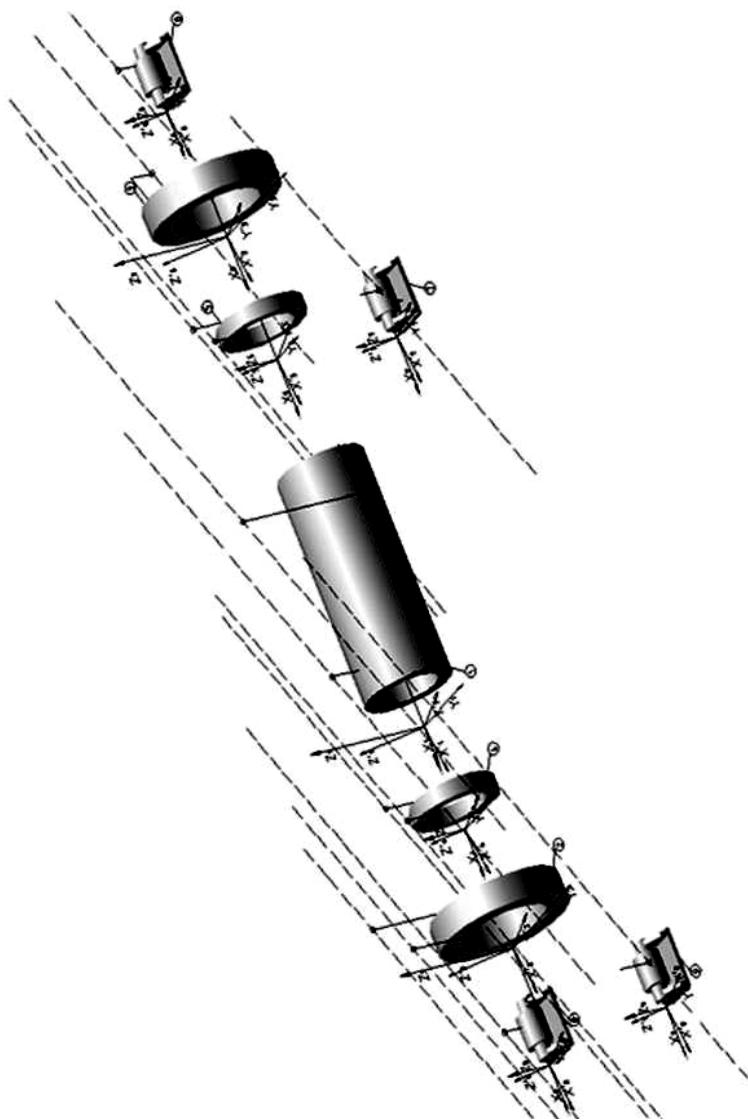


Рисунок 1 – Координатные системы узлов цементной печи: 1 – рама роликоопоры; 2 – ролик левый; 3 – ролик правый; 4 – роликоопора; 5 – бандаж; 6 – башмак; 7 – футеровка; 8 – обечайка; 9 – опора

оборудования; минимизировать радиальное биение обечайки корпуса; не допускать вспучивание обечайки корпуса; постоянно контролировать требуемую круглость опорных и несущих узлов; контролировать температурные смещения корпуса и его жесткость; проводить постоянный мониторинг вибраций. Корпус вращающейся цементной печи имеет искривление по длине, которое возникает в результате тепловых деформаций и непараллельности оси вращения опор относительно оси вращения печи, а так же из-за недостаточной точности установки бандажей, имеющих большую массу. Динамические воздействия на вращающихся цементных печах, возникающие в процессе их работы и вызывающие искривление оси вращения, проявляются в виде вибраций из-за малой жесткости корпусов при воздействии на них больших нагрузок, так колебания несущей опоры, а, следовательно, и роlikоопор могут достигать до 10мм и более. Неуравновешенность масс корпусов оказывает значительно меньшее влияние, т.к. внутри корпуса находится большая масса материала, который постоянно перемещается. Вибрации также значительно усиливаются с увеличением срока эксплуатации при появлении износа. Неточность изготовления несущих и опорных узлов оборудования также является причиной возникновения вибраций. Изменение формы поверхностей катания опорных узлов возникают в связи с нарушением взаимного расположения роликов и бандажей, в результате чего их оси вращения становятся не параллельными, что приводит к неполному контакту поверхностей катания; нестабильность технологического режима термообработки, в результате которой полученная твердость поверхностей ролика и бандажа не соответствует требованиям нормативно-технической документации, что приводит при недостаточной твердости к ползучести металла и появлению гриба раскатки с дальнейшим его разрушением; при полученной твердости большей, установленной в нормативно-технической документации, из-за проскальзывания бандажа на ролике появляется чешуйчатое разрушение поверхности катания; при эксплуатации масло, проникая в различные трещины, возникающие на поверхности сопряжения в результате усталости металла, углубляет их, и частицы металла скалываются, в результате поверхность сопряжения становится неровной, что ведет к увеличению удельных давлений и к дальнейшему разрушению контактирующей поверхности. При проскальзывании бандажа по ролику, силы трения сначала закрывают микротрещину, а потом открывают, причем устье трещины направлено навстречу масляной волне, что ведет к интенсивному проникновению масла,

сжатого высоким давлением в глубину поверхностного слоя и скалывает частицы металла. Тепловые деформации корпуса происходят также при нарушении правил технической эксплуатации оборудования, в результате чего появляются исчезающие и остающиеся прогибы корпуса между опорами и на корпусе образуются выпуклости и вмятины. Односторонний перегрев корпуса и его прогиб возникает также при внезапной остановке печи и ее продолжительном простое без вращения, такие нарушения могут возникнуть при выходе из строя приводного механизма печи или при прекращении поступления электроэнергии, в этом случае под действием тепла раскаленного клинкера нижняя часть корпуса сильно прогревается и удлиняется больше, чем верхняя. Безотказность работы печи также зависит от применяемых уплотнительных устройств [1,3,6,8,12]. В современной цементной промышленности применяются уплотнений различных конструкций, однако конструкция их полностью не отвечают предъявляемых к ним требованиям.

## **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ОПОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БАРАБАНОВ**

**Хуртасенко А.В., канд. техн. наук, доц.,**

**Шрубченко И.В., д-р техн. наук, проф.,**

**Тимофеев С.П., аспирант**

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

Современная промышленность строительных материалов, в которой используются крупногабаритные детали в виде тел вращения, всё более требовательна к внедрению новых высокоэффективных и высокоточных приборов для контроля и диагностики состояния технологического оборудования. Существенные затраты производство несет при простое технологической линии связанном с проведением профилактических или ремонтных работ.

Например, основными причинами поломок вращающихся цементных печей является деформация корпуса и появление на нём трещин, прожогов и вздутий с разрушением футеровки печи. Существенным фактором, влияющим на появление данных дефектов, является износ бандажей, опорных и контрольных роликов и как следствие превышение допустимого отклонения от прямолинейности и соосности реальной и номинальной оси вращения. Поэтому разработка и внедрение устройства позволяющего проводить своевременный, высокоточный и в тоже время не дорогой мониторинг и определение состояния и геометрии контактных поверхностей опор технологических барабанов представляется актуальной задачей.

С учетом быстрого развития и широкого внедрения оптических методов измерений и приборов на их основе в статье приведена методика и алгоритм для определения геометрических параметров формы крупногабаритных деталей тел вращения, с нестационарной осью вращения.

Немаловажным фактором разработки данной методики является то, последующее создание измерительного устройства возможно из деталей и компонентов изготавливаемых на территории стран СНГ. Например, оптические (лазерные) измерители активно развиваются и производятся в компаниях «РИФТЭК» (Беларусь) и КТИ НП СО РАН (Россия).

Определение геометрических параметров формы деталей технологических барабанов по предлагаемой методике проходит путем

последовательного измерения координат точек принадлежащих поверхности в сферической системе координат. Измерения проводятся в ряде поперечных сечений детали, после чего воссоздается цифровая модель реальной геометрии поверхности детали. На рис.1 представлена расчетная схема определения профиля поперечного сечения детали.

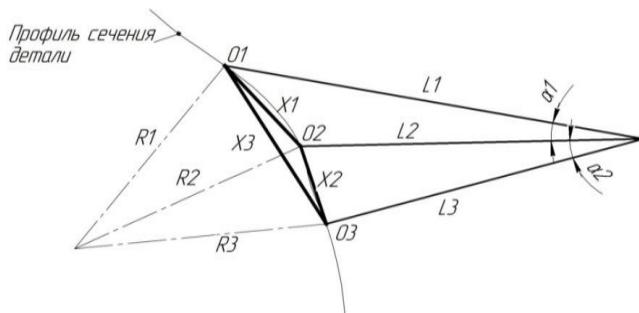


Рисунок 1 – Принципиальная схема определения профиля поперечного сечения

( $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  – расстояния от теоретической точки координат измерительного устройства до точек поверхности детали;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы раствора измерительных лучей, настроечные параметры устройства на габарит измеряемого тела;  $O_1$ ,  $O_2$  и  $O_3$  – точки дуги окружности измеряемой поверхности;  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  – хорды дуг между точками;  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  – теоретические радиусы измеряемой поверхности)

Для построения контура поперечного сечения измеряемой детали производятся следующие вычисления:

1) Определение хорды и радиуса аппроксимирующей дуги в каждый расчетный промежуток измерений.

Из расчетной схемы, согласно теоремы косинусов, определение хорды аппроксимирующей дуги производится по формулам (1-3):

$$X_1 = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 - 2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot \cos(\alpha_1)} \quad (1)$$

$$X_2 = \sqrt{L_2^2 + L_3^2 - 2 \cdot L_2 \cdot L_3 \cdot \cos(\alpha_2)} \quad (2)$$

$$X_3 = \sqrt{L_1^2 + L_3^2 - 2 \cdot L_1 \cdot L_3 \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (3)$$

На основе полученных данных предоставляется возможность полного определения всех параметров треугольника  $O_1O_2O_3$  (рис. 2).

Согласно теоремы об описанной окружности радиус аппроксимирующей дуги можно найти несколькими способами, с учетом имеющихся данных и не желательности дополнительных расчетов примем формулу определения радиуса по трем сторонам треугольника (4).

$$R = \frac{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3}{\sqrt{(X_1 + X_2 + X_3)(-X_1 + X_2 + X_3)(X_1 - X_2 + X_3)(X_1 + X_2 - X_3)}} \quad (4)$$

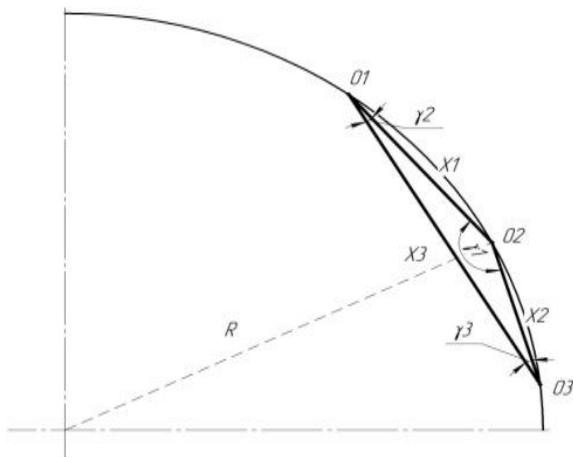


Рисунок 2 – Определение радиуса аппроксимирующей дуги

## 2) Расчет положения центра аппроксимирующей дуги.

Через параметры устройства и определенные величины определяются координаты трех точек вершин известного треугольника.

Расчет положения центра дуги производится путём решения уравнение окружности, проходящей через точки, не лежащие на одной прямой (с помощью определителя) формула (5).

$$\begin{vmatrix} Y^2 & Z^2 & Y & Z & 1 \\ Y_1^2 & Z_1^2 & Y_1 & Z_1 & 1 \\ Y_2^2 & Z_2^2 & Y_2 & Z_2 & 1 \\ Y_3^2 & Z_3^2 & Y_3 & Z_3 & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (5)$$

где  $Y$  и  $Z$  – координаты центра искомой дуги;  $Y_1$  и  $Z_1$ ,  $Y_2$  и  $Z_2$ ,  $Y_3$  и  $Z_3$  – координаты известных точек дуги.

3) Далее по рассчитанным данным производится перерасчет положений центров всех дуг относительно принятой точки начала координат с построением контура поперечного сечения измеряемой поверхности.

4) По полученной геометрии сечения определяется погрешность формы измеряемой поверхности и дальнейшая обработка данных с целью получения технологических параметров процессов подналадки или механической обработки.

Общий алгоритм процесса измерения и восстановления геометрии измеряемой поверхности представлен на рис. 3, в виде структурной схемы.

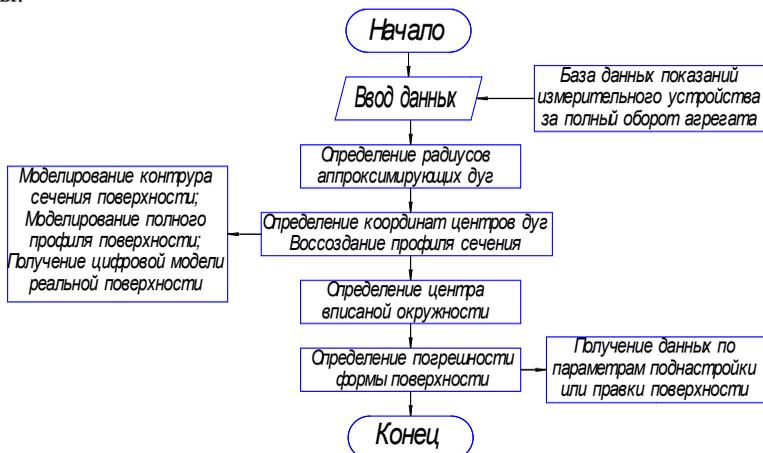


Рисунок 3 – Блок схема процесса определения геометрических параметров поверхностей качения опор технологических барабанов

#### Список литературы:

1. Шрубченко И.В., Кузнецова И.И. Повышение технологичности обработки крупногабаритных составных бандажей за счет минимизации необходимого припуска: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. 157 с.
2. Ушаков Р.Н., Погонин А.А., Шрубченко И.В. Определение формы поверхностей крупногабаритных деталей, имеющих бесцентровую схему базирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2005. №11. С.421-423.
3. Хуртасенко А.В. Технология восстановительной обработки крупногабаритных деталей с использованием методов активного контроля: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. 144 с.

## **ВОЗМОЖНОСТЬ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСКОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ**

**Цапков Ю.И.,  
Маслова М.И.,  
Должиков Д.С.,**

**Маслова И.В., канд. техн. наук, доц.**

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

Оперативный контроль в машиностроении используется для осуществления активного воздействия на технологический процесс с целью повышения точности и производительности обработки за счет сокращения времени на контрольные операции.

Средства автоматического контроля, используемые в машиностроении, не подходят для их применения при обработке крупногабаритных деталей, не имеющих стационарной оси вращения, какими являются детали опор печных агрегатов, что требует разработки новых методов контроля и проектирования соответствующих устройств.

Сложность измерения геометрических параметров крупногабаритной детали в процессе ее вращения определяется не только ее габаритами, но и тем, что судить о параметрах формы необходимо по всей рабочей поверхности детали. Кроме того, оказывает свое влияние и неопределенность базирования детали, вращающейся на роликкоопорах, которая возрастает по мере износа рабочих поверхностей. Эти положения необходимо учитывать при разработке методов контроля и диагностики, которые позволяют производить оценку параметров геометрической формы в поперечном сечении бандажа.

Одним из наиболее актуальных вопросов является вопрос, связанный с получением информации о реальной форме исследуемого бандажа. Перед реальными измерениями целесообразным является измерение на натурной модели, уменьшенной в несколько раз по отношению к действительной детали. Но изготовление натурной модели требует затрат, поэтому предпочтительным является создание 3D-модели сечения бандажа по результатам измерения его геометрических параметров. Это позволит правильно оценить имеющиеся погрешности формы детали, а также судить о возможности обработки с целью восстановления необходимой точности, определить величину снимаемого материала для исправления геометрической формы детали.

На сегодняшний день существуют контактные и бесконтактные способы измерения формы объектов и погрешностей их геометрических параметров. Для бандажей цементных печей в некоторых случаях невозможно осуществить контактные способы в силу габаритов детали и ограниченного доступа к зоне обработки.

В настоящее время наиболее распространенные измерительные комплексы и программные обеспечения имеют либо ограниченный радиус действия, либо приспособлены преимущественно в специфике строительной отрасли и не могут быть применены на предприятиях других отраслей, либо обладают высокой стоимостью входящего в комплект измерительного оборудования, из-за чего не могут быть широко использованы на большинстве отечественных предприятий. Также в большинстве случаев оборудование имеет ограничение на размер сканируемого объекта и поточечное сканирование объектов слишком больших размеров занимает длительное время, и зачастую, излишне.

В связи с этим продуктивной была бы диагностика с измерительной технологией, лишенной перечисленных недостатков. Бесконтактное измерение формы детали позволяет получать наглядную информацию о погрешностях формы и об отклонениях геометрических характеристик детали в каждом сечении.

Широкое применение нашли лазерные дальнометры и тахеометры при определении расстояния до объектов. На рабочих поверхностях бандажей, осях роликовых опор с применением высокоточного тахеометра или лазерного трекера определяется положение представительного количества точек. Определение координат выполняется методом пространственной полярной засечки прецизионным электронным тахеометром LeicaTDRA6000 или лазерным трекером LeicaAT401, обладающим функцией автоматического поиска, наведения и сопровождения визирной цели. Так, например, технические характеристики абсолютного трекера LeicaAT401: режим измерений – 2 секунды на точку при стабильных условиях окружающей среды. Полный диапазон составляет от 1,5 до 80 метров от лазерного трекера с вертикальным диапазоном  $\pm 45^\circ$ . Погрешность измерений координат XYZ определяется как отклонение между измеренной координатой и номинальной координатой данной точки. Причем современные алгоритмы поиска и захвата визирной цели позволяют эффективно работать даже в условиях значительного воздействия конвекционных потоков воздуха от рядом расположенных

работающих печей, что особенно важно в реальных производственных условиях.

Измерение формы бандажа производится бесконтактно, с использованием устройства определения формы, которое фиксирует геометрическую информацию о форме отраженного светового пятна, проецируемого на наружную поверхность, и, сравнивая параметры реального объекта и достигаемого, производится замер и контроль отклонений от формы наружной поверхности катания, с целью выработки технологических параметров восстановительной механической обработки. В результате становится известной форма объекта и отклонения ее геометрических параметров от заданных.

Существует несколько способов определения износа крупногабаритных тел вращения при помощи бесконтактных методов измерений, таких как проецирование точки, прямой, прямоугольной области.

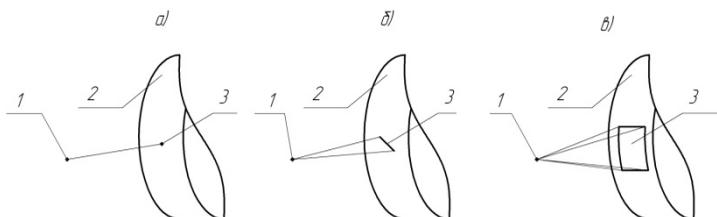


Рисунок 1 – Схема проецирования а) точки; б) прямой; в) прямоугольника на поверхность измеряемой детали: 1 – световой излучатель, 2 – измеряемая поверхность, 3 – отраженная фигура

На рис. 1. показан общий случай проецирования светового пятна на поверхность детали типа тела вращения. Таким образом, световой излучатель 1 формирует на поверхности объекта 2 световое изображение соответствующей формы, видеоустройство фиксирует проекцию на поверхности детали, которая отражает изображение светового пятна в виде определенной фигуры 3.

По форме точки невозможно сразу определить отклонения от правильности геометрической формы. По сравнению с точкой линия изменяет свою геометрию в зависимости от изменения геометрии поверхности. Наиболее оптимальным вариантом является проецирование прямоугольной области, так как при этом производится измерение одновременно по двум осям.

Очевидно, что отображаемая фигура будет изменять свои геометрические параметры при изменении формы и положения поверхности объекта, а также в соответствии с наличием дефектов в виде впадин и выпуклостей, которые возникают в процессе эксплуатации технологического оборудования. Таким образом, по форме отраженной от поверхности фигуры можно судить о геометрических характеристиках измеряемой поверхности.

Рассмотрим схему выполнения измерений расстояния до объекта, приведенную на рис. 2.

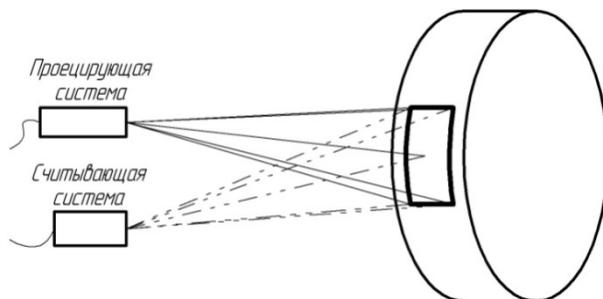


Рисунок 2 – Схема определения расстояния до объекта с использованием оптического дальномера

На рис. 2. показаны объект, до которого определяется расстояние, проецирующая система, формирующая на поверхности объекта световое изображение в виде прямоугольника, считывающая система, содержащая объектив и ПЗС-матрицу, на поверхности которой формируется изображение светового пятна в виде прямоугольника.

Проведя анализ износа рабочих поверхностей вращающихся крупногабаритных деталей, печных агрегатов, мельниц и другого оборудования и используя практические и теоретические сведения об изменении формы изнашиваемых поверхностей, выделяют такие виды износа как: поломка, поверхностный износ, износ под действием сил трения, истирание, деформация смятия и усталостное выкрашивание.

Результатом этого, например, является приобретение эллипсности в поперечном сечении бандажа цементной печи под действием собственного веса. Если происходит перекося ролик, на котором вращается деталь, то форма бандажа может быть конусной, бочкообразной или седлообразной. Если же изменяется форма рабочей поверхности роликов, то поверхность катания бандажа также будет деформироваться.

Существующие на данный момент технологии САПР позволяют быстро и эффективно провести анализ полученных данных, а с помощью методов бесконтактного определения погрешности поверхности крупногабаритных изделий, можно облегчить диагностику рабочих поверхностей и определение формы на основе изменения геометрических параметров проецируемой фигуры.

#### **Список литературы:**

1. Пат. 110181 Российская Федерация, МКИ<sup>7</sup> В 23 В 5/32. Устройство для определения погрешности формы крупногабаритных объектов / Маслова И.В., Чепчуров М.С., Хуртасенко А.В.; заявитель и патентообладатель Белгород. гос. технол. ун-т. им. В.Г.Шухова - №2011120357/28, заявл. 20.05.2011; опубл. 10.11.2011, Бюл. № 31. 8с.
2. Маслова И.В., Блудов А.Н. Обоснование использования управляемого процесса при восстановлении формы крупногабаритного тела вращения, не имеющего стационарную ось вращения //Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2012. № 3. С.76-79.
3. Пат. 101952 Российская Федерация, МКИ<sup>7</sup> В 23 В 5/32. Станочный модуль для восстановительной обработки бандажей и роликов / Маслова И.В., Погонин Д.А., Чепчуров М.С., Хуртасенко А.В.; заявитель и патентообладатель Белгород. гос. технол. ун-т им. В.Г.Шухова - №2010138151/02, заявл. 14.09.2010; опубл. 10.02.2011, Бюл. №4. 9с.
4. Петухов И.В., Маслова И.В. Определение формы крупногабаритных деталей с нестационарной осью вращения // В сборнике: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г.Шухова, Белгород, 2012.
5. Хуртасенко А.В. Устройство для определения размеров и формы крупногабаритных объектов // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб. ст. / под ред В.С. Богданова. Белгород, 2011. Вып. X. С.189-192.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ЗВЕНА В МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ, ЗАВИСЯЩЕМ ОТ ВРЕМЕНИ

**Шаталов А.В.**, канд. техн. наук, доц.,

**Суслов В.И.**, канд. техн. наук, проф.

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

Для компенсации потерь на трение предлагается использовать зависящее от времени внешнее воздействие, которое может быть аппроксимировано функциями, имеющими ограничения на продолжительность и скорость роста до максимального значения. Чаще всего при расчетах динамических систем двигатель рассматривают как источник момента силы, зависящего от кинематических параметров ротора. Такая зависимость представляет собой, так называемую статическую механическую характеристику двигателя. Однако в современных машинах агрегатах, особенно работающих в неустановившихся режимах, такой метод расчета может дать результат, который качественно и количественно отличается от истинного. Естественный и правильный путь расчета заключается, как показано в работах [1], [2], в составлении и совместном решении системы уравнений, охватывающих как динамику механической системы, так и переходные процессы в двигателе. У апробированных механических систем изменение момента движущих сил во времени может быть известно заранее. В работе [3] например, исследуются динамические свойства манипуляционной системы с пневмоприводом, в рабочем цилиндре которого давление аппроксимировано гармонической функцией. В данной работе на основании анализа решения дифференциального уравнения установлена зависимость максимумов движущего усилия от величины момента сил трения, исследуется влияние запаздывания с подачей движущего усилия.

В безразмерной форме вывод дифференциального уравнения движения исполнительного звена приведен в работе [1]. Изменение кинематических параметров в системе происходит по безразмерному времени  $\tau$ . Имеем

$$\ddot{y} + y = mg - m\tau, \quad (1)$$

где  $y$  – перемещение исполнительного звена,

$\ddot{y}$  – вторая производная от  $Y$  по безразмерному времени  $\tau$ ,

$mg$  – момент движущих сил,

$mt$ – приведенный к исполнительному звену момент сил сопротивлений.

Далее считается, что  $mt = \text{const}$ .

Найдем кинематические параметры режима движения, при котором исполнительное звено с момента времени  $\tau=0$ , из положения с координатой  $y(0)=-1$  и скорости  $\dot{y}(0)=0$  переводится за время  $\tau=\pi$  в положение  $y(\pi)=1$  при скорости  $\dot{y}(\pi)=0$ .

Пусть момент движущих сил изменяется по гармонической зависимости

$$mg = m \cdot \sin \tau, \quad (2)$$

где  $m$ - относительное значение амплитуды силового воздействия.

При начальных условиях  $\tau=0$ ,  $y(0)=-1$ ,  $\dot{y}(0)=0$  система из решений дифференциального уравнения (1) с учетом (2) принимает следующий вид

$$\begin{aligned} Y &= Y_c + m(\sin \tau - \tau \cos \tau) / 2, \\ \dot{Y} &= \dot{Y}_c + m(\tau \cdot \sin \tau) / 2, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $Y_c = -(1 - m\tau) \cos \tau - m\tau$  – перемещение исполнительного звена в колебательном контуре без учета движущего усилия,  $Y_c = (1 - m\tau) \sin \tau$  – скорость звена при том же условии.

Анализ изменения скорости исполнительного звена показывает, что в момент времени  $\tau = \pi$  скорость  $(\dot{y}) = 0$ . Координата  $y(\pi) = 1$  будет достигнута за то же время, если максимальное значение относительного момента движущих сил выбрано из условия

$$m = 4m\tau / \pi \quad (4)$$

Таким образом, гармоническое воздействие (2) с учетом (4) полностью удовлетворяет краевым условиям задачи и является симметричной механической характеристикой с продолжительностью воздействия равной времени движения исполнительного звена.

Алгоритм, использованный при решении выше изложенной задачи, может быть распространен и на другие варианты гармонического воздействия. Пусть, например время  $\tau$  в работе двигателя меньше чем полупериод колебания в упругой системе, т.е.  $\tau_b < \pi/2$ .

Допустим, что в системе имеет место запаздывание  $\tau_0$  с подачей движущего усилия. В промежутке времени  $0 \leq \tau \leq \tau_0$ , момент движущих сил.

Исполнительное звено движется под действием упругих сил, а фазовые координаты изменяются согласно решений  $Y_c, \dot{Y}_c$ . Пусть при  $\tau \geq \tau_0$  момент движущих сил изменяется по следующей зависимости:

$$m\dot{d} = m\alpha \sin \alpha(\tau - \tau_0), \quad (5)$$

где  $m\alpha$ – амплитуда относительного момента движущих сил;

$\alpha = \pi / \tau_b$  – коэффициент, учитывающий время работы двигателя.

Для  $\tau \geq \tau_0$  с учетом возмущающего воздействия (5) частное решение уравнения (1) имеет вид:

$$v = L \sin \alpha (\tau - \tau_0),$$

где  $L = m\alpha / (1 - \alpha^2)$  – амплитуда колебаний вынужденного движения.

При начальных условиях  $v(\tau_0) = v_0$ ,  $\dot{v}(\tau_0) = \dot{v}_0$ , общее решение дифференциального уравнения (1) с учетом (5)

$$v = (v_0 + mT) \cos \xi (\tau - \tau_0) - mT + (\dot{v}_0 - \alpha L) \sin (\tau - \tau_0) + L \sin \xi (\tau - \tau_0), \quad (6)$$

В решении (6) три слагаемых, влияющих на колебательный процесс в системе. Первое описывает свободные колебания, зависящие от начальных условий, а последние два описывают вынужденные колебания с разными частотами.

Продифференцировав (6) по  $\tau$ , получим для безразмерной скорости такое выражение:

$$\dot{v} = - (v_0 + mT) \sin \xi (\tau - \tau_0) + (\dot{v}_0 - \alpha L) \cos \xi (\tau - \tau_0) + \alpha L \cos \xi (\tau - \tau_0), \quad (7)$$

В момент времени  $\tau = \tau_0 + \tau_B$  воздействие движущих сил на исполнительное звено прекратится. Согласно (6) и (7), с учетом собственного движения  $Y_c, \dot{Y}_c$  положение и скорость исполнительного звена в момент времени  $t_B$  могут быть определены по следующим зависимостям:

$$v(t_B) = - (1 - mT) \cos t_B - \alpha L \sin t_B, \quad (8)$$

$$\dot{v}(t_B) = (1 - mT) \sin t_B - \alpha L (1 + \cos t_B).$$

Далее рассмотрены только те режимы работы движения исполнительного звена, для которых выполняются условия проектного задания. Как следует из (8), при  $t_B = \pi$ , и равенстве  $\alpha L \sin t_B + mT = 0$  исполнительное звено достигает координат  $v(\pi) = 1$ , но со скоростью  $\dot{v}(\pi) \neq 0$ . Поэтому для достижения требуемого движения необходимо организовать режим последствия. Используя  $v(t_B)$  и  $\dot{v}(t_B)$  из (8) как начальные условия, при  $m g(\tau) = 0$ , найдем из дифференциального уравнения (1) при  $\tau \geq t_B$  перемещение и скорость исполнительного звена в режиме последствия:

$$v(\tau) = (v(t_B) + mT) \cos (\tau - t_B) + \dot{v}(t_B) \sin (\tau - t_B) - mT, \quad (9)$$

$$\dot{v}(\tau) = - (v(t_B) + mT) \sin (\tau - t_B) + \dot{v}(t_B) \cos (\tau - t_B).$$

Изменение фазовых координат по зависимости (9) позволяет получить необходимый конечный результат.

Величина амплитуды  $m\alpha$  движущего момента сил зависит от величины момента сил трения  $mT$  и связана с коэффициентом продолжительности воздействия следующим соотношением:

$$m_{\alpha} = \frac{\alpha^2 - 1}{\alpha \cos\left(\frac{\pi}{2\alpha}\right)} m_T, \quad (10)$$

Из формулы (10) следует что если  $\alpha \rightarrow 1$ , то значение амплитуды  $m$   $\alpha$  стремится к своему минимальному значению (4).

В таблице 1 приведены отношения максимальных значений моментов движущих сил и моментов сил трения  $m/\ m_T$  в зависимости от продолжительности вклада энергии в систему. При расчетах принято  $m_T=0,1$ .

Таблица 1

тв	$2\pi/18$	$3\pi/18$	$4\pi/18$	$5\pi/18$	$6\pi/18$	$9\pi/18$	$10\pi/18$	$12\pi/18$	$15\pi/18$
$\alpha$	9	6	4,5	3,6	3	2	1,8	1,5	1,2
$m\alpha/m_T$	9,026	6,0391	4,552	3,665	3,079	2,121	1,9360	1,6666	1,4167

Из таблицы следует, что с уменьшением продолжительности действия движущих сил по отношению к продолжительности движения исполнительного звена, максимальное значение момента движущих сил растет. При  $\tau_B = \pi/3$  и  $\alpha=3$  имеет  $m_{\alpha} = 3,08 m_T$ , а при  $\alpha=6$  имеет  $m_{\alpha} = 6,04 m_T$ , то есть величина максимума момента движения сил примерно в  $\alpha$  раз больше величины момента сил трения. Требуемое движение будет удовлетворено, если система загружена моментом движущих сил с симметричной относительно времени  $\tau = \pi/2$  характеристикой. Максимальная величина движущего воздействия зависит от продолжительности  $\tau_B$  воздействия и величины  $m_T$  сил трения.

#### Список литературы:

1. Суслов В.И. Критерий выполнения требуемого движения исполнительным звеном в системе с рекуперацией энергии. //Современные проблемы строительного материаловедения. БелГТАСМ. Белгород, 2001. С.326-327.
2. Суслов В.И., Шаталов А.В. О возможности получения требуемого движения фазовых траекторий в механической системе с рекуперацией энергии // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2005. № 11. С. 225-227.
3. Акинфиев Т.С., Пожаринский А.А. Динамические свойства резонансной манипуляционной системы с односторонним пневмоприводом // Машиноведение. 1985. №2. С. 24-30.

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

**Шуманёва Е.К., аспирант**

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

Надежность – способность энергосистемы обеспечить бесперебойное снабжение потребителей электроэнергией при всех режимах работы энергосистемы. Надежность обеспечивается безаварийной работой персонала, своевременным ремонтом оборудования, правильным ведением режима работы оборудования, достаточно высокими темпами развития энергосистемы и т.д.

От надежности электроснабжения зависят промышленность, быт, сельское хозяйство. Зависимость эта такая сильная, что ее нарушение приводит к огромному материальному ущербу.

Одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед современным предприятием, имеющим в своем распоряжении сложное дорогостоящее в обслуживании оборудование, является необходимость обеспечения его надежной работы. Для поддержки длительной работоспособности электрооборудования большое значение имеет его техническое обслуживание в межремонтные периоды. Эксплуатация энергосистемы организуется в двух направлениях: технической эксплуатации оборудования и оперативного управления работой энергосистемы в целом.

Бесперебойная и надежная работа является важнейшей задачей любого предприятия. Эффективность работы электрооборудования повышается благодаря внедрению устройств автоматического повторного включения (АПВ), автоматического ввода резерва (АВР) и телемеханики. При возникновении отклонений режимов работы электрооборудования сигналы электромеханических устройств поступают на диспетчерский пункт, после получения сигнала устанавливается характер нарушения режима и действия для его устранения.

Существенный фактор, влияющий на работоспособность электроустановок, — использование средств диагностики состояния оборудования. Внедрение программируемых средств управления оборудованием позволяет осуществлять всестороннюю и глубокую диагностику работоспособности электрооборудования. Специальные диагностические программы осуществляют контроль нагрузки

элементов, работоспособности узлов. При отклонении параметров работы электроустановок или отказах обслуживающий персонал немедленно получает об этом информацию.

Последние десять лет ведутся интенсивные работы по совершенствованию неразрушающих методов диагностики изоляции и выпуску предназначенной для этого аппаратуры. Эти методы ориентированы на диагностические испытания, не разрушающие изоляцию электрооборудования и позволяющие выполнять локализацию проблемных мест на ранней стадии развития дефектов в изоляции. К числу недостатков диагностических методов испытаний изоляции следует отнести высокую стоимость диагностической аппаратуры и требующую наличия высококвалифицированного персонала. Большую сложность методов диагностики. Однако эти недостатки перестают иметь место при производстве диагностических испытаний силами специализированных предприятий, имеющих персонал высокой квалификации. Непрерывная диагностика (мониторинг) с точки зрения объема получаемых данных является наиболее информативной. Перспективным является мониторинг особо важных объектов энергетики, имеющих большую установленную мощность и соответственно стоимость.

Достоверная диагностика состояния изоляции электротехнического оборудования неразрушающими методами позволит отказаться от профилактики изоляции разрушающими методами контроля, которые во многих случаях приводят к уменьшению ресурса, несвоевременному и непредсказуемому пробою изоляции.

При эксплуатации оборудования изнашиваются его составные части, т.е. постепенно теряют свои механические или электрические характеристики, которые требуются для нормальной работы. Во многих электрических аппаратах, осуществляющих коммутацию электрических цепей (рубильники, контакторы, реле, кнопки), обгорают, покрываются оксидной пленкой контакты, в связи, с чем увеличивается их переходное сопротивление, перегревается контактное соединение и контакт выходит из строя. Неизбежные колебания температуры окружающей среды вызывают изменения режимов работы полупроводниковых элементов.

Своевременное проведение профилактических работ, регулировок, замены вышедших из строя элементов обеспечивает продолжительную работу электрооборудования. Периодические испытания, статистический учет отказов и их анализ позволяют установить

наиболее оптимальные сроки ремонтов оборудования, что продлевает сроки его эксплуатации.

Одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед современным предприятием, имеющим в своем распоряжении сложное дорогостоящее в обслуживании оборудование, является необходимость обеспечения его надежной работы. Поддержание рабочей готовности технологических активов достигается в основном за счет ремонтного и технического обслуживания оборудования, а также используемых при данных работах ресурсов.

Бесперебойная и надежная работа является важнейшей задачей любого предприятия. Для решения этой задачи были некогда разработаны мероприятия по обслуживанию и ремонту, которые обеспечивали длительное содержание оборудования в рабочем состоянии при наилучших экономических показателях его работы и минимально возможных неплановых остановках его в ремонт. Эта система основывается на проведении планово-предупредительных ремонтов (ППР). Он позволяет провести ряд работ, направленных на восстановление оборудования, замену деталей, что обеспечивает экономичную и непрерывную работу оборудования.

Чередование и периодичность планово-предупредительного ремонта (ППР) оборудования определяется назначением оборудования, его конструктивными и ремонтными особенностями, габаритами и условиями эксплуатации.

Эксплуатацию электрооборудования технологических установок осуществляют ремонтные службы предприятия, исходя из задач обеспечения безотказной работы их на основе системы проведения планово-предупредительных ремонтов (ППР). Система ППР базируется на систематических осмотрах, при которых выявляются неисправности электрооборудования и устанавливается необходимость его ремонта, а также периодических ремонтных работ. Система ППР включает следующие виды работ: текущий уход (межремонтное обслуживание), малый, средний и капитальный ремонты. Система планово-предупредительного ремонта в зависимости от объема и сложности ремонтных работ предусматривает проведение текущего и капитального ремонтов.

На основании данных, полученных в процессе работы, а также инструкций по эксплуатации оборудования отделы анализа и планирования ремонтов составляют календарные графики, в которых указывают сроки проведения осмотров, текущих и капитальных ремонтов по каждой единице оборудования.

В обслуживание электрооборудования входят наблюдение за выполнением правил его эксплуатации, периодические осмотры и проведение профилактических работ.

Текущий этап планово-предупредительного ремонта зачастую осуществляют, не вскрывая оборудование, на время останавливая работу оборудования. Текущий этап планово-предупредительного ремонта заключается в ликвидации поломок, появляющихся во время работы. Текущий этап планово-предупредительного ремонта состоит из осмотра, смазки деталей, чистки и ликвидации выявленных поломок оборудования.

Капитальный ремонт — наиболее сложный и трудоемкий вид планового ремонта, при котором производят полную разборку оборудования с последующим ремонтом или заменой всех изношенных узлов или деталей, а также работы, входящие в объем текущего ремонта. При капитальном ремонте проводят полный перемонтаж всей схемы с заменой или ремонтом большинства узлов, приборов и аппаратов. В капитальном ремонте принимают участие все ремонтные службы предприятия. Внеплановый ремонт электрооборудования, производимый при внезапных его отказах, называют аварийным. При аварийном ремонте ремонтный персонал по действию блокировок и систем защиты на базе знания электрических и функциональных схем, по звуковой и световой индикации и с помощью тестовых приборов определяет участок схемы и устройство, отказавшее в работе. Неисправность устраняют непосредственно на оборудовании либо отказавший элемент заменяют новым.

Отказы, связанные со старением оборудования, обычно связаны с накопившейся усталостью материалов, появлением коррозии, износом. Однако сегодня становится очевидно, что связь между возрастом оборудования (если конечно возраст не превышает нормативный срок эксплуатации) и возникающими на нем дефектами для большинства типов сложного оборудования становится все более и более слабой.

Зная основные повреждения, возникающие в электрических машинах, можно быстро их устранить и продлить срок службы машин. Существенный фактор, влияющий на работоспособность электроустановок, — использование средств диагностики состояния оборудования. Каждая установка обычно оснащена средствами, позволяющими определить ее работоспособность.

Внедрение программируемых средств управления оборудованием позволяет осуществлять всестороннюю и глубокую диагностику работоспособности электрооборудования.

Специальные диагностические программы осуществляют контроль нагрузки элементов, работоспособности узлов. При отклонении параметров работы электроустановок или отказах обслуживающий персонал немедленно получает об этом информацию. Информация о состоянии оборудования в программируемых системах выдается на дисплей текстом, позволяя оперативно принимать решения по устранению сбоев и отказов в работе.

Большое значение для обеспечения работоспособности электрооборудования промышленных электроустановок имеет унификация применяемых электроприводов и систем управления

#### **Список литературы:**

1. Гольгин А.Ф., Ильяшенко Л.А. Устройство и обслуживание электрооборудования промышленных предприятий. М.: В.Ш., 1986. 207с.
2. Атабеков В.Б. Ремонт электрооборудования промышленных предприятий. М.: В.Ш., 1985. 175с.
3. Мандрыкин С.А., Филатов А.А. Эксплуатация и ремонт электрооборудования станций и сетей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 344с.
4. Нестеров М.Н. Неоднозначность решения уравнений установившегося режима простой энергетической системы переменного тока // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2005.№11.

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАНДАЖА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

Щетинин Н.А., аспирант,  
Мурыгина Л.В., канд. техн. наук  
*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г.Шухова*

В настоящее время во многих отраслях промышленности широко применяют вращающиеся печи и сходные по конструкции технологические барабаны для осуществления различных технологических процессов. Основными базовыми элементами таких агрегатов являются бандажи и опорные ролики, при помощи которых печь устанавливается на опоры и осуществляет вращение. Отечественной промышленностью выпускаются два вида бандажей – плавающего и вварного типов. Вварной тип является более надежным и простым в эксплуатации, поэтому в настоящее время они постепенно вытесняют бандажи плавающего типа. При этом заменяемые бандажи отправляют на площадки ремонтного фонда или в металлолом. На кафедре технологии машиностроения разработан технологический процесс реконструкции таких бандажей непосредственно в условиях их эксплуатации [1,2] с использованием специального мобильного оборудования [3,4]. Первостепенной задачей при этом является разработка конструктивных элементов, которые необходимо выполнить на поверхностях бандажа плавающего типа, чтобы он превратился в бандаж вварного типа. В качестве исходных были использованы конструктивные элементы, в виде фасонных кольцевых проточек, выполняемых на торцевых поверхностях [5,6], в результате чего формируются поверхности закрывков, которые затем подлежат соединению с корпусом печи сваркой. Однако при этом возникает еще одна задача – определить оптимальные размеры, форму и относительное положение таких элементов. Для оптимизации конструкции предложено использовать последовательный симплексный метод [7], как наиболее простой и, который легко реализуется при использовании ЭВМ. В качестве целевой функции  $J_n$  (функция отклика) выбрана величина напряжения, возникающая в зоне перехода закрывка в основное тело бандажа ( $H/mm^2$ ). Учитывалась также и равномерность распределения напряжений по длине формируемой поверхности закрывка, в виде качественной оценки. В качестве варьируемых факторов были выбраны: глубина расположения радиуса кольцевой

проточки  $\tilde{x}_1$  и величина угла наклона внутренней грани закрылка  $\tilde{x}_2$  (рис. 1).

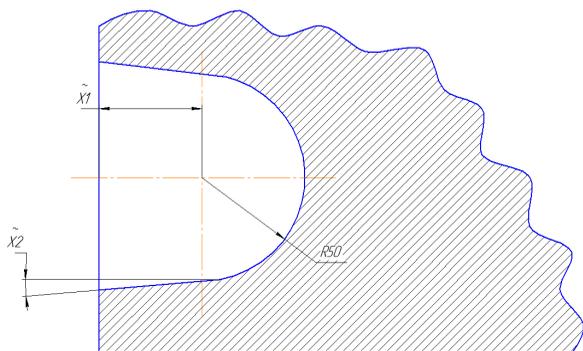


Рисунок 1 – Схема оптимизируемой конструкции

Остальные геометрические параметры, такие как радиус кольцевой проточки, угол наклона внешней грани кольцевой проточки задавались как постоянные. По конструктивным и технологическим соображениям, а также результатам предварительного моделирования были выбраны нулевые уровни и шаги варьирования факторов:

$$\tilde{x}_1 = 0 \text{ мм}; \Delta \tilde{x}_1 = 10 \text{ мм}; \tilde{x}_2 = 0^\circ; \Delta \tilde{x}_2 = 1^\circ,$$

где  $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2$  – нулевые уровни варьируемых факторов;  $\Delta \tilde{x}_1, \Delta \tilde{x}_2$  – шаги варьирования.

Так как число варьируемых факторов, участвующих в процессе оптимизации  $k = 2$ , то число точек в исходном симплексе составит:

$$N = k + 1.$$

Таким образом, исходный симплекс будет представлять собой треугольник. Матрица условий эксперимента в кодированном и натуральном виде представлена в табл. 1. Последовательно вводим в программу значение варьируемых параметров, соответствующих каждой точке симплекса  $z_1, z_2, z_3$  и моделируем напряженно-деформированное состояние поверхностей бандажа.

Таблица 1 – Матрица условий эксперимента для исходного симплекса

№ п/п	Точка симплекса	$x_1$	$x_2$	$\tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$	$J_n$
1	$z_1$	0	0	0	0	32,9
2	$z_2$	+2	0	20	0	32,5
3	$z_3$	+1	+1,73	10	1,73	31,2

В результате получаем значение целевой функции – величину напряжений, возникающих в зоне перехода закрывка в основное тело бандажа и их распределение по длине формируемых поверхностей. Сравниваем значения целевой функции в пределах одного симплекса и

определяем точку  $z_i$ , с наихудшим значением целевой функции, т.е. с максимальным значением напряжений и с большей неравномерностью их распределения. Найденную таким образом точку симплекса, отображаем относительно противоположной грани и определяем ее координаты в кодированном и натуральном виде (рис. 2). Поле в выбранной системе координат, где может перемещаться симплекс ограничиваем, вводя два технических ограничения. Для фактора  $x_1$  – 50 мм, для фактора  $x_2$  – 6°. Для первого фактора введение такого ограничения обосновано тем, что повышенная глубина кольцевой проточки существенно снижает жесткость самого бандажа. Для второго фактора – из требований к форме скоса при разделке кромок сварных соединений. Для исходного симплекса точкой с наихудшим значением целевой функции является точка –  $z_1$ . Вычисляем координаты новой точки  $z_4$  по следующим зависимостям [7]:

$$\tilde{x}_{j,N+1} = \frac{2}{k} \sum_{i=1}^{k+1} \tilde{x}_i - \left( \frac{2}{k} + 1 \right) \cdot \tilde{x}_i^*$$

$$x_{j,N+1} = \frac{2}{k} \sum_{i=1}^{k+1} x_i - \left( \frac{2}{k} + 1 \right) \cdot x_i^*$$

где  $k$  – число варьируемых факторов;  $x_i^*$ ,  $\tilde{x}_i^*$  – координаты наихудшей точки симплекса соответственно в кодированном и натуральном видах. Для перехода от кодированных координат к натуральным и наоборот используем известные зависимости:

$$\tilde{x}_j = \frac{\tilde{x}_j^0 - \tilde{x}_j^0}{\Delta \tilde{x}_j},$$

$$\tilde{x}_j = \tilde{x}_j^0 + \Delta \tilde{x}_j \cdot x_j,$$

где  $\tilde{x}_j$  – значение факторов в натуральной системе координат;  
 $\tilde{x}_j^0$  – значение факторов не нулевых уровнях в натуральной системе координат;  
 $x_j$  – значение факторов в кодированной системе координат;  
 $\Delta \tilde{x}_j$  – шаги варьирования факторов в натуральной системе координат.

Затем осуществляем моделирование с параметрами, соответствующими точке симплекса  $z_4$ . Далее сравниваем значения целевой функции в пределах второго симплекса и так далее. При этом симплекс перемещается в область, где значения варьируемых параметров будут оптимальными (рис. 2).

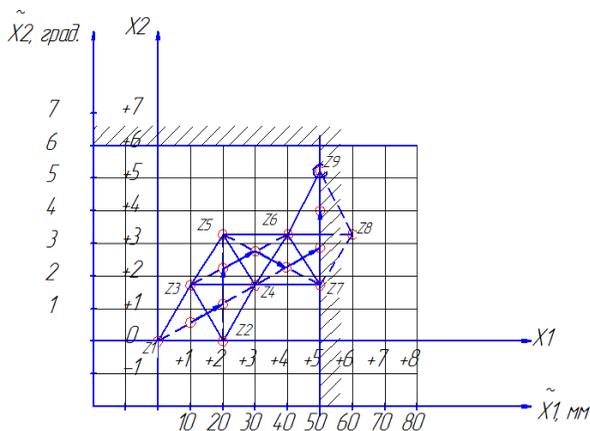


Рисунок 2 – Движение симплекса при оптимизации конструктивных параметров поверхностей закрылка

Если при движении симплекса новая точка будет выходить за установленное техническое ограничение, то в этом случае в пределах симплекса следует выбрать вторую наихудшую точку и произвести ее

отображение относительно противоположной грани, с последующим определением ее координат. Значения варьируемых факторов в кодированном и натуральном виде, а также значения целевой функции приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения варьируемых факторов и целевой функции

№ симплекса	Точки симплекса	$x_1$	$x_2$	$\tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$	$J_n$
1	$z_1$	0	0	0	0	32,9
	$z_2$	+2	0	20	0	32,5
	$z_3$	+1	+1,73	10	1,73	31,2
2	$z_2, z_3, z_4$	+3	+1,73	30	1,73	30,9
3	$z_3, z_4, z_5$	+2	+3,46	20	3,46	30,8
4	$z_4, z_5, z_6$	+4	+3,46	40	3,46	30,1
5	$z_4, z_6, z_7$	+5	+1,73	50	1,73	30,3
6	$z_6, z_7, z_8$	+6	+3,46	60	3,46	30,2
7	$z_6, z_8, z_9$	+5	+5,19	50	5,19	29,9

Ее анализ показывает, что оптимальными значениями варьируемых параметров являются значения, соответствующие точке симплекса  $z_9$ , т.е. глубина расположения радиуса кольцевой проточки  $\tilde{x}_1$  должна составлять не более 50 мм, а угол наклона внутренней грани закрывка должен составлять примерно  $5,2^\circ$ . На рис. 3 представлены числовые значения напряжений и их распределение для оптимальных конструктивных параметров, формируемых на торцевых поверхностях бандажа.

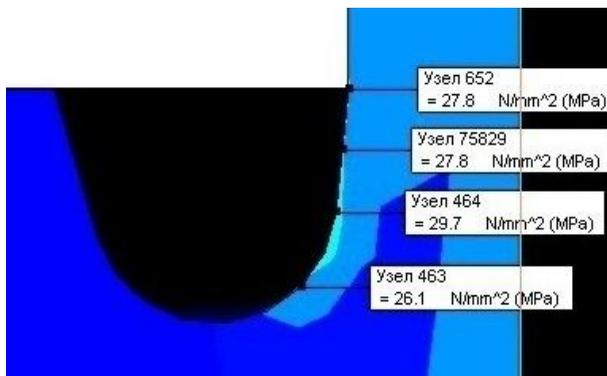


Рисунок 3 – Числовые значения напряжений и их распределение для оптимальных конструктивных параметров

Процесс оптимизации осуществлялся для бандажа  $\varnothing 6100\text{мм}$  и полученные оптимальные значения следует задать в пропорции от геометрических параметров самого бандажа (рис. 4).

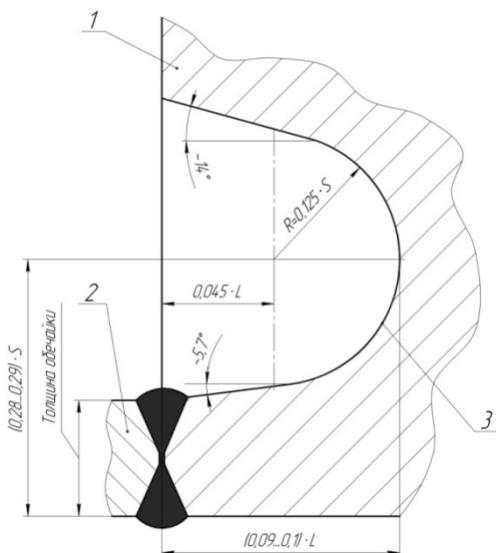


Рисунок 4 – Оптимальная форма фасонной кольцевой проточки на торцевой поверхности бандажа

Кольцевые фасонные проточки следует располагать на расстоянии равном толщине кольцевых обечайек и выполнять глубиной  $(0,09 \dots 0,1)L$ , где  $L$  – длина бандажа и радиусом закругления  $0,125S$ , где  $S$  – толщина бандажа. При этом наружная грань проточки должна быть расположена под углом  $14^{\circ}$ , а внутренняя – под углом  $5,2^{\circ}$ . При уменьшении глубины проточки менее  $0,09$  от длины бандажа уменьшается зона перехода от кольцевой обечайки к основному телу бандажа, что в свою очередь влечет за собой увеличение концентрации напряжений. При глубине более  $0,1$  толщины бандажа зона перехода увеличивается, однако, снижаются прочностные свойства самого бандажа, в результате ослабления его сечения проточкой большей глубины. Радиус закругления проточки должен выполняться равным  $0,125$  толщины бандажа. Такая величина выбрана с учетом удобства проведения последующих работ по сварке бандажа с кольцевыми обечайками. При уменьшении величины радиуса закругления менее  $0,125$  толщины бандажа, размеры проточки уменьшаются, что усложняет процесс проведения работ. Уменьшение радиуса закругления приводит так же и к увеличению концентрации напряжений. При радиусе закругления более  $0,125$  толщины бандажа размеры проточки увеличиваются, что может благоприятно сказываться на удобстве проведения работ. Однако, конструкция бандажа в этом случае значительно ослабляется, что может отрицательно сказываться на его надежности. Наклон внутренней грани кольцевой фасонной проточки на угол, равный  $5,2^{\circ}$  обеспечивает плавный переход от кольцевой обечайки к телу бандажа, что положительно сказывается на равномерности распределения напряжений, возникающих при работе бандажа. Изменение величины угла влечет за собой изменение характера распределения напряжений и их существенной концентрации на отдельных участках. Угол расположения наружной грани проточки, равный  $14^{\circ}$  выбран из конструктивных соображений, так как он обеспечивает удобство последующего монтажа и сварки. Так как бандаж вращающейся печи соединяется с кольцевыми обечайками при помощи сварки, то при последующей эксплуатации, благодаря наличию выполненных таким образом канавок, внутренние напряжения, возникающие в местах их соединения, будут более равномерно распределяться по длине соединения, что обеспечит существенное повышение его надежности.

Выполняя, таким образом, фасонные кольцевые проточки на торцевых поверхностях, возможна реконструкция бандажей плавающего (насадного) типа во вварные. Технологический процесс [10], предполагает выполнение работ, используя специальное

устройство [11].

#### Список литературы:

1. Шрубченко И.В. Технологические основы обеспечения формы и условий контакта поверхностей качения опор технологических барабанов при обработке мобильным оборудованием: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.02.08: защищена 25.04.07. / Шрубченко Иван Васильевич; Московский авиац. ин-т. М., 2007. 44 с.
2. Шрубченко И.В. Технологические основы обеспечения формы и условий контакта поверхностей качения опор технологических барабанов при обработке мобильным оборудованием: Дисс. докт. техн. наук/ И.В. Шрубченко; МАИ, БГТУ им. В.Г.Шухова. М.: 2007. 373 с.
3. Пелипенко Н.А., Погонин А.А., Шрубченко И.В. А.С. №1306648 СССР МКИ 4 В 23В 5/32. Станок для проточки бандажей и роликов / Белгор. технол. ин-т стр. матер. 3995076/31–08. Заявл. 25.12.85; Опубл. 30.04.87. Бюл.№16 // Открытия. Изобретения. 1987. №16. С. 35.
4. Расчет и конструирование деталей и узлов металлообрабатывающих станков: учеб. пособие / А.Т. Калашников, А.А. Погонин, И.В. Шрубченко и др. Белгород: Изд-во БГТУ, 2003 158 с.
5. Черняев А.С., Шрубченко И.В., Мурыгина Л.В., Архипова Н.А., Рыбалко В.Ю. Пат. 114763 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup>F 27 В 7/20. Бандаж вращающейся печи; заявитель и патентообладатель: Белгор. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова. № 2011140909 / 02; заявл. 7.10.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. №10. 3 с.
6. Пелипенко Н.А., Погонин А.А., Федоренко М.А., Шрубченко И.В. А.С. №1350459 СССР МКИ 4F 27 В 7/22 Бандаж вращающейся печи /, Белгор. технол. ин-т стр. матер. 4032018/29-33 Заявл. 05.03.86; Опубл. 07.11.87. Бюл.№41 // Открытия. Изобретения. 1987. №41. С. 159.
7. Хартман К., Лецки Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 1977. 522 с.
8. Шрубченко И.В., Мурыгина Л.В., Щетинин Н.А. Некоторые особенности реконструкции бандажей вращающихся технологических барабанов с использованием мобильных технологий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. №4. С. 96-99.
9. Шрубченко И.В., Черняев А.С., Мурыгина Л.В. Технологический процесс реконструкции бандажей типа «П» в тип «В» // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №1. С. 73-77.
10. Шрубченко И.В., Мурыгина Л.В., Щетинин Н.А. Пат. 143559 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 23 В 5/00. Устройство для обработки бандажей; заявитель и патентообладатель: Белгор. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова. № 2013159271 / 02; заявл. 30.12.2013; опубл. 27.07.2014, Бюл. №21. 3 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

<b>Александрова Е.Б., Стадченко А.А.</b> Сепаратор со смещенным ротором.....	3
<b>Богданов В.С., Гавриленко А.В.</b> Расчёт оптимальных параметров аэрационного устройства пневмокамерного насоса .....	5
<b>Булгаков С.Б., Уваров В.А., Леонов А.Н.</b> Пневмоструйная мельница.....	9
<b>Вердиян М.А., Несмеянов Н.П., Ильин Д.В.</b> Критерий необходимости инновационной модернизации цементных заводов...	15
<b>Герасимов М.Д., Мкртычев О.В.</b> Условия прохождения исходной массы сыпучего материала через просеивающие поверхности при грохочении .....	24
<b>Герасимов М.Д., Мкртычев О.В., Степанищев В.А.</b> Расчёт системы одновальных вибраторов с помощью рядов Фурье .....	29
<b>Дейнека Е.Ю.</b> Тонкое измельчение строительных материалов с использованием автоколебательных процессов в барабанных мельницах.....	35
<b>Ельцов М.Ю., Хахалев П.А., Фоменко А., Латышев И.</b> Тепловой расчет корпуса сушильного барабана 1,6x8 м в САД/САЕ-системе NX.....	41
<b>Ильина Т.Н., Севостьянов М.В., Кошукوف А.В., Емельянов Д.А., Григорьев В.А.</b> Особенности процессов компактирования техногенных волокнистых материалов.....	47
<b>Карпачев Д.В., Семикопенко И.А.</b> Тонкое измельчение частиц при взаимодействии двухфазных струй в противоточной струйной мельнице.....	52
<b>Киреев В.М.</b> Повышение энергоэффективности систем аспирации при перегрузке сыпучих материалов .....	59
<b>Королёв А.А., Лукьянов Н.А., Степанов М.А., Дьяконов Н.А.</b> Расчёт сопротивлений возникающих в валках .....	64
<b>Лаптева С.Н.</b> Минимизация отражений электромагнитной волны от слоя обрабатываемого вещества в промышленных СВЧ энергетических установках .....	70

<b>Лозовая С.Ю., Стовпенко А.С., Старчик Ю.Ю.</b> Повышение качества промпродукта при флотации магнитнорудного сырья.....	75
<b>Науменко Ю.В.</b> Организация диспергирования материалов на основе концепции энергетической селективности процесса.....	78
<b>Несмеянов Н.П., Бражник Ю.В., Барышева Т.А.</b> Разработка роторного смесителя с высокоскоростным режимом смешивания для производства модифицированных строительных смесей.....	85
<b>Несмеянов Н.П., Дмитриенко В.Г., Матусов М.Г.</b> Разработка смешивающего механизма бетоносмесителя принудительного действия.....	88
<b>Романович А.А., Мещеряков С.А.</b> К вопросу помола материалов, предварительно деформированных в ПВИ.....	91
<b>Романович А.А., Мещеряков С.А.</b> Расчет мощности привода шаровой мельницы, оснащенной энергообменными устройствами ...	96
<b>Севостьянов В.С., Михайличенко С.А., Сиваченко Т.Л., Попов Ф.С.</b> Потенциал создания конструкций и использования иглофрезерных методов дезинтеграторной обработки материалов....	104
<b>Севостьянов В.С., Михайличенко С.А., Сиваченко Т.Л., Попов Ф.С.</b> Технологическая эффективность переработки материалов в роторно–центробежных агрегатах.....	110
<b>Севостьянов В.С., Сиваченко Т.Л.</b> Разработка энергоэффективных механизмов единичных актов измельчения.....	117
<b>Севостьянов М.В., Ильина Т.Н.</b> Классификационный анализ технических средств для компактирования техногенных материалов.....	121
<b>Севостьянов М.В., Уваров В.А., Зубаков А.П.</b> Теоретические и экспериментальные исследования вальцевого пресса с протяженной зоной уплотнения.....	127
<b>Семикопенко И.А., Вялых С.В., Смирнов Д.В., Горбань Т.Л., Трофимов И.О.</b> Центробежная противоточная мельница с селективным измельчением материала.....	135
<b>Струков В.Г., Струков К.В., Смольяков М.Г., Соловьев С.В.</b> Повышение эффективности шнековых ленточных прессов для производства керамических изделий.....	138
<b>Трулёв А.В., Коновалов В.М., Кузнецов В.А.</b> Компьютерное моделирование горения природного газа в цементной вращающейся печи.....	142
<b>Уваров В.А., Шарипов Ринат Р.</b> Влияние варьируемых параметров на производительность центробежного сепаратора.....	147

<b>Уваров В.А., Шарапов Ринат Р.</b> Влияние расхода свежего воздуха на разрежение в корпусе центробежного сепаратора.....	154
<b>Фадин Ю.М., Герасименко В.Б., Лапина О.А., Герасименко А.А.</b> Наклонная межкамерная перегородка для трубной сепараторной мельницы.....	158
<b>Фадин Ю.М., Латышев С.С., Донецкий Р.В., Лапина О.А.</b> Межкамерная перегородка трубной мельницы.....	164
<b>Федоренко М.А., Маркова О.В.</b> Влияние конструкции опорного узла модуля на смещение оси восстанавливаемого вала.....	169
<b>Харламов Е.В., Шарапов Р.Р., Харламова В.В.</b> Теория и практика использования сепаратора кипящего слоя.....	175
<b>Чемеричко Г.И., Порядина Е.В.</b> Совершенствование конструкции рабочих органов двухвального лопастного смесителя непрерывного действия.....	181
<b>Юдин К.А., Кулаков Л.С.</b> Особенности линии по производству целевых полов.....	185

## **НОВЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

<b>Абрамов В.В., Ракунов Ю.П., Капырин П.Д.</b> О механо-физико-химических явлениях на границе раздела разнородных твердых тел при термодформационном воздействии.....	189
<b>Бойко А.Ф., Блинова Т.А.</b> Анализ конструкций изделий с микроотверстиями.....	194
<b>Бойко А.Ф., Пузачева Е.И., Жуков Е.М.</b> Определение шероховатости обработанной поверхности при электроэрозионной прошивке малых отверстий с использованием генератора импульсов с индуктивностью в разрядной цепи.....	201
<b>Бондаренко Ю.А., Антонов С.И.</b> Анализ некоторых особенностей применения уплотнений вращающихся печей.....	207
<b>Гетьман Ю.А., Маслова И.В., Шипилов И.П., Шипилов К.П.</b> Проблема восстановления геометрической точности тел вращения печных агрегатов.....	212
<b>Гончаров М.С., Хуртасенко А.В., Шрубченко И.В.</b> Компьютерное моделирование контакта бандажа и ролика.....	216
<b>Гончаров М.С., Шрубченко И.В., Мурыгина Л.В., Щетинин Н.А.</b> Моделирование технологической системы мобильного оборудования.....	223

<b>Дашкевич В.Г., Стасевич Г.В., Ковальчук А.В., Щербаков В.Г., Гегеня Д.В.</b> Эффективные технологии поверхностной обработки изделий из стали.....	229
<b>Дуганов В.Я., Воронкова М.Н., Архипова Н.А.</b> Переносной станок для обработки вкладышей крупногабаритных подшипников скольжения .....	234
<b>Дуганов В.Я., Хуртасенко А.В., Архипова Н.А.</b> Способ выверки оси вращающейся печи при восстановительном ремонте.....	238
<b>Дуюн Т.А., Гринек А.В., Хакимов Л.Р., Никольская В., Баранов Д.С.</b> Моделирование процесса прерывистого резания и оптимизация механической обработки поверхностей с неоднородным припуском .....	245
<b>Дуюн Т.А., Гринек А.В., Хакимов Л.Р., Никольская В., Манжос Р.В.</b> Численное моделирование тепловых параметров и динамических характеристик процесса резания.....	252
<b>Мочалов В.Д.</b> Определение остаточных напряжений первого рода в деталях машин после алмазно-электроэрозионного шлифования ...	258
<b>Прокопов Е.Е.</b> Эффективность ударовиброзащиты при прерывистом режиме работы упругого звена.....	264
<b>Сторублев М.Л.</b> Свойство управляемости процессов интегрированных систем менеджмента.....	269
<b>Федоренко М.А., Антонов С.И.</b> Анализ факторов, снижающих работоспособность вращающихся печей промышленности строительных материалов .....	274
<b>Хуртасенко А.В., Шрубченко И.В., Тимофеев С.П.</b> Метод определения параметров поверхностей крупногабаритных деталей опор технологических барабанов.....	279
<b>Цапков Ю.И., Маслова М.И., Должиков Д.С., Маслова И.В.</b> Возможность контроля формы крупногабаритных изделий с использованием бесконтактных методов измерений .....	283
<b>Шаталов А.В., Суслов В.И.</b> Исследование движения исполнительного звена в механической системе, зависящем от времени.....	288
<b>Шуманёва Е.К.</b> Методы повышения работоспособности электрооборудования.....	292
<b>Щетинин Н.А., Мурыгина Л.В.</b> Оптимизация конструктивных параметров бандажа вращающейся печи.....	297