К. т. н. **В. В. Зубов**, к. т. н. **Д. И. Симисинов**, к. т. н. **Н. В. Ахлюстина**, д. т. н. **М. Л. Хазин**, д. т. н. **С. Я. Давыдов** (🖂)

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, Россия

УДК 621.926

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ВСТРЕЧНОГО УДАРА

Рассмотрены основные геометрические параметры измельчителя встречного удара. Предложен алгоритм определения радиальных размеров ротора измельчителя. Представлены варианты возможного проектирования: без минимизации напора и с обеспечением минимального напора ротора-вентилятора. На основе проведенных исследований рекомендованы геометрические параметры ротора.

Ключевые слова: измельчитель встречного удара, скорость удара, ротор измельчителя.

Технологический процесс производства огнеупорных изделий подразумевает измельчение и смешивание компонентов огнеупорной смеси. Для этого после мелкого дробления кварцитов конусными дробилками применили измельчитель с ротором встречного удара. Продукт дробления, подаваемый в измельчитель, содержит 8,2–8,5 % гранул класса +25 мм и 40,5–52,7 % класса –10 мм. Конечный зерновой состав для получения огнеупорной смеси: 2,5–0,63 мм 40–45 %, 0,63–0,1 мм 15–20 %, <0,1 мм 40–45 % [1].

Одной из основных задач, возникающих при эксплуатации оборудования для подготовки сырья (измельчителей, смесителей и др.), является повышение долговечности интенсивно изнашивающихся рабочих элементов этих машин.

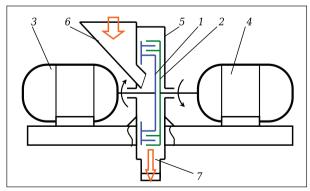
Проведенный сравнительный анализ измельчителей показал, что наилучшими для подготовки аналитических проб являются измельчители с ротором встречного удара (ИРВУ), превосходящие агрегаты других типов по производительности, надежности и ремонтопригодности при минимальных габаритных размерах и массе.

Устройства, в которых для измельчения используется встречный удар, по принципу действия близки к дезинтеграторам. Вопросы, связанные с аэродинамикой ротора измельчителя встречного удара, рассматривались ранее [2, 3].

На рис. 1 показана конструктивная схема ИРВУ, состоящая из двух вращающихся в разные стороны роторов 1 и 2, каждый из которых насажен на вал двигателей 3, 4 и закрыт корпусом 5 с загрузочной воронкой 6 и выпускным окном 7.

⊠ С. Я. Давыдов E-mail: davidovtrans@mail.ru Исходный материал в виде кусков загружается через воронку. Выгрузка готового продукта происходит через выпускное окно.

На рис. 2 показан рабочий орган ИРВУ, который содержит круглое основание 8 с равномерно распределенными по его краям и жестко закрепленными стойками 9, к которым прикреплен плоский диск 10 с центральным отверстием 11. Основание, стойки и плоский диск образуют рабочую камеру 12 с окнами 21. На поверхности плоского диска, обращенной к первому ротору (см. рис. 1), выполнен кольцевой выступ 13 с радиальными прорезями 14, которые формируют била ротора. Второй ротор 2 (см. рис. 1) представляет собой плоский диск 15. На поверхности плоского диска 15, обращенной к плоскому диску 10, выполнены кольцевые выступы 16 и 17 с радиальными прорезями 18 и 19, также формирующие била. Кольцевой выступ 16 размещен между стойками 9 и кольцевым выступом 13, а кольцевой выступ 13 — между кольцевыми выступами 16 и 17. К кольцевому выступу 17 прикреплены центробежные лопатки 20. окно 21.



**Рис. 1.** Конструктивная схема измельчителя ИРВУ: 1, 2 — ротор; 3, 4 — двигатель; 5 — корпус; 6 — загрузочная воронка; 7 — выпускное окно

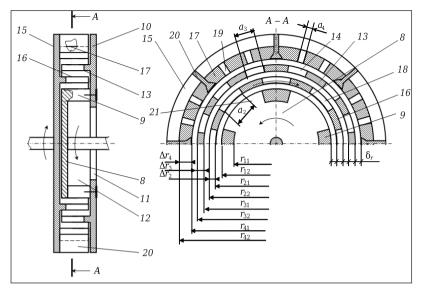
Роторы расположены так, что концентрические окружности с билами одного ротора размещаются внутри концентрических окружностей с билами другого ротора. Била 13, 16, 17 роторов могут иметь различное поперечное сечение (круг, прямоугольник, лопасть, многогранник) в зависимости от типа дробимого материала и конечной крупности. Била подвергаются наибольшему износу, поэтому их изготавливают из специальной стали и закрепляют на дисках разными способами. Удлинение срока службы бил достигается путем наплавки твердых сплавов. В условиях высокой интенсивности абразивного изнашивания деталей применяют футеровку, упрочнение или нанесение защитных покрытий. В случае высокой неравномерности износа упрочнение выполняется с переменным локальным эффектом: рабочую поверхность детали изготавливают или восстанавливают с переменной износостойкостью [4].

Била ИРВУ — участки кольцевых выступов — воздействуют на частицы материала плоскими поверхностями или ребрами. Стержни дезинтегратора имеют цилиндрическую форму. Вследствие этого наблюдаются различные виды разрушения. Как показано в работе [5], в роторе ИРВУ проявляются, кроме удара, раскалывание и срез, т. е. такие виды разрушения, которых в дезинтеграторе (в явном виде) быть не может.

Важным обстоятельством является строго выраженная линейная форма каналов в кольцевых выступах лабиринтного ротора, вследствие чего в ИРВУ более четко проявляется стадийность разрушения, чем в дезинтеграторе. Кинематика куска и частицы при прохождении каналов ИРВУ значительно лучше подчиняется математическому анализу.

На рис. З приведен алгоритм расчета ротора ИРВУ. Обязательным условием при определении размеров ротора является обеспечение скорости удара  $\nu_{yg}$ , необходимой для эффективного измельчения. При измельчении материалов в виде песка она уже на первой стадии переработки задает тонину продукта. Кусковые материалы, пройдя стадию резания, представляют собой осколки, испытывающие ударное воздействие на последующих стадиях.

На первой стадии измельчения сумма окружных скоростей, а следовательно, и  $\nu_{y_{\rm M}}$  меньше, чем на последующих стадиях, поэтому



**Рис. 2.** Рабочий орган ИРВУ:  $r_{11}$  — внутренний радиус первого кольцевого ряда;  $r_{21}$  — внешний радиус первого кольцевого ряда;  $r_{22}$  — внешний радиус второго кольцевого ряда;  $r_{22}$  — внешний радиус второго кольцевого ряда;  $r_{31}$  — внутренний радиус третьего кольцевого ряда;  $r_{32}$  — внешний радиус третьего кольцевого ряда;  $r_{32}$  — внешний радиус третьего кольцевого ряда;  $r_{42}$  — внешний радиус четвертого кольцевого ряда;  $r_{42}$  — внешний радиус четвертого кольцевого ряда;  $r_{42}$  — ширина канала между билами второго ряда;  $r_{43}$  — ширина канала между билами третьего ряда;  $r_{44}$  — ширина канала между билами четвертого ряда;  $r_{44}$  — толщина била второго ряда;  $r_{45}$  — толщина била третьего ряда;  $r_{45}$  — толщина била четвертого ряда;  $r_{45}$  — радиальный зазор между билами

именно она и является определяющей для всего рабочего процесса ИРВУ.

Для разрушения кусков достаточно минимальных величин  $v_{y_{\pi}}$  из диапазона, используемого в измельчающем устройстве ударного действия, — около 30 м/с. Однако для ударного разрушения песка, а также осколков, получившихся в результате резания крупных кусков на первой стадии, требуется кинетическая энергия, необходимая для разрушения материала с заданными механическими свойствами. Следует учитывать также, что увеличение скорости удара приводит к перераспределению гранулометрического состава пробы в сторону мелких фракций.

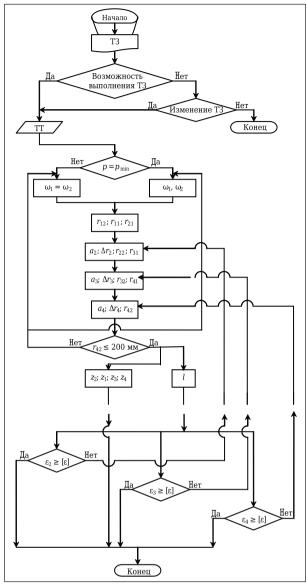
В настоящее время отсутствует конкретная информация о «привязке» значений скорости удара к тому или иному материалу. На основании анализа технической литературы и исследований авторов можно рекомендовать:

- для материалов категорий VI, V по шкале М. М. Протодьяконова (до класса 4 включительно по Moocy)  $v_{v\pi} = 35 \div 45$  м/с;
- для материалов с более высокой твердостью  $v_{vu} = 50 \div 70 \text{ м/c}.$

Частота вращения и размеры ротора определяются с учетом скорости удара. Для первой стадии измельчения

$$v_{yx} = u_{12} + u_{21} = \omega_1 r_{12} + \omega_2 r_{21}, \tag{1}$$

где  $u_{12}$ ,  $u_{21}$  — окружные скорости на внешнем радиусе решетки 1 и внутреннем радиусе решетки



**Рис. 3.** Алгоритм расчета конструкции ротора ИРВУ: p — полное давление;  $p_{\min}$  — минимальное давление;  $z_1, z_2, z_3, z_4$  — стойки активных элементов, где 1; 2; 3; 4 — номер ряда; l — рабочая длина элемента

2 соответственно;  $\omega_1 r_{12}$  — угловая скорость на внешнем радиусе первого кольцевого ряда;  $\omega_2 r_{21}$  — угловая скорость на внутреннем радиусе второго кольцевого ряда.

Рабочие органы ИРВУ, вращаясь с высокими угловыми скоростями, создают воздушный поток аналогично центробежному (радиальному) вентилятору (далее в тексте применительно к ротору ИРВУ используется термин роторвентилятор).

Возможны два варианта проектирования: без минимизации напора ротора-вентилятора, при этом угловые скорости дисков ротора:  $\omega_1 = \omega_2$  (вариант 1), и с обеспечением минимального напора ротора-вентилятора, при этом  $\omega_1 \neq \omega_2$  (вариант 2), в котором достигается равенство  $p = p_{\min}$  (см. рис. 3) [5].

**Вариант 1** означает, что угловые скорости дисков ротора:  $\omega_1 = \omega_2$ . Поскольку  $r_{12} \approx \approx r_{21}$ , то принимаем допущение, что  $u_{12} = u_{21}$  и, следовательно,

$$v_{\text{VII}} = 2\omega_1 r_{12}.\tag{2}$$

Во многих случаях целесообразно применять привод ИРВУ от наиболее широко распространенных асинхронных короткозамкнутых двигателей с посадкой дисков ротора ИРВУ непосредственно на валы двигателей, так как при этом отпадает необходимость в механических передачах.

Принимая во внимание, что диаметр ротора измельчителя не превышает 200 мм, можно рекомендовать двигатели с синхронной частотой вращения  $n_{\text{синхр}} = 3000$  об/мин, поэтому

$$\omega_1 = \frac{\pi n_{\text{MB}}}{30},\tag{3}$$

где  $n_{\text{дв}}$  — фактическая (асинхронная) частота вращения двигателя.

Из выражения (2) следует, что первый из конструктивных размеров ротора — радиус расположения внешних кромок (внешний радиус) стоек равен:

$$r_{12} = \frac{v_{y\pi}}{2\omega_1}.\tag{4}$$

Далее необходимо определить внутренний радиус стоек  $r_{11}$ . С точки зрения повышения производительности ИРВУ желательно принимать как можно меньшее значение данного размера, так как это приведет к повышению относительной скорости материала. В то же время равномерное распределение материала по окружности перед первой стадией измельчения наиболее качественно осуществляется при загрузке на плоскую, без каких-либо выступов поверхность диска 15 (см. рис. 2) [3]. Поэтому рекомендуется [3] принимать искомый радиус на 10 мм меньше, чем  $r_{12}$ :

$$r_{11} = r_{12} - 10. (5)$$

Внутренний радиус второго ряда элементов (кольцевого выступа *16*, см. рис. 2) равен:

$$r_{21} = r_{12} + \delta_r. ag{6}$$

Наличие гарантированного, достаточно большого радиального зазора  $\delta_r$  обязательно. Зазор компенсирует погрешности изготовления деталей и сборки ротора и способствует его самоочищению от продуктов измельчения. Вследствие этого рекомендуется принимать  $\delta_r = 0.5$  мм [3].

Ширину канала  $a_2$  между билами второго ряда следует принимать в соответствии с рекомендациями:

- для измельчения кускового материала  $a_2 = (1,00 \div 1,25) d_{\rm K}$ ;

- для измельчения песка

$$a_2 = 2d_{\mathbf{q}} \frac{r_{12}}{\sqrt{r_{12}^2 - r_{11}^2}},\tag{7}$$

где  $d_{\kappa}$  и  $d_{\tau}$  — приведенный диаметр куска и частицы измельчаемого материала соответственно.

Внешний радиус второго ряда бил

$$r_{22} = r_{21} + \Delta r_2, \tag{8}$$

где  $\Delta r_2$  — толщина била 2-го ряда.

Внутренний радиус третьего ряда бил кольцевого выступа 13 (см. рис. 2)

$$r_{31} = r_{22} + \delta_r. (9)$$

Ширину канала между билами третьего ряда  $a_3$  целесообразно принимать  $a_3=2\div 3$  мм, а толщину бил  $\Delta r_3=3\div 5$  мм. Изготовление бил меньшей толщины может быть связано с технологическими трудностями.

Внешний радиус третьего ряда и внутренний радиус четвертого ряда бил кольцевого выступа 17 (см. рис. 2) соответственно равны:

$$r_{32} = r_{31} + \Delta r_3,\tag{10}$$

$$r_{41} = r_{32} + \delta_r. {(11)}$$

Ширину канала между билами четвертого ряда  $a_4$  следует выполнить равной 1 мм для измельчения материалов по ГОСТ 32520 и равной 2 мм для измельчения материалов по ГОСТ 10742. Высота бил  $\Delta r_4 = 2 \div 4$  мм, бо́льшие значения — при  $r_{41}$ , близком к 200 мм (см. рис. 3). Внешний радиус четвертого ряда бил

$$r_{42} = r_{41} + \Delta r_4. \tag{12}$$

Во избежание завышения массогабаритных показателей проектируемого измельчителя следует обеспечить выполнение условия

$$r_{42} \le 200 \text{ mm}.$$
 (13)

В случае невыполнения условия (13) необходимо увеличить угловые скорости  $\omega_1$  и  $\omega_2$  с по-

## Библиографический список

- 1. **Давыдов, С. Я.** Вращающиеся печи предприятий строительных материалов: учебное пособие / С. Я. Давыдов, В. А. Пьячев, И. Д. Кащеев [и др.]. Екатеринбург: ГОЛУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. 352 с.
- 2. **Ахлюстина, Н. В.** Аэродинамика ротора измельчителя встречного удара / Н. В. Ахлюстина, В. В. Зубов // Фундаментальные исследования. 2014. № 8 (часть 6). С. 1279–1282.
- 3. **Ахлюстина, Н. В.** Управление воздушным потоком в каналах ротора измельчителя встречного удара / Н. В. Ахлюстина, В. В. Зубов // Горный журнал. 2015. № 3. С. 126–132.
- 4. *Симисинов, Д. И.* Упрочнение ножей смесителей интенсивного действия по кривым износа / Д. И. Симисинов, А. И. Афанасьев, В. Я. Потапов // Новые огнеупоры. 2015. № 9. С. 8–10.

следующей корректировкой радиусов кольцевых выступов. Данная операция не всегда связана с изменением типа двигателя. Серийные асинхронные двигатели типов 4A, АИР, 5A способны эксплуатироваться с частотой питающего напряжения 60 Гц. Переход с 50 Гц на 60 Гц позволит повысить угловую скорость в 1,2 раза.

Расчет радиусов части ротора по варианту 1 следует считать законченным при выполнении условия

$$\varepsilon_k \le [\varepsilon],$$
(14)

где k=2;3;4 — номер ряда;  $\varepsilon_k$  — деформация била k-го ряда,  $[\varepsilon]=0,1\delta_r$  — допускаемая деформация.

По варианту 2 для нахождения угловых скоростей дисков ротора необходимо принять скорость удара, а затем предварительно задаться радиусом  $r_{12}$ . На основании анализа результатов эксперимента [5] можно сформулировать следующие рекомендации:

Диапазон скоростей удара, м/с.. 30–44 45–58 59–72 Радиус  $r_{12}$ , мм...... 55–65 66–75 76–85

Далее следует рассчитать геометрические параметры конструкции ротора по формулам (4)–(14) и определить угловые скорости, обеспечивающие режим минимального напора роторавентилятора:

$$\omega_{1} = \frac{v_{y\pi}(2r_{42}^{2} + r_{22}^{2} - r_{12}^{2} - r_{32}^{2})}{2r_{12}r_{42}^{2}};$$

$$\omega_2 = \frac{\nu_{\text{ym}}}{r_{12}} - \omega_1.$$

На основе теоретических расчетов и экспериментальных данных предложен алгоритм определения радиальных размеров ротора измельчителя встречного удара для двух вариантов конструкции: без минимизации напора и с обеспечением минимального напора роторавентилятора.

**Simisinov, D. I.** Strengthening the blades of a high-speed mixer on the basis of wear curves / D. I. Simisinov, A. I. Afanas'ev, V. Ya. Potapov // Refract. Ind. Ceram.— 2016. — Vol. 56,  $\mathbb{N}$  5. — P. 453–455. DOI: 10.1007/s11148-016-9867-z.

5. **Ахлюстина, Н. В.** Физические процессы при ударном разрушении материалов в измельчителе с ротором встречного вращения / Н. В. Ахлюстина, В. М. Таугер // Известия вузов. Горный журнал. — 2007. — № 3. — С. 113–117. ■

Получено 19.05.17 © В. В. Зубов, Д. И. Симисинов, Н. В. Ахлюстина, М. Л. Хазин, С. Я. Давыдов, 2017 г.