

газоочытки (Р.Ч. № 25064) доменной печи № 2 Череповецкого металлургического завода с применением вихревых труб. Предусмотрено использование для заводских нужд обоих газовых потоков и утилизаций уловленной пыли.

УДК 541.127.:627.928.6

А.И.Карелин, А.Я.Сваровский, Е.И.Щипицин

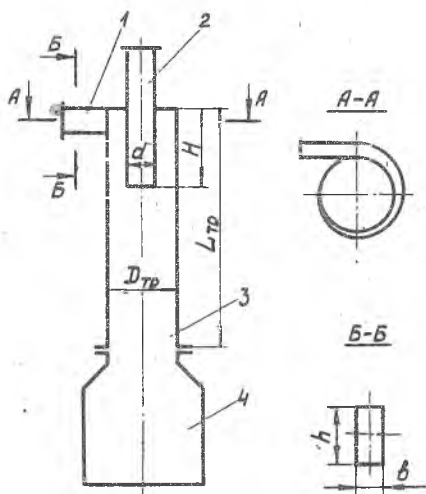
### ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ ДЛЯ ОТДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ИЗ СЛАБОЗАПЫЛЕННЫХ ПОТОКОВ

В технологии получения окислов редкоземельных элементов (РЗЭ) из нитратных растворов находят применение плазмохимические реакторы (ПХР) с высокочастотным индукционным или дуговым плазмотронами, в которых происходят нагрев, испарение капель распыленного раствора и термическое разложение соли в потоке высокотемпературного теплоносителя. Одной из проблем этого эффективного процесса является выделение и сбор получаемой твердой фазы окислов РЗЭ из пылепарогазовых потоков с температурой  $T = 700-800\text{K}$  после ПХР. В условиях плазмохимической денитрации растворов в пылепарогазовой смеси, отходящей от ПХР при температуре до  $800\text{K}$ , содержится от 0,3 до 1,5 окислов РЗЭ на  $1\text{ м}^3$  газовой смеси с размерами частиц до 2 мкм. Такие условия значительно затрудняют выделение и сбор кондиционных окислов.

Отсутствие надежного аппарата для этих целей привело к исследованию на модели и испытаниям ВТ в плазмохимической установке для денитрации растворов РЗЭ. Конструкция трубы, отличающаяся от ВТ Ранка отсутствием дросселя и заменой диафрагмы на выхлопной патрубок, представлена на рис. 1. ВТ состоит из цилиндрического корпуса 3 с выполненным по спирали Архимеда тангенциальным сопловым вводом 1 прямоугольного сечения, выхлопной трубы 2 для отвода очищенного газа и контейнера 4 для сбора твердого порошкообразного продукта. ВТ имеет следующие соотношения основных размеров:

$$\bar{F}_c = \frac{S_{\text{вх}}}{S_{\text{мп}}} = 0,085 ; \quad \bar{d}_m = \frac{d_m}{D_{\text{мп}}} = 0,416 ;$$

$$H/D_{\text{мп}} = 1,1 ; \quad L_{\text{мп}} = 4,2 D_{\text{мп}} .$$



Р и с. 1. Схема вихревой трубы

На модельной установке с ВТ проводились опыты по улавливанию из потока частиц  $Mg$ ,  $ZnO$ ,  $CaF_2$ , РЗЭ при объемном расходе газа 20-50 м<sup>3</sup>/с, размерах частиц до 5 мкм и концентрациях пыли в газе от 1 до 2 г/м<sup>3</sup>. Полученные степени улавливания достаточно высоки - до 95%.

Эти данные дали возможность провести моделирование по теории приближенного подобия для процесса отделения окислов РЗЭ, получаемых в ПХР. Известно, что в геометрически подобных аппаратах

движение запыленного газа характеризуется критериями  $St$ ,  $Fr$ ,  $Re$ . В рассматриваемом процессе, где газовый поток слабо запылен, сила тяжести незначительна по сравнению с силами инерции при обтекании газовым потоком частиц с числами  $Re$  в автомоделной области и ее можно пренебречь [2]. В этом случае движение пылегазовой смеси определяется только критерием Стокса:

$$St = \frac{\delta^2 \nu (\rho_4 - \rho_2)}{\mu L} \quad (I)$$

$$\text{или } \frac{K_\delta^2 K_\nu K_{(\rho_4 - \rho_2)}}{K_\mu K_L} = 1,$$

где  $K$  - множитель преобразования величин, входящих в формулу (I).

Так как на модели и натуре некоторые величины известны - расходы пылегазовых потоков, плотности газа и частиц, температура потока, вязкость газа, то их множители преобразования являются величинами известными и фиксированными:

$$K_\mu = \frac{\mu_M}{\mu_N}; \quad K_{(\rho_4 - \rho_2)} = \frac{(\rho_4 - \rho_2)_M}{(\rho_4 - \rho_2)_N};$$

$$K_\delta = \frac{\delta_M}{\delta_N} = 1 \quad \text{при равенстве частиц модели и натуре.}$$

Для уточнения длины ВТ проводились расчеты траекторий движения частиц, радиальных и тангенциальных скоростей ее на траектории по уравнениям:

$$r = r_1 \sqrt{1 + \frac{\varphi^0}{57,3} \frac{2\omega_1}{Ar_1}}; \quad (3)$$

$$U_r = \frac{\omega_1^2}{A} \frac{r_1^2}{r^3}; \quad (4)$$

$$U_\varphi = \omega_1 \frac{r_1}{r}; \quad (5)$$

$$A = \frac{3}{4} \xi \frac{\rho_2}{\rho_4} \frac{\nu}{\delta^2} f.$$

При модельных испытаниях использовался воздух с  $T = 293\text{K}$ ,  $\rho_{2M} = 1,29\text{кг/м}^3$ ,  $\mu_M = 18,2 \cdot 10^{-6}$  н с/м<sup>2</sup>, интенсивность закрутки вихревого потока в трубе  $\Phi = 4,75$ . Процесс получения окислов РЭЭ характеризовался следующими параметрами: расход пылепарогазовой смеси  $156\text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $T = 800\text{K}$  после ПХР,  $\mu_H = 33,8 \cdot 10^{-6}$  н с/м<sup>2</sup>,  $\rho_{2H} = 0,344\text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{4H} = 5,7 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$ . Проведенные расчеты для отделения частиц окислов РЭЭ (в сравнении с частицами  $\text{CaF}_2$  до 5 мкм) определили множитель преобразования линейных размеров  $K_L = 0,406$ . Размеры ВТ для плазмохимической установки производительностью 15–20 л/ч раствора следующие:  $D_{mp} = 45\text{ мм}$ ,  $d_m = 20\text{ мм}$ ,  $H = 50\text{ мм}$ ,  $L_{mp} = 190\text{ мм}$ ,  $S_{6x} = 112,5\text{ мм}^2$ .

Расчеты, проведенные по уравнениям (3)–(5), показали, что уже в конце первого витка частица окислов сепарируется на стенку трубы. Значительное уменьшение радиальной скорости частицы  $U_r$  (примерно в 5–6 раз) говорит о том, что твердая частица быстро вовлекается газовым потоком в вихревое движение. Тангенциальная скорость частицы  $U_\varphi$  уменьшается медленнее и более равномерно.

Определяющими факторами метода отделения твердой фазы ВТ являются центробежный эффект и поперечная миграция частиц под действием градиента пульсационной скорости в турбулентном потоке при большой интенсивности закрутки [1]. Так, примененный нами метод лазерного зондирования закрученного потока в трубе при холодной продувке позволил получить качественную картину распределения концентрации частиц, которая в пристеночной зоне вихревого потока на радиусах от  $\bar{r} = 0,7$  до  $\bar{r} = 1$  имела максимальное значение, а частота пульсации концентрации составляла около 10 Гц. Кривые рас-

пределения температуры  $T$  и давления  $p$  по радиусу для различных сечений (1, 2, 3 калибра) при  $\mu = 1$  вполне согласуются с аналогичными кривыми для обычной ВТ с дросселем [3].

Испытания ВТ проводились при пониженных давлениях за счет прокачки всей схемы плазмохимической и модельной установок вакуумным насосом. Результаты испытаний ВТ на плазмохимической установке при переработке нитратных растворов РЗЭ с концентрацией азотной кислоты 18,9 г/л и окислов РЗЭ 19,39 г/л показали достаточно высокую степень отделения твердой фазы: на одной вихревой трубе - 90-93%, на двух при последовательной установке - до 97%. Эти величины хорошо согласуются с результатами моделирования.

Состав окислов РЗЭ:  $La_2O_3$  - 23-25%,  $CeO_2$  - 50-55%,  $Pr_6O_{11}$  - 6-9%,  $Nd_2O_3$  - 13-16%,  $\Sigma Sm, Eu$  - 1-2%, остальное - примеси. Температура пылепарогазовой смеси на входе в ВТ составляла 720-770К, гидравлическое сопротивление трубы 20-30 кн/м<sup>2</sup>.

#### Л и т е р а т у р а

1. М е д н и к о в Е.П. Миграционная теория осаждения аэрозольных частиц из турбулентных потоков на стенках труб и каналов. - ДАН т. 206, 1972, № 1.
2. З в е р е в Н.И. Моделирование движения полидисперсной пыли. - Теплоэнергетика, 1957, № 7.
3. М е р к у л о в А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969.

УДК 532.527.000.14

М.В.Юцкевич

#### К ВОПРОСУ РАБОТЫ ВИХРЕВЫХ ТРУБ НА ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

Вихревые трубы находят применение в качестве генератора холода в системах индивидуальной противотепловой защиты [1, 2]. Весьма перспективным следует считать использование ВТ для таких целей в глубоких угольных шахтах, когда средствами общешахтного