

концевых уплотнений паровой турбины (Лучанский сахарный завод) [3], пара из расширителей непрерывной продувки котлов (Мионовский сахарный завод), подогревателей высокого давления, дренажей высокого давления. Предложена конструкция аккумулятора пара с ВЭ [4], имеющего повышенную аккумулирующую способность.

#### Библиографический список

1. Ильин А.В. Результаты экспериментального исследования вихревого эжектора для сжатия водяных паров // Вихревой эффект и его применение в технике: Мат-лы IV Всесоюз. научн.-техн. конф. / Куйбышев. авиац. ин-т им. С.П. Королева. - Куйбышев: КуАИ, 1984. С. 146-153.

2. А.с. 1333866 (СССР). Вихревой эжектор / Б.С. Маргулис, А.В. Ильин, Б.М. Маргулис и др. - Опубл. в Б.И., 1987, № 32.

3. Адаменко В.П., Хоменко В.П., Маргулис Б.С. и др. Использование низкопотенциальных паров // Сахарная промышленность. - 1987. - № 7. - 38 с.

4. А.с. 1333994 (СССР). Аккумулятор тепла / Б.С. Маргулис, А.В. Ильин, Б.М. Маргулис. - Опубл. в Б.И., 1987, № 32.

УДК 66.023:66.094.402:532.527

А.И. Карелин, А.Я. Сваровский

#### ВИХРЕВОЙ РЕАКТОР ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ФТОРИРОВАНИЯ ОКСИДОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Масштабы применения фторидов редкоземельных элементов (РЗЭ) в производстве катализаторов, люминофоров, оптических стекол для сплавов металлов и в других областях новой техники предъявляют серьезные требования к инженерному оформлению процессов их производства и требуют разработки эффективной, надежной, легко автоматизированной аппаратуры.

Вихревой реактор представляет интерес для практики конструирования аппаратов-фтораторов, отличающихся простотой конструктивного исполнения, высокими производительностью и технологическими показателями. Тангенциальный подвод фтора в таком вихревом реакторе позволяет изменять параметры закрутки потока  $\phi$  и за счет этого

значительно интенсифицировать процессы тепло- и массообмена в отличие от реакторов с прямоточными струями факельного типа.

При разработке вихревого реактора с небольшими расходами фтора для количественной оценки влияния закрутки потока на организацию процесса фторирования проводились численные исследования на модели процесса и экспериментальные работы с использованием лазерных методов зондирования для изучения структуры двухфазного вихревого потока. Проведенные зондовые измерения давлений в присосевой области вихревого потока модельного аппарата для фторирования оксидов РЗЭ диаметром  $4,8 \cdot 10^{-2}$  м при расходе газа  $1,4 \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>/с на расстоянии от одного до 10 калибров от устья сопла, параметре  $\phi = 5,2$  и различных степенях сжатия газа  $\bar{K}$  определили зону с наибольшим разрежением в трубе. При  $\bar{K} = 5,98$  разрежение достигало до 5 кПа в сечениях трубы, находящихся на расстоянии 4-5 калибров от сопла. Зона пониженного давления сохранялась на этом участке трубы и для  $\bar{K} = 5,87$ , а при  $\bar{K} = 5,16 \dots 5,55$  в сечениях на 1-4 калибрах наблюдались пульсации давлений величиной до 1 кПа.

Такие испытания модельного аппарата с диффузором, коническим дросселем на конце вихревой трубы и выявление зоны пониженного давления в трубе при  $\bar{K} = 5,16 \dots 5,98$  показали возможность использования этой зоны в конструкции узла загрузки реактора для транспортировки диспергированных частиц оксидов РЗЭ в реакционную (вихревую) трубу при изменении давлений в технологической схеме производства.

Применение метода лазерного зондирования [1] позволило получить качественную картину распределения концентраций твердой фазы в вихревом потоке при  $\phi = 15,5$  в сопловом сечении трубы. Измерения проводились на 10-м калибре сечения потока и в отдельных точках потока. Так в пристеночной зоне вихревого потока на радиусах с  $\bar{r} = 0,6$  до  $\bar{r} = 1,0$  концентрация частиц значительно выше, чем в присосевой зоне; на радиусе  $\bar{r} = 0,2$  концентрация частиц меньше, чем по оси вихревой трубы и на  $\bar{r} = 0,4 \dots 0,6$  близка к концентрации осевого потока. Измерение концентраций частиц в отдельных точках сечения вихревого потока показало, что в осевой зоне на радиусах до  $\bar{r} = 0,8$  имеется рециркулирующее движение обратных токов газа и концентрация частиц значительно изменяется на одном и том же радиусе. Зона обратных токов до  $\bar{r} = 0,2$  носит устойчивый характер и концентрация частиц здесь более стабильна, а начиная с  $\bar{r} = 0,2$  до  $\bar{r} = 0,8$  поток неустойчивый. Такое рециркулирующее движение

газа с частицами за счет разрежения в осевой зоне вихревого потока может являться дополнительным источником тепла для воспламенения поступающих вновь частиц оксидов РЗЭ в вихревой реактор.

Используя метод лазерного доплеровского измерения скоростей (ЛДИС) [2], измерялись тангенциальные  $\omega_{\tau}$  и осевые  $\omega_z$  локальные скорости частиц в вихревом потоке модельного аппарата на  $\bar{r} = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$  при  $\phi = 15,5$  и расходах газа  $Q = 2,6 \pm 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . По величинам  $\omega_{\tau}$  в сечениях от соплового ввода на 7, 9, 18 и 26 калибрах, изменяющихся по кривой с максимумом, определены следующие области течений: изменение величины  $\omega_{\tau}$  у поверхности трубы близко к потенциальному вращению, а начиная с  $\bar{r} = 0,5 \dots 0,75$ , происходит перестройка  $\omega_{\tau}$  по закону вращения твердого тела. По мере затухания закрутки на 18, 26-м калибрах изменение  $\omega_{\tau}$  частиц ближе к закону потенциального вращения вплоть до вырождения закрутки. Из анализа составляющих скоростей частиц  $\omega_{\tau}$  и  $\omega_z$  закрученный двухфазный поток представляет сложное течение с зоной рециркуляции. В пристеночной области течение происходит с отрицательным градиентом  $\omega_z$ , а у оси - с положительным. По мере затухания закрутки зона обратных токов и отсос газа с частицами прекращается. Закрученный двухфазный поток при  $Q = 2,6 \dots 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  сохраняет структуру в пределах до 30 калибров, а далее приобретает характер стабилизированного осевого течения в трубе. При расходе газа до  $1,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$  закрутка потока сохраняется до 50-60 калибров.

Полученные данные по распределению скоростей  $\omega_{\tau}$  и  $\omega_z$  частиц близки к результатам работы [3] и хорошо согласуются с распределением максимальных концентраций частиц твердой фазы по сечению вихревого потока.

Определение характера течений вихревого потока в трубе до сечения с вырождением закрутки позволяет уточнить размеры реакционной зоны (трубы) вихревого реактора, а также для расчетов теплового режима и выгорания частиц выявить область прямого тока вихревого потока с максимальной концентрацией частиц оксидов РЗЭ.

Предложенная модель процесса фторирования [4] состоит из уравнений движения частиц и газа, горения частиц, теплообмена между частицей и газом. Численное исследование задачи с допущениями в рамках модели сплошной среды позволило определить изменение температуры частиц  $T_k$  и газа  $T_r$ , выгорание частиц  $\delta/\delta_0$  и скорость частиц  $\omega_{\tau}$  при фторировании в вихревых потоках. Расчеты проводи-

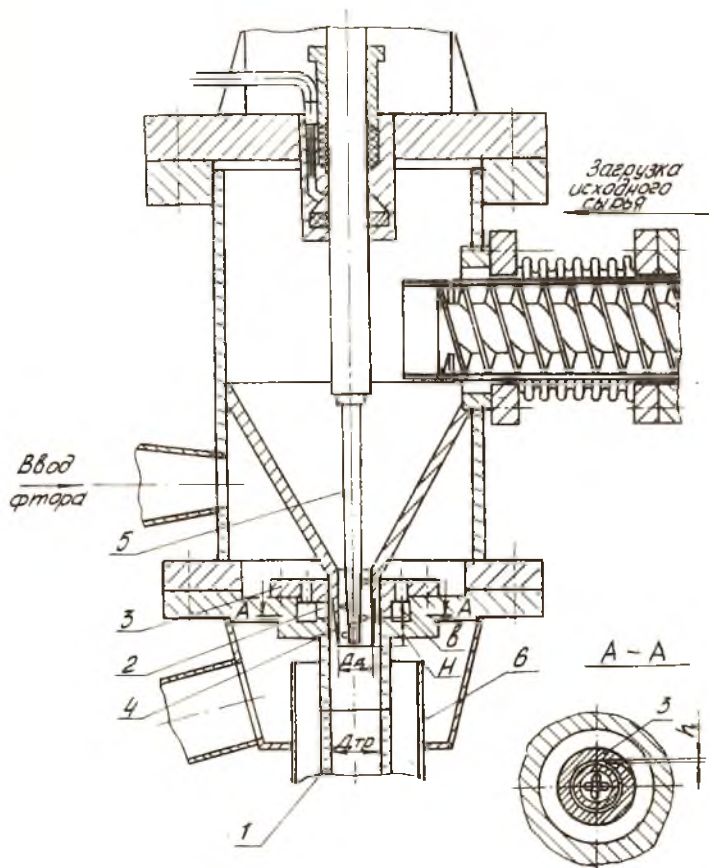
лись при тангенциальном подводе фтора с критической скоростью на срезе сопла и движении его по закону потенциального вращения, при этом твердые частицы оксидов инжектируются через отверстие диафрагмы в верхней части трубы, сепарируются на стенку и сгорают, двигаясь вдоль нее с постоянным радиусом. Образующаяся зона обратного тока по оси вихревой трубы в расчетах не учитывалась, задача решалась в области прямого тока, начиная с радиуса  $\tilde{r} = 0,7$  сечения трубы до  $\tilde{r} = 1,0$ .

Результаты расчетов на ЭВМ показали, что развитие процесса воспламенения и горения частиц оксидов РЗЭ по времени разделяется на стадии прогрева частиц, квазистационарного разогрева смеси и диффузионного режима горения. Так частицы радиусом  $\delta_0 = 5 \cdot 10^{-6}$  м воспламеняются при  $T_K = 513$  К,  $T_G = 433$  К через 0,9 с и сгорают при  $T_K = 653$  К,  $T_G = 453$  К через 0,4 с. Частицы с  $\delta_0 = 0,1 \cdot 10^{-4}$  м воспламеняются при  $T_K = 528$  К,  $T_G = 433$  К через 1,2 с и сгорают при тех же температурах через 0,5 с.

Скорость частиц  $\omega_T$  достигает 300 м/с через 0,2...0,3 с, крупные частицы разгоняются более медленно и соответственно позднее достигают величины скорости газового потока, но начало воспламенения для всех частиц происходит при движении их по стенке трубы с максимальными скоростями.

Частицы оксидов РЗЭ в кинетическом режиме практически не выгорают ( $\delta/\delta_0 = 1$ ), основное их выгорание происходит в диффузионном режиме, хотя на кинетический режим приходится 60-70 % всего времени фторирования. Так как задача решалась только в области прямого тока вихревого потока без учета обратного тока рециркуляции, можно предположить, что время фторирования оксидов будет несколько меньше расчетного. Об этом свидетельствует и полученное значение температуры воспламенения  $T_K = 513...528$  К, практически соответствующее температуре выхода реактора на стационарный тепловой режим при фторировании оксидов РЗЭ. Проведенные расчеты форсированных режимов фторирования в вихревом потоке и результаты экспериментов по структуре двухфазных потоков привели к конструктивным решениям узлов реактора и определенным соотношениям их размеров.

Реактор (рис.) выполнен в виде цилиндрической трубы I (реакционной зоны) диаметром  $D_{TR}$ , снабженной в верхней части тангенциальным соплом 2 размером  $\delta \times h$  и улиткой 3, диафрагмой 4 с осевым отверстием  $\varnothing_p$ . Во избежание перетока фтора в узел загрузки реактора нижний конец диафрагмы смещен от тангенциального сопла



Р и с. Вихревой реактор: 1 - реакционная зона; 2 - сопло тангенциальное; 3 - улитка; 4 - диафрагма; 5 - диспергатор; 6 - рубашка охлаждения

в трубе на расстояние  $H$ . Реактор оснащался контейнером со шнековым питателем и вращающимся диспергатором 5, узлом выгрузки отходов, рубашкой охлаждения 6.

Относительные соотношения размеров вихревого аппарата:

диаметр отверстия диафрагмы  $\bar{d}_{no} = D_{no}/D_{TP} = 0,625$ ;

площадь проходного сечения сопла  $F_c = S_c/S_{TP} = 0,016$ ;

размеры сопла (длина, ширина)  $b \times h = 7,5$ ;

длина реакционной зоны  $L_{\text{тр}} = 60 D_{\text{тр}}$  ;  
смещение низа диафрагмы относительно сопла  $H/D_{\text{тр}} = 0,5$ .

Такой реактор с вихревой реакционной зоной диаметром  $D_{\text{тр}} = 4,8 \cdot 10^{-2}$  м испытывался при фторировании смеси оксидов РЗЭ при расходах фтора 35...40  $\text{м}^3/\text{ч}$ . Состав смеси оксидов РЗЭ следующий:  $\text{La}_2\text{O}_3$  - 23...25;  $\text{CeO}_2$  - 50...55;  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  - 6...9;  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  - 13...16%, сумма оксидов остальных РЗЭ составляет 1-2 %, доля примесей (сульфатов кальция, железа и окиси кремния) - 1+3 %. Получены кондиционные фториды, степень превращения по сумме фторидов РЗЭ составляла 99,3 %.

Вихревой реактор легко выводится на стационарный режим, прост в управлении, экономичен в использовании фтора. Полученные данные могут использоваться в практических расчетах и конструировании оборудования.

#### Библиографический список

1. Архипов В.А., Ротанов Г.С. Исследование структуры гетерогенных потоков по данным рассеяния света //Тр.НИИ прикладной механики и математики.-Томск: Изд-во Томского госуниверситета, 1973. Вып. 2. С.3-8.
2. Ринкевичус Б.С. Допплеровский метод измерения локальных скоростей с помощью лазеров//Успехи физических наук, 1973. Т.3. Вып.2. С.305-330.
3. Халатов А.А., Щукин В.К., Летагин В.Г. Локальные и интегральные параметры закрученного течения в длинной трубе//ИФЖ, 1977. Т. XXXIII. № 2. С.224-232.
4. Карелин А.И., Колмаков А.Д., Сваровский А.Я., Зурер А.Б., Соловьев А.И. Исследование процесса фторирования оксидов РЗЭ в вихревых потоках //Торение конденсированных систем. Черногловка: Ин-т химической физики АН СССР, 1977. С.111-113.

УДК 532.517.4+536.24

А.А.Халатов, И.М.Загуменнов

#### ГИДРОДИНАМИКА И ТРЕНИЕ НА ТОРЦЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЫ

Вихревые камеры широко используются в сепарационных и диспергирующих устройствах, камерах сгорания, эжекторах, различной тепло-