

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ТВЕРДОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ВЫПАРИВАНИИ ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Запорожская государственная инженерная академия

Наведено результати теоретичного аналізу впливу основних гідродинамічних параметрів на процес випаровування високомінералізованих стічних вод в апаратах з проміжним твердим теплоносієм.

Представлены результаты теоретического анализа влияния основных гидродинамических параметров на процесс выпаривания высокоминерализованных сточных вод в аппаратах с промежуточным твердым теплоносителем.

Введение. Одними из основных и достаточно распространенных загрязнителей окружающей природной среды являются так называемые высокоминерализованные сточные воды (ВМСВ) металлургической, химической, энергетической и ряда других отраслей промышленности, содержащие соли кальция, натрия, магния и др.

Основными источниками образования ВМСВ служат водоподготовительные установки (основные компоненты в составе стоков, %: $NaCl$ – 71,2...84,2; $CaCl_2$ – 5,3...23,8; $MgCl_2$ – 3,1...9,4); парогенераторы (продувочные воды, загрязнены такими солевыми компонентами как Na_2SO_4 , $NaCl$, Na_2CO_3 , $NaOH$, Na_2SiO_3 , Na_3PO_4); тра-вильные отделения (в промывных водах после травления и обезжиривания присутствуют хорошо растворимые соли $CaCl_2$, $Ca(NO_3)_2$, Na_2SO_4 , $NaCl$, $NaNO_3$). Кроме того, минеральные загрязнения поступают в сточные воды при контакте жидкости с различными продуктами, содержащими соли в твердом состоянии либо в растворе (например, при очистке различных газов) [1].

Несмотря на широкое внедрение оборотного водоснабжения и новых малоот-ходных технологий объем загрязненных сточных вод остается значительным. Поэтому важной проблемой остается очистка жидких отходов от минеральных загрязнений.

Анализ достижений. Большое разнообразие солевого состава сточных вод, различие в мощности и целевом назначении обезвреживающих установок не позволяют выбрать какой-либо один универсальный метод очистки, который можно было бы применить с максимальной экономической эффективностью практически в любых условиях.

До недавнего времени термическое обессоливание полагали бесперспективным направлением научных исследований из-за его энергоемкости. Однако простота эксплуатации выпарных установок при условии использования теплоты отходящих газов, например теплоэлектростанций, АЭС и металлургических агрегатов, обусловила совершенствование и удешевление указанного способа. При этом данный метод менее чувствителен к составу минерализованных сточных вод, достаточно экономичен, а также является наиболее распространенным и применяемым методом обессоливания во всех странах мира [2].

В предыдущих работах авторов [3,4] предложена принципиальная схема выпарной установки по обезвреживанию ВМСВ, в которой промежуточный твердый теплоноситель состоит из металлических шаров, размещенных в нагревательной камере

© Кутузова И.А., Беренда Н.В., 2012

на решетке. Горячий газ, который непрерывно подводят в выпарную камеру, проходит через слой зернистого промежуточного теплоносителя и нагревает его. Подачу ВМСВ осуществляют импульсами, в результате чего часть воды испаряется, а остальная часть возвращается в циркуляционную емкость. За счет циклического орошения постоянно нагретого промежуточного твердого теплоносителя обеспечивается повышение надежности и эффективности обезвреживания высокоминерализованных сточных вод.

Постановка задачи. Одной из основных эксплуатационных характеристик выпарных аппаратов с промежуточным твердым теплоносителем является гидравлическое сопротивление, которое по мере нарастания слоя солей на шаровой насадке увеличивается и может достигать критических значений, когда дальнейшая эксплуатация становится невыгодной из-за больших энергетических затрат на преодоление данного сопротивления. Поэтому важно исследовать, от каких параметров зависит гидравлическое сопротивление аппарата при выпаривании ВМСВ на промежуточном твердом теплоносителе.

Основная часть. Гидродинамическое сопротивление вышеуказанных аппаратов описывается аналогично гидравлическому сопротивлению монодисперсного зернистого слоя сферических элементов. Известно несколько зависимостей для определения гидравлического сопротивления такого слоя.

Гидравлическое сопротивление несмоченного (сухого) слоя насадки рассчитывают по формуле:

$$\Delta h_{\text{сyx}} = \Delta h_{\text{mp}} + \Delta h_{\text{м}}, \quad (1)$$

где $\Delta h_{\text{сyx}}$ – общие потери напора газа при движении через насадку; Δh_{mp} , $\Delta h_{\text{м}}$ – потери напора газа, обусловленные соответственно трением и гидродинамическими или местными сопротивлениями.

Потери напора газа, обусловленные трением потока о поверхность насадки на 1 м высоты слоя насадки, можно записать как

$$\frac{\Delta h_{\text{mp}}}{L} = \frac{2 \zeta_{\text{m}} \cdot \rho \cdot \bar{w}^2}{g \cdot d_{\text{э}}}, \quad (2)$$

где L – высота слоя насадки; ζ_{mp} – коэффициент трения; ρ – плотность газа; \bar{w} – средняя скорость движения газа; g – ускорение силы тяжести; $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр элементов насадки.

Определение действительной средней скорости газа в выпарном аппарате затруднительно, так как вследствие извилистости каналов неизвестна их длина. Среднюю скорость движения газа \bar{w} можно выразить через его скорость при полном сечении пустого аппарата \bar{w}_0 :

$$\bar{w} = \frac{\bar{w}_0}{F_A}, \quad (3)$$

где \bar{F}_A – среднее живое сечение насадки – величина, численно равная свободному объему.

Тогда

$$\frac{\Delta h_{mp}}{L} = \frac{2 \zeta_{mp} \cdot \rho \cdot \bar{w}_0^2}{g \cdot d_3 \cdot F_A^2} . \quad (4)$$

Потери напора газа за счет местных сопротивлений определяются процессами, обусловленными сжатием и расширением газовой струи при движении по каналам переменного сечения:

$$\Delta h_m = \Delta h_{сж} + \Delta h_{расш} , \quad (5)$$

где $\Delta h_{сж}$, $\Delta h_{расш}$ – потери напора, обусловленные сжатием и расширением газовой струи соответственно.

Движение газового потока по каналу переменного сечения можно условно представить как движение через серию последовательно включенных диафрагм.

Тогда

$$\Delta h_{сж} = \frac{A \cdot \rho \cdot w_2^2}{2g} , \quad (6)$$

где A – коэффициент, зависящий от степени сжатия канала, то есть от отношения площадей живого сечения до и после сжатия; w_2 – скорость газа в суженном сечении канала насадки.

Согласно уравнению неразрывности струи

$$w_2 = \frac{F_1 \cdot w_1}{F_2} , \quad (7)$$

где F_1 , F_2 – площадь сечения канала насадки до и после его сужения соответственно; w_1 – скорость газа в сечении канала насадки до его сужения.

Тогда уравнение (6) преобразуется к виду

$$\Delta h_{сж} = \frac{A \cdot \rho \cdot w_1^2}{2g} \cdot \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 . \quad (8)$$

Потери, связанные с расширением газовой струи, можно записать как

$$\Delta h_{расш} = \frac{\rho \cdot w_1^2}{2g} \cdot \left(\frac{F_1}{F_2} - 1 \right)^2 . \quad (9)$$

Обозначив количество расширений и сжатий газовой струи при движении в каналах насадки на 1 м высоты слоя через $1/n$, где n – количество расширений и сжатий газовой струи, и выполняя преобразования выражений (8) и (9) с учетом скорости газа \bar{w}_0 , получаем уравнение для определения потерь напора газа за счет местных сопротивлений на 1 м высоты насадки:

$$\frac{\Delta h_m}{L} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\rho \cdot \bar{w}_0^2}{2g \cdot F_1^2} \cdot \left[A \cdot \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 + \left(\frac{F_1}{F_2} - 1 \right)^2 \right] . \quad (10)$$

С учетом того, что среднее живое сечение насадки составляет $\overline{F}_A = 0,5(F_1 + F_2)$, общие потери напора газа при движении через насадку на 1 м высоты слоя можно записать как

$$\Delta h_{\text{сyx}} = \frac{2\rho \cdot \overline{w}_0^2}{g \cdot d_s \cdot \overline{F}_A^2} \cdot (\zeta_m + \zeta'_m) = \frac{2\rho \cdot \overline{w}_0^2 \cdot \zeta'}{g \cdot d_s \cdot \overline{F}_A^2}, \quad (11)$$

где \overline{F}_A – среднее живое сечение насадки; ζ_m – безразмерный коэффициент местных сопротивлений, обусловленных сжатием и расширением газового потока при движении в насадке; ζ' – общий коэффициент сопротивления насадки.

При практических расчетах используют формулу для определения удельных потерь давления на сухой насадке, Па/м [5]:

$$\frac{\Delta p_{\text{сyx}}}{L} = \frac{\zeta' \cdot \overline{w}_0^2 \cdot \rho \cdot a}{8\varepsilon^2}, \quad (12)$$

где a – удельная поверхность зернистого слоя; ε – порозность зернистого слоя.

Сопротивление смоченной насадки в точке инверсии определяется соотношением, Па:

$$\Delta p = \Delta p \cdot (1 + f'), \quad (13)$$

где f' – безразмерный коэффициент, определяемый из условий эксперимента.

Из зависимости (13) видно, что гидравлическое сопротивление смоченной насадки превосходит сопротивление сухой насадки. Исследованиями [6] подтверждено, что гидравлическое сопротивление промежуточного твердого теплоносителя выпарных аппаратов зависит не только от характеристик первичного теплоносителя и выпариваемого раствора, но и от параметров загрузки: порозности, удельной поверхности и среднего линейного размера элементов. Поэтому при исследовании процесса выпаривания первоочередной задачей является определение указанных параметров насадки выпарного аппарата.

Значение порозности зернистого слоя зависит от формы элементов, состояния их поверхности и характера упаковки в слое. Удельную поверхность шаровой насадки a можно определить по результатам измерения течения газа через слой шаров. Так, для шаров с практически точечными контактами друг с другом:

$$a = a_0 \cdot (1 - \varepsilon), \quad (14)$$

где $a_0 = A_{u1} / V_{u1}$ – удельная поверхность шаров, представляющая собой отношение внешней поверхности A_{u1} шара к его объему V_{u1} .

Для получения исходных параметров шаровой насадки желательно, чтобы аппараты для испытаний были бы возможно большего диаметра. Трудности эксперимента с увеличением размеров аппарата возрастают, но, учитывая, что 1-2 ряда элементов слоя, расположенных у стенки аппарата, имеют искаженную анизотропную структуру, желательно, чтобы соблюдалось соотношение: $D_{an} > 20 d_s$, где D_{an} – диаметр поперечного сечения выпарной камеры. При определении перепада давления высоту шаровой насадки L_{cl} следует выбирать так, чтобы $L_{cl} > 20 d_s$ [6].

По результатам предварительных экспериментов установлено, что циклическое выпаривание высокоминерализованных растворов на промежуточном

твердом теплоносителе приводит к образованию пленки кристаллов солей на элементах насадки. Слой солей возрастает с каждым последующим циклом выпаривания. Следовательно, происходит уменьшение порозности слоя до критического значения и повышение гидравлического сопротивления промежуточного твердого теплоносителя.

Общий объем отложения солей на элементах насадки:

$$V_c = \frac{m_c}{\rho_c} - \frac{0,1 \cdot M_n}{\rho_c}, \quad (15)$$

где m_c, ρ_c – масса и плотность солей соответственно; M_n – масса насадки.

Свободный объем между элементами насадки составляет:

$$V_n = V_n \cdot \varepsilon - V_c, \quad (16)$$

где V_n – общий объем насадки.

С другой стороны, данный параметр можно записать как

$$V_n = V_n - V_{ш}, \quad (17)$$

где $V_{ш}$ – общий объем шаров.

Отсюда порозность слоя

$$\varepsilon = \frac{V_n - V_{ш} + V_c}{V_n}. \quad (18)$$

В процессе выпаривания для дальнейшей эффективной эксплуатации выпарного аппарата необходимо, чтобы порозность слоя шаров, была как можно больше своего критического значения. Поэтому промежуточный твердый теплоноситель необходимо подвергать регенерации: выводить из аппарата и направлять на механическую обработку для удаления слоя солей. После регенерации металлические шары возвращаются в цикл очистки ВМСВ выпариванием.

Выводы

Установлено, что при поддержании порозности слоя промежуточного твердого теплоносителя, состоящего из металлических шаров, на достаточно высоком значении для данного типа насадки становится возможным контроль гидравлического сопротивления выпарного аппарата, а, следовательно, и снижение энергоемкости данного способа выпаривания ВМСВ.

Вопросы расчетного определения сопротивления смоченной шаровой насадки требуют дальнейшей разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников, Ю. Н. Обессоливание сточных вод предприятий черной металлургии [Текст] / Ю. Н. Резников. – К. : Техника, 1984. – 105 с. – Библиогр. : с. 100-102.
2. Таубман, Е. И. Термическое обезвреживание минерализованных промышленных сточных вод [Текст] / Е. И. Таубман, З. П. Бильдер. – Л. : Химия, 1975. – 208 с. – Библиогр. : с. 203-206.
3. Кожемякин, Г. Б. Проблема обезвреживания высокоминерализованных сточных вод металлургических процессов [Текст] / Г. Б. Кожемякин, И. А. Кутузова // Металургія : наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2006. – Вип. 13. – С. 117-122.
4. Спосіб знешкодження високомінералізованих стічних вод випарюванням [Текст] : пат. 10997 У Україна: МПК⁷ С 02 F1/10. / Кожемякін Г. Б., Кутузова І. О.; заявник й

патентовласник Запоріж. держ. інж. академія. № u200503375; заявл. 11.04.2005; опубл. 15.12.2005. – Бюл. № 12. – 2005. – 2 с.

5. *Кутателадзе, С. С.* Гидродинамика газожидкостных систем [Текст] / С. С. Кутателадзе, М. А. Стырикович. – М. : Энергия, 1976. – 296 с. – Библиогр. : с. 290-293.
6. *Аэров, М. Э.* Аппараты со стационарным зернистым слоем: гидравлические и тепловые основы работы [Текст] / М. Э. Аэров, О. М. Тодес, Д. А. Наринский. – Л. : Химия, 1979. – 176 с. – Библиогр. : с. 171-173.

Стаття надійшла до редакції 05.07.2011 р.
Рецензент, проф. М.П. Українець