

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫПАРИВАНИЯ КРИСТАЛЛИЗУЮЩИХСЯ РАСТВОРОВ

В. К. Леонтьев, О. Н. Кораблева

*Кафедра «Химическая технология органических веществ», leontievvk@ystu.ru;
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
г. Ярославль, Россия*

Ключевые слова: выпаривание; гидравлическое сопротивление; гидроциклон; интенсификация процесса; циркуляционный насос.

Аннотация: В целях интенсификации процесса выпаривания разработана схема выпарной установки с отделением кристаллов минеральных солей в гидроциклоне, установленном на циркуляционной линии выпарного аппарата. Определены основные конструкционные размеры выпарного аппарата и гидроциклона, а также проведен расчет гидравлического сопротивления циркуляционного контура выпарного аппарата. Подобран насос, обеспечивающий интенсивную циркуляцию раствора в контуре.

Введение

В настоящее время в условиях роста энергопотребления, ограниченности ресурсов традиционных видов топлива и обострения экологических проблем повышенное внимание уделяется природным минерализованным водам не только как источнику энергии, но и как источнику ценного минерального сырья. Извлекаемые из геотермальных вод соединения натрия, магния, брома, кальция, лития и другие минеральные соли находят широкое применение в химической промышленности. Технология комплексной переработки пластовых вод приобретает большое значение, в связи с возможностью улучшения состояния окружающей среды и обновления минерально-сырьевых ресурсов региона [1].

В ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» совместно с ОАО НПЦ «Недра» разработана технологическая схема переработки геотермальных вод, добываемых из Медягинской скважины на территории Ярославской области. Начальный этап переработки геотермальных вод заключается в концентрировании солевых многокомпонентных растворов до перенасыщения основного компонента, например хлористого натрия, с последующим извлечением из концентрированного рассола других минеральных компонентов. Процесс выпаривания проводят в выпарных аппаратах специальной конструкции для кристаллизующихся растворов. Высокое содержание минеральных солей в геотермальных водах приводит к образованию кристаллического осадка (выпадению кристаллов хлорида натрия, кальция и других элементов) на внутренней поверхности трубок подогревателя, а затем к быстрому зарастанию и забивке тру-

бок теплообменника кристаллизующейся солью, в свою очередь снижающих эффективность выпаривания. В результате аппарат приходится промывать, а промывную воду упаривать, затрачивая на это дополнительную энергию [2].

Для интенсификации процесса выпаривания разработана схема выпарной установки для кристаллизующихся растворов с гидроциклоном, предотвращающим образование накипи и кристаллического осадка. Скорость разделения суспензии в поле действия центробежных сил в гидроциклоне выше, чем в поле действия силы тяжести. Поэтому, даже несмотря на небольшие размеры, гидроциклоны имеют высокую производительность, значительно превышающую производительность механических классификаторов.

При проектировании выпарного аппарата возник вопрос о возможности использования стандартного осевого насоса для обеспечения интенсивной циркуляции в контуре выпарного аппарата. Цель работы – определение гидравлического сопротивления в циркуляционном контуре «циркуляционная труба, циклон, кипятельные трубы теплообменника» и подбор насоса.

Проектирование выпарной установки для кристаллизующихся растворов

Зная производительность выпарного аппарата, начальную и конечную концентрации раствора, вакуумметрическое давление в сепараторе выпарного аппарата, рассчитан выпарной аппарат с принудительной циркуляцией и вынесенной греющей камерой. Аппарат состоит из следующих основных элементов: корпуса, подогревателя, сепаратора, гидроциклона, в котором под действием центробежной силы частицы твердой фазы отбрасываются к стенке аппарата и нисходящим спиральным потоком направляются к разгрузочному отверстию.

В качестве греющего агента выпарного аппарата для переработки геотермальных вод используется горячая вода температурой 115 °С с блока мини-ТЭЦ. Производительности по исходному раствору и выпариваемому растворителю составляют соответственно 1,58 и 0,78 кг/с, начальная и конечная концентрации раствора – 20 и 41 % соответственно, вакуумметрическое давление в сепараторе выпарного аппарата 0,45 ат. В результате расчетов выбран выпарной аппарат с принудительной циркуляцией и вынесенной греющей камерой, действительной площадью поверхности теплообмена 192 м², длиной труб 5 м, диаметром труб 38×2 мм [2, 3].

Для расчета конструктивных размеров гидроциклона использовали методику [4], согласно которой объемная производительность гидроциклона V , м³/ч, рассчитывается по формуле

$$V \cong 0,94 d_{\text{вх}} d_{\text{ш}} \sqrt{\Delta p},$$

где $d_{\text{вх}}$, $d_{\text{ш}}$ – диаметры входного и шламового патрубков, см, соответственно; Δp – избыточное давление перед входным патрубком, ат.

Давление на входе в гидроциклон определяется из условия $\Delta p = 0,85 \rho_p$ (ρ_p – плотность раствора, г/см³). Принято избыточное давление на входе в гидроциклон $\Delta p = 1$ ат. С учетом массового расхода циркулирующего раствора выбран стандартный гидроциклон диаметром $D = 2$ м с углом конусности 20° [5].

По заданной производительности и принятому перепаду давления Δp определены основные конструктивные размеры гидроциклона: наименьший диаметр входного патрубка $d_{\text{вх}}$, диаметры шламового патрубка $d_{\text{ш}}$ и песковой насадки $d_{\text{п}}$.

Расчет гидравлического сопротивления в циркуляционном контуре

Циркуляционный насос должен обеспечивать рабочую скорость движения газожидкостной смеси в кипятильных трубах, преодолевать гидравлическое сопротивление в циркуляционной трубе и гидроциклоне. Необходимо отметить, что циркуляционный поток, поднимающийся вверх по кипятильным трубам выпарного аппарата, представляет собой газожидкостную смесь с твердыми включениями кристаллов минеральных солей, а поток в циркуляционной трубе – жидкостной раствор с включением твердой фазы (кристаллов).

Для стабилизированного участка, по которому движется двухфазный поток, гидравлическое сопротивление определено по выражению [6]

$$\Delta p_T + \Delta p_{\text{ч}} = \lambda_c \frac{l_c (G + G_T)v}{d_{\text{тр}} 2S},$$

где Δp_T , $\Delta p_{\text{ч}}$ – потери давления на трение раствора и твердых частиц соответственно, Па; λ_c – коэффициент трения среды; l_c , $d_{\text{тр}}$ – длина и диаметр стабилизированного участка трубопровода, м; G , G_T – массовый расход несущей среды и твердых частиц, кг/с; S – площадь поперечного сечения трубы, м²; v – скорость потока, м/с.

При этом коэффициент гидравлического трения рассчитывался

$$\Delta \lambda_c = \left[0,2 + \frac{0,88\beta_p}{(1 + \beta_p)^2} \right] \text{Re}_{\text{тр}}^{-0,2},$$

где β_p – массовая концентрация твердой фазы, определяемая по выражению

$$\beta_p = \frac{G_T}{\rho_T v S}; \quad \text{Re}_{\text{тр}} = \frac{v d_{\text{тр}} \rho}{\mu} - \text{критерий Рейнольдса.}$$

Гидравлическое сопротивление газожидкостного потока в кипятильных трубах определялось по выражению [4]

$$\Delta p = \lambda \frac{nL}{d_3} \frac{\rho v^2}{2} + \sum \xi \frac{\rho v^2}{2},$$

где L – длина одного хода, м; n – число ходов; d_3 – эквивалентный диаметр, м; ρ – плотность газожидкостного потока в кипятильных трубах, кг/м³; $\sum \xi$ – сумма коэффициентов местного сопротивления.

В результате расчетов получены гидравлические сопротивления в циркуляционной трубе и двухфазного потока в кипятильных трубах выпарного аппарата – 340 и 8150 Па соответственно.

Подбор циркуляционного насоса

С учетом высоты выпарного аппарата, а также гидравлического сопротивления гидроциклона рассчитан потребный напор $H_{\text{потр}}$, который составил около 16 м. На требуемую производительность стандартный осевой насос марки ОГ6-42 имеет напор 4,2 м. Данный насос не обеспечивает необходимый потребный напор. Для движения потоков в циркуляционном контуре выпарного аппарата и интенсивного отделения кристаллов в гидроциклоне необходимо изменить схему установки насоса и гидроциклона в циркуляционном контуре выпарного аппарата (рис. 1).

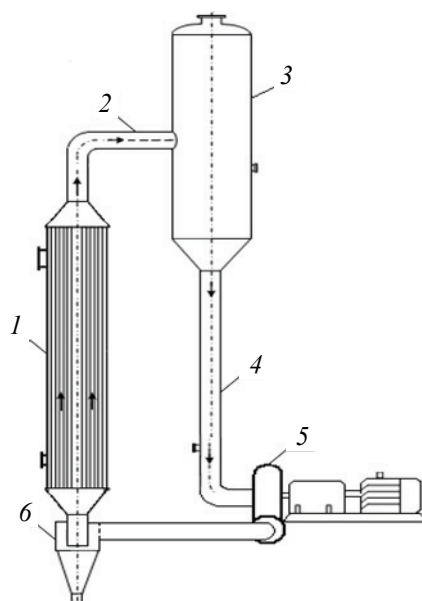


Рис. 1. Схема однокорпусной выпарной установки для кристаллизующихся растворов:

1 – кипяtilьные трубы подогревателя выпарного аппарата; 2 – труба вскипания; 3 – сепаратор; 4 – циркуляционная труба; 5 – насос, 6 – гидроциклон

Для предложенной схемы выпарной установки по величине потребного напора и необходимому расходу потока в циркуляционной линии выбран насосный агрегат серии 5-АНГК с подачей $1600 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором 20 м.

Заключение

В целях интенсификации процесса выпаривания кристаллизующихся растворов минеральных солей разработана конструкция выпарного аппарата с гидроциклоном. Подобран насосный агрегат, который обеспечивает интенсивную циркуляцию раствора в контуре «гидроциклон, кипяtilьные трубы, циркуляционная труба».

Список литературы

1. Леонтьев, В. К. Применение процесса выпаривания для концентрирования геотермальных вод / В. К. Леонтьев, О. Н. Кораблева, Д. А. Барзыкина // Инновационно-технологическое развитие науки : сборник статей Международной научно-практической конференции : в 3-х частях ; 05 апреля 2017 г., Волгоград. – Уфа, 2017. – Ч. 3. – С. 29 – 32.
2. Леонтьев, В. К. Выпарной аппарат для кристаллизующихся растворов / В. К. Леонтьев, О. Н. Кораблева, Л. М. Соболева // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2018. – № 10. – С. 6 – 7.
3. Пат. на полезную модель 161443 Российская Федерация, МПК В01Д 1/12 Выпарной аппарат для кристаллизующихся растворов / В. М. Бурцева, В. К. Леонтьев, О. Н. Кораблева ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». – № 2014147464/05 ; заявл. 25.11.2014 ; опубл. 20.04.2016, Бюл. № 11. – 2 с.

4. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учеб. пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 13-е изд. – М. : Альянс, 2005. – 576 с.

5. ТУ 1104–022–05773333–2008. Гидроциклоны. – Введ. 2008-06-15. – Первоуральск : ОАО «Первоуральский завод горного оборудования», 2008. – 13 с.

6. Гельперин, Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии / Н. И. Гельперин. – М. : Химия, 1981. – 812 с.

Intensification of the Process of Evaporation of Crystallizing Solutions

V. K. Leontyev, O. N. Korableva

*Department of Chemical Technology of Organic Substances, leontievvk@ystu.ru;
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia*

Keywords: evaporation; hydraulic resistance; hydrocyclone; process intensification; circulation pump.

Abstract: In order to intensify the evaporation process, a scheme of an evaporation unit with separation of crystals of mineral salts in a hydrocyclone installed on the circulation line of the evaporator was developed. The main structural dimensions of the evaporator and hydrocyclone are determined, and the hydraulic resistance of the circulation circuit of the evaporator is calculated. A pump that provides intensive circulation of the solution in the circuit is selected.

References

1. Leont'yev V.K., Korableva O.N., Barzykina D.A. *Innovatsionno-tekhnologicheskoye razvitiye nauki: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 3-kh chastyakh* [Innovative and technological development of science: a collection of articles by the International Scientific practical conference: in 3 parts], 05 April, 2017, Volgograd, Ufa, 2017, Part 3, pp. 29-32. (In Russ.)

2. Leont'yev V.K., Korableva O.N., Soboleva L.M. [Evaporation apparatus for crystallizing solutions], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2018, no. 10, pp. 6-7. (In Russ.)

3. Burtseva V.M., Leont'yev V.K., Korableva O.N. *Vyparnoy apparat dlya kristallizuyushchikhsya rastvorov* [The evaporator for crystallizing solutions], Russian Federation, 2016, Pat. Utility Model 161443. (In Russ.)

4. Pavlov K.F., Romanov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Examples and tasks on the course of processes and apparatuses of chemical technology: textbook for universities], Moscow: Al'yanS, 2005, 576 p. (In Russ.)

5. ТУ 1104–022–05773333–2008. *Gidrotsiklony* [Hydrocyclones], Pervoural'sk: ОАО «Pervoural'skiy zavod gornogo oborudovaniya», 2008, 13 p. (In Russ.)

6. Gel'perin N.I. *Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [The main processes and apparatuses of chemical technology], Moscow: Khimiya, 1981, 812 p. (In Russ.)

Intensivierung des Verdampfungsprozesses der kristallisierenden Lösungen

Zusammenfassung: Um den Verdampfungsprozess zu intensivieren, ist das Schema der Verdampfungsanlage mit Trennung von Mineralsalzkristallen in einem Hydrozyklon entwickelt, der an der Zirkulationsleitung des Verdampfers installiert ist. Es sind die Hauptstrukturabmessungen des Verdampfers und des Hydrozyklons bestimmt, sowie auch die Berechnungen des hydraulischen Widerstands des Zirkulationskreislaufs des Verdampfers durchgeführt. Es ist eine Pumpe ausgewählt, die eine intensive Zirkulation der Lösung im Kreislauf gewährleistet.

Intensification du processus de l'évaporation des solutions cristallisées

Résumé: Dans le but de l'intensification du processus de l'évaporation est élaboré le schéma de l'installation de l'évaporation avec la séparation des cristaux des sels de minéraux dans un hydrocyclone installé sur la ligne de circulation de l'appareil de l'évaporation. Sont définies les principales dimensions structurelles de l'évaporateur et de l'hydro-cyclone; est calculée la résistance hydraulique du circuit de circulation de l'évaporateur. Est choisie une pompe pour assurer la circulation intentionnelle de la solution dans le circuit.

Авторы: *Леонтьев Валерий Константинович* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Химическая технология органических веществ»; *Кораблева Ольга Николаевна* – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химическая технология органических веществ», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия.

Рецензент: *Лебедев Антон Евгеньевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия.