

Угол отрыва частицы от тарелки (рис.4) и текущий радиус (рис.5) изменяются по экспоненциальному закону. Причем на этих графиках имеется явная точка перегиба. Эта точка, на наш взгляд, соответствует увеличению кориолисовой силы, которая замедляет движение частицы в радиальном направлении.

По внешнему радиусу беговой дорожки, используя график (рис.5), можно определить максимальную частоту вращения, при которой частица гарантированно попадет под валок.

Предложенная математическая модель может быть успешно использована для расчета и оптимизации конструктивных и технологических параметров промышленных среднеходных мельниц.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. –М.: Недра, 1980. –412 с.
2. Летин Л.А., Роддатис К.Ф. Среднеходные и тихоходные мельницы. –М.: Энергоиздат, 1981.-360 с.
3. Князев А.С., Чулков В.В., Хомченко Г.Л. Исследование лабораторной валковой мельницы // Сб. тр. ВНИИцеммаш. – Тольятти, 1985. –С. 47-51.
4. Маркман Я.Б., Силкина В.И. К расчету движения материала на размольной тарелке вертикальной роликовой мельницы //Сб. тр. ВНИИцеммаш. – Тольятти, 1985. –С. 58-67.
5. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. –М.: Наука, 1970.-478 с.

УДК 661.4

Д. Г. Калишук, доцент; А. Ф. Селевич, ст.н.сотр. НИИФХП БГУ

#### **ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РАССОЛОВ БЕЛАРУСИ ЕСТЕСТВЕННЫМ УПАРИВАНИЕМ**

The analysis of factors influencing velocity of natural brines evaporation has been made. Evaluation of prospects of use of natural evaporation of underground brines at the Belarusian climatic conditions with the purpose of optimization of extraction technologies of production of concentrates of iodine, bromine, boron, lithium compounds is reported.

Беларусь обладает уникальными запасами природных высокоминерализованных рассолов, содержащих такие ценные компоненты, как соединения брома, иода, бора, лития. Концентрации указанных соединений в рассолах достаточно высоки, что позволяет судить о перспективе промышленного производства брома, иода, бора, лития [1-5]. Одной из стадий получения технически и химически чистых данных веществ является производство концентратов их соединений. В результате лабораторных исследований экстракционной технологии получения концентратов, разработанной в НИИФХП БГУ, установлено, что их качество повышается при подаче на экстракцию предварительно упаренного рассола [6,7].

Однако предварительное упаривание рассола очень энергоемко из-за необходимости испарять из него большую часть воды. При использовании промышленных теплоносителей этот процесс требует сложного аппаратного оформления и дорог. Аль-

тернативой является естественное упаривание в открытых бассейнах, широко применяемое в иодобромной промышленности при первичной переработке сырья – морской воды [1-3, 8]. Однако бассейновые технологии распространены в настоящее время лишь в климатических зонах с более высокой, чем в Беларуси, интенсивностью солнечной радиации.

Нами проведена оценка возможности естественного упаривания рассолов с привязкой к климатическим условиям региона их залегания в Беларуси – северо-западной части Гомельской области.

Факторами, влияющими на скорость естественного испарения воды из бассейнов (водоемов), являются климатические условия (температура воздуха, его относительная влажность, скорость ветра, интенсивность солнечной радиации), состав раствора в бассейне, его геометрические параметры (поверхность, глубина). Изменение уровня раствора в незащищенном от атмосферных осадков бассейне также зависит от их количества [1-3, 8-11]. Скорость ветра определяет интенсивность конвективного переноса паров воды от поверхности испарения. Движущей силой процесса испарения является разность давлений паров влаги над поверхностью раствора и в окружающем воздухе. Давление паров над поверхностью раствора зависит от его температуры и состава. Давление паров в окружающем воздухе является функцией его температуры и относительной влажности. Климатические условия зависят от географического положения и значительно меняются не только с изменением пор года, но и в течение суток.

Максимальная движущая сила процесса естественного испарения для условий Беларуси наблюдается в летний период. Изучив материалы справочников [12-15] и монографии [16], мы пришли к выводу, что наиболее благоприятными для проведения естественного упаривания рассолов, добываемых и подлежащих переработке в районе городского поселка Октябрьский, являются следующие месяцы: май, июнь, июль и август.

Литературные источники содержат для расчета скорости испарения различные зависимости. Наиболее полные сведения о методах расчетов изложены в монографии [9], руководстве [11], указаниях [10], обзоре [8]. Монографии [1-3] предлагают использовать для расчета скорости испарения воды из рассолов в бассейнах  $E$ , м/месяц, уравнение Майера

$$E = 0,4(5+w)(e_p - e_a), \quad (1)$$

где  $w$  – скорость ветра, м/с;  $e_p$  и  $e_a$  – равновесное давление паров воды над поверхностью рассола и в атмосферном воздухе соответственно, кПа.

Однако критический анализ различных зависимостей для расчета скорости испарения, проведенный В.И. Бабкиным [9], указывает на значительную погрешность вычислений по уравнению Майера. В монографии [9], обзоре [8] рекомендуют вести расчет скорости испарения по формулам, приведенным в нормативном документе [10]:

$$E = 1,4 \cdot 10^{-3} n (e_p - e_a) (1 + 0,72w), \quad (2)$$

$$Y = 1604 \cdot 10^{-3} m (y_p - y_a) (k_o + 0,672t) b, \quad (3)$$

где  $n$  – число суток в расчетном интервале (месяце);  $k_o$  – параметр, зависящий от разности температур поверхности раствора (воды) и воздуха, °С.

Большую сложность представляет определение величин  $e_p$  и  $k_o$ . Причины этого следующие:

1) отсутствуют справочные данные о температуре рассола в климатических справочниках и др. литературе, не представляется возможным получить эту температуру расчетным путем;

2) отсутствуют данные о давлении насыщенного пара над многокомпонентными водными растворами (рассолами), содержащими  $NaCl$ ,  $MgCl_2$ ,  $CaCl_2$ ,  $KCl$ .

Значение давления насыщенного пара над многокомпонентными водными растворами неорганических веществ  $e_p$  в монографии [17] рекомендовано вычислять по методике, предложенной Эзрохи:

$$e_p = e_o 10^{\sum_{i=1}^n (F_i N_i + Q_i N_i N)} \quad (4)$$

где  $e_o$  – давление насыщенного пара воды при температуре раствора;  $F_i$  и  $Q_i$  – коэффициенты, величины которых зависят от природы растворенного  $i$ -го компонента и температуры раствора;  $N_i$  – концентрация  $i$ -го компонента в растворе, моль/кмоль;  $N$  – суммарная концентрация всех компонентов (солей) в растворе, моль/кмоль.

Коэффициенты  $F_i$  и  $Q_i$  рассчитывают по уравнениям

$$F_i = f_{0i} + f_{1i} t_p + f_{2i} t_p^2, \quad (5)$$

$$Q_i = q_{0i} + q_{1i} t_p + q_{2i} t_p^2 \quad (6)$$

где  $f_{0i}$ ,  $f_{1i}$ ,  $f_{2i}$ ,  $q_{0i}$ ,  $q_{1i}$ ,  $q_{2i}$  – коэффициенты, величины которых зависят от природы растворенной в воде соли ( $i$ -го компонента);  $t_p$  – температура раствора, °С.

Составы исходного и упаренного, из которого удалено до 50% воды, рассолов, а также некоторые свойства их компонентов приведены в таблице. Плотность исходного раствора составляет 1249 кг/м<sup>3</sup>, упаренного 1349 кг/м<sup>3</sup>. По данным, представленным в таблице, были определены значения коэффициентов, входящих в уравнения (5) и (6), для солей – компонентов рассолов [17].

На основании сведений справочников [12-15] приведено среднее за сезон в период с 6 час 30 мин до 18 час 30 мин значение интенсивности солнечной радиации:  $q_c = 385,6$  Вт/м<sup>2</sup>. За этот период 1 м<sup>2</sup> поверхности бассейна будет поглощать при альбедо  $A = 0,2$  [11-16]  $Q_{cn} = 1,33 \cdot 10^7$  Дж солнечной энергии. Для определения средней температуры, до которой будет нагрет рассол в бассейне, следует решить уравнение теплового баланса, приближенный вид которого следующий:

$$Q_{cn} = Q_{np} + Q_{исп} + Q_n - Q_{конц}, \quad (7)$$

где  $Q_{np}$  – тепло, расходуемое на нагрев рассола, Дж;  $Q_{исп}$  – тепло, расходуемое на испарение воды из рассола, Дж;  $Q_n$  – тепловые потери, включая тепло на нагрев конструкций бассейна, Дж;  $Q_{конц}$  – тепло, выделяющееся в результате физико-химических превращений (концентрирования).

$$Q_{np} = G_p c_p (t_p - t), \quad (8)$$

где  $G_p$  – масса рассола, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> поверхности бассейна, кг;  $c_p$  – удельная теплоемкость рассола, Дж/кг·К;  $t_p$  – температура, до которой нагревается рассол, °С;  $t$  – начальная температура рассола, °С.

Теплоемкость рассола может быть рассчитана по правилу аддитивности [18]:

$$c_p = c_e(1 - \sum_{i=1}^n x_i) + \sum_{i=1}^n c_{pi} x_i, \quad (9)$$

где  $c_e$  – удельная теплоемкость воды, Дж/кг·К;  $x_i$  – массовая доля  $i$ -го компонента раствора (соли), кг/кг;  $c_{pi}$  – удельная теплоемкость  $i$ -го компонента раствора, Дж/кг·град;  $n$  – число компонентов (солей) в растворе.

Таблица

Состав рассолов и свойства их компонентов

Компонент	Концентрация компонента						Молярная масса $M_b$ кг/кмоль	Удельная теплоемкость $C_{pb}$ Дж/кг·К [19]
	В исходном рассоле			В упаренном рассоле				
	$C_b$ кг/м <sup>3</sup>	$N_b$ моль/кмоль $H_2O$	$X_b$ кг/кг р-ра	$C_{yb}$ кг/м <sup>3</sup>	$N_{yb}$ моль/кмоль $H_2O$	$X_{yb}$ кг/кг р-ра		
<i>NaCl</i>	114,5	38,79	0,0917	12,5	4,40	0,0093	58,44	864
<i>MgCl<sub>2</sub></i>	32,6	6,78	0,0261	65,1	14,07	0,0483	95,21	747
<i>KCl</i>	9,6	2,55	0,0077	19,1	5,28	0,0142	74,55	688
<i>CaCl<sub>2</sub></i>	169,3	30,20	0,1355	346,9	64,37	0,2572	110,99	654
<i>H<sub>2</sub>O</i>	910,0	–	0,7286	875,0	–	0,6486	18,02	4190
Сумма солей	335	78,32	0,2682	470	88,12	0,3484	–	–

Используя данные таблицы, получим, что удельная теплоемкость свежего рассола составит  $c_p = 3245$  Дж/кг·К, упаренного –  $c_y = 2939$  Дж/кг·К.

Тепло, расходуемое на испарение воды из рассола, рассчитывается по уравнению

$$Q_{исп} = G_e r_e \quad (10)$$

где  $G_e$  – масса воды, испаренной с 1 м<sup>2</sup> бассейна, кг;  $r_e$  – удельная теплота парообразования воды при условиях испарения, Дж/кг.

В то же время из уравнения (2), принимая, что с 18 час 30 мин до 6 час 30 мин испарение незначительно,

$$G_e = 1,4 \cdot 10^{-3} n (e_p - e_e) (1 + 0,72w). \quad (11)$$

Величина тепловых потерь является трудноопределимой и сильно зависит от конструкции бассейна, степени контакта его с грунтом и т.д. Но даже при известной величине  $Q_n$  система, состоящая из уравнений (7), (8), (9) и (10), является сложной и может быть решена только приближенно относительно  $t_p$  итерационным методом. При решении ее также следует задаваться глубиной налива рассола в бассейн, а также моделью изменения концентраций – по принципу аппарата идеального смешения или идеального вытеснения.

Нами была предпринята попытка ориентировочно рассчитать  $t_p$ . При этом принято, что  $Q_n = 0,2Q_{сн}$ , глубина налива рассола в бассейн  $H_p = 0,25-0,30$  м. Теплотой концентрирования пренебрегали. Получено, что рассол может быть нагрет до  $t_p = 22...25$  °С.

Для температуры 22 °С давление насыщенного пара воды  $e_e = 2,64$  кПа, для 25 °С –  $e_e = 3,17$  кПа [18]. Расчеты по формуле (4) дают следующие значения  $e_p$ : над исходным рассолом при 22 °С – 1,61 кПа, при 25 °С – 1,93 кПа; над упаренным при 22 °С – 1,41 кПа, при 25 °С – 1,68 кПа.

Усреднив приведенные выше значения  $e_p$  и подставив усредненную величину в уравнение (2) при  $n = 123$  дня,  $e_s = 1,34$  кПа,  $w = 3,23$  м/с [13-15], получим, что испарение за сезон (май-август) составит  $E = 0,183$  м. В то же время суммарные атмосферные осадки за сезон составляют  $E_{ос} = 0,277$  м [15]. Т. к. испарение меньше осадков, бассейны для естественного упаривания должны быть защищены от осадков, но хорошо продуваемы.

Оценочные расчеты показывают, что при использовании низкопотенциального вторичного тепла оборотной воды промышленных предприятий для нагрева рассола температура его в летний сезон может быть доведена до 27-30 °С. Это позволит увеличить испарение в 3-4 раза и соответственно уменьшить площадь бассейнов. Без использования интенсифицирующих факторов (естественное упаривание) в расчете на 1 т получаемого брома следует испарять за сезон из рассола до 300 т воды, что соответствует бассейнам с поверхностью испарения примерно 1600 м<sup>2</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ксензенко В.И., Стасиневич Д.С. Технология брома и иода. – М.: Госхимиздат, 1960. – 298 с.
2. Ксензенко В.И., Стасиневич Д.С. Химия и технология брома, иода и их соединений. – М.: Химия, 1979. – 304 с.
3. Ксензенко В.И., Стасиневич Д.С. Химия и технология брома, иода и их соединений. – М.: Химия, 1995. – 432 с.
4. Плющев В.Е., Степин Б.Д. Химия и технология соединений лития, рубидия и цезия. – М.: Химия, 1970. – 320 с.
5. Позин М.И. Технология минеральных солей. Ч. 1. – Л.: Химия, 1974. – 792 с.
6. Экстракционная технология получения иодобромного концентрата из промышленных рассолов Припятского прогиба / А.Ф.Селевич, Т.Б.Ковалева, О.А.Ивашкевич, Д.Г.Калишук и др. // В сб. «Природопользование и охрана окружающей среды». – Мн.: ИПИПриЭ НАН Беларуси, 1998. – С. 85.
7. Калишук Д.Г., Ковалева Т.Б., Селевич А.Ф. Разработка технологии и аппаратного оформления процесса получения бромид-иодидного концентрата // В сб. тезисов Международной научно-технической конференции «Разработка импортозамещающих технологий и материалов в химической промышленности». – Мн.: БГТУ, 1999. – С. 70-71.
8. Шихеева Л.В., Зырянова В.В. Бассейновые методы переработки рассолов. – М.: НИИТЭХИМ, 1975. – 44 с.
9. Бабкин В.И. Испарение с водной поверхности. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – 78 с.
10. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – 83 с.
11. Методы расчета водных балансов. Международное руководство по исследованиям и практике / Под ред. А.А. Соколова и Т.Г. Чапмена. – Л.: Гидрометеоздат, 1976. – 120 с.
12. Справочник по климату СССР. Вып. 7. Белорусская ССР. Ч. I. – Л.: Гидрометеоздат, 1966. – 67 с.
13. Справочник по климату СССР. Вып. 7. Белорусская ССР. Ч. II. – Л.: Гидрометеоздат, 1965. – 246 с.

14. Справочник по климату СССР. Вып. 7. Белорусская ССР. Ч. III. – Л.: Гидрометеоздат, 1966. – 156 с.
15. Справочник по климату СССР. Вып. 7. Белорусская ССР. Ч. IV. – Л.: Гидрометеоздат, 1968. – 264 с.
16. Климат Беларуси / Под ред. В.Ф. Логинова. – Мн.: Институт геологических наук АН Беларуси, 1996. – 234 с.
17. Зайцев И.Д., Зозуля А.Ф., Асеев Г.Г. Машинный расчет физико-химических параметров неорганических веществ. – М.: Химия, 1983. – 256 с.
18. Методы расчетов процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк, М.И. Курочкина. – С.-Пб.: Химия, 1993. – 496 с.
19. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. – С.-Пб.: Химия, 1994. – 432 с.

УДК 541.18.045:66.0

А. И. Ершов, профессор; Ю. П. Лунчук, инженер

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АППАРАТА С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ**

The results of experimental research of exchange intensity apparatus with horizontal profiling heaters are given. The dependence of coefficient of heat transmission  $K$  upon driving forces of the exchange process has been received  $\Delta t$ .

Теплообмен между кипящей жидкостью в неограниченном объеме и конденсирующимся паром в горизонтальных трубах и каналах широко применяется в выпарных аппаратах, паровых котлах, химических реакторах и относится к числу самых сложных, т. к. связан с фазовым превращением обоих теплоносителей. Он может осуществляться как при естественной, так и при принудительной циркуляции кипящей жидкости у поверхности стенок нагревательных устройств. Исследованиями установлено [1, 2], что интенсивность теплообмена возрастает с увеличением скорости внешнего обтекания теплопередающих поверхностей и при вынужденном движении жидкости технически легко реализуема. Однако на практике в большинстве случаев указанные тепловые процессы проводятся при естественной конвекции, которая во многом зависит от геометрии и конструктивного оформления самих теплообменных устройств.

Ранее, применительно к выпарным аппаратам для концентрирования растворов с минимальными температурными потерями на гидростатический эффект, было предложено новое техническое решение горизонтального нагревательного устройства с плоскоовальными трубами [3, 4]. Благодаря их секционированному расположению возникает хорошо организованный контур циркуляции кипящей жидкости вместе с образующимися пузырьками пара в зазорах между трубками вверх, а в зазорах между секциями вниз из-за существенной разности плотностей восходящего и нисходящего потоков. Последнее обусловлено тем, что поверхность стенок, приходящаяся на единицу объема воспринимающей тепло среды, в зазорах между соседними трубами заметно больше, чем в зазорах между секциями.

Разработка методики теплового расчета таких нагревательных устройств потребовала проведения исследований, которые выполнялись авторами в несколько этапов. На