

УДК 621.565:628.165

В.В. Клименко, проф., д-р техн. наук, І.О. Переверзєв, доц., канд. техн. наук, Н.В. Ковальчук, викл.*Кіровоградський національний технічний університет, м.Кіровоград, Україна,
E-mail: klymvas@ukr.net*

Підвищення енергоефективності концентрування водних розчинів виморожуванням

Підвищення ефективності техніки та процесів концентрування водних розчинів виморожуванням, зокрема шляхом зменшення енерговитрат, є важливим і актуальним. Ціль досліджень даної роботи – підвищити енергоефективність способу концентрування водних розчинів виморожуванням при застосуванні газоподібного холодоагенту (ГПХ). В роботі визначена функціональна залежність енерговитрат на концентрування водних розчинів виморожуванням із застосуванням ГПХ від величини тиску в установці концентрування та визначений оптимум (мінімум) функції такої залежності. При підвищених тисках газоподібного холодоагенту (повітря) в області значень $0,2 \text{ МПа} \leq P \leq 0,5 \text{ МПа}$ енерговитрати в установці концентрування водного розчину виморожуванням мінімальні та менші, ніж при атмосферному тиску в $1,6 \div 1,8$ рази.

концентрування водних розчинів, енерговитрати, холодоагент, сепарація льоду, виморожування**В.В. Клименко, проф., д-р техн. наук, И.А. Переверзев, доц., канд. техн. наук, Н.В. Ковальчук, викл.***Кіровоградський національний технічний університет, г.Кіровоград, Україна*

Повышение энергоэффективности концентрирования водных растворов вымораживанием

Повышение эффективности техники и процессов концентрирования водных растворов вымораживанием, в частности путем уменьшения энергозатрат, является важным и актуальным. Цель исследований данной работы – повышение энергоэффективности метода концентрирования водных растворов вымораживанием при использовании газообразного хладагента (ГОХ). В работе определена функциональная зависимость энергозатрат на концентрирование водных растворов вымораживанием с применением ГОХ от величины давления в установке концентрирования и найден оптимум (минимум) функции такой зависимости. При повышенных давлениях газообразного хладагента (воздуха) в области значений $0,2 \text{ МПа} \leq P \leq 0,5 \text{ МПа}$ энергозатраты в установке концентрирования водного раствора вымораживанием минимальные и меньше, чем при атмосферном давлении в $1,6 \div 1,8$ раз.

концентрирование водных растворов, энергозатраты, хладагент, сепарация льда, вымораживание

Постановка проблеми. В техніці концентрування водних розчинів та водоочистки найбільші труднощі викликає видалення іонних домішок, до яких відносяться і речовини, що обумовлюють ступінь мінералізації води.

Метод концентрування і очистки водних розчинів, стічних вод виморожуванням перспективний не тільки для видалення мінеральних домішок, а і цілого ряду органічних забруднень, що знаходяться в молекулярно - розчинному стані. Тому підвищення ефективності техніки та процесів концентрування водних розчинів виморожуванням, зокрема шляхом зменшення енерговитрат, є важливим і актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо декілька способів концентрування водних розчинів виморожуванням, що включають попереднє охолодження рідини потоками прісної води та концентрату, утворення кристалів льоду і концентратів при контактуванні з холодоагентом, сепарацію льоду від концентрату, промивку та плавлення льоду [1].

© В.В. Клименко, І.О. Переверзєв, Н.В. Ковальчук, 2016

Недоліком таких способів концентрування рідин є відносно низька якість отриманої прісної води та концентрату через наявність в них домішок речовин, що застосовуються в якості контактуючих з рідиною холодоагентів (пропан, бутан та ін.) обумовлених їх розчинністю у потоках прісної води та концентрату. Винесення вказаних речовин не тільки погіршує якість прісної води та концентрату, підвищує їх собівартість, але і негативно впливає на довкілля.

Для очистки дренажних, шахтних, кар'єрних і промислових вод, що скидаються, які забруднені змуленими речовинами, бактеріальними домішками, мінеральними солями, в тому числі, на основі важких металів пропонується спосіб, який полягає у виморожуванні прісної води при контакті мінералізованої води з холодним повітрям [2]. Процес виморожування ведуть у циркуляційно-проточному вертикально встановленому апараті (льодогенераторі) колонного типу, заповненому насадкою із твердих тіл різної форми: зверху апарату подають мінералізовану воду, а знизу холодне повітря із мінусовою температурою. Але енерговитрати на реалізацію такого способу значно вищі, ніж при виморожуванні шляхом прямого контактування з холодоагентом, що випаровується в процесі контакту.

Для концентрування рідин виморожуванням з метою виділення розчинених речовин при евтектичних параметрах відомо спосіб, що включає охолодження і подачу холодоагенту в газоподібному стані, контакт його з рідиною з утворенням кристалів льоду та концентрованої рідини (концентрату), сепарацію, промивку та плавлення льоду [3]. Недоліком такого способу, що здійснюється при атмосферному тиску, є підвищені витрати енергії (50...100 кВт-год/т води), визначені перш за все суттєвими енергозатратами на переміщення газоподібного холодоагенту, що контактує з розчином.

Постановка завдання. Ціль досліджень даної роботи – підвищити енергоефективність концентрування водних розчинів виморожуванням при застосуванні газоподібного холодоагенту (ГПХ). Попередній аналіз показав, що величина енергозатрат такого способу суттєво залежить від тиску, при якому здійснюється циркуляція ГПХ в контурі установки концентрування розчину.

Для досягнення поставленої цілі потрібно з'ясувати залежність енерговитрат на концентрування водних розчинів виморожуванням із застосуванням ГПХ від величини тиску в установці концентрування та визначити оптимум (мінімум) функції такої залежності.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо спосіб концентрування рідин виморожуванням з метою виділення розчинених речовин при евтектичних параметрах аналогічним способом [3], але який передбачає можливість здійснення процесу виморожування при тисках газоподібного холодоагенту (повітря) більше атмосферного [4]. Блок-схема установки, в якій може здійснюватися такий спосіб, надано на рис.1.

Установка працює наступним чином: початкова рідина попередньо охолоджується в теплообміннику 1 холодними потоками концентрату та прісної води, що виходять з установки, змішується з рідиною, що рециркулює, а суміш поступає в кристалізатор-виморожувач (Кр-Вм) 2.

В Кр-Вм, де підтримується тиск вище атмосферного, подається також охолоджений в холодильній машині 4 газоподібний холодоагент, циркуляція якого здійснюється за допомогою вентилятора 3. При контакті холодоагенту із сумішшю вхідної рідини та рідини, що рециркулює, відбувається її охолодження з утворенням кристалів льоду та відповідним підвищенням концентрації рідини.

Потім кристали льоду сепаруються від концентрату, промиваються та плавляться з утворенням прісної води (на схемі не показано), а концентрат ділиться на

дві частини – більша частина повертається на рециркуляцію (на схемі не показано), а менша через теплообмінник 1 виводиться з установки. Так як з Кр-Вм буде постійно виноситись частина газоподібного холодоагенту потоками концентрату та прісної води, що виходять, то для підтримання необхідного тиску буде потрібно поповнювати газоподібний холодоагент в еквівалентній кількості за допомогою пристрою 5 (компресор).

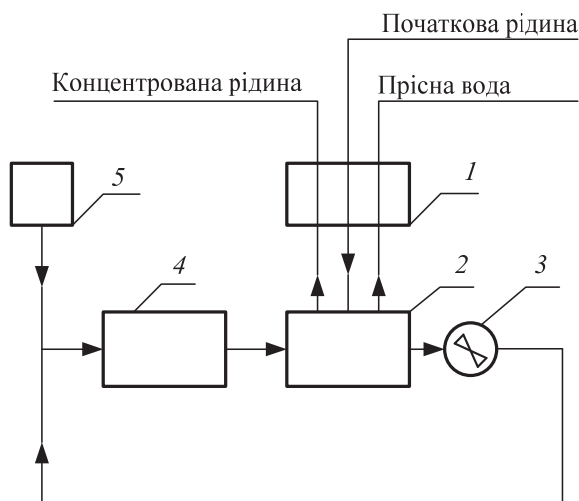


Рисунок 1 – Блок- схема установки для концентрування водних розчинів виморожуванням

Загальні енерговитрати в такій установці можна визначити як:

Загальні енерговитрати в такій установці можна визначити як:

$$L = L_x + L_b + L_{п1} + L_{п2},$$

де L_x – енерговитрати в холодильній машині;

L_b – енерговитрати на переміщення (циркуляцію) ГПХ (повітря);

$L_{п1}$ – енерговитрати на поповнення ГПХ внаслідок його втрат з потоками прісної води та концентрату, що виводяться з установки;

$L_{п2}$ – енерговитрати на привід насосів.

Можна вважати, що для певного ступеня концентрування L_x та $L_{п1}$ не залежать від величини тиску ГПХ [4].

Разом з тим енергетичні затрати на переміщення газоподібного холодоагенту, наприклад, повітря, в припущенні, що конструкція та розміри апаратів установки незмінні, а масова витрата повітря при різних тисках постійна, з підвищенням тиску будуть зменшуватися.

Покажемо, що при незмінній продуктивності апаратів та при постійному значенні їх гідродинамічних та тепло-масообмінних характеристик, які визначаються критерієм Рейнольдса Re , це дійсно так.

Першою причиною, що викликає зменшення енергозатрат на переміщення газоподібного холодоагенту при вказаних обмеженнях, є зменшення втрат тиску при його підвищенні:

$$\Delta P_p = \Delta P_{01} \frac{\rho_{01}}{\rho_p} = \Delta P_{01} \frac{P_{01}}{P_p}, \quad (1)$$

де ΔP_p – втрати тиску при тиску P ($P > P_{01}$);

ΔP_{01} – втрати тиску при атмосферному тиску P_{01} ;

ρ_p і ρ_{01} – відповідно густина газоподібного холодоагенту при P та P_{01} .

Дійсно, при умові рівності критеріїв Re_p при тиску P та Re_{01} при атмосферному тиску P_{01} впливає:

$$\frac{W_p \rho_p l}{\mu_p} = \frac{W_{01} \rho_{01} l}{\mu_{01}}, \quad (2)$$

де W_p і W_{01} – швидкість переміщення газоподібного холодоагенту при тисках P та P_{01} відповідно;

l – визначальний розмір (гідравлічний діаметр), величина постійна при прийнятих допущеннях;

μ_p і μ_{01} – коефіцієнти динамічної в'язкості газоподібного холодоагенту при тисках P та P_{01} відповідно.

Для газоподібних холодоагентів μ практично не змінюється в інтервалі тисків $0,1 \div 2,5$ МПа. Наприклад, для повітря з температурою $t = -23^\circ\text{C}$ при $P_{01} = 0,1$ МПа $\mu_{01} = 159 \cdot 10^{-7}$ Па·С; а при $P_1 = 1$ МПа $\mu_{01} = 161,2 \cdot 10^{-7}$ Па·С, $P_2 = 2$ МПа $\mu_2 = 163,2 \cdot 10^{-7}$ Па·С [5].

Прийнявши $\mu_p = \mu_{01}$ з (2) отримуємо:

$$W_p = W_{01} \frac{\rho_{01}}{\rho_p}. \quad (3)$$

Так як ГПХ, наприклад, повітря, при невеликих тисках практично веде себе як ідеальний газ, то:

$$\frac{\rho_p}{\rho_{01}} = \frac{P_p}{P_{01}}. \quad (4)$$

Втрати тиску, що визначаються гідравлічним опором, можна розрахувати за формулою [6]:

$$\Delta P = \left(\sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i \frac{L_i}{l_i} + \sum_{i=1}^{i=n} \xi_i \right) \frac{\rho W^2}{2g}, \quad (5)$$

де L_i – довжина шляху переміщення повітря;

λ_i – коефіцієнт опору тертя по довжині;

ξ_i – коефіцієнт місцевого опору;

l_i – гідравлічний діаметр.

Коефіцієнти λ_i та ξ_i залежать для обумовлених умов тільки від Re , тому при рівних Re_p та Re_{01} будуть рівні відповідні значення λ_i та ξ_i .

Падіння тиску при атмосферному тиску P_{01} буде:

$$\Delta P_{01} = \left(\sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i \frac{L_i}{l_i} + \sum_{i=1}^{i=n} \xi_i \right) \frac{\rho_{01} W_{01}^2}{2g}, \quad (6)$$

а при тиску P :

$$\Delta P_p = \left(\sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i \frac{L_i}{l_i} + \sum_{i=1}^{i=n} \xi_i \right) \frac{\rho_p W_p^2}{2g}. \quad (7)$$

Підставивши у вираз (7) значення з рівняння (3) отримуємо:

$$\Delta P_p = \left(\sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i \frac{L_i}{l_i} + \sum_{i=1}^{i=n} \xi_i \right) \frac{\rho_p \left(W_{01} \frac{\rho_{01}}{\rho_p} \right)^2}{2g} = \left(\sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i \frac{L_i}{l_i} + \sum_{i=1}^{i=n} \xi_i \right) \frac{\rho_{01}^2 W_{01}^2}{2g}. \quad (8)$$

Поділивши вираз (8) на (6)

$$\frac{\Delta P_p}{\Delta P_{01}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i \frac{L_i}{l_i} + \sum_{i=1}^{i=n} \xi_i \right) \frac{\rho_p \left(W_{01} \frac{\rho_{01}}{\rho_p} \right)^2}{2g}}{\left(\sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i \frac{L_i}{l_i} + \sum_{i=1}^{i=n} \xi_i \right) \frac{\rho_{01} W_{01}^2}{2g}}$$

після елементарних перетворень отримуємо вираз (1).

Іншою причиною, що викликає зменшення енерговитрат на переміщення ГПХ, є зменшення його об'ємних витрат при підвищенні тиску:

$$V_p = V_{01} \frac{\rho_{01}}{\rho_p}. \quad (9)$$

Дійсно, при умові постійних масових витрат G , об'ємні витрати газоподібного холодоагенту при атмосферному тиску будуть дорівнювати

$$V_{01} = \frac{G}{\rho_{01}}, \quad (10)$$

а при тиску P

$$V_p = \frac{G}{\rho_p}. \quad (11)$$

Підставивши у вираз (11) значення G з (10) отримуємо рівняння (9)

Енергозатрати на переміщення ГПХ визначаються за формулою [6]

$$L_b = \frac{V \Delta P_b}{\eta}, \quad (12)$$

де ΔP_b – напір, що створюється вентилятором $\Delta P_b = \Delta P + P_\Gamma$, де P_Γ – гідростатичний тиск шару рідини в кристалізаторі - виморожувачі, при прийнятих вище умовах величина незмінна;

η – к.к.д. вентилятора, практично незалежний від тиску.

При атмосферному тиску енерговитрати на переміщення газоподібного холодоагенту при атмосферному тиску визначаються як

$$L_{b01} = \frac{V_{01} \Delta P_{b01}}{\eta} = \frac{V_{01} (\Delta P_{b01} + P_\Gamma)}{\eta}, \quad (13)$$

а при тиску P як

$$L_{\text{вп}} = \frac{V_p \Delta P_{\text{вп}}}{\eta} = \frac{V_p (\Delta P_{\text{вп}} + P_{\Gamma})}{\eta}. \quad (14)$$

З (13) та (14) з урахуванням (1) та (9) маємо:

$$L_{\text{вп}} = L_{\text{в01}} \frac{\rho_{01}}{\rho_p} \frac{\Delta P_{\text{в01}} \frac{\rho_{01}}{\rho_p} + P_{\Gamma}}{\Delta P_{\text{в01}} + P_{\Gamma}}. \quad (15)$$

Так як $\frac{\rho_{01}}{\rho_p} < 1$ та $\frac{\Delta P_{\text{в01}} \frac{\rho_{01}}{\rho_p} + P_{\Gamma}}{\Delta P_{\text{в01}} + P_{\Gamma}} < 1$, то $L_{\text{вп}} < L_{\text{в01}}$, тобто з підвищенням тиску

газоподібного холодоагенту енерговитрати на його переміщення зменшуються.

Визначаючи загальні енерговитрати на концентрування рідин при підвищеному тиску ГПХ, необхідно враховувати залежність його розчинності в рідині від тиску та температури. Оскільки розчинність газів, наприклад, повітря з підвищенням тиску та зниженням температури збільшується, то буде збільшуватися частина повітря, яка виноситиметься потоками прісної води та концентрату, що виводяться з установки концентрування при $P_p > P_{01}$. Ці втрати повітря необхідно поповнювати, що викличе додаткові енерговитрати.

Тому повинна існувати область оптимальних значень тисків газоподібного холодоагенту, для яких сумарні енерговитрати на його переміщення та поповнення виносів будуть мінімальними.

На основі розробленої нами методики для запропонованого способу були виконані розрахунки енерговитрат на переміщення і поповнення повітря $L_{\text{в}} + L_{\text{п}}$ та загальних енерговитрат L в залежності від тиску P газоподібного холодоагенту (повітря) при концентруванні водних розчинів виморожуванням. Результати розрахунків, виконаних для концентрування взятих в якості прикладу водних розчинів NaCl від початкової концентрації 2% до кінцевої 14%, з урахуванням вищенаведених припущень, наведені на рис. 2.

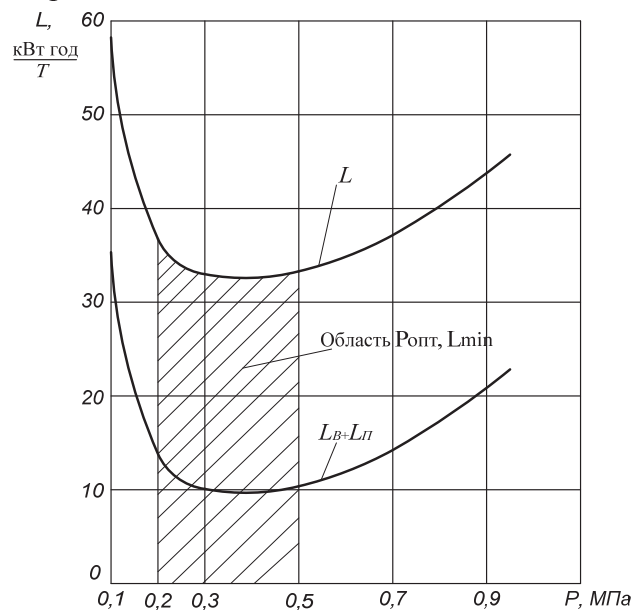


Рисунок 2 – Залежності енерговитрат L і $L_{\text{в}}+L_{\text{п}}$ від тиску газоподібного холодоагенту при концентруванні водних розчинів виморожуванням

Як видно з рисунку, існує область оптимальних тисків ГПХ: $P = 0,2 \div 0,5$ МПа, для яких $L_v + L_p$ і L мають мінімальне значення.

Слід зауважити, що відношення тисків P/P_{01} $2 \div 5$, яке визначає область мінімальних енергозатрат, хоч і отримане для конкретного прикладу концентрування водного розчину, буде справедливим і для інших мінералізованих розчинів та ступенів їх концентрування.

Висновки. Розглянуто спосіб концентрування водних розчинів виморожуванням при різних тисках газоподібного холодоагенту та запропоновано методику визначення енерговитрат при його здійсненні.

Визначено, що при підвищених тисках газоподібного холодоагенту (повітря) в області значень $2 < P/P_{01} < 5$ енерговитрати на концентрування водного розчину виморожуванням мінімальні та менші, ніж при атмосферному тиску в $1,6 \div 1,8$ рази.

Список літератури

1. Rahman M. S. and Al-Khusaibi M. Freezing-Melting Desalination Process / Desalination: Water from Water- Copyright © 2014 Scrivener Publishing LLC- Published Online: 31 JAN 2014- P. 473-502; DOI: 10.1002/9781118904855.ch10.
2. Пат. 86257 Україна, МПК C02F/22. Спосіб опріснення мінералізованої води / І.П. Ріло, В.А. Гурін, М.М. Гіроль, В.П. Востріков; заявник і патентоутримувач Національний університет водного господарства та природокористування. - №а200703596 ; заявл. 02.04.2007 ; опубл. 10.04.2009, Бюл.№ 7.
3. А. с. 1084037 СССР. Способ концентрирования водных растворов вымораживанием /Л.Ф. Бондаренко, Е.И. Таубман, Л.А. Барский, В.И. Савинкин, Б.Л. Пастушенко. №3002362/23-26 ; заявл. 10.11.1980; опубл. 07.04.1984, Бюл. № 13.
4. В.В. Клименко, І.О. Переверзев, Н.В. Ковальчук. Підвищення ефективності концентрування водних розчинів виморожуванням / Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві”. – Кіровоград: КНТУ, 2015. – С.29-30.
5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и гиджостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 626 с.
6. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1981. – 560 с.

Vasyl Klymenko, Prof., DSc., Igor Pereverzev, Assos. Prof., PhD tech. sci., Natalya Kovalchuk, lecturer
Kirovograd National Technical University, Kirovograd, Ukraine

Increasing energy efficiency of concentrating aqueous solutions using freeze

The purpose of this research is a way to increase the efficiency of concentrating aqueous solutions using freeze, by using refrigerant gas (RG). Preliminary analysis showed, that the value of energy consumption, substantially depends on the pressure, that applying to RG circulation, in the circuit inside the installation for concentrating of solutions.

To achieve the goals, we need to figure out the functional dependence of energy consumption of aqueous solutions concentrating by using RS freeze, on the pressure in the installation, and determine the optimum (minimum) value of such dependence. We have developed a methodology, and performed calculations of energy consumption on movement and replenishment of air, and general energy consumption, depending on pressure of RG (air) during a process of aqueous solution concentrating by freeze.

It's determined, that concentrating of the aqueous solution by freeze, using RG (air) at high pressure, in a range of values of $0.2 \text{ MPa} \leq P \leq 0.5 \text{ MPa}$, takes less energy consumption, then concentrating at the atmospheric pressure in $1,6 \div 1,8$ times.

concentrating of aqueous solutions, energy consumption, refrigerant gas, separation of ice, freeze

Одержано 16.12.15