

О.Д. ЮРКОВ
ДІ «УкрНДІводоканалпроект»

ОЦІНКА ДИФУЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ РОЗЧИНЕННІ НЕДОВИПАЛЕНОГО ДОЛОМІТУ ТА БРУСИТУ

Представлено розрахунок константи швидкості розчинення та коефіцієнта масовіддачі в залежності від тривалості контакту з водою, діаметра фракції завантаження, рН води та її жорсткості та аналіз процесу розчинення недовипаленого доломіту і бруситу. На основі розрахунку отримано емпіричні формули для опису дифузійних процесів при розчиненні недовипаленого доломіту та бруситу.

Ключові слова: доломіт, брусит, рН води, магній, кальцій, жорсткість, дифузія, коефіцієнт масовіддачі, константа швидкості розчинення.

Представлены расчет константы скорости растворения и коэффициента массоотдачи в зависимости от продолжительности контакта с водой, диаметра фракции загрузки, рН воды и ее жесткости и анализ процесса растворения недообожженного доломита и брусита. На основе расчета получены эмпирические формулы для описания диффузионных процессов при растворении недообожженного доломита и брусита.

Ключевые слова: доломит, брусит, рН воды, магний, кальций, жесткость, диффузия, коэффициент массоотдачи, константа скорости растворения.

Analysis of dissolving process in half roasted dolomite and brucite based on empirical calculation of dissolution rate constants and dissolving coefficient.

Key words: dolomite, brucite, pH of water, magnesium, calcium hardness, diffusion coefficient, dissolution rate constant.

Використання недовипаленого доломіту та бруситу для коригування рН води при освітленні, знебарвленні, знезалізненні, видаленні марганцю, іонів важких металів, підлюговуванні води після установок зворотного осмосу та інших технологічних заходів потребує більш повного дослідження процесу розчинення цих матеріалів.

Розчинення недовипаленого доломіту та бруситу залежить від багатьох факторів, а саме: температури води, що обробляється, її жорсткості та рН, часу контакту її з матеріалом і його поверхнею, крупності зерен досліджуваних матеріалів. Розчинення недовипаленого доломіту та бруситу являє собою доволі складний процес – вилуговування, тобто вилучення речовини розчинником (водою) з твердого скелету, при цьому, крім

масовіддачі від поверхні розподілу фаз в потік речовини, має місце і переміщення речовини в твердій фазі. Для цього процесу характерним є зменшення швидкості переносу маси в порівнянні зі швидкістю молекулярної дифузії. Тому в науково-технічній літературі [1-3] при описі вказаних процесів користуються терміном "обмежена дифузія", що пояснюється механічним опором дифузійному потоку самим каркасом твердого тіла (доломіту та бруситу) і опором руху молекул.

Для «обмеженої дифузії» Каді та Вільямсом була введена залежність через молекулярну дифузію (1)

$$D_{\text{ст}} = D \cdot \frac{1}{1 + a \cdot \frac{r}{R}}, \quad (1),$$

де $D_{\text{ст}}$ – коефіцієнт «обмеженої дифузії», D – Коефіцієнт молекулярної дифузії, r – розмір дифундуючих молекул, R – поперечний розмір пор твердого тіла; a – числовий коефіцієнт.

При розгляді процесу розчинення «обмежену дифузію» змінюють на більш загальну кінетичну характеристику, а саме: коефіцієнт масопровідності. І в якості закону, приймають, що кількість речовини, що перемістилася у твердій фазі за рахунок масопровідності, пропорційна градієнту концентрації, площі, перпендикулярної напрямку потоку речовини та часу.

Згідно з цим законом, перенесення розподілюваної речовини в твердому тілі описується рівнянням

$$dM = -K \cdot \frac{dc}{dx} \cdot dF \cdot dt, \quad (2)$$

де $\frac{dc}{dx}$ – градієнт концентрації; F – площа перпендикулярна напрямку потоку речовини; t – час; K – коефіцієнт пропорційності (коефіцієнт масопровідності), що має розмірність коефіцієнту дифузії.

Закономірним є, що коефіцієнт масопровідності не являється постійною величиною і залежить від природи процесу, ряду факторів, що визначають величину коефіцієнта молекулярної дифузії та від структури твердого тіла.

Для оцінки процесу розчинення на підставі закону масовіддачі і конвективної дифузії Щукар'єв [3] запропонував рівняння у вигляді:

$$dM = \beta \cdot (C_r - C_t) dF \cdot dt, \quad (3)$$

де β – коефіцієнт масовіддачі, що характеризує перенесення речовини конвективними та дифузійними потоками одночасно; C_r – концентрація у сприймаючій фазі біля поверхні розподілу фаз (розглядається як рівноважна концентрація); C_t – концентрація у ядрі потоку сприймаючої фази; M – кількість речовини, що про дифундувала; t – час дифузії.

Якщо прийняти одиниці виміру $[M] = [\text{кг}]$, $[F] = [\text{м}^2]$, $[t] = [\text{год}]$, $[C] = [\text{кг/м}^3]$, то одиниця вимірювання β буде

$$[\beta] = \left[\frac{M}{Ft(C_r - C_t)} \right] = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{кг}} \right] = \left[\frac{\text{м}}{\text{год}} \right]. \quad (4)$$

Коефіцієнт масовіддачі показує, яка кількість речовини передається від поверхні розподілу фаз в сприймаючу фазу через 1 м² поверхні фазового контакту на протязі однієї години при різниці концентрацій 1 кг/м³

Іншим критерієм, що характеризує процес розчинення недовипаленого доломіту та бруситу у воді, є константа швидкості розчинення, так як розчинення відноситься до гетерогенних процесів і його лімітуючою стадією є дифузія, то швидкість усього процесу визначається швидкістю дифузії. Константа швидкості розчинення, запропонована Щукар'ювим, визначається за рівнянням:

$$K_p = \frac{2,3}{t} \cdot \lg \frac{C_{\text{нас}}}{C_{\text{нас}} - C} \quad (5)$$

де t – час розчинення; $C_{\text{нас}}$ – концентрація розчину безпосередньо на поверхні розподілу фаз (на поверхні доломіту і бруситу); C – концентрація речовини, що дифундує.

Коефіцієнти масовіддачі і константа швидкості розчинення також не є постійними величинами і залежать від параметрів, що описувалися вище.

Метою даних досліджень було визначення коефіцієнта масовіддачі і константи швидкості розчинення недовипаленого доломіту і бруситу.

На підставі попередніх досліджень було встановлено, що найбільш оптимальними умовами випалу для:

- доломіту – обробка матеріалу протягом 1-ї години при температурі 800...825°C;
- бруситу – обробка матеріалу протягом 1-ї години при температурі 600...650°C;

В представлених дослідах використовувався недовипалений доломіт з зернами діаметром 1,75; 4,0; 6,0; 8,5, 12,5 мм, та брусит, крупність зерен якого становила 1,8; 3,0; 4,0; 6,0 і 12,5 мм, випалені при вищезазначених умовах.

Для визначення поверхні шару доломіту і бруситу, що припадає на одиницю його об'єму a (м²/м³) визначалася їх пористість, тобто частка незайнятого зернами об'єму ϵ , котра складала 0,5, що відповідає зернам щебеню крупністю 5...25 мм (3). Величина поверхні зерен визначалася за формулою:

$$a = a_0 (1 - \epsilon) \quad (6)$$

де a_0 – питома поверхня зерна, яка визначалася із виразу:

$$a_0 = 6 / d \quad (7)$$

Таким чином, поверхня зерен діаметром 1,75; 1,8; 4,0; 6,0; 8,5; 12,5 мм відповідно становила 1714; 1666,7; 750; 500; 366 і 254,3 м²/м³. Дослідження проводилися при однаковій температурі, що становила 20°C. Вихідна вода мала наступні показники:

- рН 3; 5; 7; 9; 11;
- жорсткість 1; 3; 5; 7; 9 мг-екв/л,
- час контакту води з недовипаленим доломітом і бруситом становив, відповідно 1; 3; 5; 7; 9 хв.

Планування експерименту проводилося за методикою Протод'яконова [4]. Визначення загальної, магнієвої, кальцієвої жорсткості та інших параметрів проводилося за стандартними методикам. Концентрація розчину безпосередньо на поверхні твердої фази визначалася шляхом відбору проб в розчині до отримання максимальної і постійної протягом тривалого часу (на протязі 25...45 год) концентрації. Для недовипаленого доломіту ця концентрація складала: $C_{\text{нас}}^{\text{заг}} = 15,9$ мг-екв/л, $C_{\text{Mg}} = 13,5$ мг-екв/л, $C_{\text{Ca}} = 2,4$ мг-екв/л, а для недовипаленого бруситу: $C_{\text{нас}} = 11,35$ мг-екв/л, $C_{\text{Mg}} = 10,805$ мг-екв/л, $C_{\text{Ca}} = 0,495$ мг-екв/л. Ці значення концентрації використовувалися при визначенні констант швидкості розчинення недовипаленого доломіту та бруситу, а також коефіцієнта масовіддачі.

При порівнянні розчинності недовипаленого доломіту та бруситу при їх контакті з вихідною водою при $\text{pH} = 6,95$, загальній $J_{\text{заг}} = 8,45$ мг-екв/л, кальцієвій $J_{\text{Ca}} = 6,08$ мг-екв/л і магнієвій жорсткості $J_{\text{Mg}} = 2,37$ мг-екв/л, впливає, що кальцієва жорсткість в обох випадках зменшується відповідно в 1,14 і 1,28 разів, магнієва жорсткість збільшується в 2,76 і 2,93 рази. Результати експерименту наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

**Зміна жорсткості та pH води при розчиненні
недовипаленого доломіту та бруситу**

№ п/п	Час, хв	Брусит				Доломіт			
		pH	Жорсткість, мг-екв/л			pH	Жорсткість, мг-екв/л		
			$J_{\text{заг}}$	J_{Mg}	J_{Ca}		$J_{\text{заг}}$	J_{Mg}	J_{Ca}
1	1	7,69	10,35	3,58	6,74	8,0	14,15	6,74	7,41
2	3	8,1	12,92	6,18	6,74	8,1	14,82	7,5	7,32
3	5	8,2	12,35	6,46	5,89	8,1	11,88	5,89	5,99
4	7	8,1	11,40	6,00	5,40	8,1	12,06	6,74	5,32
5	9	8,0	11,87	6,55	5,32	8,1	11,7	6,95	4,75

Зменшення кальцієвої жорсткості в даному випадку можна пояснити сорбцією іонів кальцію гідроксидом магнію, що утворився у розчині при $\text{pH} = 8,0$. Як показали подальші дослідження, зі збільшенням pH, процес вилучення іонів кальцію збільшується. При контакті недовипаленого доломіту та бруситу з водою протягом 9 хвилин, кінцева величина pH і загальна жорсткість води в обох випадках приблизно однакові.

При дослідженні розчинення недовипаленого бруситу враховувався той факт, що в воду надходять тільки іони магнію, а іони кальцію, присутні у вихідній воді, частково сорбуються гідроксидом магнію, що утворюється, причому величина сорбції збільшується зі збільшенням pH води.

Також були визначені константи швидкості розчинення (загальної – $K_{\text{заг}}$, магнієвої – K_{Mg} і кальцієвої – K_{Ca}) недовипаленого доломіту та бруситу, отримані на підставі формули (5), в залежності від часу їх контакту з водою, крупності зерен завантаження, значень pH і жорсткості вихідної води.

Результати експериментальних визначень констант швидкості розчинення наведені в табл.2,3 та на рис. 1-4.

Таблиця 2

Усереднені значення констант швидкості розчинення недовипаленого доломіту та бруситу в залежності від часу їх контакту з водою та значень рН вихідної води

№ п/п	t , хв.	$K_{\text{заг}}^{\text{доломіт}}$ $\times 10^{-2}$	$K_{\text{заг}}^{\text{брусит}}$ $\times 10^{-2}$	pH_0	$K_{\text{заг}}^{\text{доломіт}}$ $\times 10^{-2}$	$K_{\text{заг}}^{\text{брусит}}$ $\times 10^{-2}$
1	1	75,00	113,60	3	27,23	33,80
2	3	27,76	42,80	5	38,18	36,20
3	5	18,99	26,80	7	32,62	66,48
4	7	10,06	30,28	9	32,56	65,88
5	9	8,67	34,88	11	11,62	46,00

Таблиця 3

Усереднені значення констант швидкості розчинення недовипаленого доломіту та бруситу в залежності від жорсткості вихідної води та діаметра зерен

№ п/п	Ж, мг-екв/л	$K_{\text{заг}}^{\text{доломіт}}$ $\times 10^{-2}$	$K_{\text{заг}}^{\text{брусит}}$ $\times 10^{-2}$	Діаметр зерен	$K_{\text{заг}}^{\text{доломіт}}$ $\times 10^{-2}$	$K_{\text{заг}}^{\text{брусит}}$ $\times 10^{-2}$
1	1	19,00	33,80	1,8	29,48	34,80
2	3	26,16	36,20	3	27,66	39,60
3	5	25,10	66,48	4	32,18	39,68
4	7	34,40	65,88	6	26,64	40,88
5	9	42,96	46,00	12,5	27,84	43,80

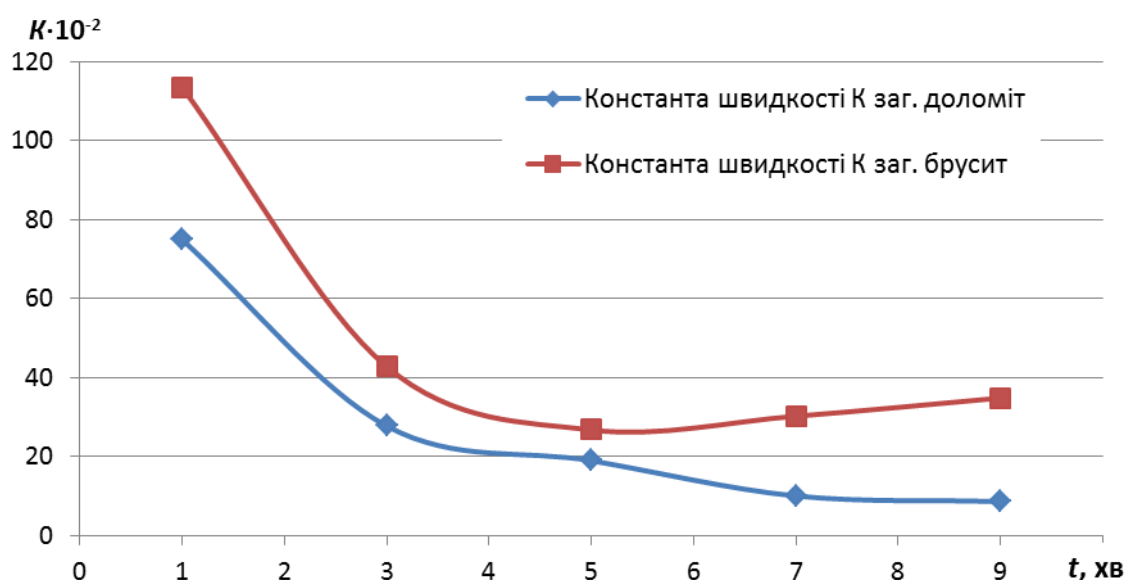


Рис. 1. Усереднені значення константи швидкості розчинення недовипаленого доломіту та бруситу в залежності від часу їх контакту з водою

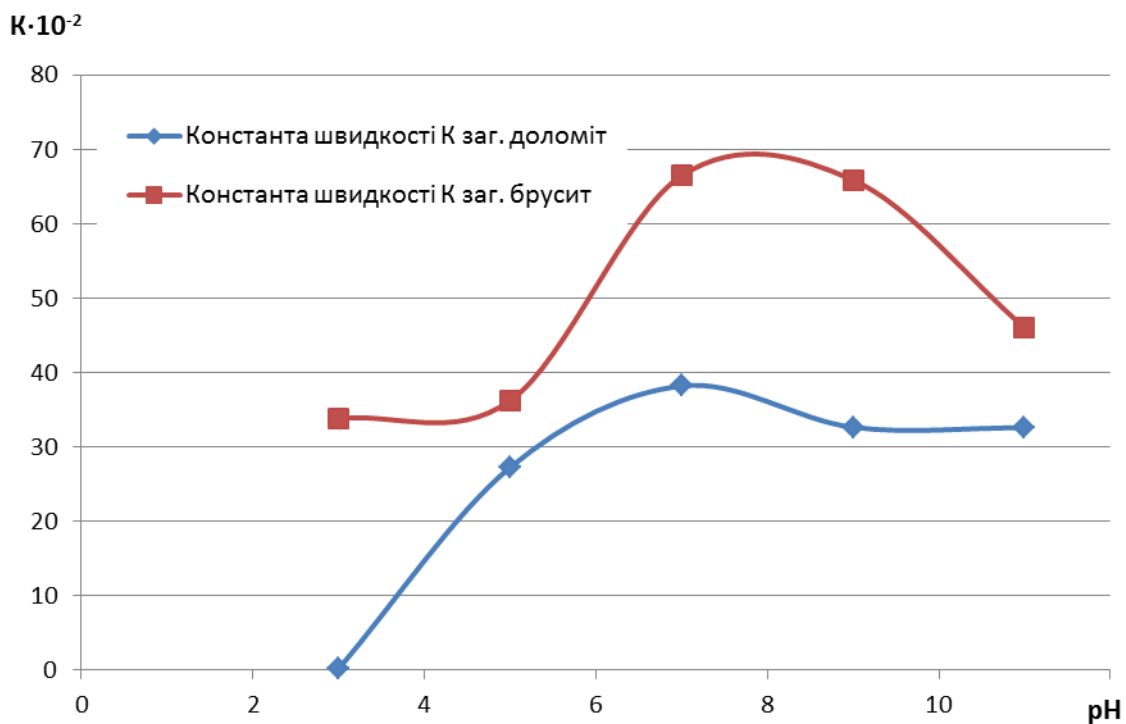


Рис. 2. Усереднені значення константи швидкості розчинення недовипаленого доломіту та бруситу в залежності від значень рН вихідної ВОДИ

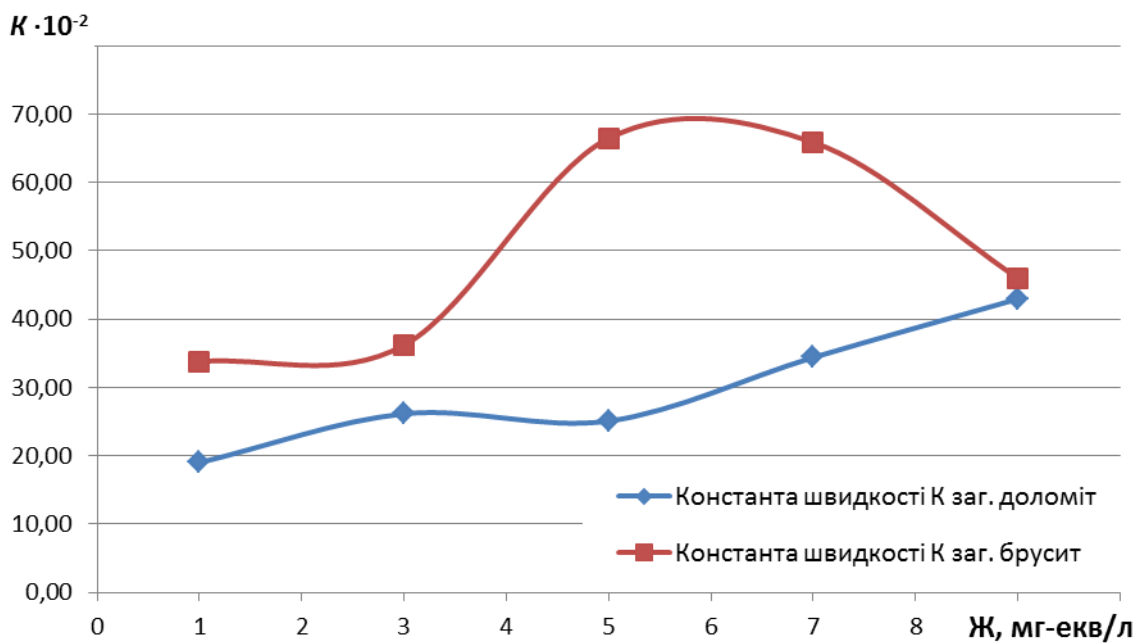


Рис. 3. Усереднені значення константи швидкості розчинення недовипаленого доломіту та бруситу в залежності від жорсткості вихідної ВОДИ

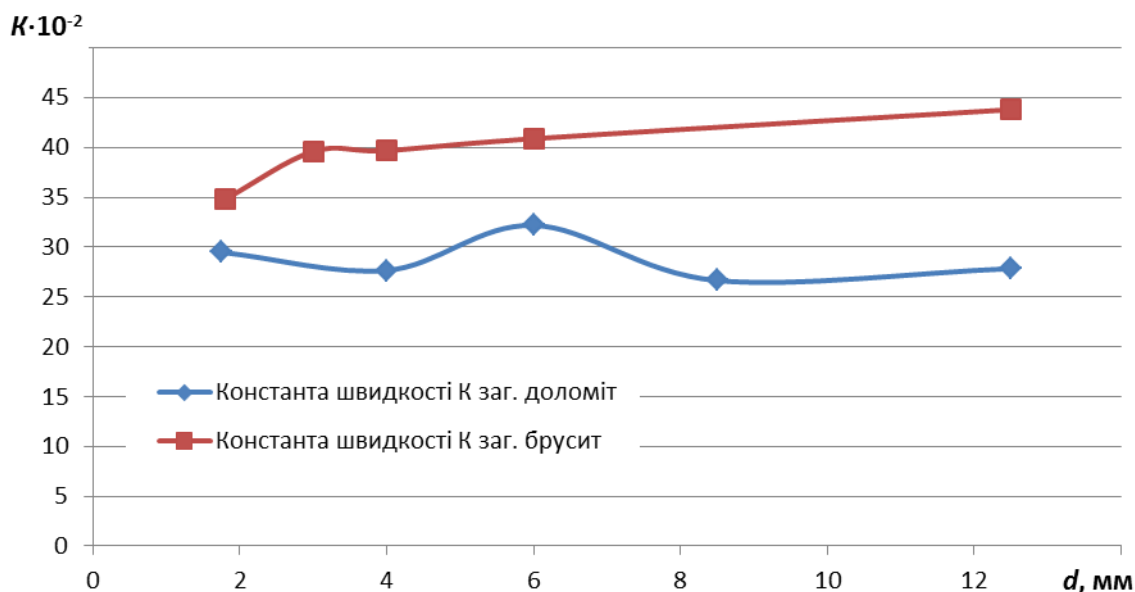


Рис. 4. Усереднені значення константи швидкості розчинення недовипаленого доломіту та бруситу в залежності від діаметру зерен завантаження

Константи швидкості розчинення недовипаленого доломіту та бруситу описані нижченаведеними емпіричними рівняннями в залежності від :

– часу контакту з водою

$$K_{\text{заг}}^{\text{доломіту}} = \frac{0,7275}{t} + 0,0183$$

$$K_{\text{заг}}^{\text{бруситу}} = -0,0855t + 0,9211$$

$$K_{\text{Mg}}^{\text{доломіту}} = \frac{0,996}{t} - 0,351$$

$$K_{\text{Mg}}^{\text{бруситу}} = 0,0866t + 0,8178$$

$$K_{\text{Ca}}^{\text{доломіту}} = \frac{1,319}{t} - 0,0487$$

– значень pH вихідної води:

$$K_{\text{заг}}^{\text{доломіту}} = -0,0021\text{pH}^4 + 0,0605\text{pH}^3 + 0,6197\text{pH}^2 + 2 \cdot 0,6544\text{pH}$$

$$K_{\text{заг}}^{\text{бруситу}} = 0,0030547\text{pH}^4 \cdot 0,0879\text{pH}^3 + 0,8835\text{pH}^2 \cdot 3,57704\text{pH} + 5,2$$

$$K_{\text{Mg}}^{\text{доломіту}} = -0,00124\text{pH}^4 + 0,0329\text{pH}^3 \cdot 0,312\text{pH}^2 + 1,25\text{pH} - 1$$

$$K_{\text{Mg}}^{\text{бруситу}} = 7,8125 \cdot 10^{-4}\text{pH}^4 \cdot 0,00194\text{pH}^3 + 0,1649\text{pH}^2 + 0,6125$$

$$K_{\text{Ca}}^{\text{доломіту}} = -0,001354\text{pH}^4 + 0,0395\text{pH}^3 + 0,4227\text{pH}^2 + 1,9234\text{pH}$$

– жорсткості вихідної води:

$$K_{\text{заг}}^{\text{доломіту}} = -0,00268\text{Ж}_{\text{заг}}^4 + 0,0058\text{Ж}_{\text{заг}}^3 + 0,417\text{Ж}_{\text{заг}}^2 + 1,168\text{Ж}_{\text{заг}} + 0,57$$

$$K_{\text{заг}}^{\text{бруситу}} = 0,00177\text{Ж}_{\text{заг}}^4 + 0,040\text{Ж}_{\text{заг}}^3 + 0,2916\text{Ж}_{\text{заг}}^2 + 0,69075\text{Ж}_{\text{заг}} + 0,75058$$

$$K_{\text{Mg}}^{\text{доломіту}} = [7 \cdot 1354 \cdot 10^{-4}]\text{Ж}_{\text{Mg}}^4 + 0,001566\text{Ж}_{\text{Mg}}^3 + 0,1086\text{Ж}_{\text{Mg}}^2 + 0,271$$

$$K_{\text{Mg}}^{\text{бруситу}} = -9,16606 \cdot 10^{-4} \text{Ж}^4 + 0,0156 \text{Ж}^3 + 0,08127 \text{Ж}^2 + 0,1908$$

$$K_{\text{Ca}}^{\text{доломіту}} = [2,630 \cdot 10^{-4}] \cdot \text{Ж}_{\text{Ca}}^4 + 0,008 \text{Ж}_{\text{Ca}}^3 + 0,0706 \cdot \text{Ж}_{\text{Ca}}^2 + 0,1714$$

– діаметра зерен завантаження:

$$K_{\text{заг}}^{\text{доломіту}} = 0,0087d + 0,337$$

$$K_{\text{заг}}^{\text{бруситу}} = -0,0025d + 0,4436$$

$$K_{\text{Mg}}^{\text{доломіту}} = 0,0051d + 0,2139$$

$$K_{\text{Mg}}^{\text{бруситу}} = 3,527 \cdot 10^{-4}d + 0,3659$$

$$K_{\text{Ca}}^{\text{доломіту}} = 0,00765d + 0,2794$$

Коефіцієнти масовіддачі β для недовипаленого доломіту та бруситу, в залежності від часу їх контакту з водою, крупності зерен завантаження, значень рН і жорсткості вихідної води, визначався за формулою (4).

Результати розрахунків коефіцієнта масовіддачі β наведені в табл.4,5 та на рис. 5-8.

Таблиця 4

Коефіцієнт масовіддачі в залежності від часу контакту з водою та рН

№ п/п	t, хв	$\beta_{\text{заг}}^{\text{доломіт}} \times 10^{-3}$	$\beta_{\text{заг}}^{\text{брусит}} \times 10^{-3}$	рН	$\beta_{\text{заг}}^{\text{доломіт}} \times 10^{-3}$	$\beta_{\text{заг}}^{\text{брусит}} \times 10^{-3}$
1	1	139,71	238,80	3	24,30	55,60
2	3	74,92	78,00	5	52,23	101,40
3	5	59,45	45,80	7	91,04	89,60
4	7	19,89	48,00	9	74,28	111,68
5	9	16,50	89,80	11	80,78	47,75

Таблиця 5

Коефіцієнт масовіддачі в залежності від жорсткості вихідної води та діаметру зерен завантаження

№ п/п	Ж, мг-екв/л	$\beta_{\text{заг}}^{\text{доломіт}} \times 10^{-3}$	$\beta_{\text{заг}}^{\text{брусит}} \times 10^{-3}$	Діаметр зерен	$\beta_{\text{заг}}^{\text{доломіт}} \times 10^{-3}$	$\beta_{\text{заг}}^{\text{брусит}} \times 10^{-3}$
1	1	20,00	55,60	1,8	16,67	54,80
2	3	45,57	101,40	3	64,19	93,80
3	5	39,63	89,60	4	62,20	111,40
4	7	61,48	111,68	6	68,39	95,75
5	9	163,83	133,25	12,5	105,28	219,00

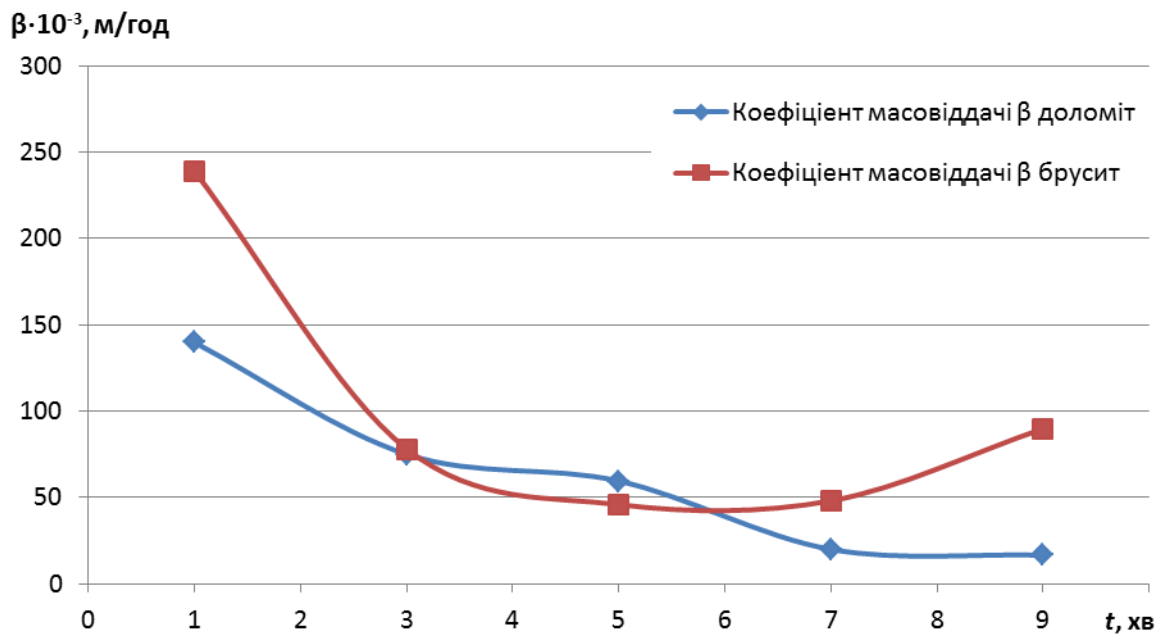


Рис. 5. Усереднені значення коефіцієнта масовіддачі β недовипаленого доломіту та бруситу в залежності від часу їх контакту з водою

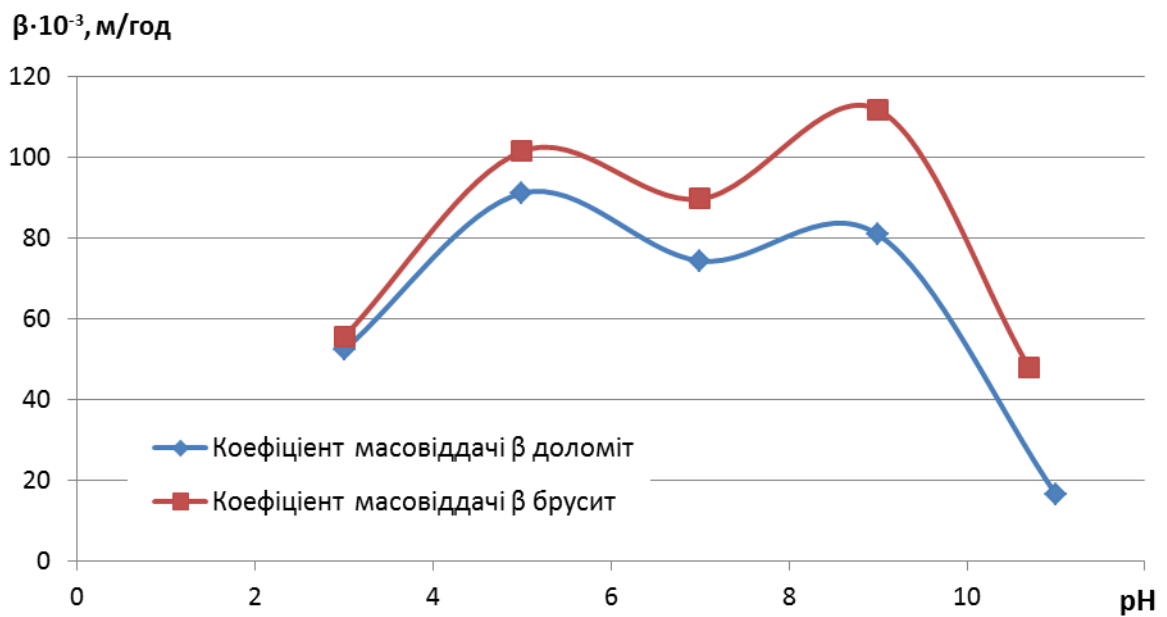


Рис. 6. Усереднені значення коефіцієнта масовіддачі β недовипаленого доломіту та бруситу в залежності від значень рН вихідної води

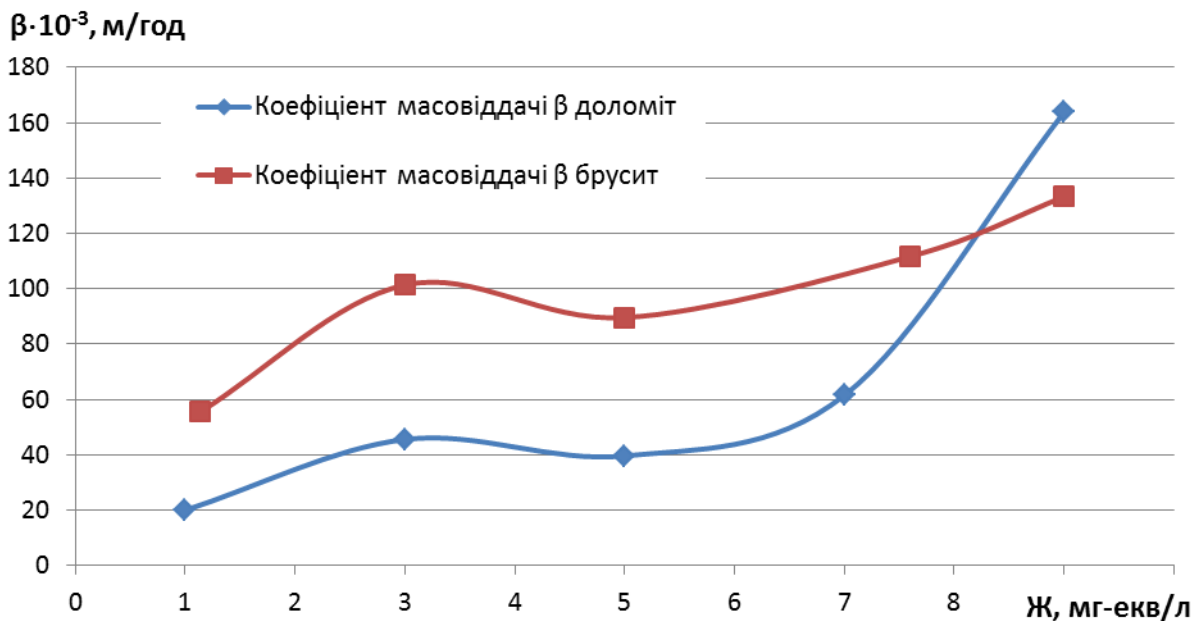


Рис. 7. Усереднені значення коефіцієнта масовіддачі β недовипаленого доломіту та бруситу в залежності від значень жорсткості вихідної води

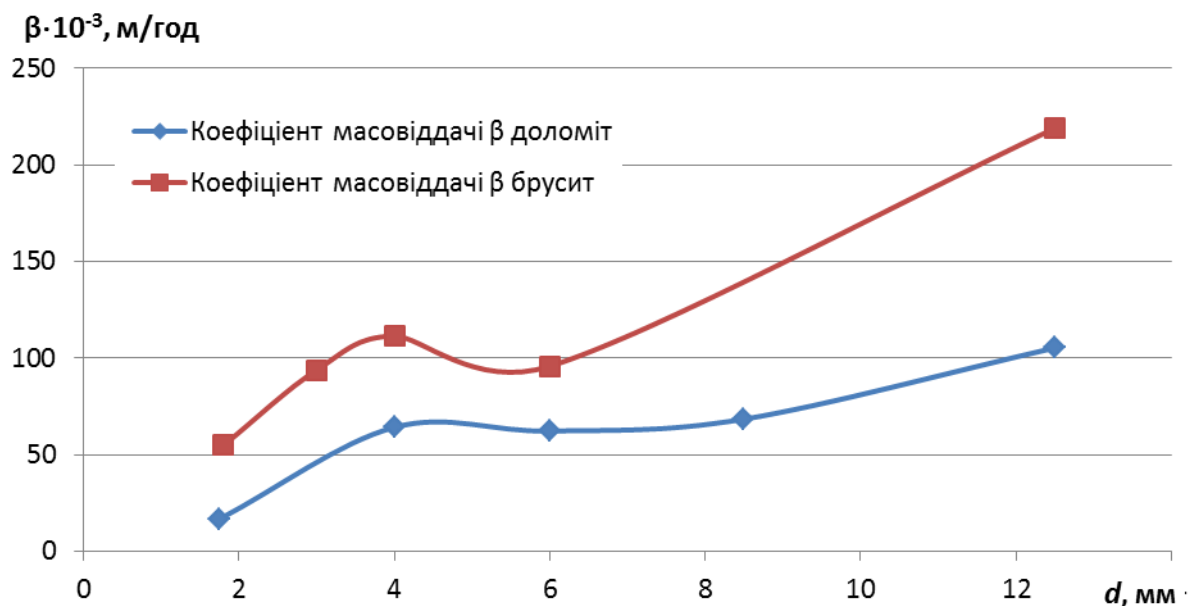


Рис. 8. Усереднені значення коефіцієнта масовіддачі β недовипаленого доломіту та бруситу в залежності від діаметра зерен завантаження

Значення коефіцієнта масовіддачі β при розчиненні недовипаленого доломіту та бруситу визначаються емпіричними

рівняннями в залежності від:

- часу контакту з водою:

$$\begin{aligned} \lg\beta_{\text{заг}}^{\text{доломіту}} &= 0,1418t + 1,939; \\ \lg\beta_{\text{заг}}^{\text{бруситу}} &= -0,00279 t^4 + 0,033t^3 + 0,1133t^2 + 0,4065t + 1; \\ \lg\beta_{\text{Mg}}^{\text{доломіту}} &= 0,1131t + 1,7303; \\ \lg\beta_{\text{Mg}}^{\text{бруситу}} &= -0,002067 t^4 + 0,0621t^3 + 0,6277t^2 + 2,4748t; \end{aligned}$$

- значень рН вихідної води:

$$\begin{aligned} \lg\beta_{\text{заг}}^{\text{бруситу}} &= -0,003487 pH^4 + 0,1002pH^3 + 1,0051pH^2 \cdot 4,084pH + 2,9; \\ \lg\beta_{\text{Mg}}^{\text{бруситу}} &= 0,0015 pH^4 + 0,035pH^3 + 0,2887pH^2 + 0,931pH + 3,744; \end{aligned}$$

- жорсткості вихідної води:

$$\begin{aligned} \lg\beta_{\text{заг}}^{\text{бруситу}} &= 0,00715 Ж^4 + 0,1461Ж^3 + 0,99546Ж^2 + 2,46685Ж + 3,9; \\ \lg\beta_{\text{Mg}}^{\text{бруситу}} &= 0,00288 Ж^4 + 0,0695Ж^3 + 0,5784Ж^2 + 1,841Ж + 4,0121; \end{aligned}$$

- діаметра зерен завантаження:

$$\begin{aligned} \lg\beta_{\text{заг}}^{\text{бруситу}} &= 0,0061309d + 2,5437; \\ \lg\beta_{\text{Mg}}^{\text{бруситу}} &= 0,015591d + 2,56187. \end{aligned}$$

Висновки

1. При розчиненні недовипаленого доломіту:

- константа швидкості розчинення істотно залежить від часу його контакту з водою (рис. 1) і в меншій мірі – від діаметра завантаження (рис. 4). Невелика різниця значень констант швидкості розчинення в залежності від діаметра зерен завантаження пояснюється тим, що зі зменшенням діаметру завантаження, поверхня, за рахунок контакту сусідніх зерен, більше заклинена і в меншій мірі омивається потоком води, а отже, виключається з масообміну;

- константа швидкості розчинення в інтервалі значень рН від 3 до 5 збільшується, при рН =7...9 – стабілізується, а потім різко зменшується (рис. 2);

- зі збільшенням жорсткості вихідної води збільшується і константа швидкості розчинення, причому різке її збільшення спостерігається в інтервалі показників жорсткості від 5,0 до 9,0 мг-екв/л (рис. 3);

- зі збільшенням часу контакту доломітового завантаження з водою коефіцієнт масовіддачі зменшується, а зі збільшенням діаметра завантаження – збільшується (рис. 5 та 8). Збільшення коефіцієнта масовіддачі β зі збільшенням діаметра завантаження можна пояснити значно меншим опором завантаження при дифузії іонів магнію і кальцію;

- найбільш інтенсивно процес масовіддачі протікає при значеннях рН від 5 до 9, потім процес значно сповільнюється (рис. 6);

- жорсткість в меншій мірі впливає на коефіцієнт масовіддачі, але в інтервалі від 5 до 9 мг-екв/л спостерігається збільшення дифузії іонів кальцію та магнію.

2. При розчиненні бруситу:

- вплив діаметра завантаження на константу швидкості розчинення істотно відзначається в інтервалі від 1,8 до 3,0 мм, в інтервалі від 3 до 12,5 мм вплив діаметра незначний (рис. 4);
- зі збільшенням значень рН до 9 і вихідної жорсткості води до 7,0 мг-екв/л, константа швидкості розчинення зростає, а потім зменшується в обох випадках (рис. 2, 3);
- зі збільшенням часу контакту недовипаленого бруситу з водою константа швидкості розчинення різко зменшується, крива, що приведена на рис. 1 має гіперболічний вид;
- коефіцієнт масовіддачі β зі збільшенням часу контакту спочатку зменшується, а потім після 5 хвилин контакту починає збільшуватися (рис. 5);
- діаметр зерен завантаження несуттєво впливає на величину коефіцієнта β (рис. 8);
- найбільш інтенсивно процес масовіддачі протікає при значеннях рН води в інтервалі від 5 до 9, потім процес значно сповільнюється (рис. 6);
- коефіцієнт β набуває найбільших значень при жорсткості 9,0 мг-екв/л (рис. 7).

Список літератури

1. *Плановський О.М., Ніколаєв І.П.* Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. – М.: Химия, 1972р. – 266 с.
2. *Аеров М.Е., Тодес О.М.* Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов, со стационарным и кипящим зернистым слоем. – Л.: Химия, 1968 р. – 81 с.
3. *Айвазов Б.В.* Практикум по химии поверхностных явлений и адсорбции. – М.: Высшая школа, 1978 р. – 208 с.
4. *Протодьяконов М.М., Тедер Р.І.* Методика рационального планирования экспериментов. – М.: Наука, 1971 р. – 76 с.

Надійшло до редакції 25.04.2016