

Сабадаш В.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД У ПОЛІ ДІЇ НАДВИСОКОЧАСТОТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Проблема очищення стічних вод від органічних забруднень дуже часто супроводжується труднощами, пов'язаними з невисокою ефективністю вилучення колоїдних частинок. За наявності білкових сполук у стічних водах виникає небезпека не тільки нецільової втрати цінних поживних речовин, але й створення поживного середовища для патогенної мікрофлори, що ускладнюватиме процес очищення стічних вод.

Ключові слова: стічні води, білок, денатурація, надвисокочастотне випромінювання, теплообмін.

Постановка проблеми. Серед галузей промисловості, що скидають значну кількість забруднених органічними речовинами стічних вод, одне з перших місць займають біотехнологічні виробництва [1, с. 133; 2, с. 233]. Відомо, що стічні води, наприклад, дріжджового виробництва найбільш забруднені органічними речовинами, що впливає на фауну та флору природних водойм.

Стічні води дріжджових заводів сильно забруднені органічними та мінеральними речовинами [2, с. 234]. Це – дріжджові клітини, білки, вуглеводи, залишки масел, хлориди, фосфати, калій, азот; БПК загального стоку становить 1 500–5 000 мг/л.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У літературних джерелах міститься багато даних про способи вилучення білків із водних розчинів, зокрема і сорбційні методи із застосуванням природних та синтетичних сорбентів. Досягнення вищих показників якості очищення стічних вод потребує розробки новітніх технологій, зокрема застосування техніки надвисоких частот (далі – НВЧ). Використання НВЧ-випромінювання у різних галузях за останні десятиліття поширилося завдяки можливостям ефективного миттєвого нагріву, висушування, стерилізації, швидкого розігріву замороженої сировини і т. д. [2, с. 233].

Надвисокі електромагнітні хвилі проникають в об'єм матеріалу, що обробляється, і діють швидко та рівномірно. Сухі матеріали не підігріваються, а ті, що містять воду, можуть повністю залишитися без вологи. Після обробки НВЧ структура матеріалу не змінюється. Ефективність перетворення енергії електромагнітного поля на тепло

зростає прямо пропорційно частоті коливань і квадрату напруженості поля. Важлива перевага НВЧ-нагріву – відсутність теплової інерційності, тобто можливість практично миттєвого включення і виключення теплового впливу на сировину, яка обробляється. Це дозволяє підтримувати високу точність регулювання процесу нагріву. ККД перетворення енергії НВЧ на тепло наближається до 100% [3, с. 29; 4, с. 172].

Виклад основного матеріалу дослідження. Було проведено серію дослідів із метою вивчення процесу денатурації розчинів білка, що моделюють стічні води підприємств харчової промисловості, у мікрохвильовій печі при дії НВЧ-випромінювання з частотою 2 450 Гц. Аналіз отриманих експериментальних даних дозволив встановити оптимальний час оброблення дисперсії альбуміну та казеїну з масовою часткою сухих речовин (СР) 5% у полі НВЧ за потужності 800 Вт. Контроль за процесом здійснювали за зміною оптичної густини досліджуваних розчинів.

Як видно з результатів дослідження, під дією НВЧ-поля відбувається зменшення концентрації білків у модельному розчині за рахунок утворення осаду денатурованого білка. У процесі денатурації спостерігається зміна оптичної густини розчину. Результати дослідження приведені на рис. 2.

Процес нагрівання модельного розчину в лабораторній установці нестационарний. Температура змінюється по осях X та Z.

Скляний контейнер, виготовлений із кварцового скла, у якому відбувається нагрівання, пропускає електромагнітне випромінювання і є неполярним діелектриком.

Поверхня контейнера контактує в конвективному і радіаційному теплообміні з навколишнім середовищем, що має більш низьку температуру.

Теплофізичні та оптичні характеристики матеріалів залежать від температури.

Вплив НВЧ випромінювання на досліджуваний об'єкт призводить до виділення тепла, що рівномірно розподіляється в об'ємі розчину [5, с. 333; 6, с. 15].

Спочатку визначимо зв'язок між напруженістю електромагнітного поля, що генерується в резонаторній НВЧ-камері, та потужністю НВЧ-генератора. Для цього скористаємося загальновідомими рівняннями електродинаміки [4, с. 172; 7, с. 45].

Питома потужність Π (Вт/м²), що переноситься електромагнітною хвилею в довільному середовищі, визначається за формулою:

$$\Pi = v\varepsilon_0 E^2 \quad (1)$$

де v – частота, Гц, $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$;

c – швидкість світла у середовищі, м/с;

$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ – швидкість світла у вакуумі м/с;

μ_0 – магнітна стала $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

μ – відносна магнітна проникність середовища.

У вільному робочому об'ємі НВЧ-камери електромагнітна хвиля переміщується зі швидкістю світла у вакуумі, а для повітря, як і для вакууму, $\varepsilon = \mu = 1$.

За умови оптимального навантаження резонаторної НВЧ-камери, питому потужність можна визначити за формулою [7, с. 312]:

$$\Pi = \frac{P}{S} \quad (2)$$

де P – потужність НВЧ-генератора, Вт;

S – площа поверхні продукту, м².

Порівнюючи праві частини виразів (1) і (2), отримаємо формулу для визначення напруженості електромагнітного поля E_0 на поверхні продукту:

$$E_0 = \sqrt{\frac{P}{\varepsilon_0 c S}} \quad (3)$$

Під впливом НВЧ-променів конфігурація білків руйнується. Змінений у такий спосіб білок називають денатурованим; він втрачає свою біологічну активність і зазвичай стає нерозчинним. Добре знайомі всім приклади денатурованого білка – варені яйця або збиті вершки. Невеликі білки, що містять близько сотні амінокислот, здатні повертати свою структуру, тобто знову набувати вихідної конфігурації. Але більшість білків перетворюється на масу поплутаних поліпептидних ланцюгів і колишню конфігурацію не відновлює.

На підставі (1) отримуємо:

$$v\varepsilon_0 E_{i0}^2 = c\varepsilon_0 E_0^2, \quad (4)$$

де E_{i0} – напруженість електромагнітного поля, яка проникає в продукт.

Звідси, з урахуванням $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ та (3), отримуємо:

$$E_{i0}^2 = \frac{P}{\sqrt{\varepsilon}\varepsilon_0 c S} \quad (5)$$

Оскільки для експерименту використовували контейнер із кварцового скла, що має значно меншу діелектричну проникність, ніж водні розчини, то нагріванням контейнера знехтуємо. Далі потрібно врахувати ефект поглинання електромагнітної енергії у продукті від поверхні до його центру, тобто розрахувати густину потужності внутрішніх джерел теплоти (рис. 2). Для цього запишемо баланс потужності для довільного внутрішнього шару продукту об'ємом dV із площиною поверхні S_V . На підставі (1) та (4) маємо:

$$\omega dV = -S_V d\Pi. \quad (6)$$

де ω – потужність внутрішніх джерел теплоти, Вт/м³,

$$\omega = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon \cdot tgl \cdot E^2; \quad (7)$$

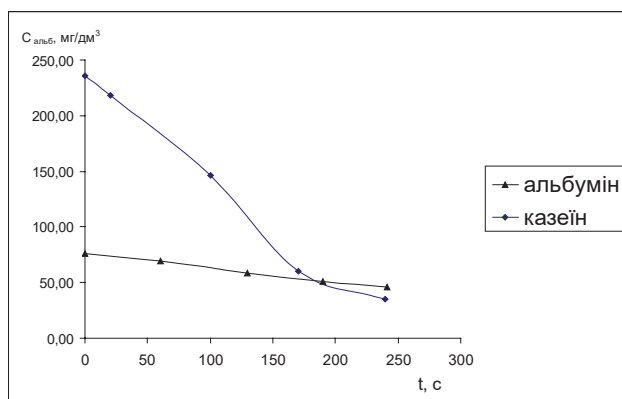


Рис. 1. Кінетика вилучення білків із модельного розчину

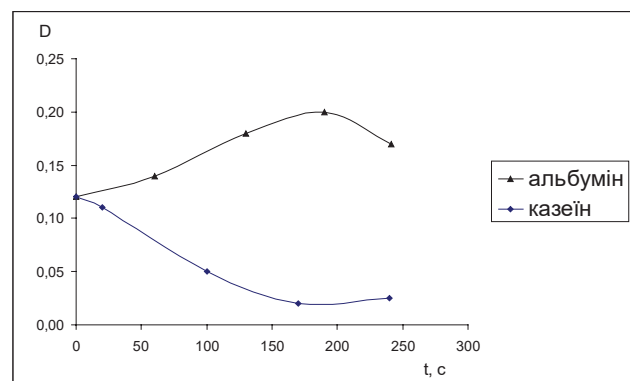


Рис. 2. Зміна оптичної густини розчинів білка

де ϵ_0 – діелектрична стала ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);
 f – частота електромагнітних коливань, Гц;
 ϵ – відносна діелектрична проникність середовища (дійсна частина);

$\text{tg } l$ – тангенс кута втрат;

E – напруженість електричного поля в продукті, В/м.

Проінтегрувавши (6), одержимо:

$$\int_0^V \omega dV = - \int_0^l S d\Pi \quad (8)$$

$$\omega = - \frac{S\Pi}{V} = - \frac{P}{V}$$

Знак «мінус» вказує на те, що напруженість внутрішнього електромагнітного поля E_i зменшується внаслідок перетворення енергії випромінювання на теплоту.

Враховуючи (4) і те, що $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ [4, стор. 172], одержимо:

$$2\pi f \epsilon_0 \epsilon \cdot \text{tg } l \cdot E^2 dV = -c \epsilon_0 \epsilon \sqrt{\epsilon} S_r dE^2 \quad (9)$$

Глибина проникнення НВЧ-енергії в діелектрик (l, м) [3, с. 105]: $l = \frac{c}{2\pi f \epsilon_0 \epsilon \cdot \text{tg } \delta}$. Розрахуємо температурний розподіл досліджуваного об'єкта та на підставі (9) отримаємо таке диференційне рівняння:

$$\frac{dE^2}{E^2} = - \frac{1}{l} \frac{dV}{S} = - \frac{1}{l} dr \quad (10)$$

де r – поточна відстань по нормалі від поверхні до внутрішнього шару продукту dV .

Рішення (10) за граничної умови $E|_{r=0} = E_0$ має вигляд:

$$E^2 = E_0^2 e^{-\frac{r}{l}} \quad (11)$$

Підставивши (11) у (7), з урахуванням (5) та $l = \frac{c}{2\pi f \epsilon_0 \epsilon \cdot \text{tg } \delta}$, отримуємо розрахункову формулу для густини джерел теплоти за внутрішнім об'ємом продукту під час його НВЧ-обробки, яка описує розподілення напруженості електромагнітного поля за внутрішнім об'ємом досліджуваного розчину. На підставі (7) середнє значення

питомої потужності внутрішніх джерел теплоти визначимо інтегруванням [7, с. 80]:

$$\omega = \frac{P}{VS} \frac{1}{R} \int_0^R e^{-\frac{r}{l}} dr = \frac{P}{V} \frac{l}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{l}}\right) \quad (12)$$

де $R = V/S$ – відношення об'єму продукту до площі його поверхні, м.

Потужність нагрівання тіла довільної форми в момент часу τ :

$$P = c' m \frac{(T_2 - T_1)}{\tau}, \quad (13)$$

де m – маса об'єкта, що піддається нагріву, кг;
 T_1 і T_2 – початкова та кінцева температури досліджуваного об'єкта С;

c' – теплоємність, Дж/(кг*К);

t – час, с.

Таким чином, рівняння (12) матиме такий вигляд:

$$\omega = \frac{cm(T_2 - T_1)}{\tau V} \frac{l}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{l}}\right)$$

Температура нагрівання тіла довільної форми в момент часу τ після впливу НВЧ-поля дорівнюватиме:

$$T_2 = \frac{\omega V \tau R}{cm l \left(1 - e^{-\frac{R}{l}}\right)} + T_1, \text{ або} \quad (14)$$

$$T_2 = \frac{P \tau R}{cm l \left(1 - e^{-\frac{R}{l}}\right)} + T_1$$

Для перевірки теоретичних даних ми дослідили зміну температури досліджуваного об'єкта. Порівняння теоретичних та експериментальних даних (рис. 4) свідчить, що наведена модель дозволяє визначати теплофізичні параметри процесу до 100°C (або для діелектриків із низьким вмістом вологи) з достатньою точністю.

Висновки. Отже, аналіз результатів наукових даних щодо використання НВЧ-енергії показав, що хвилі НВЧ можуть успішно використовуватися для вилучення білків із водних розчинів, зменшення енергозатрат, скорочення тривалості

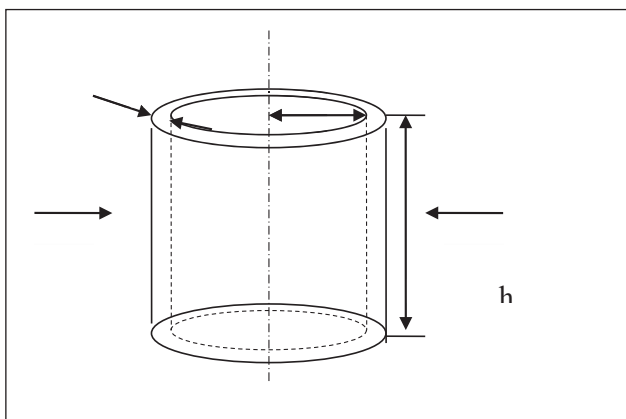


Рис. 3. Схема досліджуваного об'єкта

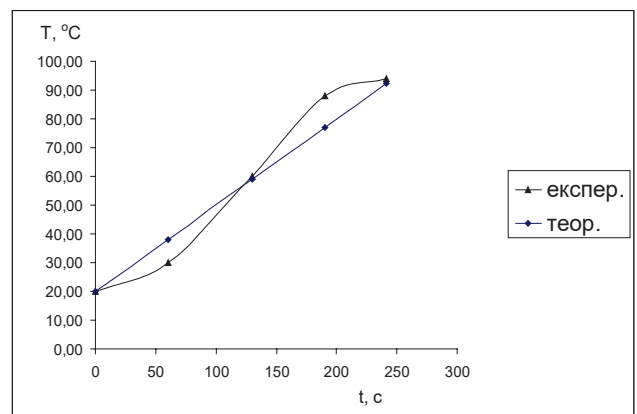


Рис. 4. Зміна температури розчинів білка під впливом НВЧ

процесу обробки, забезпечення мікробіологічної стабільності продукції. Нами було встановлено, що процес адсорбції білків відбувається тільки на зовнішній поверхні сорбента та макропор. Встановлено, що сорбційна ємність цео-

літу щодо альбуміну становить тільки 14 мг/г. адс. Перспективи більш широкого застосування НВЧ-випромінювання пов'язані з розробкою і впровадженням НВЧ-установок нового покоління.

Список літератури:

1. Гумницький Я.М., Гивлюд А.М., Сабадаш В.В. Кінетика адсорбції альбуміну природним сорбентом. Наукові праці ОНАХТ. Одеса, 2015. Вип. 47. Т. 1. С. 133–139.
2. Beszedes S., Szabo G., Geczi G. Application of thermal and microwave pre-treatments for dairy wastewater sludge. International Journal of Engineering. 2012. № 10. С. 231–235.
3. Соколов С.В., Писаренко Л.Д., Журба В.О. Теорія електромагнітного поля і основи техніки НВЧ: навч. посіб. / за заг. ред. Г.С. Воробйова. Суми: Сумський державний університет, 2011. 393 с.
4. Калинин Л.Г. Применение метода регулярного режима для определения электро- и теплофизических характеристик дисперсных систем. Наук. праці. ОНХАТ. Одеса, 2010. Вип. 37. С. 170–173.
5. Nagursky O., Gumnitsky Ya. Mass exchange of dispersed materials encapsulating in quasi-liquefaction state. Chemistry & Chemical Technology. 2015. Vol. 9. № 3. P. 333–336.
6. Кудряшов Ю.Б., Перов Ю.Ф., Рубин Ф.Б. Радиационная биофизика: радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения: учебник. М.: Физматлит, 2008. 184 с.
7. Диденко А.Н. СВЧ-энергетика. Теория и практика. М.: Наука, 2003. 447 с.

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В ПОЛЕ ДЕЙСТВИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Проблема очистки сточных вод от органических загрязнений очень часто сопровождается трудностями, связанными с невысокой эффективностью извлечения коллоидных частиц. В случае наличия белковых соединений в сточных водах возникает опасность не только нецелевой потери ценных питательных веществ, но и возникновения питательной среды для патогенной микрофлоры, которая будет затруднять процесс очистки сточных вод.

Ключевые слова: сточные воды, белок, денатурация, сверхвысокочастотное излучение, теплообмен.

WASTEWATER TREATMENT IN THE FIELD OF MICROWAVE RADIATION

The problem of wastewater treatment from organic contamination is often accompanied by difficulties associated with the low efficiency of colloidal particles removal. In the case of the presence of protein compounds in wastewater, there is a danger of non-purposeful loss of not only valuable nutrients, but also the danger of creating a nutrient medium for pathogenic microflora, which would impede the process of wastewater treatment.

Key words: sewage, protein, denaturation, microwave radiation, heat exchange.