

УДК 66.062.53

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВОДОПІДГОТОВКИ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ СОКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ

Целень Б. Я., к.т.н., п.н.с.

<https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>

Ободович О. М., д.т.н., завідувач відділом,

<https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

Недбайло А. Є., к.т.н, с.н.с.

<https://orcid.org/0000-0002-8590-5823>

Гоженко Л. П., к.т.н, с.н.с.

<https://orcid.org/0000-0002-8999-1917>

Радченко Н. Л., к.т.н, с.н.с.

<https://orcid.org/0000-0002-5315-1609>

Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна

<https://doi.org/10.31073/foodresources2024-23-22>

Предмет. Підвищення ефективності дегазації води в технологіях відновлення соків за рахунок використання в циклі вакуумної дегазації інтенсифікуючого впливу гідродинамічної кавітації, яку запропоновано реалізовувати в кавітаційному апараті роторно-пульсаційного (РПА) типу зі спеціально розробленою конструкцією. На основі попереднього розрахунку запропоновано три режими обробки для вибору оптимального, які порівнювались з обробкою без застосування впливу кавітації. **Мета.** Вивчення можливості підвищення ефективності вакуумної дегазації води за рахунок використання РПА на основі оцінки концентрації залишкового кисню, можливості досягнення активації води, яка характеризується зміною рН, ОВП, електропровідності, а також часу релаксації. Оцінкою впливу кавітації на перебіг процесу відновлення соків за кількістю розчинних сухих речовин, показником титрованої кислотності, рН та стабільності при зберіганні з визначенням мікробіологічного показника. **Методи.** Аналіз та дослідження проводились з використанням методичних підходів. **Результати.** Показали ефективним використання РПА в комплексі з вакуумною дегазацією за динамікою зниження концентрації кисню з 5.6 до 2.0 мг/л, для порівняння, при обробці вакуумною дегазацією зниження становило до 4.7 мг/л за аналогічний час обробки. Досягнуто ефекту активації води, який залишався стабільним не менше 48 годин і супроводжувався підвищенням рН від 0.9 до 1.18 залежно від режимів, зниженням ОВП від 11 до 15 мВ та зниженням електропровідності в діапазоні від 8 до 15 мкСм. Досягнуто підвищення масової частки розчинних сухих речовин, яке склало 15.43% і 15.92%, а показник рН 3.8 та 4.0, для порівняння у зразках оброблених вакуумною дегазацією – 14.3%, а рН – 3.55. Оцінка за мікробіологічними показниками показала, що більш ефективною з точки зору підвищення стійкості соку є дегазація з використанням кавітаційних ефектів, що підтверджено незначним зростанням КМАФАМ і дріжджів. Окрім цього обладнання відповідає критеріям енергоефективності, екологічності і є простим у реалізації для промислових масштабів. **Сфера застосування результатів.** В технологіях відновлення соків з низькою кислотністю.

Ключові слова: дегазація, гідродинамічна кавітація, вода, соки, активація

OPTIMIZATION OF THE WATER TREATMENT PROCESS FOR JUICE RECOVERY USING HYDRODYNAMIC CAVITATION

Bogdan Tselen, PhD, Engineering, Leading researcher

<https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>

Oleksandr Obodovych, D-r of Sc., Engineering, Head of Department

<https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

Anna Nedbailo, PhD, Engineering, Senior researcher

<https://orcid.org/0000-0002-8590-5823>

Liubov Gozhenko, PhD, Engineering, Senior researcher

<https://orcid.org/0000-0002-8999-1917>

Nataliya Radchenko, PhD, Engineering, Senior researcher

<https://orcid.org/0000-0002-5315-1609>

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Subject. Increasing the efficiency of water degassing in juice recovery technologies due to the use in the vacuum degassing cycle of the additional intensifying effect of hydrodynamic cavitation, which is proposed to be implemented in a specially designed rotary-pulsation (RPA) type cavitation apparatus. Based on the preliminary calculation, three processing modes were proposed for choosing the optimal one, which were compared with processing without cavitation. **Purpose.** To study the possibility of increasing the efficiency of vacuum degassing of water due to the use of RPA based on the assessment of the concentration of residual oxygen, the possibility of achieving activation of water, which is characterized by a change in pH, ORP, electrical conductivity, as well as relaxation time. Assessment of the impact of cavitation on the course of the juice recovery process by the amount of soluble solids, the index of titrated acidity, pH and stability during storage with the determination of the microbiological index. **Methods.** Analysis and research were carried out using methodical approaches. **Results.** Showed the effective use of RPA in a complex with vacuum degassing in terms of the dynamics of oxygen concentration reduction from 5.6 to 2.0 mg/l , for comparison, with vacuum degassing treatment the reduction was up to 4.7 mg/l for the same treatment time. A water activation effect was achieved, which remained stable for at least 3 hours and was accompanied by an increase in pH from 0.9 to 1.18 depending on the modes, a decrease in ORP from 11 to 15 mV, and a decrease in electrical conductivity in the range from 8 to 15 μS . An increase in the mass fraction of soluble solids was achieved, which amounted to 15.43% and 15.92%, and the pH value was 3.8 and 4.0, for comparison, in the samples treated with vacuum degassing, it was 14.3%, and the pH value was 3.55. The assessment of microbiological indicators showed that degassing using cavitation effects is more effective in terms of increasing the stability of the juice, which is confirmed by a slight increase in harmful microflora. In addition, the equipment meets the criteria of energy efficiency, environmental friendliness and is easy to implement on an industrial scale. **Scope of results.** In technologies for the recovery of juices with low acidity.

Key words: degassing, hydrodynamic cavitation, water, juices, activation

Постановка проблеми. Забезпечення якісної водопідготовки на підприємствах харчової промисловості є однією із головних умов успішного розвитку усієї галузі, однак, разом із цим, важливим завданням залишається енергоощадність та екологічність цих технологій. Забезпечення відповідності сучасних технологій водопідготовки цим критеріям є актуальною проблемою для науковців і практиків.

Актуальність. Сучасні промислові системи водопідготовки достатньо складні та багатоетапні оскільки вода, яка використовується для виробництва харчових продуктів є багатоцільовою і присутня на всіх етапах виробництва. Традиційно такі технології включають: механічну очистку відстоюванням, фільтрацією; знезараження хімічними методами (хлорування, озонування, коагуляція, флокуляція) чи фізичними (ультразвук, ультрафіолет чи їх комбінації); знезалізнення фільтрацією чи хімічними методами; пом'якшення, наприклад в іонообмінних апаратах; кондиціонування хімічними або фізичними методами (магнітний чи радіочастотний). Послідовність кожного із перелічених етапів та їх комбінація можуть варіюватись, що і визначає екологічність, енергоефективність та продуктивність технології. Для ряду харчових виробництв існують додаткові вимоги до водопідготовки. До них відносять виробництво відновленням різних концентратів, соків, молочних продуктів, нектарів, морсів, безалкогольних соковмісних напоїв та вин. В технологіях відновлення цих продуктів особливо важливими є відсутність у воді розчинених газів, які спричиняють окислення продукту. Тобто крім традиційних необхідно окремо проводити дегазацію води. В таких технологіях водопідготовки дегазація води самостійно не проводиться, а досягається переважно у комплексі, з іншими методами, зокрема, знезалізненням, пом'якшенням чи знесоленням. Проводять її нагріванням у термічних чи вакуумних дегазаторах, мембранних апаратах, адсорбційних колонах, які досить громіздкі, енерговитратні і високовартісні. Як альтернативу можуть додавати різноманітні реагенти, які мають здатність зв'язувати газові молекули піднімаючи їх на поверхню, що потребує їх наступного видалення. У цьому випадку необхідність подальшої нейтралізації залишків реагентів у обробленій воді значно

ускладнює загальну технологію водопідготовки. Для усунення цих недоліків авторами запропоновано дегазацію води проводити у циклі з кавітаційною обробкою. На сьогоднішній день найбільш перспективними вважають [1, 2] акустичну кавітацію та гідродинамічну. Однак, через ряд причин, акустична на даному етапі не використовується в промислових масштабах через енергоємність обладнання, складність конструкцій та високу вартість виготовлення. За даними роботи [3] такі конструкції не розраховані для використання в промислових масштабах через складність обробки значних обсягів рідин та малий коефіцієнт корисної дії. Цих недоліків на думку [4] позбавлена гідродинамічна кавітація. Тому авторами альтернативно запропоновано використання саме гідродинамічної кавітаційної обробки, яку пропонується проводити у роторно-пульсаційному апараті (далі РПА). Використання даного типу обладнання у циклі з дегазацією у повній мірі відповідає критеріям екологічності, енергоефективності та є простим у реалізації для промислових масштабів.

Протягом багатьох років в ІТТФ НАНУ на основі концепції дискретно-імпульсного вводу енергії (ДІВЕ) проводяться розробки високоефективних РПА різної конфігурації для реалізації процесів емульгування, диспергування, гомогенізації та знезараження різних рідинних систем для потреб не лише харчової промисловості, а й хімічної, фармацевтичної, АПК і ін. Серед них [5] доведена ефективність використання РПА у комплексі з дегазацією для нейтралізації кислого конденсату, який утворюється в міських котельнях при згорянні природного газу, де нейтралізація конденсату досягається за рахунок підвищення показника рН та видалення розчинених газів в умовах створюваного інтенсивного кавітаційного впливу. В рамках даного напрямку проведено попередні дослідження та розроблено РПА спеціальної конструкції для використання у циклі вакуумної дегазації води, як інтенсифікуючий фактор на прикладі технології відновлення соків. За попередніми розрахунками [5] використання запропонованого підходу дозволить в режимі рециркуляційної обробки (РПА-вакуумна ємність з розпилом) знизити поріг кавітації та створити більш жорсткі умови перебігу процесу, зокрема, за рахунок особливостей конструкції РПА. Таким чином за короткий час обробки можливо одночасно досягати глибокої дегазації, знезараження та активації води при якій вона переходить у метастабільний стан змінюючи свої фізико-хімічні властивості і розчинну здатність. Дані припущення зроблено на основі аналізу багаточисельних досліджень І. М. Федоткіна, О. Ф. Немчина, Т. М. Вітенько, а також розробок А. А. Комарова, Sun H. та ін., які свідчать про ефективність застосування кавітаційного методу для активації води. В роботах [3,6] є дані, що вода після активації протягом певного проміжку часу (48...72 год) набуває властивість підвищеної хімічної активності, змінюються її електрохімічні показники: рН, ОВП, електропровідність, зростає її проникність та розчинна здатність, що є важливими показниками в технологіях відновлення соків, напоїв і т.д. За даними цих же авторів дія інтенсивної гідродинамічної кавітації веде до послаблення енергії водневих зв'язків між молекулами та одночасного збільшення їх рухливості. З позиції хімічних змін у воді автори [4] спираючись на роботи І.М. Федоткіна та на основі отриманих ними практичних даних зміни рН, дали ґрунтовне пояснення механізму іонізації води під впливом гідродинамічного кавітаційного поля. Зокрема, пояснюючи, що в умовах гідродинамічної кавітації відбувається вивільнення водневих зв'язків, деструктування каркасу води і клатральних комплексів аж до однієї молекули води. В інших своїх роботах [4] привели дані про утворення під впливом кавітаційного поля у воді вільних іонів, які здатні прискорювати проникнення речовин інтенсифікуючи різні масообмінні процеси, а також зробили припущення про утворення радикалів гідроксилу, які мають підвищену реакційну здатність та здатність знезараження води. Цю думку поділяють автори [7,8], які наводять інформацію про утворення гідроксильних радикалів внаслідок колапсу бульбашок та виникаючих високих температур, тиску і, як наслідок, завдяки своїй окислювальній властивості мають здатність до знезараження.

Даний механізм, етапи та схему утворення радикалів усередині бульбашки, що руйнується, та їх дисперсії в об'ємних розчинах детально розглянуто у [9]. Тому мета роботи дослідити можливість підвищення ефективності вакуумної дегазації води в технологіях відновлення соків за рахунок використання в циклі дегазації інтенсивних гідродинамічних кавітаційних ефектів створюваних РПА спеціальної конструкції. Пропонований підхід дозволить в режимі рециркуляції за короткий проміжок часу досягти більш глибокої дегазації, активації води та її знезараження, що в подальшому може впливати на властивості відновленого соку та стабільність при зберіганні. Для досягнення даної мети **сформульовано завдання:**

- Оцінити ефективність процесу дегазації води реалізованої сумісно з дією гідродинамічної кавітації і порівняти її з вакуумною дегазацією води без використання кавітації за залишковою концентрацією O_2 ;

- Дослідити можливість досягнення активації води в результаті сумісного впливу дегазації та гідродинамічної кавітації за зміною її фізико-хімічних показників (рН, ОВП, електропровідності) та визначити стійкість отриманого ефекту у часі (час релаксації);

- Оцінити ефективність впливу створюваних ефектів на перебіг процесу відновлення соків за кількістю розчинних сухих речовин, показником титрованої кислотності та рН відновленого соку та дослідити динаміку мікробіологічного показника у відновленому продукті в процесі зберігання.

Матеріали і методи. 1–3 – зразки обробленої води при трьох режимних параметрах, які включають дію гідродинамічної кавітації створюваної РПА; 4 – зразок води дегазованої вакуумуванням без використання кавітації; 5 – необроблений зразок води з централізованого водопостачання м. Києва згідно ДСанПіН 2.2.4-171-10 2.2.4-171-10. Для обробки води використовували дослідну установку (рис.1) принцип роботи якої побудований на використанні сукупності гідродинамічних кавітаційних ефектів створюваних способом ДІВЕ [10] та реалізованих у РПА спеціальної конструкції (ротатор-статор-ротатор), який працює в контурі рециркуляції вакуумної камери дегазації. В схемі дослідної установки РПА спеціальної конструкції з'єднаний напряму з вакуумною камерою в якій за допомогою вакуумного насоса створювався тиск нижчий за атмосферний з відведенням видалених газів. Їх комплексна дія дозволяє знизити поріг кавітації та створити більш інтенсивний динамічний вплив на оброблювану воду. В ході експериментів параметри тиску в камері контролювались вакуумметром, а тиск в системі – манометрами, які розташовано в системі перед та за РПА. Контроль температури води здійснювався перед обробкою та після обробки для кожного з дослідних режимів. Обробку води здійснювали шляхом рециркуляції в контурі РПА – вакуумна камера протягом 4 хвилин при інтенсивному впливі височастотних гідродинамічних коливань при змінному абсолютному тиску в діапазоні 0.05...0.15 МПа з подальшим розпилюванням у вакуумну камеру для досягнення глибокої дегазації (контур 1). Режимні параметри обирались за попереднім теоретичним розрахунком. Для порівняння обробку води проводили дегазацією вакуумуванням без використання РПА (контур 2). Для дегазації води вакуумуванням використовували цикл 4-х хвилинної обробки при тиску 0.014 МПа. з виключенням РПА із контуру. Обробка води проводилась з використанням РПА при різних режимних параметрах 1–3 для визначення найбільш ефективного та, для порівняння, з вакуумною дегазацією при режимі 4. Режимні параметри 1–3 передбачали: 1 – обробка протягом 2 хв. з розпилюванням у вакуумну камеру при тиску 0.1 МПа з подальшим продовженням обробки протягом 2 хв. з розпилюванням у вакуумну камеру при тиску 0.014 МПа; 2 – обробка протягом 4 хв. з розпилюванням у вакуумну камеру при тиску 0.1 МПа; 3 – обробка протягом 4 хв. з розпилюванням у вакуумну камеру при тиску 0.014 МПа; 4 – дегазація вакуумуванням протягом 4 хв з розпилюванням у камеру при тиску 0.014 МПа.



Рис. 1. Дослідна установка для дегазації води

1 – цикл дегазації РПА – вакуумна камера;

2 – дегазація у вакуумній камері

всього часу обробки для кожного з дослідних режимів (1–4). Показники рН, ОВП, електропровідність та розчинений кисень фіксувалися в кожному з оброблених зразків води відразу після обробки, через 1 годину, 2 години, 3 години, 5 годин, 10 годин, 24 години та 48 годин з наступним порівнянням зі зразками необробленої води (контрольний). Для точності отриманих результатів експерименти повторювали тричі для напрацювання масиву даних та їх наступної обробки використовуючи програму Microsoft Excel. Вимірювання рН, ОВП, електропровідності проводили на портативному приладі EZODO PCT-407 (рН-метр/кондуктометр/ОВП-метр) згідно стандартної інструкції з експлуатації. Вимірювання концентрації розчиненого кисню в зразках проводили на оксиметрі EZODO PDO-408 згідно стандартної інструкції з експлуатації без контакту з повітрям. Підготовка лабораторного посуду для експериментів проводилась згідно МВ 10.2.1-113-2005 Санітарно-мікробіологічний контроль якості питної води п.6. Відбір проб води здійснювали в стерильні колби об'ємом 500 мл. з пробкою без доступу повітря. Для відновлення соку брали виноградний концентрат з концентрацією сухих речовин, Brix (%) 65, кислотністю 1.5%, який відновлювали у зразках води №1, №3, котрі отримано при режимах обробки 1 і 3 та у зразках води №4 дегазованої вакуумуванням. Для цього у концентрат вносили у першому експерименті підготовлені зразки води №1, у другому – №3 і у третьому зразки №4 зі співвідношенням компонентів 1:3.0 (1 частина концентрату на 3.0 частини води). Температура зразків води становила 20°C. Підготовлені зразки соку піддавались спочатку перемішуванню та наступній фільтрації для видалення частинок і осаду. Визначення масової частки розчинних сухих речовин у відновлених зразках соку та титрованої кислотності проводили за ДСТУ 7159:2010 Консерви. Соки відновлені. Для визначення патогенної мікрофлори, а також загального мікробного числа використано методику мембранної фільтрації за якою передбачено визначення числа мезофільних аеробних і факультативно анаеробних мікроорганізмів здатних утворювати колонії на поживному агарі згідно МВ 10.2.1-113-2005 Санітарно-мікробіологічний контроль якості питної води п.7. Для визначення дріжджів – ДСТУ ISO 7954:2006.

Результати досліджень показали, що всі запропоновані режимні параметри обробки з використанням кавітаційних ефектів створюваних РПА дозволяють досягти глибокої дегазації води протягом 4 хвилин обробки (таблиця 1). Однак максимальне зниження концентрації кисню досягнуто для зразків оброблених за режимними параметрами №3 від 5.6 до 2.0 мг/л, а мінімальне – для №1 від 5.6 до 3.0 мг/л. Порівняння досягнутих результатів зі зразками води №4 дегазованої вакуумуванням показало меншу динаміку зниження концентрації кисню до 4.7 мг/л протягом аналогічного часу обробки.

Аналізуючи результати таблиці 2 зміни фізико-хімічних показників води, яка піддавалась кавітаційному впливу встановлено, що для трьох пропонованих режимів

можливо досягати ефекту активації, на що вказує підвищення рН, зниження ОВП та електропровідності. Необхідно додати, що після обробки показники залишались стабільними протягом 48 годин. Зростання рН варіювалось від 0.9 до 1.18 залежно від режимів 1-3, а для зразків оброблених вакуумною дегазацією рН зріс на 0.15.

Таблиця 1

Зміна вмісту кисню у зразках води дегазованої за різними режимами

Зразок води	Концентрація кисню O ₂ , мг/л після обробки, год			
	після обробки	1	24	48
№1	3.0	3.0	3.0	3.0
№2	2.8	2.8	2.8	2.8
№3	2.0	2.0	2.0	2.0
№ 4 Дегазована вакуумуванням	4.7	4.7	4.7	4.7
№5 Необроблена	5.6	5.6	5.6	5.6

Таблиця 2

Зміна фізико-хімічних показників води дегазованої за різними режимами

Зразок води	рН	ОВП, мВ	Електропровідність, мкСм
№1	8.15	154.0	333.0
№2	8.4	153.0	329.0
№3	8.43	150.0	326.0
№ 4 Дегазована вакуумуванням	7.4	158.0	338.0
№5 Необроблена	7.25	165.0	341.0

що в умовах вакууму вода починає кипіти за нижчої температури, а процес кипіння пов'язаний з поглинанням тепла з води, що і пояснює незначне зниження. Отже серед досліджуваних режимних параметрів найменших змін зазнав зразок № 4, що пройшов дегазацію вакуумуванням протягом 4 хв з розпилюванням у камеру при тиску 0.014 МПа. для якого рН зріс на 0.15, ОВП знизився на 7мВ., а електропровідність на 3 мкСм. Найбільших змін зазнав зразок води №3 оброблений при дослідному режимі №3, який передбачав обробку в РПА при змінному абсолютному тиску 0.05÷0.15 МПа з розпилюванням у вакуумну камеру при тиску 0.014 МПа протягом 4 хвилин в режимі рециркуляції. При даних режимах було досягнуто найбільш глибокої дегазації – від 5.6 мг/л O₂ до 2.0 мг/л O₂, найбільшого зростання рН від 7.25 до 8.43, зниження ОВП до 150.0 мВ та електропровідності до 326.0 мкСм. При цьому, приріст температури за час обробки склав 4°C. Тобто аналізуючи дослідні режими можна стверджувати, що регулюючи інтенсивність кавітаційного колапсу парогазових бульбашок у воді або зовсім уникаючи його шляхом задання необхідних параметрів можна регулювати співвідношення концентрацій мономерних молекул води і вільних радикалів аж до практично повної відсутності останніх. Реалізувати їх можна за рахунок регулювання значень тиску і температури рідини та газового середовища в основних робочих вузлах контролюючи при цьому амплітудно-частотну характеристику і величину звукового тиску в генераторі високочастотних гідродинамічних коливань. Дані по вмісту кисню в зразках активованої води (таблиця 1) свідчать про глибоку дегазацію води, що також впливає на зміну її водневого показника. Механізм перебігу процесу в кавітаційних течіях висвітлено в попередніх роботах [10]. При використанні води для відновлення соків досягнуті ефекти

Паралельне вимірювання ОВП показало, зниження значень від 11 до 15 мВ, однак, без переходу до негативних значень, а електропровідності від 8 до 15 мкСм залежно від режимів. При цьому, для зразків води №4 обробленої вакуумуванням встановлено, що електропровідність знизилась на 3 мкСм, а ОВП на 7 мВ.

Результати вимірювань температури води обробленої за трьома дослідними режимами показали незалежне стійке лінійне підвищення температури, яке склало від 3°C (режим 1) до 4°C (режим 3) протягом 4 хвилин обробки тобто на 0.8...1°C за хвилину. Отримані дані лінійної залежності зростання температури корелюються з даними досліджень Z. Zheng. При цьому, для зразків №4 спостерігалось незначне зниження температури на 0.3°C за 4 хвилини обробки, яке можна пояснити тим,

глибокої дегазації та активації можуть створювати позитивний вплив, оскільки досить часто залишкові гази спричиняють окислення компонентів соку та погіршують його органолептичні властивості. З іншої сторони досягнутий ефект активованої води може сприяти більш швидкому і ефективному розчиненню сухих речовин при відновленні соків, покращуючи їх однорідність і якість, а зміна рН дозволить коригувати рН відновлених соків, які мають низьку кислотність концентрату та потребують додавання цукру, що веде до підвищення їх калорійності, наприклад, апельсиновий, виноградний, грейпфрутовий, журавлиний, лайму.

Експериментальним шляхом було встановлено, що ефект активації води для всіх режимних параметрів обробки зберігався майже без змін протягом 48 годин. За даний проміжок часу на графіках 1–3 (рисунк 2,3) спостерігали утворення невеликої полички та подальшу незначну динаміку показників, що можна пояснити частковим поверненням системи до стану рівноваги та можливістю перебігу зворотних хімічних реакцій, які і зумовлюють подальше незначне зниження рН (на 0.2 од). Для порівняння, значення рН зразку води дегазованої вакуумуванням показало зниження на 0.1од протягом 48 годин без утворення характерної полички. У той же час для необробленої води протягом аналогічного часу рН поступово зростав і через 48 годин приріст становив 0.3 од.

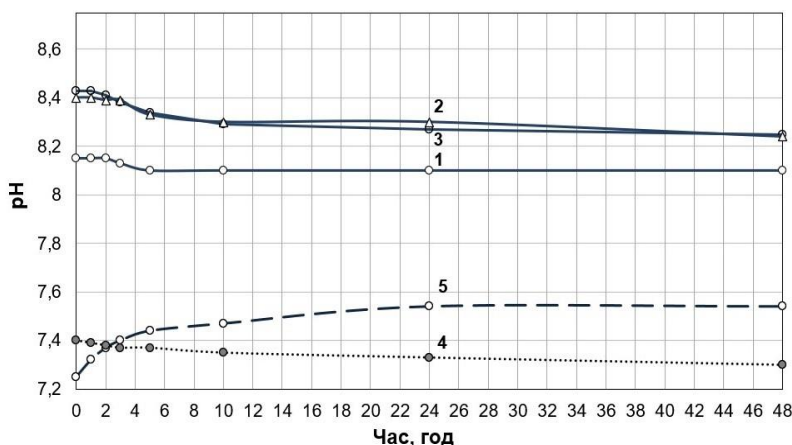


Рис. 2. Зміна водневого показника в часі зразків води:

1 – обробленої за режимом № 1; 2 – обробленої за режимом № 2; 3 – обробленої за режимом № 3; 4 – дегазованої вакуумуванням; 5 – необробленої

Паралельний контроль ОВП (рис. 3а) протягом 24 години показав поступове зростання, яке для зразків № 3 показало найбільший приріст від 150 до 161 мВ. При цьому найбільш інтенсивне підвищення виявилось протягом 3 годин після обробки зі 150 до 155 мВ, що підтверджує попереднє припущення про час релаксації системи. Подібна закономірність зберігалась для зразку №1, однак зростання становило від 154 до 165 мВ та зразків

№2 для них ОВП зріс від 153 до 163 мВ.

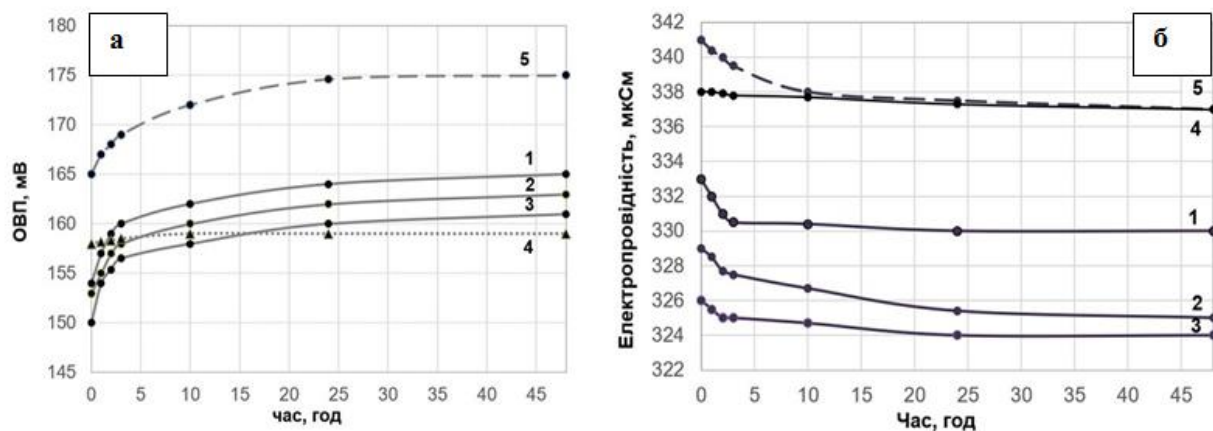


Рис. 3. Зміна окисно-відновного потенціалу в часі зразків води:

1 – обробленої за режимом № 1; 2 – обробленої за режимом № 2; 3 – обробленої за режимом № 3; 4 – дегазованої вакуумуванням; 5 – необробленої

Для зразків №4 оброблених вакуумуванням значення окисно-відновного потенціалу залишилось майже незмінним, а для необробленої води змінився на 1 мВ. Під час зберігання зразків №1...3 активованої води спостерігалось також незначне зниження електропровідності (рис. 3б), яка інтенсивніше зменшувалась протягом 3 годин після активації і далі протягом наступних 48 годин практично не змінювалась. Зокрема для зразків №1...3 на 2...4 мкСм., а для дегазованої води вакуумуванням за аналогічний час обробки залишилась практично незмінною. Для порівняння, електропровідність зразків необробленої води також знизилась на 4 мкСм. Отже, отримані дані показали ефективність застосування способу ДІВЕ, який реалізує ефекти гідродинамічної кавітації для досягнення ефекту активації води, та її глибокої дегазації. Оцінку ефективності впливу досягнутих ефектів на перебіг процесу відновлення соку проводили за показниками кількості розчинних сухих речовин, титрованої кислотності і рН відновленого соку та наступним їх порівнянням зі зразками соку відновленими у воді обробленій вакуумною дегазацією. Результати досліджень, які представлено в таблиці 3 показали, що активація води сприяє ефективнішому розчиненню сухих речовин, зокрема, при відновленні зразків виноградного соку у зразках №1 і №3 масова частка розчинних сухих речовин становила 15.43% і 15.92% а у зразках №4 оброблених вакуумною дегазацією – 14.3%. Відомо, що соки з вищим вмістом сухих речовин зазвичай характеризуються більш насиченим смаком, ароматом, мають вищу в'язкість та кращу текстуру з точки зору органолептики, що є безумовною перевагою. Масова частка титрованих кислот для дослідних зразків соку склала 0.375%. При цьому, показник рН відрізнявся і для зразків соків відновлених у активованій воді він був вище та становив 3.8 і 4.0, у той час, як рН соку відновленого у воді дегазованої вакуумуванням проявив вищу кислотність – 3.55. Така різниця суттєво впливає на смакові властивості соків та на їх стабільність при зберіганні. Відомо, що соки з вищим рН характеризуються більш м'яким і приємним смаком та є менш агресивними при вживанні, у той час, як соки з нижчим рН більш кислі і різкі на смак, проте більш стабільні при зберіганні.

Таблиця 3

Зміна властивостей відновлених зразків виноградного соку

Показник	Сік відновлений у зразках води		
	№1	№3	№4
Масова частка розчинних сухих речовин, %	15.43	15.92	14.3
Масова частка титрованих кислот (у перерахунку на винну кислоту)	0.375	0.375	0.375
рН	3.8	4.0	3.55

Тому наступним етапом стало порівняння стабільності зразків за мікробіологічними показниками. Основні зміни включають ріст бактерій, дріжджів, патогенної мікрофлори і їх найменша присутність може призвести до зниження стабільності при зберіганні та псування в цілому. Мікробіологічна стабільність зразків соків визначалась за КМАФАМ, патогенною мікрофлорою та наявністю дріжджів. Як видно із результатів таблиці 4, найбільш ефективною з точки зору підвищення стійкості соку є попередня дегазація з використанням кавітаційних ефектів. Незначне зростання мікробіологічних показників з 3.0 до 3.5 КУО/см³ в зразках №1 та з 2.0 до 2.2 КУО/см³ в зразках №3 протягом 24 годин зберігання можна пояснити створюваним кавітаційною дією ефектом знезараження. Він пов'язаний з тим, що утворені кавітаційні бульбашки переміщуються до зон високого тиску, де вони миттєво руйнуються (схлопуються), що створює локальні температури до 5000°C та тиск до 1000 атм. Такий мікро-вибух механічно руйнує клітини мікроорганізмів серед яких бактерії, віруси та ін. З іншої сторони кавітаційний вплив супроводжується утворенням гідроксильних радикалів, котрі завдяки своїй окислювальній властивості мають додатково здатність до знищення шкідливої мікрофлори у обробленій воді.

З отриманих результатів видно, що більш динамічним виявилось зростання мікробіологічних показників відновленого соку у воді обробленій вакуумуванням, хоча нижчий рН мав би пригнітити активний ріст шкідливої мікрофлори. Тобто вплив кавітаційного ефекту є домінуючим фактором пригнічення шкідливої мікрофлори. Результати показали відсутність дріжджів у зразках №1 та №3 та зростання їх кількості в зразках соку відновлених у воді, що пройшла вакуумну дегазацію з $3 \cdot 10$ до $5 \cdot 10^2$ КУО/г. Також отримані дані свідчать відсутність патогенної мікрофлори в усіх зразках.

Таблиця 4

Мікробіологічні показники відновленого виноградного соку при зберіганні

Показник	Час зберігання, 0 год			Час зберігання, 24 год		
	№1	№3	№4	№1	№3	№4
КМАФАМ, КУО/см ³	3.0	2.0	$7.4 \cdot 10$	3.5	2.2	$7.5 \cdot 10^2$
Дріжджі, КУО/г	-	-	$3 \cdot 10$	-	-	$5 \cdot 10^2$
Патогенна мікрофлора	-	-	-	-	-	-

Висновки. Встановлено, що всі запропоновані режимні параметри обробки з використанням кавітаційних ефектів створюваних РПА дозволяють досягти глибокої дегазації води вже протягом 4 хвилин обробки. Максимальне зниження концентрації O_2 з 5.6 до 2.0 мг/л спостерігалось для зразків №3, а мінімальне з 5.6 до 3.0 мг/л для зразків води №1. Порівняння з вакуумною дегазацією води без використання кавітації показало найменше зниження концентрації O_2 до 4.7 мг/л протягом аналогічного часу обробки.

Встановлено, що для трьох пропонувананих режимів можливо досягати ефекту активації води, що підтверджується підвищенням рН, яке варіювалось від 0.9 до 1.18 залежно від режимів 1-3, зниження ОВП від 11 до 15 мВ та зниження електропровідності в діапазоні від 8 до 15 мкСм. При цьому, приріст температури під час обробки склав $0.8 \dots 1^\circ\text{C}$ за хвилину. Встановлено, що після обробки показники активованої води для зразків 1-3 залишались практично стабільними 48 годин. При порівнянні з вакуумною дегазацією показник рН зразків зріс на 0.15, електропровідність знизилась на 3 мкСм, а ОВП на 7 мВ. Найбільших змін зазнав зразок води №3 оброблений в РПА при змінному абсолютному тиску $0.05 \div 0.15$ МПа з розпилюванням у вакуумну камеру при тиску 0.014 МПа протягом 4 хвилин в режимі рециркуляції для якого спостерігалось найбільше зростання рН від 7.25 до 8.43, зниження ОВП до 150.0 мВ та електропровідності до 326.0 мкСм.

Встановлено, що використання впливу кавітаційних ефектів підвищує ефективність процесу відновлення соків. Зокрема, при відновленні виноградного соку у зразках активованої води масова частка розчинних сухих речовин становила 15.43% і 15.92%, показник рН 3.8 та 4.0, а у зразках оброблених вакуумною дегазацією – 14.3%, при цьому, рН показав більшу кислотність – 3.55. Масова частка титрованих кислот склала 0.375. Оцінка за мікробіологічними показниками показала, що найбільш ефективною з точки зору підвищення стійкості соку є попередня дегазація з використанням кавітаційних ефектів, оскільки спостерігалось незначне зростання КМАФАМ для зразків №1 і №3 з 3.2 до 3.7 КУО/г(см³) та з 2.0 до 2.2 КУО/г(см³), у той час, як динаміка для зразків №4 зростає з $7.4 \cdot 10$ до $7.5 \cdot 10^2$ КУО/г(см³), а кількість дріжджів з $3 \cdot 10$ до $5 \cdot 10^2$ КУО/г протягом 24 годин зберігання. Встановлено, що патогенна мікрофлора в усіх зразках відсутня.

Одержані результати можуть використовуватись в технологіях відновлення соків з низькою кислотністю.

Бібліографія

1. Веретельник Т. И., Цыба А. А., Себко А. В. Влияние гидродинамической кавитационной обработки на электрохимические показатели водопроводной воды. Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. 2014. № 3 (72), С. 97–103 <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c4fff15a-8621-4bce-b3ab-d15591aa87ff/content>.

2. Ashokkumar M., Krasulya O. & Shestakov S., Rink R. A new look at cavitation and the applications of its liquid-phase effects in the processing of food and fuel. *Applied Physics Research*. 2012. Vol. 4, № 1, P. 19–29 <http://dx.doi.org/10.5539/apr.v4n1p19>.

3. Вітенько Т., Сілін Р., Баран Б., Гордєєв А. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах: монографія. Хмельницький нац. ун-т. Хмельницький: ХНУ, 2009. 254 с.

4. Вітенько Т.М., Гащин О.Р. Гідродинамічна кавітація як один із способів активації рідких середовищ. Наукові праці ОНАХТ. 2006, Вип. 28, Т. 2 С. 20–23 https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=uk&user=61aJLWUAAAAAJ&cstart=20&pagesize=80&citation_for_view=61aJLWUAAAAAJ:EYYDruWGBBe4C.

5. Dolinskiy A., Tselen B., Ivanitskiy G., Konyk A., Radchenko N., Hartviih A. Using of the energydiscrete-pulse inputmethod forthe condensatenatural gas combustion productsneutralizing, *Scientific Works*. 2017. Vol. 81(1), P. 9-14 <https://doi.org/10.15673/swonaft.v81i1.663>.

6. Маргуліс М. Сонолюмінісценція. Успіхи фіз. наук. 2000, 170(3), С. 263–287.

7. Chaudhuri J., Chatterjee D. Modelling of chemical kinetics in the presence of hydrodynamic cavitation for wastewater treatment applications. *Chemical Engineering Science*. 2024. 295. 120167. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120167>.

8. Kalmár C., Turányi T., Zsély I., Papp M., Hegedűs F. The importance of chemical mechanisms in sonochemical modelling. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. 83. 105925 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105925>.

9. Peng K., Qin F., Jiang R., Qu W. Production and dispersion of free radicals from transient cavitation Bubbles: An integrated numerical scheme and applications. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. 88, 106067.

10. Tselen B., Ivanitsky G., Obodovych O., Radchenko, N., Nedbailo A., Gozhenko L. Discrete-pulsed energy input-based method for neutralisation of the acidic condensate. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2023. 25, 215–221. <https://doi.org/10.54740/ros.2023.021>.

References

1. Veretelnik, T., Tsyba, A., Sebko, A. (2014). Vliyanye hydrodynamicheskoi kavytatsyonnoi obrabotky na elektrokhimicheskiye pokazately vodoprovodnoi vody. *Visnyk NTUU «KPI». Seriya mashynobuduvannya*. 3 (72), P. 97–103 <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c4fff15a-8621-4bce-b3ab-d15591aa87ff/content> [in russian].

2. Ashokkumar, M., Krasulya, O., Shestakov, S., Rink, R. (2012). A new look at cavitation and the applications of its liquid-phase effects in the processing of food and fuel. *Applied Physics Research*. Vol. 4, No. 1, P. 19–29 <http://dx.doi.org/10.5539/apr.v4n1p19>.

3. Vitenko, T., Silin, R., Baran, B., Hordieiev, A. (2009). Hidrodynamichna kavitatsiia u masoobminnykh, khimichnykh i biolohichnykh protsesakh: monohrafiia. *Khmelnitskyi nats. un-t. Khmelnitskyi: KhNU*, 254. [in Ukrainian].

4. Vitenko, T., Hashchyn, O. (2006). Hidrodynamichna kavitatsiia yak odyin iz sposobiv aktyvatsii ridkykh seredovyshch. *Naukovi pratsi ONAKhT*. 28, Т. 2. 20–23. https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=uk&user=61aJLWUAAAAAJ&cstart=20&pagesize=80&citation_for_view=61aJLWUAAAAAJ:EYYDruWGBBe4C [in Ukrainian]

5. Dolinskiy, A., Tselen, B., Ivanitskiy, G., Konyk, A., Radchenko, N., Hartviih, A. (2017). Using of the energydiscrete-pulse inputmethod forthe condensatenatural gas combustion productsneutralizing, *Scientific Works*. Vol. 81(1), P. 9-14 <https://doi.org/10.15673/swonaft.v81i1.663> [in Ukrainian].

6. Marhulis, M. Sonoluminisentsiia. *Uspikhy fiz. nauk*. 2000, 170(3), P. 263–287.

7. Chaudhuri, J., Chatterjee, D. (2024). Modelling of chemical kinetics in the presence of hydrodynamic cavitation for wastewater treatment applications. *Chemical Engineering Science*. 295. 120167. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120167>.

8. Kalmár, C., Turányi, T., Zsély, I., Papp, M., Hegedűs, F. (2022). The importance of chemical mechanisms in sonochemical modelling. *Ultrasonics Sonochemistry*. 83. 105925 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105925>.

9. Peng, K., Qin, F., Jiang, R., Qu, W. (2022). Production and dispersion of free radicals from transient cavitation Bubbles: An integrated numerical scheme and applications. *Ultrasonics Sonochemistry*. 88, 106067.

10. Tselen, B., Ivanitsky, G., Obodovych, O., Radchenko, N., Nedbailo, A., Gozhenko, L. (2023). Discrete-pulsed energy input-based method for neutralisation of the acidic condensate. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 25, 215–221. <https://doi.org/10.54740/ros.2023.021>.