

УДК 66.021: 532.528

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНІЦІЮВАННЯ КАВІТАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ У ПУЛЬСАЦІЙНОМУ ЕКСТРАКТОРІ З КОМБІНОВАНИМ ГІДРОДИНАМІЧНИМ ПРИСТРОЄМ

Ободович О.М.¹, д-р техн. наук, Іваницький Г.К.², д-р техн. наук, Гоженко Л.П.³, канд. техн. наук, Целень Б.Я.⁴, канд. техн. наук, Недбайло А.Є.⁵, канд. техн. наук

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, г. н. с., проф., вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, tdsittf@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проф., с. н. с., пр-т Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна;

³Інститут технічної теплофізики НАН України, пр. н. с., с. н. с., вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, gergey4@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0486-2359>

⁴Інститут технічної теплофізики НАН України, с. н. с., вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, itt_f_tds@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8999-1917>

⁵Інститут технічної теплофізики НАН України, пр. н. с., с. н. с., вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, itt_f_tds@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>

⁵Інститут технічної теплофізики НАН України, с. н. с., вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, itt_f_tds@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8590-5823>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.4>

Аналітичні дослідження проведено з метою визначення додаткових способів інтенсифікації кавітаційних ефектів у пульсаційному екстракторі, який працює в режимі кавітаційного реактора. Розглянуто принцип роботи пульсаційного екстрактора з комбінованим гідродинамічним пристроєм, в якому ініціюється потужний комплекс кавітаційних механізмів, що дозволяє обробляти різноманітну сировину з широким спектром властивостей при порівняно невеликих енергозатратах.

Analytical studies were carried out with the aim of determining additional methods of intensification of cavitation effects in a pulsation extractor operating in the mode of a cavitation reactor. The principle of operation of a pulsation extractor with a combined hydrodynamic device is considered, in which a powerful complex of cavitation mechanisms is initiated, which allows processing a variety of raw materials with a wide range of properties with relatively low energy consumption.

Бібл. 15, рис. 3

Ключові слова: пульсаційний екстрактор, гідродинамічна кавітація, сопло Вентурі, моделювання, енергоефективність.

P – тиск;

T – температура;

τ – час;

max – максимальне значення;

min – мінімальне значення;

L – довжина;

c – швидкість;

R – радіус;

PBT – ресивер високого тиску;

PNT – ресивер низького тиску.

Індекси:

0 – початкове значення;

a – атмосферний;

sat – насичений;

comp – компресор;

vac – вакуум;

l – рідина;

ac – акустична;

b – бульбашка.

Вступ. Вирішення актуальної проблеми створення ефективних фітопрепаратів, біологічно-активних добавок, продуктів функціонального призначення пов'язано з розробками і широким впровадженням сучасних промислових енергоефективних екстракційних способів переробки сировини. У сучасних способах інтенсифікації

процесу екстракції: ультразвукових, електроімпульсних, вібраційних [1 – 3] і т. п., використовуються фізико-хімічні ефекти акустичної або гідродинамічної кавітації [4, 5], що сприяє пришвидшенню процесів екстракції, забезпечуючи при цьому більший вихід цільових речовин [6]. Періодична зміна тиску при стисканні та

розрідженні покращує проникнення екстрагента в матеріал (частинку сировини) з наступним його виходом з матеріалу. Ініціювання динамічних ефектів кавітації сприяє розриву клітинних структур, що прискорює процес переходу цільових речовин в екстрагент за рахунок їх вимивання. Разом з тим в промисловості використання більшості подібних методів недоцільне, насамперед, з точки зору надзвичайно високих енергетичних витрат. У деяких випадках широко використовувані на сьогодні методи роторно-пульсаційної обробки з використанням гідродинамічної кавітації не практичні у застосуванні через специфічні абразивні та реологічні показники оброблюваної сировини.

Постановка проблеми. Розроблені в ІТТФ НАН України на основі принципу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) [7] пульсаційні диспергатори різної модифікації широко використовуються в різних виробництвах як перемішувальні пристрої, гомогенізатори, емульгатори та екстрактори [4, 8 – 10]. Проте, проблема досліджень інтенсифікації процесу екстракції та розроблення енергоефективного екстрактора з комбінованим гідродинамічним пристроєм залишається актуальною.

Мета роботи і постановка завдань досліджень. Дослідження проведено з метою вибору раціональної конструкції та оптимальних режимів роботи пульсаційного екстрактора для максимальної реалізації в ньому кавітаційних ефектів. У цій роботі розглядається принцип роботи ефективного пульсаційного екстрактора з комбінованим гідродинамічним пристроєм, в якому ініціюється широкий комплекс кавітаційних механізмів і який дозволяє обробляти сировину з широким спектром структурно-механічних і реологічних характеристик при порівняно невеликих енерговитратах. Завдання досліджень полягає у з'ясуванні основних динамічних ефектів у пульсаційному екстракторі з комбінованим гідродинамічним пристроєм, отриманні залежності зміни тиску в рідині з часом, залежності зміни з часом розміру бульбашок кавітаційного кластера та імпульсів тиску при кавітаційному захопленні бульбашок кластера у цих зонах.

Аналіз кавітаційних механізмів. Реалізація ефектів кавітації в різних типів пристроях є одним з ефективних способів керування гідродинамічними, термічними, хімічними процесами, що відбуваються як на макро, так і нанорівні. У теорії дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) кавітація розглядається як жорсткий механізм, який забезпечує в дискретних локальних точках оброблюваного середовища високу питому потужність в імпульсі при мінімальних витратах введеної

енергії [7]. Для ініціювання кавітації необхідно, щоб в об'ємі рідини з тиском p_{l0} і температурою T_l тиск швидко знизився від p_{l0} до $p_{l1} < p_{sat}(T_l)$, а потім різко піднявся до значення $p_{l2} > p_{sat}(T_l)$, де $p_{sat}(T_l)$ – тиск насиченої пари. Виділена в імпульсі питома потужність тим вища, чим швидше відбудеться скидання з наступним підвищенням тиску. Критерії ефективності кавітаційного впливу, сформовані на основі принципу ДІВЕ, можна представити у вигляді: $|p_{l0} - p_{l1}| / \Delta\tau_{0-1} \rightarrow \max$, і $|p_{l2} - p_{l1}| / \Delta\tau_{1-2} \rightarrow \max$ [7]. При розробці ефективних кавітаційних реакторів, у тому числі й із застосуванням комбінованих гідродинамічних пристроїв, обов'язково потрібно враховувати ці критерії ефективності кавітаційного впливу.

Слід зазначити, що для прискорення внутрішнього переносу не обов'язково виконувати умову $p_{l1} < p_{sat}(T_l)$ для кавітаційного скидання рідини. Почергове стиснення та розрідження рідини всередині частинок при періодичній зміні тиску створює ефект «губки». Такий спосіб забезпечує прискорення конвективного масопереносу, що запобігає руйнуванню клітин і його відносять до кавітаційних ефектів [6].

Принцип роботи пульсаційного екстрактора з комбінованим гідродинамічним пристроєм. В ІТТФ НАН України на основі модифікації існуючого кавітаційного пульсатора [4, 11 – 13] створено принципово новий тип екстрактора пульсаційного типу в якому вперше для посилення кавітаційних ефектів застосовано комбінований гідродинамічний пристрій у склад якого входить сопло Вентурі [14]. Конструктивна схема цього апарата, яка показана на рис. 1 і принцип його роботи практично ті ж самі, як і у традиційного пульсатора з активною мембраною, описаного в роботах [4, 7, 8, 15], але з певною принциповою відмінністю.

Робоча камера 1 виконана у вигляді короткого циліндра верхня і нижня основи якого мають форму кульового сегмента. Через круглий отвір у верхній основі камера за допомогою горизонтальної труби 2, на якій встановлено сопло Вентурі 3, з'єднана із завантажувальною ємністю 4, що містить оброблювану рідинну суміш із заданою температурою T_b , що знаходиться під атмосферним тиском p_a . Отвір у нижній основі з'єднує робочу камеру з газовим трактом. Швидкодіючий електромагнітний клапан 5 дозволяє періодично через задані інтервали часу підключати камеру або до ресивера високого тиску (РВТ) 6, під'єданого до компресора, або до ресивера низького тиску (РНТ) 7, під'єданого до вакуумного насоса. У процесі екстрагування показники тиску в ресиверах підтримуються постійними в інтервалах значень $p_{comp} = 0.2 \div 0.4$ МПа і $p_{vac} = 0.001 \div 0.003$ МПа

відповідно. Тиск в ресиверах p_{comp} і p_{vac} так само з тривалістю підключення кожного ресивера до робочої камери τ_{comp} і τ_{vac} є режимними параметрами установки. У центрі робочої камери розташована, виготовлена з міцної резини, діафрагма, що жорстко з'єднана по довжині кола з бічною поверхнею камери. Під дією тиску центральна частина діафрагми щільно прилягає позмінно до верхньої або нижньої основи, перекриваючи, відповідно, верхній або нижній отвір камери. На стадії підключення камери до РВТ діафрагма переміщується до верхньої основи, інтенсивно виштовхуючи рідину з камери по трубі через сопло Вентурі до завантажувальної ємності. До моменту перекриття верхнього отвору швидкість течії набуває значення порядку 10 м/с, і рідина рухається вгору по трубі без контакту з діафрагмою.

Після відриву рідини від діафрагми утворюється порожнина з безперервно зростаючим об'ємом, що поступово заповнюється парою. Через швидкісний рух стовпа рідини тиск пари всередині порожнини суттєво нижчий тиску насиченої пари $p_{sat}(T_l)$. Тиск в рідині на межі з порожниною миттєво знижується від величини $p_{comp} \approx 0.3 \text{ МПа}$ до $p_l < p_{sat}(T_l) \approx 0.002 \text{ МПа}$, що приводить до закипання рідини поблизу вільної поверхні. Через різницю тисків $p_a - p_{sat}(T_l)$ і дії сил тертя об стінку рідина в трубі швидко гальмує і потім, змінюючи напрям, рухається зі зростаючою швидкістю у напрямку камери доки не досягне вхідного отвору в камеру. Якщо до цього моменту камера під'єднана до РВТ то вхід в камеру перекритий і рідина в трубі одразу зупиняється. Якщо ж камера

через електромагнітний клапан вже з'єднана з РНТ то рідина з труби швидко заповнює камеру і зупиняється на діафрагмі, що прилягає до нижньої основи. В обох випадках миттєва зупинка потоку ініціює явище гідравлічного удару. При наступному під'єднанні камери з РВТ цикл повторюється. Частота повторень циклу в залежності від заданого режиму становить 0.5 – 1.5 Гц.

Новизна конструкції полягає в тому, що в середину з'єднувальної труби між камерою та ємністю розміщено сопло Вентурі заданої геометрії. При проходженні в трубі рідини, швидкість якої періодично змінюється за величиною і напрямом, в соплі Вентурі відбувається періодична зміна тиску і створюються динамічні кавітаційні ефекти, що сукупно сприяє конвективному переносу цільової речовини через капіляри і пори частинок сировини. Як показали попередні дослідження апарата, застосування в пульсаційному екстракторі сопла Вентурі суттєво скорочує час екстракції, створює можливість роздрібнюватися частинки і суттєво збільшити за рахунок цього вихід цільової речовини. Ще однією особливістю конструкції апарата є те, що, як видно з рис.1 камеру, на відміну від традиційної схеми [4], розміщено під завантажувальною ємністю. Це не впливає на режими роботи апарата, але запобігає накопиченню повітря всередині робочої камери в процесі роботи, що посилює ефективність кавітаційної дії. Ще одна особливість полягає в тому, що зазвичай сопло Вентурі, при застосуванні його в системах рециркуляції в якості кавітатора, працює в умовах, коли через сопло безперервно проходить стаціонарний турбулентний



Рис. 1. Схема пульсаційного екстрактора з комбінованим гідродинамічним пристроєм:

1 – робоча камера; 2 – труба; 3 – сопло Вентурі; 4 – завантажувальна ємність; 5 – електромагнітний клапан; 6 – ресивер високого тиску(РВТ); 7 – ресивер низького тиску (РНТ)

Fig. 1. Scheme of a pulsation extractor with a combined hydrodynamic device:

1 – working camera; 2 – tube; 3 – Venturi nozzle; 4 – loading capacity; 5 – solenoid valve; 6 – high pressure receiver (HPR); 7 – low pressure receiver (LPR)

і односпрямований потік рідини [2, 5, 7]. Це дозволяє визначити раціональну геометрію сопла і оптимальні режими його роботи. В даному випадку в соплі Вентурі періодично змінюється і швидкість, і напрямок течії через сопло, що потребує спеціальної розробки аналітичної методики розрахунку оптимальних режимів роботи апарата.

Результати аналізу ініціювання ефектів у пульсаційному екстракторі. У роботах [7, 11 – 13] представлено математичні моделі, що адекватно описують гідро- і аеродинамічні процеси в рідинному та газовому трактах пульсаційного апарата кавітаційного типу з урахуванням теплофізичних і реологічних характеристик оброблюваної рідинної суміші. У рамках моделі розраховуються поточні значення тиску і швидкості рідини в робочій камері та трубі, значення швидкості і тиску повітря у каналах, що з'єднує камеру з ресиверами, а також термічні ефекти, що виникають під час роботи апарата. На рис. 2а представлено для одного з режимів роботи апарата розрахункові дані зміни тиску в рідині у трубі на виході із камери протягом п'яти циклів роботи. Для порівняння на рис. 2 б для того ж режиму представлено результати експериментальних вимірювань тиску в трубі на виході з камери за допомогою чутливого датчика тиску, покази якого виводяться на екран осцилографа. Довжина труби становить 60 см, а діаметр – 2.5 см. Сопло Вентурі встановлено поперечним розрізом на відстані половини довжини труби.

При швидкості входу в трубу порядку 10 м/с рідина під дією протитиску на виході $p_a = 0.1$ МПа і сили тертя об стінку швидко сповільнюється. Через 50 мс після перекриття верхнього отвору рідина зупиняється на відстані 26 см від входу в робочу камеру, після

чого починає переміщатись у зворотному напрямі. При гальмуванні величина від'ємного прискорення досягає -3300 м/с². При зворотному русі рідини максимальна величина прискорення досягає 850 м/с².

На рис. 2 видно, що при заданому тиску в РВТ $p_{comp} = 0.3$ МПа амплітуда імпульсів тиску в момент гідрравлічного удару перевищує 0.6 МПа. Гідроудар супроводжується високочастотним чергуванням затухаючих імпульсів стиснення і розрідження в рідині. Спостерігається, що при перекритті діафрагмою верхнього отвору камери тиск у рідині різко знижується до нульового рівня.

Проведений за допомогою моделі аналіз дозволяє вибирати раціональну геометрію обладнання і оптимальні режими його роботи залежно від характеристик оброблюваного середовища за критеріями максимальної продуктивності і мінімізації енерговитрат.

Основними динамічними ефектами, що реалізуються в даному пульсаційному апараті та суттєво інтенсифікують процес екстракції є динамічна дія струменю, що витікає з великою швидкістю з робочої камери і сприяє інтенсивному турбулентному перемішуванню суміші; дія гідроудару, що виникає при гальмуванні зворотного потоку, що супроводжується високочастотною зміною стиснення і розрідження рідини в трубі та, як наслідок, виникнення вторинних кавітаційних ефектів. Основні кавітаційні ефекти виникають після виходу рідини з робочої камери в трубу, а також з сопла Вентурі в трубу.

При розриві суцільності потоку рідини в момент перекриття отвору діафрагмою тиск на верхній межі рідини $p_{10} = 0.3$ МПа миттєво знижується до деякого

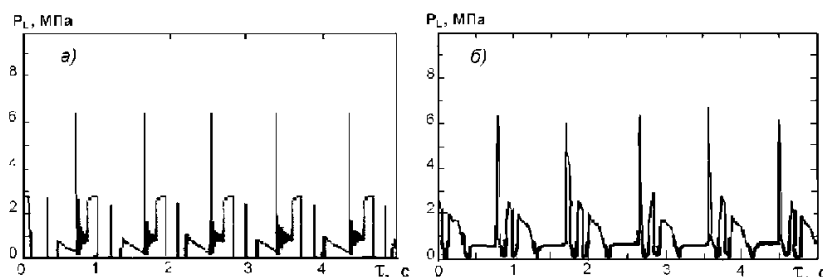


Рис. 2. Зміна тиску з часом у рідині на виході з камери протягом 5 циклів обробки:

а) розрахунок по моделі; б) дані експериментальних досліджень

5 – чохла термопар; 6 – кріплення термопар; 7 – підставка

Fig. 2. Pressure change over time in the liquid at the exit from the chamber during 5 processing cycles:

a) calculation according to the model; b) experimental research data

від'ємного значення. Падіння тиску зумовлено ефектом розтягування вільного стовпа рідини, який до цього був стиснений. Це явище, що виникає у трубі пульсатора в момент миттєвого перекриття отвору за своєю природою подібний до другої і третьої стадій гідроудару. Імпульс від'ємного тиску від вільної поверхні рідини розповсюджується вздовж труби до вихідного перерізу каналу зі швидкістю звуку в рідині c_{ac} . При довжині труби $L = 60$ см з урахуванням сопла Вентурі імпульс проходить цю відстань за 0.4 мс. У відповідності з теорією гідралічного удару час існування імпульсу від'ємного тиску всередині труби визначається відношенням $\Delta\tau_{p_{min}} = 2L/c_{ac}$ і становить приблизно 0.8 мс. За цей проміжок часу рідина в трубі встигає переміститися всього на 8 мм. Відповідно, фаза розтягування в зоні рідини поблизу її вільної поверхні триває приблизно 0.8 мс і потім змінюється фазою стиснення, при якій $p_l \gg p_a$.

Якщо розглядати переріз в трубі не на рівні вільної поверхні стовпа рідини, а на відстані X від неї у напрямі до завантажувальної ємності, то фаза розтягування починається пізніше і закінчується раніше. Тривалість фази розтягування на відстані X від вільної поверхні визначається відношенням $\Delta\tau_{p_{min}} = 2(L - x)/c_{ac}$.

Таким чином, картину формування кавітаційного кластера в рідині всередині труби пульсатора можна представити наступним чином. Після розриву суцільності потоку і миттєвого розтягу рідини вниз по

трубі проходить імпульс від'ємного тиску, що призводить до виникнення кавітаційних ефектів – інтенсивного формування і росту парових бульбашок в екстрагенті протягом часу за який фронт розрідження досягає вихідного перерізу труби. Ріст кавітаційних бульбашок на стадії розтягування продовжується до тих пір, доки величина тиску в рідині не перевищує величину тиску насиченої пари $p_{sat}(T_l)$. Якщо декремент затухання коливань знакозмінного тиску не дуже великий, то процес зростання і схлопування бульбашок за час перекриття камери діафрагмою буде спостерігатись неодноразово.

За допомогою моделі гідродинамічних процесів у розглядуваному пульсаторному апараті можна розрахувати зміну з часом тиску рідини у будь-якій точці труби на будь-якій стадії процесу. Аналіз показує, що на стадії перекриття верхнього отвору камери на будь-якій ділянці труби мінімальне значення тиску $p_l \ll p_{sat}(T_l)$, а максимальне значення $p_l > p_a$. Виконання цих умов завжди забезпечує виникнення з наступним руйнуванням кавітаційного кластера, який в процесі свого розвитку суттєво інтенсифікує масообмінні процеси на макрорівні та прискорює вилучення біологічно активних компонентів з клітин рослинної сировини.

Для наочної кількісної оцінки динамічних параметрів кавітаційного кластера використано представлену в роботі [7] математичну модель динаміки ансамбля парових бульбашок у процесах кавітації та кипіння. На рис. 3 для контрольного режиму екстра-

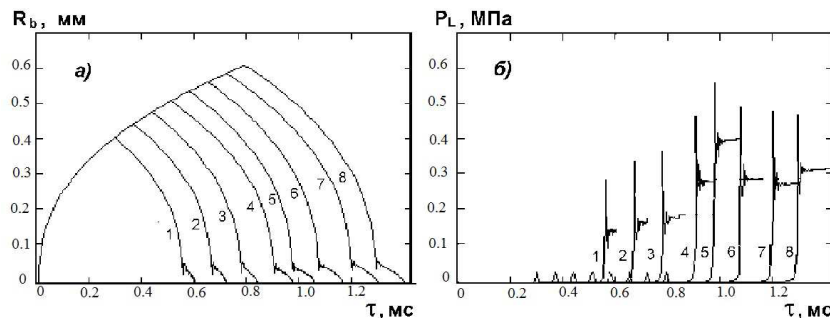


Рис. 3. Зміна з часом бульбашок кавітаційних кластерів у різних зонах труби (а) та імпульсів тиску при кавітаційному захопленні бульбашок кластера у цих зонах (б)

Результати розрахунку представлено для різних відстаней поперечних перерізів від вільної поверхні стовпа рідини: 1 – 5 см; 2 – 10 см; 3 – 15 см; 4 – 20 см; 5 – 25 см; 6 – 30 см; 7 – 35 см; 8 – 40 см. Екстрагент – вода. Тиск у рідині на вході у трубу – 0.3 МПа; температура рідини – 20 °С; швидкість рідини – 10 м/с

Fig. 3. Change over time of bubbles of cavitation clusters in different zones of the pipe (a) and pressure pulses cavitation collapse of cluster bubbles in these zones (b).

The calculation results are presented for different distances of the cross sections from the free surface of the liquid column:

1 – 5 cm; 2 – 10 cm; 3 – 15 cm; 4 – 20 cm; 5 – 25 cm; 6 – 30 cm; 7 – 35 cm; 8 – 40 cm. The extractant is water. The pressure in the liquid at the entrance to the pipe is 0.3 MPa; liquid temperature is 20 °C; the speed of the liquid is 10 m/s

гування з використанням води у якості екстрагента наведено результати розрахунку динаміки кавітаційного кластера на різних ділянках труби.

На рис. 3а показано як змінюється радіус бульбашок кластера за час його існування на різних відстанях від рівня вільної поверхні. На рис. 3б представлені дані по зміні тиску в міжбульбашковому просторі у відповідних точках труби. Спостерігається, що на стадії захоплювання кластера пікові значення локального тиску в момент захоплювання бульбашок кластера достатньо високі.

Висновки.

Отримані результати аналітичних досліджень в пульсаційному екстракторі дозволяють проаналізувати умови ініціювання кавітаційних ефектів у рідинному тракті апарата. Значення зміни тиску з часом у рідині протягом 5 циклів обробки однакові як для аналітичних розрахунків, так і експериментальних. Отже, при заданому тиску в РВТ $p_{comp} = 0.3$ МПа амплітуда імпульсів тиску в момент гідравлічного удару перевищує 0.6 МПа і, відповідно, гідроудар супроводжується високочастотним чергуванням затухаючих імпульсів стиснення і розрідження в рідині, що в свою чергу інтенсифікує процес екстракції. Отримані розрахункові значення вказують на виконання критеріїв ефективності кавітаційного впливу. Пікові значення локального тиску в момент захоплювання кавітаційного кластера знаходяться у діапазоні 0.3 – 0.6 МПа.

Теоретичний аналіз результатів експериментальних досліджень процесу екстракції з рослинної сировини, проведений на пульсаційних екстракторах з комбінованими гідродинамічними пристроями, дозволяє рекомендувати оптимальні динамічні та термічні режими кавітаційної обробки для конкретного виду сировини.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ashokkumar M., Krasulya O., Rink R. A New Look at Cavitation and the Applications of Its Liquid-Phase Effects in the Processing of Food and Fuel // Appl. Phys. Research.–2012. –Vol.4, No.1.–pp.19–29. <https://doi.org/10.5539/apr.v4n1p19>
2. Parag R. Gogate P.R. Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing //Food Bioprocess Technol.–2011. –Vol.4, No.6, pp 996–1011. <http://dx.doi.org/10.1007%2Fs11947-010-0418-1>
3. Rooze, J. Cavitation in gas-saturated liquids. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven –2012.– 120 pp. <https://doi.org/10.6100/IR732583>
4. Hozhenko L., Ivanitsky G., Tselen B., Radchenko N., Nedbailo A. The application of hydrodynamic cavitation methods to increase the efficiency of the process of extracting biologically active substances from the walnut septums // Acta Periodica Technologica 2024 Issue 55, Pages: 215-223 <https://doi.org/10.2298/APT2455215H>
5. Вітенько Т. М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах. Тернопіль: Видавн. Терноп. держ. техн. ун-ту ім. І. Пулюя, 2009. 220 с.
6. Екстракція рослинної сировини / Ю.І. Сидоров, І.І. Губицька, Р. Т. Конечна, В. П. Новіков. – Львів : Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2008. – С. 116–117.
7. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. – Киев: Наук. думка, 2008. – 381 с.
8. Чайка О. І., Гоженко Л. П., Іваницький Г. К., Корінчук Д.М. Інтенсифікація диспергування низинного торфу із застосуванням пульсаційного диспергатора. Пром. Теплотехніка. 2013. № 35 (5). 20 –26.
9. Іваницький Г. К., Чайка О. І., Гоженко Л.П. Застосування кавітаційного реактора пульсаційного типу для екстрагування з рослинної сировини. Наукові праці ОНАХТ. 2015. № 47 (2). 138 – 142. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v1i47.419>
10. Басок Б.І., Новицька М.П., Чайка О. І. Гідродинамика и теплообмен при пневмопульсационном воздействии на жидкие системы. – Київ: Калита, 2014. – 140 с.
11. Іваницький Г.К., Корчинский А.А., Матюшкин М.В. Математическое моделирование процессов в пульсационном диспергаторе ударного типа. // Пром. теплотехника. –2003. –Т.25, №1. –С.29–34.
12. Іваницький Г.К. Аналитическое исследование условий возникновения кавитации в трубе пульсационного диспергатора ударного типа / Г. К. Иваницкий, Л.П. Гоженко // Пром. теплотехника. – 2014. – Т. 36, № 6. – с. 49 – 56
13. Іваницький Г.К. Численное исследование поведения пузырькового кластера в процессах гидродинамической кавитации. // Наукові праці ОНАХТ.–2 017.– Т.81, вип..1, С.114–120. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v81i1.686>
14. Макаренко, А.А. Дослідження ефективності застосування різних конструкцій проточних кавітаційних змішувачів / А.А. Макаренко // Теплофізика та теплоенергетика. – 2019. – Т.41. - №1. – С. 74-79. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2019.10>
15. Накорчевский А.И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках / А.И. Накорчевский, Б.И. Басок. – Киев: Наукова думка, 2001. – 345 с

ANALYTICAL STUDIES OF THE INITIATION OF CAVITATION EFFECTS IN THE PULSATION EXTRACTOR WITH THE COMBINED HYDRODYNAMIC DEVICE

Obodovych O.M.¹, Ivanitsky G.K.², Gozhenko L.P.³, Tselen B.Y.⁴, Nedbailo A.Y.⁵

¹⁻⁵*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine*

²*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Beresteiska Avenue, Kyiv, 03056, Ukraine*

¹*Doc. Tech. Sci., Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>*

²*Doc. Tech. Sci., Senior Researcher, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0486-2359>*

³*PhD (Engin.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8999-1917>*

⁴*PhD (Engin.), Senior Researcher, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>*

⁵*PhD (Engin.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8590-5823>*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.4>

It was established that today there is no clear theoretical basis for understanding the possibilities and limitations of the application of cavitation devices in solving specific problems. Analytical studies were carried out with the aim of determining additional methods of intensification of cavitation effects in a pulsation extractor operating in the mode of a cavitation reactor. The conditions for the occurrence of cavitation effects in a pulsating extractor with a combined hydrodynamic device have been clarified. The principle of operation of a pulsation extractor with a combined hydrodynamic device is considered, in which a powerful complex of cavitation mechanisms is initiated, which allows processing a variety of raw materials with a wide range of properties with relatively low energy consumption. The model of hydrodynamic processes in a cavitation-type pulsating extractor was taken as a basis, which made it possible to obtain calculated changes over time in the pressure of the liquid at the control points of the pipe at different stages of the process. The analysis of the initiation of cavitation effects is made on the basis of the described one-dimensional flow of liquid compressible in a

pipe behind an instantaneously closed diaphragm, as well as in the constriction of a Venturi nozzle. It is shown that the formation and growth of cavitation bubbles occurs at the stage of rarefaction, and their collapse occurs at the stage of compression. It has been established that fulfillment of the criteria for the efficiency of the cavitation effect ensures the emergence and subsequent destruction of a cavitation cluster, which in the course of its development significantly intensifies the mass exchange processes at the macro level and accelerates the extraction of active components from the cells of plant raw materials.

References 15, figures 3.

Key words: pulsation extractor, hydrodynamic cavitation, Venturi nozzle, modeling, energy efficiency.

1. Ashokkumar M., Krasulya O., Rink R. A New Look at Cavitation and the Applications of Its Liquid-Phase Effects in the Processing of Food and Fuel // Appl. Phys. Research.–2012. –Vol.4, No.1.–pp.19–29. <https://doi.org/10.5539/apr.v4n1p19>

2. Parag R. Gogate P.R. Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing //Food Bioprocess Technol.–2011. –Vol.4, No.6, pp 996–1011. <http://dx.doi.org/10.1007%2Fs11947-010-0418-1>

3. Rooze, J. Cavitation in gas-saturated liquids. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven –2012.– 120 pp. <https://doi.org/10.6100/IR732583>

4. Hozhenko L., Ivanitsky G., Tselen B., Radchenko N., Nedbailo A. The application of hydrodynamic cavitation methods to increase the efficiency of the process of extracting biologically active substances from the walnut septums // Acta Periodica Technologica 2024 Issue 55, Pages: 215-223 <https://doi.org/10.2298/APT2455215H>

5. Vitenko T. (2009). Hidrodinamichna kavitatsia u masoobminnykh, chimichnykh i biolohichnykh protsessakh: Monografiia. [The hydrodynamic cavitation in mass transfer, chemical and biological processes: Monograph]. Ternopil. Ternopil Ivan Puliy National Technical University. 220 p. [in Ukrainian].

6. Sydorov, Yu., Hubyts'ka, I., Konechna, R., Novikov, V. (2008), Extraction of plant material [Ekstraktsiya roslynnoyi syrovyny], Vydavnytstvo Natsional'noho universytetu «L'vivs'ka politekhnika», Lviv, pp. 116-117. [in Ukrainian].

7. Dolinskyi, A. A., Ivanitskyi, G. K. (2008), Teplomassoobmen i hidrodinamika v parozhidkostnykh dispersnykh sistemakh. Teplofizicheskie osnovy diskretno-impulsnoho vvoda enerhii [Heat and mass transfer and hydrodynamics in vapour-liquid disperse systems. Thermophysical basics of the method of discrete-pulse energy input.], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine, 381 p. . [in Rus.].

8. Chaika O. I., Gozhenko L. P., Ivanitskyi G. K., Korinchuk D. M. (2013). Intensyfikatsia dysperhuvannia nyzynnoho torfu iz zastosuvanniam pulsatsiynoho dysperhatora [Intensification of lowland peat dispersion using a pulsating disperser]. *Prom. Teplotechnika* [Industrial heat engineering]. 5 (35). 20 – 26. <http://ittf.kiev.ua/vidavnychy-diyalnist/> [in Ukrainian].
9. Ivanitskyi G. K., Chayka O. I., Gozhenko L. P. (2015). Zastosuvannia kavitatsiynoho reaktora pulsatsiynoho typu dlia ekstraktsii z roslinnoi syrovyny [The use of pulsating cavitation reactor type for extraction of plant raw material]. *Naukovi pratsi ONAKHT* [Scientific Works]. 2 (47). 138 – 142. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v1i47.419> [in Ukrainian].
10. Basok, B. I., Novitskaia, M. P., Chayka, O. I. (2014). Hidrodynamika i teploobmen pri pnevmopulsatsiynom vozdeystvii na zhydkie sistemy [Hydrodynamics and heat transfer in case of pneumatic pulsation action on liquid systems], *Kalyta, Kyiv*, 140 p. [in Rus.].
11. Ivanitskyi, G.K., Korchynskyi, A.A., Matiushkin, M.V. (2003) Matematicheskoe modelirovanie protsessov v pulsatsiynom disperhatore udarnoho tipa [The mathematical modeling of processes in pulsating dispersant of impact type]. *Prom. teplotechnika* [Industrial heat engineering], Kyiv: 25 (1), 29 - 34. <http://ittf.kiev.ua/vidavnychy-diyalnist/> [in Rus.].
12. Ivanitskiy, G.K., Gozhenko, L.P. (2014). Analiticheskoye issledovaniye usloviy vozniknoveniya kavitatsii v trubie pulsatsiynogo dispergatora udarnogo tipa. *Prom. teplotechnika*, 36(6), 49–56. <http://ittf.kiev.ua/vidavnychy-diyalnist/> [in Rus.].
13. Ivanitskyi G. K (2017) Chislennoe issledovanie povedeniya puzyrkovoho klastera v protsesakh hidrodynamichnoi kavitatsii [Numerical study of bubble cluster behavior in hydrodynamic cavitation processes]. *Naukovi pratsi ONAKHT* [Scientific Works]. 1 (81). 114–120. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v8i1i1.686> [in Rus.].
14. Makarenko, A. (2018). RESEARCH OF THE APPLICATION EFFICIENCY OF DIFFERENT CONSTRUCTIONS OF FLOW CAVITATION MIXERS. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 41(1), 74-81. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2019.10> [in Ukrainian].
15. Nakorchevskiy, A. I., Basok, B. I. (2001), Hidrodynamika i massoperenos v heterohennykh sistemakh i pulsiruiushchikh potokakh [Hydrodynamics and heat and mass transfer in heterogeneous systems and pulsating flows], *Naukova dumka, Kyiv, Ukraine*, 345 p. [in Rus.].

Отримано 03.02.2025
Received 03.02.2025

Прийнято до друку 18.02.2025
Accepted for publication 18.02.2025