

ЗАСТОСУВАННЯ КАВІТАЦІЙНОГО РЕАКТОРА ПУЛЬСАЦІЙНОГО ТИПУ ДЛЯ ЕКСТРАГУВАННЯ З РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

Іваницький Г.К., д-р техн. наук, пров. наук. співр., Чайка О.І., канд. техн. наук, ст.наук. співр.,
Гоженко Л.П., мол. наук. співр.
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Описано принцип роботи кавітаційного реактора пульсаційного типу. Визначено режимні параметри оптимальної дії кавітаційних ефектів для екстрагування з рослинної сировини. Представлено технологічні характеристики розробленого апарата. Експериментально підтверджено інтенсифікацію процесу екстрагування з рослинної сировини при ініціюванні кавітаційних ефектів.

In this study, the principle of work of cavitation reactor pulsation type is describes. The operating parameters of the optimal effect of cavitation effects to extract from plant material showed. The technological characteristics of the developed equipment presented. The intensification of the process of extraction from plant raw materials at the initiation of cavitation effects experimentally validated.

Ключові слова: кавітація, екстрагування, рослинна сировина, енергетична ефективність.

Вирішення проблеми одержання ефективних екстрактів з рослинної сировини, які входять до складу біоактивних добавок і біостимуляторів, пов'язано з розробкою та широким впровадженням сучасних енергоефективних способів вилучення цільових компонентів [1]. В останні роки методи інтенсифікації процесів екстрагування пов'язані із застосуванням ультразвукових, гідродинамічних та електророзрядних пристроїв, в яких реалізуються ефекти кавітації, що дозволяє впливати на швидкість внутрішнього масопереносу в клітинній структурі рослинної сировини [2]. Ультразвукові та електроімпульсні методи екстрагування практично не застосовуються в промислових виробництвах через відносно малу продуктивність та високі енерговитрати. При застосуванні в технологіях екстрагування таких гідродинамічних кавітаторів, як роторно-пульсаційні апарати, відцентрові насоси, трубки Вентурі та інші, слід брати до уваги структурно-механічні та абразивні властивості сировини. До гідродинамічних пристроїв відносяться також пульсаційні апарати з активною діафрагмою, створені в ІТТФ НАНУ на основі принципу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ), які застосовуються у виробництві в якості ефективних гомогенізаторів, диспергаторів, екстракторів [3, 4]. Ці апарати відрізняються високою зносостійкістю та відсутністю вузлів, які труться або обертаються, що дозволяє обробляти гетерогенні суміші з твердими частками, незалежно від їх форми, розміру та абразивних властивостей.

В результаті детального аналізу принципу дії цих апаратів була доведена і практично реалізована можливість створення на базі пульсаційного апарата з активною діафрагмою вискоефективного кавітаційного реактора для застосування в технологічних процесах диспергування та екстракції при обробці рослинної сировини з широким спектром структурно-механічних та реологічних властивостей оброблюваних сумішей при порівняно невисоких енерговитратах.

Принципову схему кавітаційного реактора пульсаційного типу представлено на рис. 1.

Суміш екстрагента з подрібненою рослинною сировиною знаходиться у завантажувальному резервуарі під атмосферним тиском p_a при температурі T_l . В процесі роботи екстрактора рідинна суміш надходить в робочу камеру із резервуара або витікає з камери в резервуар через циліндричну трубу, яка герметично з'єднана з нижньою поверхнею камери. Верхня і нижня поверхні робочої камери мають форму кульового сегмента, між якими знаходиться еластична мембрана, що відокремлює рідинний та газовий тракти апарата. Через отвір на верхній поверхні робоча камера з'єднується із газовим трактом. Трьохходовий електромагнітний клапан періодично з заданими інтервалами часу підключає камеру до ресивера високого тиску (РВТ), з'єданого з компресором, або ж до ресивера низького тиску (РНТ), підключеного до вакуумного насоса. Величини тиску в РВТ можна задавати в інтервалі $p_{comp} \cong 0,2 \div 0,5$ МПа, а в РНТ – в інтервалі $p_{vac} = 0,001 \div 0,003$ МПа.

На стадії підключення камери до РВТ мембрана під дією високого тиску інтенсивно виштовхує рідину з камери через трубу в резервуар. При перекритті мембраною отвору на нижній поверхні камери уся рідина виходить з камери. В цей момент швидкість течії в трубі набуває максимального значення (близько 10 м/с) і рідина продовжує рухатися вниз по трубі за інерцією (без контакту з мембраною). Після відриву рідинної суміші від мембрани у верхній частині труби утворюється порожнина під вакуумом з

безперервно зростаючим об'ємом, що поступово заповнюється паром. Встановлено, що внаслідок швидкого руху стовпа рідини тиск пари в порожнині суттєво нижчий тиску насиченої пари $p_{sat}(T_l)$. Тиск в рідині на границі з порожниною миттєво понижується від величини $p_{comp} \approx 0,3$ МПа до $p_l < p_{sat}(T_l) \approx 0,002$ МПа, що приводить до закипання рідинної суміші поблизу вільної поверхні.

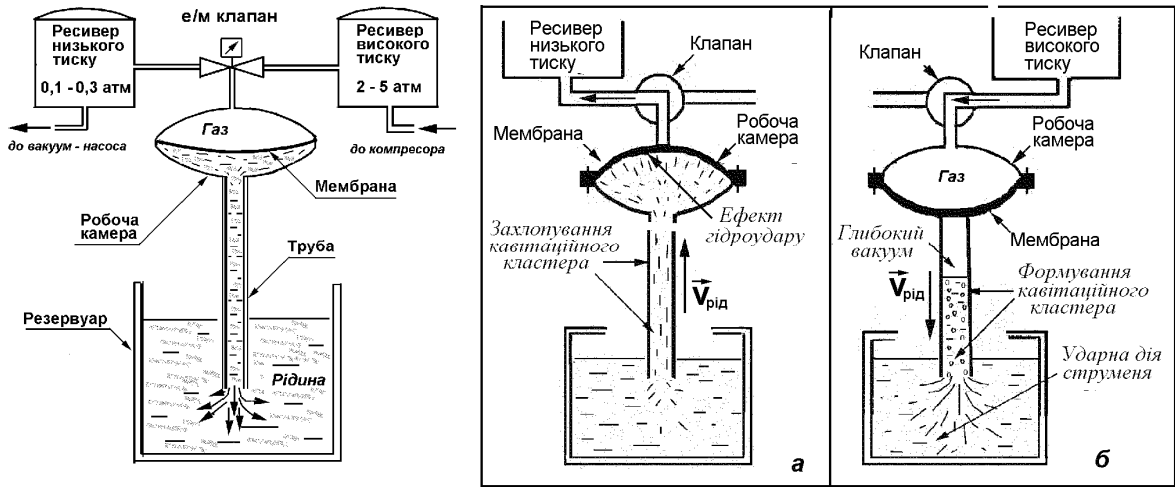


Рис. 1 – Принципова схема кавітаційного реактора пульсацийного типу та основні динамічні ефекти: а) стадія впуску рідини в робочу камеру; б) стадія виштовхування рідини з камери

Різниця тисків $p_a - p_{sat}(T_l)$ та дія сили тертя об стінку спричинюють різке гальмування рідинної суміші в трубі, яка потім змінюючи напрям, рухається зі зростаючою швидкістю до камери доки не дійде вхідного отвору в камеру. Якщо до цього моменту камера все ще підключена до РВТ, то вхід в камеру перекритий, і рідинна суміш, що рухається відразу зупиняється.

Якщо ж камера вже з'єднана з РНТ, то рідинна суміш із труби швидко заповнює камеру і зупиняється на мембрані, що прилягає до верхньої поверхні камери. В обох випадках миттєва зупинка потоку ініціює явище гідрравлічного удару. При наступному підключенні камери до РВТ цикл повторюється. Частота повторень циклів в залежності від режиму, знаходиться в діапазоні $0,5 \div 1,5$ Гц.

На рис. 1 показані основні динамічні ефекти, що реалізуються в кавітаційному екстракторі. До них відносяться: динамічний вплив струменя, що витікає з труби в резервуар і сприяє інтенсивному турбулентному перемішуванню суміші; вплив гідрравлічного удару, що виникає внаслідок гальмування зворотного потоку на поверхні мембрани, який супроводжується високочастотним змінням стиснення та розрідження в камері і трубі і, як наслідок, виникненням вторинних кавітаційних ефектів. Але найбільш потужні кавітаційні ефекти виникають після виходу рідини з камери в трубу.

При порушенні суцільності потоку в момент перекриття отвору мембраною тиск на верхній границі рідини $p_{l0} = 0,3$ МПа миттєво спадає до від'ємного значення з амплітудою – $0,3$ МПа. Падіння тиску обумовлено ефектом розтягу вільного стовпа рідини, яка до цього була стиснена. Це явище, що виникає в момент миттєвого перекриття вхідного отвору, за своєю природою властиве другій і третій стадії гідрравлічного удару. Імпульс від'ємного тиску від вільної поверхні рідини розповсюджується вздовж труби до вихідного перерізу каналу зі швидкістю звуку в рідині c_{ac} , а потім повертається у формі імпульсу стиснення. При довжині труби $L = 60$ см імпульс проходить цю відстань за $0,4$ мс. Відповідно до теорії гідрравлічного удару час існування імпульсу від'ємного тиску всередині труби визначається співвідношенням $\Delta\tau_{p_{min}} = 2L/c_{ac}$ і складає приблизно $0,8$ мс. За цей проміжок часу рідина в трубі встигає переміститися лише на 8 мм. З цього випливає, що фаза розтягу в зоні рідини поблизу її вільної поверхні продовжується близько $0,8$ мс, а потім настає фаза стиснення, при якій $p_l \gg p_a$.

Таким чином, після розриву суцільності потоку і раптового розтягу рідини вниз по трубі проходить імпульс від'ємного тиску, що веде до формування та інтенсивного зростання парових бульбашок в екстрагенті протягом часу, за який фронт розрідження досягне вихідного перерізу труби. Наступний фронт стиснення, що розповсюджується в напрямі камери приводить до миттєвого захлопування бульбашок з виникненням потужних мікро масштабних кавітаційних ефектів. Якщо декремент затухання коливальних знакозмінного тиску невеликий, то процес зростання і захлопування парових бульбашок за час перекриття отвору камери мембраною буде спостерігатися багаторазово.

На рис. 2 для одного з режимів показано розраховане за математичною моделлю розподілення тиску по довжині труби і на ділянці в різні моменти часу τ протягом першого циклу коливаль. Залежно від наближення імпульсу розрідження до вихідного перерізу його амплітуда збільшується і, відповідно, зростає інтенсивність закипання рідини. Амплітуда стиснення імпульсу у другому пів циклі збільшується з мірою наближення імпульсу до робочої камери і, відповідно, зростає інтенсивність колапсу кавітаційного кластера. Особливості протікання процесів формування і колапсу кавітаційного кластера в різних зонах труби суттєво відрізняються між собою, що підтверджено результатами розрахунків.

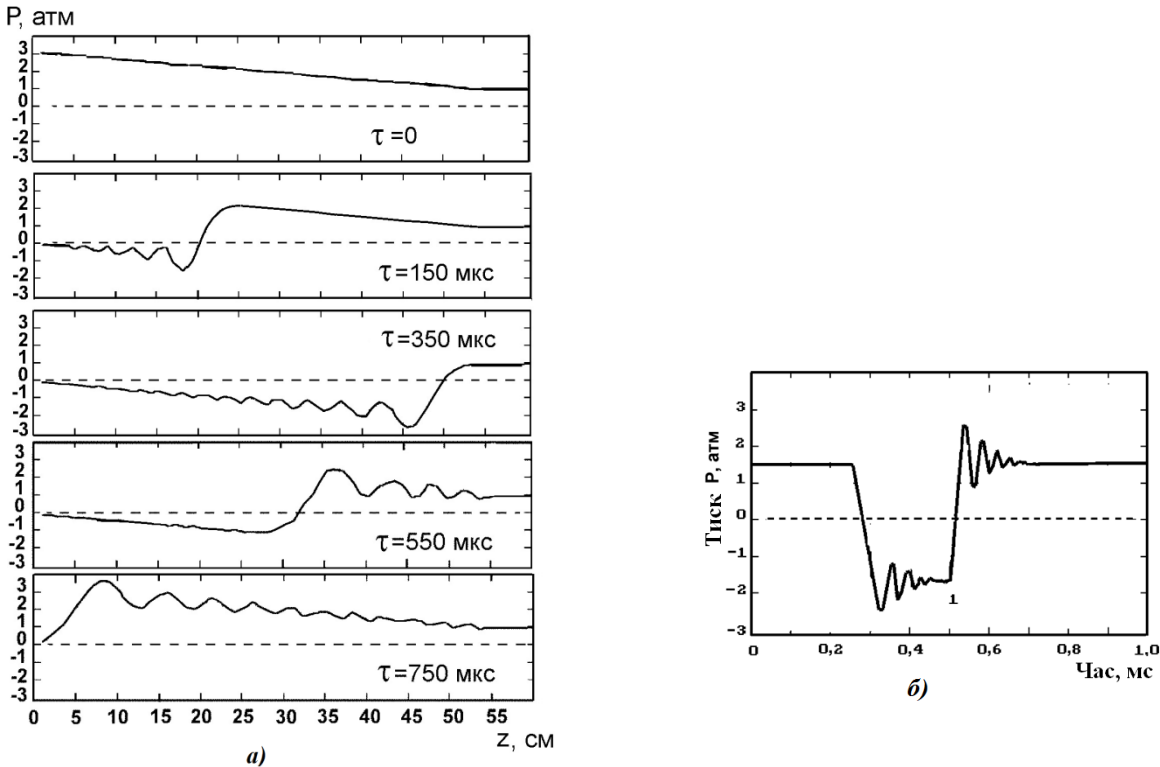


Рис. 2 – Динаміка імпульсу по довжині труби (а) і на ділянці труби (б)

Отримані результати оптимальних режимів обробки в кавітаційному екстракторі, які представлені на рис. 3, дозволяють визначати та задавати значення тиску в ресиверах залежно від потрібної продуктивності та геометричних розмірів робочої камери. Для модельної рідини – води при температурі 20°C розраховано тиск в імпульсі та масові витрати залежно від діаметра труби і тиску в компресорі.

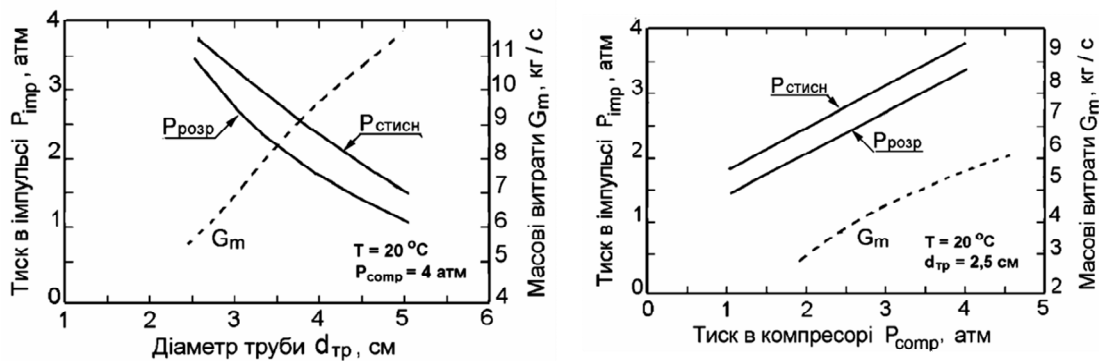


Рис. 3 – Оптимальні режими обробки в кавітаційному екстракторі

Різниця між тисками стиснення та розрідження при відповідному діаметрі труби та заданому тиску в компресорі визначає величину тиску в імпульсі. Задаючись масовими витратами та підібраним діаметром труби, розраховуємо потрібні тиски стиснення та розрідження залежно від тиску в компресорі для створення потрібного тиску в імпульсі. Спостерігаємо постійну величину зміни тиску в імпульсі при діаметрі

труби 2,5 см та змінному тиску в компресорі тоді, як від заданого тиску в компресорі 4 атм і зміни діаметра труби ця ж величина має змінний характер.

З метою вибору оптимальних режимів роботи кавітаційного екстрактора залежно від виду сировини та екстрагента проведено комплексні дослідження результати яких викладено в [5–7].

Отже, для ініціювання кавітації необхідно, щоб в об'ємі рідини з тиском p_{10} і температурою T_1 , тиск швидко знизився від p_{10} до $p_{11} < p_{sat}(T_1)$, а потім різко зріс до значення $p_{12} > p_{sat}(T_1)$, де $p_{sat}(T_1)$ – тиск насиченої пари. Виділена в імпульсі питома потужність тим вища, чим швидше відбувається скидання тиску із наступним його підвищенням.

На основі узагальненого механізму екстрагування з твердих тіл клітинної будови [1, 4] запропоновано методику визначення в лабораторних умовах вихідних даних, необхідних для вирішення задач з екстракції конкретного виду рослинної сировини. Об'єктами дослідження були цілі висушені плоди шипшини (*Rosa acicularis* Lindl) та подрібнені корені з кореневищами валеріани (*Valeriana officinalis* L.). В якості екстрагента використовували воду при кімнатній температурі. Співвідношення фаз тверде тіло– рідина становило: для плодів шипшини – 1:10, для валеріани – 1:30. Відповідно до методики визначалися абсолютні значення вихідних величин, а потім розраховувалися відповідні їм питомі значення величин в перерахунку на одиницю маси сировини. Вимірювання експериментальних величин проводилися після досягнення рівноважної концентрації, коли концентрація цільового компонента у вільному екстрагенті c_{al} дорівнювала його концентрації в сировинному екстрагенті c_{as} . Тривалість процесу екстрагування оцінюється шляхом вимірювання концентрації c_{al} через визначені проміжки часу доки не буде виконана умова $c_{al} = c_{alp} = \text{const}$, де c_{alp} – рівноважна концентрація цільового компонента у вільному екстрагенті. Величина ефективного коефіцієнта масопереносу K_{ef} , який характеризує швидкість вилучення цільового компонента із сировини в об'єм вільного екстрагента, визначається за формулою:

$$K_{ef} = \frac{a_s D_{ef}}{d_s^2 (1 - \zeta)},$$

де D_{ef} – ефективний коефіцієнт дифузії, величина якого оцінюється при експериментальному дослідженні кінетики екстрагування для конкретного виду сировини;

d_s – характерний розмір частинки рослинної сировини;

ζ – відношення об'єму сировинного екстрагента до загального об'єму екстрагента.

Для частинок сировини сферичної, циліндричної, кубічної форми коефіцієнт $a_s = 12$, для плоских частинок товщиною d_s (листя, трави, пелюстки) коефіцієнт $a_s = 4$.

За результатами експериментальних і аналітичних досліджень складено алгоритм розрахунку оптимального об'єму екстрагента і тривалості екстрагування при заданих характеристиках сировини та режимних параметрах кавітаційної обробки в даному апараті.

Для встановлення ефективності кавітаційного впливу при екстрагуванні з рослинної сировини на вказаних модельних об'єктах проведено порівняльні експериментальні дослідження на пульсаційному апараті ударного типу з активною діафрагмою [3, 8] та на кавітаційному екстракторі. Результати цих досліджень представлено на рис. 4. При проведенні екстрагування в кавітаційному реакторі рівноважна концентрація для плодів шипшини встановилася через 20 хв, для кореневищ із коренями валеріани – через 10 хв. При екстрагуванні в апараті ударного типу плодів шипшини рівноважна концентрація не встановилася протягом часу більше 30 хв. При екстрагуванні з коренів валеріани в апараті ударного типу рівновага концентрацій в сировинному та у вільному екстрагенті не досягалася навіть через 50 хв обробки. Дослідження показали, що величини рівноважних концентрацій, визначених в лабораторних умовах для вибраної сировини, співпадають із значеннями рівноважних концентрацій у відібраних пробах залежно від тривалості обробки в кавітаційному реакторі.

Отримані експериментальні дані залежності виходу сухих речовин від тривалості обробки пояснюються біологічною структурою сировини та фізичним змістом власне процесу екстрагування. У висушеній сировині з клітинною структурою, яка підлягає екстрагуванню, після капілярного просочення екстрагенту та утворення первинного соку відбуваються явища переносу речовин всередині сировини у сформованих клітинному та міжклітинному середовищах. Внутрішньоклітинний цільовий компонент, що продифундував через клітинну оболонку, рухається через міжклітинний простір до поверхні сировини (пристінного дифузійного шару) з відповідним коефіцієнтом дифузії. Інтенсифікація рухомого екстрагента сприяє перенесенню речовини за рахунок зменшення шару нерухомої рідини і збільшенню коефіцієнта конвективної дифузії.

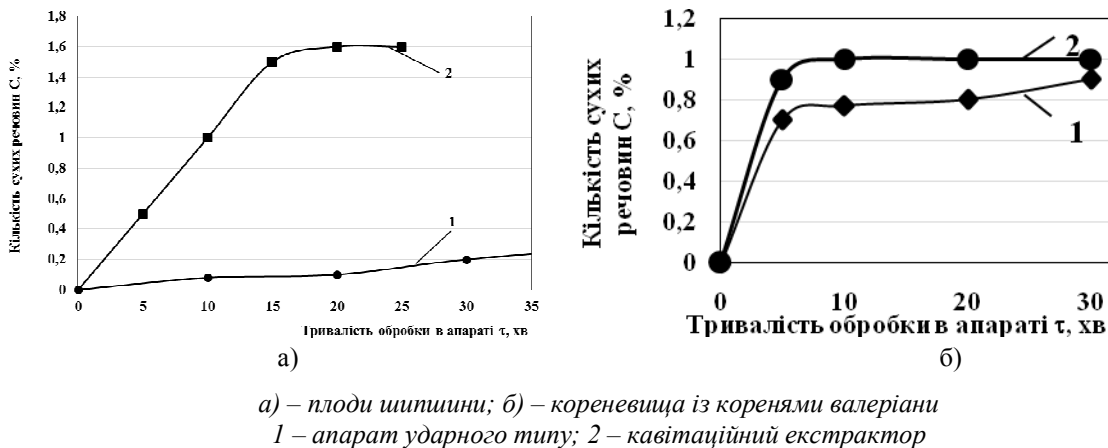


Рис. 4 – Залежність виходу кількості сухих речовин від тривалості екстрагування в апараті

Аналіз одержаних результатів дозволяє відмітити, що застосування кавітаційного екстрактора значно пришвидшує процес екстрагування порівняно з потужними тільки перемішувальними пристроями.

Висновки. Проведено аналітичні та експериментальні дослідження з впливу кавітаційних ефектів на процес екстрагування. За результатами досліджень розроблено принципову конструкцію кавітаційного реактора пульсаційного типу, визначено раціональні геометричні розміри та підібрані оптимальні режими для максимального ініціювання кавітаційного явища. Виконано порівняльні експериментальні дослідження екстрагування рослинної сировини на апаратах ударного типу й кавітаційному екстракторі. Раціональна тривалість обробки в кавітаційному екстракторі для вибраної сировини становить: для шипшини – 20 хв, для кореневищ із коренями валеріани – 10 хв. Одержані результати підтверджують інтенсифікацію процесу екстрагування в розробленому кавітаційному екстракторі. Проведення процесу екстрагентом – водою при кімнатній температурі має важливе значення для вилучення термолабільних речовин, що забезпечує оптимальне застосування кавітаційних механізмів в масообмінних апаратах.

Література

1. Дячок В.В. Науково-теоретичні основи екстрагування лікарської рослинної сировини. /Автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.12. – Київ, 2010. – 41 с.
2. Вітенько Т. М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах. – Тернопіль: Видавн. Терноп. держ. техн. ун-ту ім. І. Пулюя, 2009. – 220 с
3. Долінський А. А., Корчинський А. А., Панчишин В. В., Чайка А. И. Исследование динамики жидкости и изменения давления газа в аппарате для импульсного перемешивания жидкости // Пром. теплотехника. – 1985. – Т. 7, № 4. – с. 38 – 41.
4. Басок Б. И., Новицкая М. П., Чайка А. И. Гидродинамика и теплообмен при пневмопульсационном воздействии на жидкие системы. – К.: «Калита», 2014. – 140 с.
5. Іваницький Г. К., Гоженко Л. П. Застосування пульсаційного диспергатора для інтенсифікації диспергування фрезерного торфу // Наукові праці ОНАХТ. – 2013. - №.43, Т.1 – с. 120 – 123.
6. Іваницький Г.К., Гоженко Л.П. Анализ эффектов кавитации в пульсационном экстракторе // Междунар. н-т. конф. «Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК» (ПРЭТ-2014) / Иван. гос. хим.-технол. ун-т. –Иваново, 2014. – с. 475–479.
7. Іваницький Г.К., Гоженко Л.П. Аналитическое исследование условий возникновения кавитации в трубе пульсационного диспергатора ударного типа // Пром. теплотехника. – 2014. – Т. 36, № 6. – с. 5–12.
8. Чайка О. І., Малецька К. Д., Матюшкін М. В., Гоженко Л. П. Експериментальні дослідження екстрагування з рослинної сировини методом дискретно-імпульсного введення енергії // Наукові праці ОНАХТ. – 2012. - №.41, Т.1 – с. 48-51.