

УДК 532.528+582.751.42

ДОСЛІДЖЕННЯ КАВІТАЦІЙНОГО ВПЛИВУ НА ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ
СУМІШЕЙ НАСІННЯ ОЛІЙНИХ І ЗЕРНОБОБОВИХ КУЛЬТУРГоженко Л. П.¹, к.т.н., с.н.с.
<https://orcid.org/0000-0002-8999-1917>Іваницький Г. К.^{1,2}, д.т.н., пр.н.с.
<https://orcid.org/0000-0002-0486-2359>Цельєв Б. Я.¹, к.т.н., пр.н.с.
<https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>Радченко Н. Л.¹, к.т.н., с.н.с.
<https://orcid.org/0000-0002-5315-1609>Недбайло А. Є.¹, к.т.н., с.н.с.
<https://orcid.org/0000-0002-8590-5823>Щепкін В. І.¹, гол. технологШуляк В. В.¹, гол. механік¹Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна²Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», Київ, Україна

<https://doi.org/10.31073/foodresources2024-23-05>

Предмет. Представлено вирішення питання інтенсифікації процесу екстракції біологічно-активних речовин (БАР) з сумішей цілісної та розмеленої насінневої сировини на прикладі насіння льону та екструдату бобів сої. Зроблено аналіз сучасних перспективних методів екстракції БАР з рослинної сировини, переваг і недоліків апаратів реалізації способів впливу на сировину. Запропоновано для оптимізації процесу екстракції експериментальні дослідження провести в пульсаційних диспергаторах ударного та кавітаційного типу, розроблених в ІТТФ НАН України, в яких реалізується метод дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ). **Мета.** Вивчення закономірностей впливу механізмів ДІВЕ на фізико-хімічні та структурно-механічні властивості насіння олійних і зернобобових культур при обробці в пульсаційних апаратах. **Методи.** В ході проведення експериментальних досліджень в одержаних екстрактах визначено фізико-хімічні властивості: вміст сухих речовин, кількість білка. Реологічні властивості отриманих сумішей експериментально досліджено на ротаційному віскозиметрі. Мікроструктуру зразків до обробки в апаратах і зразків, отриманих протягом обробки з періодичним відбором проб, досліджено на світловому мікроскопі. **Результати.** В результаті експериментальних досліджень встановлено, що кавітаційний механізм є найенергоєфективнішим і раціональнішим способом впливу на обробку насіння олійних і зернобобових культур. Для цілого та розмеленого насіння льону, екструдату бобів сої показники кількості виходу сухих речовин після екстракції в диспергаторі кавітаційного типу вищі, ніж у диспергаторі ударного типу на 2%; 7,5%; 5,8%. відповідно. Вихід білка з цілого та розмеленого насіння льону після обробки у кавітаційному диспергаторі також вищий приблизно на 2% і залежить від тривалості обробки, що максимально становить 10 хв. Встановлено, що для отриманих рідинних сумішей цілого і розмеленого насіння льону характерні властивості псевдопластичної рідини. У всіх сумішах проявляється неньютонівський характер в'язкості більш чітко зі збільшенням тривалості обробки. **Сфера застосування результатів.** Результати можуть використовуватись у технологіях переробки насіння олійних і зернобобових культур з максимальним збереженням термолабільних біоактивних компонентів.

Ключові слова: метод дискретно-імпульсного введення енергії, кавітація, пульсаційний апарат, диспергатор, насіння льону, екструдат бобів сої

RESEARCH OF CAVITATION INFLUENCE ON THE PROCESSING
OF MIXTURES OF OILY AND CEREAL LEGUME SEEDSLiubov Hozhenko¹ PhD, Senior Researcher
<https://orcid.org/0000-0002-8999-1917>Georgiy Ivanitsky^{1,2} D.Sc., Leading Researcher
<https://orcid.org/0000-0002-0486-2359>Bogdan Tselen¹ PhD, Leading Researcher
<https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>

Nataliya Radchenko¹ PhD, Senior Researcher

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

Anna Nedbailo¹ PhD, Senior Researcher

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

Volodymyr Shchepkin¹, Chief Technologist

Volodymyr Shuliak², Chief Mechanic

¹Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Subject. A solution to the issue of intensification of the process of extraction of biologically active substances (BAR) from mixtures of whole and ground seed raw materials is presented using the example of flax seeds and extrudate from soybeans. The analysis of modern promising methods of BAR extraction from plant raw materials, advantages and disadvantages of apparatus for the implementation of methods of influence on raw materials was performed. In order to optimize the extraction process, it is proposed to carry out experimental studies in pulsating dispersers of the impact and cavitation type, developed at the ITTF of the National Academy of Sciences of Ukraine, in which the method of discrete-pulse energy input (DPEI) is implemented. **Purpose.** Study the regularities of the influence of DPEI mechanisms on the physicochemical, structural and mechanical properties of the seeds of oil and leguminous crops during processing in pulsation apparatus. **Methods.** In the course of experimental research, the physicochemical properties of the obtained extracts from grain crops were determined: the content of dry substances, and the amount of protein. The rheological properties of the obtained mixtures were experimentally investigated on a rotary viscometer. The microstructure of the samples to be processed in the apparatus and the samples obtained during the processing with periodic sampling was studied under a light microscope. **Results.** As a result of experimental studies, it was established that the cavitation mechanism is the most energy-efficient and rational way of influencing the processing of oil and leguminous seeds. For whole and ground flax seeds, soybean extrudate, the indicators of the amount of dry substances released after extraction in a cavitation-type disperser are higher than in an impact-type disperser by 2%; 7,5%; 5,8%. in accordance. The yield of protein from whole and ground flaxseed after treatment in a cavitation disperser is also higher by about 2% and depends on the duration of treatment, which is a maximum of 10 min. It was established that the obtained liquid mixtures of whole and ground flax seeds have characteristic properties of a pseudoplastic liquid. For all the mixtures investigated in the work, the non-Newtonian character of the viscosity is more clearly manifested with an increase in the duration of processing. **Scope of results.** The results can be used in the technology of processing the seeds of legumes and oil crops with maximum preservation of thermolabile bioactive components is required.

Key words: method of discrete-pulse energy input, cavitation, pulsation apparatus, disperser, flax seeds, soybean extrudate

Постановка проблеми. Головна особливість процесів обробки харчової рослинної сировини полягає в тому, що значно змінюються її фізико-хімічні та структурно-механічні властивості в процесі екстрагування [1, 2] і це суттєво впливає на всі стадії подальшого технологічного процесу [3]. Технологія переробки насіння олійних і зернобобових культур для продуктів функціонального призначення потребує максимального збереження біоактивних компонентів [4], що може забезпечити проведення екстрагування при невисоких температурах. Перед проведенням процесу екстракції БАР з насіння потрібне попереднє замочування, тривалість якого залежить від швидкості витіснення повітря з клітини. Застосовуючи ультразвукові апарати [5], що забезпечують звукокапілярний ефект, досягається не тільки прискорення витіснення бульбашок повітря, але і спричиняються умови для його розчинення у воді. Під дією ультразвукових коливань в оброблюваному середовищі відбувається активний вплив на клітинний і міжклітинний простір насіннєвої сировини, що забезпечує більш швидкий перехід біоактивних компонентів з клітини в екстрагент і приводить до інтенсифікації процесу екстрагування [1, 5]. В акустичному полі виникає процес диспергування. Оптимізація процесу диспергування насіннєвої сировини має вагоме значення для інтенсифікації процесу екстрагування [4]. Вирішальним фактором прискорення процесів масопереносу, що протікають під дією акустичного поля є кавітаційний механізм [6].

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 [7, 8] насіння олійних і зернобобових культур. 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 [2, 3, 9]. До гідродинамічних пристроїв відносяться також пульсаційні апарати з активною діафрагмою [10], створені в ІТТФ НАНУ на основі принципу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ), які застосовуються у виробництві в якості ефективних гомогенізаторів, диспергаторів, екстракторів. 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.

Формулювання мети та постановка завдання. Метою досліджень є вивчення закономірностей впливу сукупності механізмів ДІВЕ на фізико-хімічні та структурно-механічні властивості насіння олійних і зернобобових культур при обробці в пульсаційних апаратах. Об'єкти досліджень – водні екстракти з насіння льону цілого та розмеленого, водні екстракти та суміші на основі екструдованої сої з цілим насінням льону.

Для визначення енергоефективного способу процесу екстракції біологічно-активних речовин (БАР) з сумішей цілісної та розмеленої насінневої сировини на прикладі насіння льону та екструдату з бобів сої завданнями досліджень поставлено провести процес диспергування в пульсаційних апаратах ударного і кавітаційного типу, визначити показники фізико-хімічних та структурно-механічних властивостей отриманих екстрактів, визначити реологічні показники одержаних сумішей, дослідити мікроструктуру отриманих зразків методом оптичної мікроскопії.

Матеріали та методи. В результаті детального аналізу принципу дії апаратів, в яких реалізується метод ДІВЕ, було аналітично доведено і практично реалізовано можливість створення на базі пульсаційного апарата з активними діафрагмами [10], показаного на рис. 1 і застосованого у роботі як пульсаційного диспергатора ударного типу, вискоефективного пульсаційного диспергатора кавітаційного типу 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.

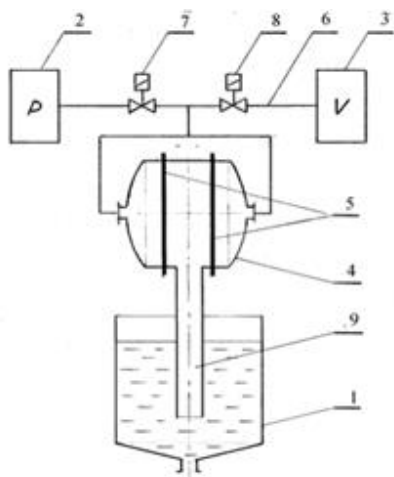


Рис. 1. Принципова схема пульсаційного апарата ударного типу

- 1 – ємність; 2 – джерело стисненого газу;
- 3 – джерело вакууму; 4 – пульсатор;
- 5 – гнучкі мембрани; 6 – трубопровід;
- 7, 8 – клапани; 9 – труба

Принципову схему пульсаційного диспергатора кавітаційного типу представлено на рис. 2.

Суміш екстрагента з подрібненою рослинною сировиною знаходиться у завантажувальному резервуарі під атмосферним тиском p_a при температурі T_1 . 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 $p_{\text{comp}}=0,2\div0,5$ МПа, а в РНТ – в інтервалі $p_{\text{vac}}=0,001\div0,003$ МПа.

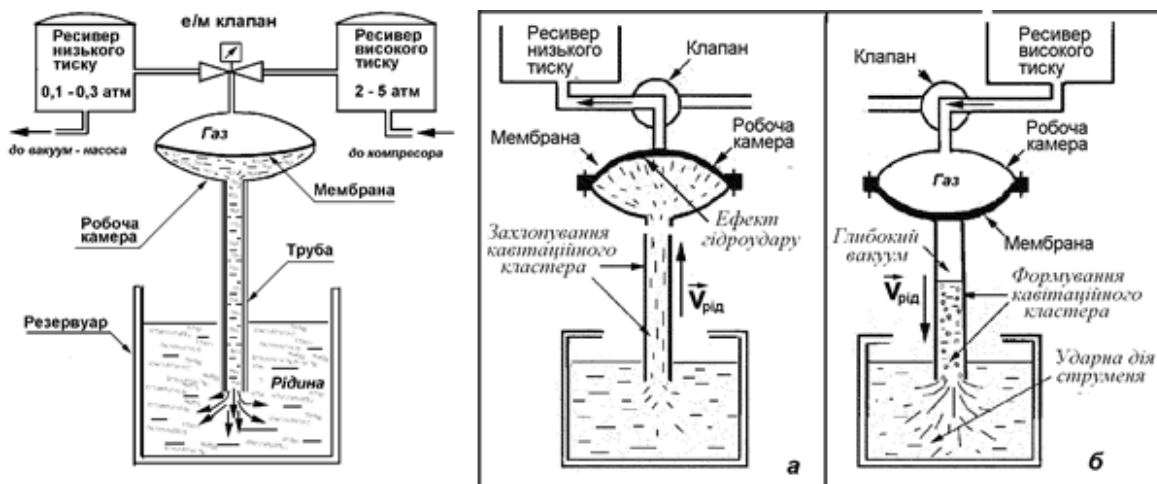


Рис. 2. Принципова схема пульсаційного диспергатора кавітаційного типу та основні динамічні ефекти методу ДІВЕ, що реалізуються:

а) стадія впуску рідини в робочу камеру; б) стадія виштовхування рідини з камери

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 парою. Встановлено, що внаслідок швидкого руху стовпа рідини тиск пари в порожнині суттєво нижчий тиску насиченої пари $p_{\text{sat}}(T_1)$. Тиск в рідині на границі з порожниною миттєво знижується від величини $p_{\text{comp}}=0,3$ МПа до $p_1 < p_{\text{sat}}(T_1)=0,002$ МПа, що приводить до закипання рідинної суміші поблизу вільної поверхні.

Різниця тисків $p_a - p_{\text{sat}}(T_1)$ та дія сили тертя об стінку спричиняють 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 гідралічного 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. 2 також показані основні динамічні ефекти методу ДІВЕ, що реалізуються в пульсаційному диспергаторі кавітаційного типу. До них відносяться: динамічний вплив струменя, що витікає з труби в резервуар і сприяє інтенсивному турбулентному перемішуванню суміші; вплив гідралічного удару, що виникає внаслідок гальмування

зворотнього 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.

Процес екстрагування проведено паралельно в пульсаційних диспергаторах ударного та кавітаційного типу. При проведенні експериментальних досліджень впливу кавітаційних ефектів на сировину в пульсаційних диспергаторах взято за об'єкти досліджень: насіння льону ціле та розмелене, екструдат бобів сої, окремо екструдат бобів сої з цілим насінням льону (для визначення впливу на структурно-механічні властивості після обробки). Методом попередніх лабораторних досліджень визначено гідромодуль 1:7 і також визначено температуру екстрагента рівною 30°C, яка підтримувалась протягом дослідження. В якості екстрагента використано воду. Після екстрагування в одержаних зразках експериментально визначено: вміст сухих речовин згідно ДСТУ 7804:2015, кількість білка за нефелометричним методом, реологічні показники екстракту за допомогою ротаційного віскозиметра «Реотест-2». Мікроструктуру зразків досліджено на світловому мікроскопі Axio Imager Z1m виробництва Carl Zeiss.

Результати та обговорення. В ході експериментальних досліджень процесу екстракції насіння льону цілого без попереднього замочування, а також розмеленого льону і екструдату бобів сої з цілим насінням льону в пульсаційному диспергаторі кавітаційного типу одержано мутні суспензії світло-сірого кольору. Результати дослідження мікроструктури отриманих зразків сумішей показали переважну наявність частинок розмірами меншими 5 мкм. Навколо цілого насіння льону у водній суспензії спостерігаються круглі об'єкти розміром 2 мкм. Цілісність насінини протягом обробки в пульсаційних диспергаторах не порушено, розламу структури не відбулося. Протягом доби відстоювання гелеподібної суміші з цілого насіння льону ущільнення шару не відбулося.

Результати кількості виходу сухих речовин в усіх об'єктах дослідження в залежності від тривалості обробки, представлено на рис. 3. Видно, що для кожного виду насіння процес екстрагування інтенсивніше проходить в диспергаторі кавітаційного типу, на відміну від ударного. Для екструдату сої та розмеленого льону різниця показників кількості виходу сухих речовин, порівнюючи після обробки в апаратах, складає близько 5,8% та 7,5% відповідно. Для цілого насіння льону різниця становить 2%. Безумовно вплив кавітаційних ефектів кращий на розмелену сировину. Проте, одержані показники для цілісної сировини мають велике практичне значення.

Наступним етапом з аналізу одержаних зразків було порівняння за виходом кількості білка (рис. 4).

Видно, що для кожного виду насіння вихід білка більший в диспергаторі кавітаційного типу на відміну від ударної дії. Різниця між виходом кількості білка розмеленого насіння льону та цілого в цих апаратах складає 1,8% і 2% відповідно. Вихід білка також залежить від тривалості обробки. Загалом в пульсаційних диспергаторах досить 10 хв обробки як для цілого, так і розмеленого насіння льону.

Сировина, напівфабрикати, готова продукція мають різноманітні структурно-механічні властивості, що залежать від багатьох факторів, а саме: температури, тиску, вологості, якості вихідної сировини, механічної взаємодії, транспортування, способів і терміну зберігання та інших умов. Експериментальні дослідження, пов'язані з вивченням фізико-хімічними, біологічними і механічними процесами дають можливість оптимізувати організацію об'єктивного контролю якості готової продукції. Харчова промисловість пов'язана з процесами переробки структурованих дисперсних систем, які характеризуються такими механічними та реологічними властивостями як в'язкість, пружність, повзучість, пластичність, міцність, релаксація та ін. На рис.5 зображено криві в'язкості одержаних зразків після обробки під впливом кавітаційного механізму.

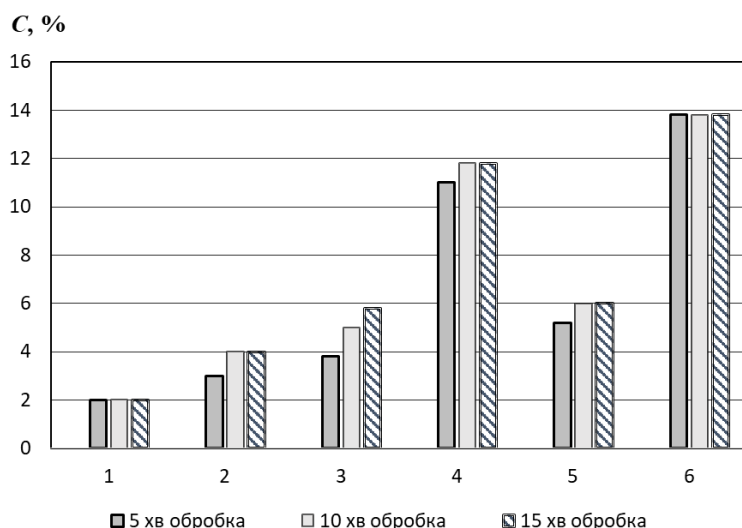


Рис. 3. Кількість виходу сухих речовин C, % у зразках 1–6, в залежності від тривалості обробки в пульсаційних апаратах: 1 – цілий льон, обробка в диспергаторі ударного типу; 2 – цілий льон, обробка в диспергаторі кавітаційного типу; 3 – льон розмелений, обробка в диспергаторі ударного типу; 4 – льон розмелений, обробка в диспергаторі кавітаційного типу; 5 – екструдат сої, обробка в диспергаторі ударного типу; 6 – екструдат сої, обробка в диспергаторі кавітаційного типу

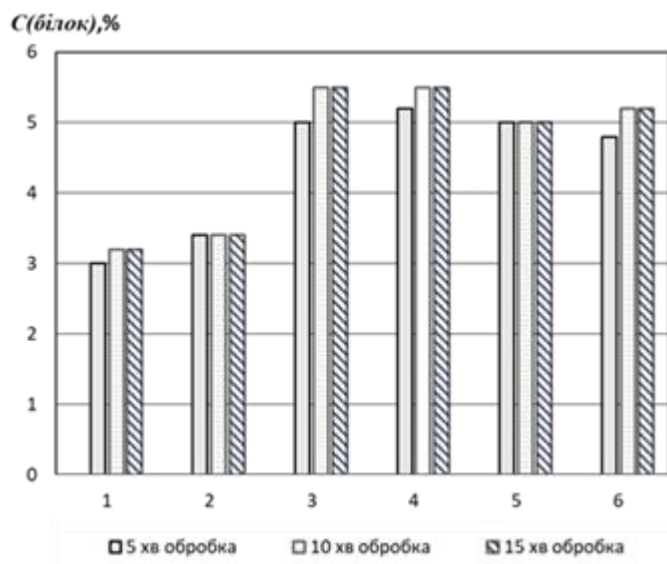


Рис. 4. Залежність виходу кількості білка C (білка), % у зразках 1–6 в залежності від тривалості обробки в пульсаційних апаратах: 1 – цілий льон, обробка в диспергаторі ударного типу; 2 – цілий льон, обробка в диспергаторі кавітаційного типу; 3 – льон розмелений, обробка в диспергаторі ударного типу; 4 – льон розмелений, обробка в диспергаторі кавітаційного типу; 5 – екструдат сої, обробка в диспергаторі ударного типу; 6 – екструдат сої, обробка в диспергаторі кавітаційного типу

На рис. 5а, б представлено, як приклад, експериментальні дані по залежності напруження зсуву P від швидкості зсуву $\varepsilon = \Delta v / \Delta r$, одержані на ротаційному віскозиметрі «Реотест-2» для двох зразків обробленої суміші. Проведені реологічні дослідження показали, що усі суміші після екстрагування мають властивості неньютонівської рідини. Екстракт цілого льону, як видно з рис. 5 а, має характерні властивості псевдо пластичної рідини – ефективна в'язкість $\eta = dP/d\varepsilon$ зменшуються із зростанням швидкості зсуву. Такий же реологічний характер спостерігається і в обробленій суміші розмеленого льону. Принципово інші реологічні властивості у суміші екструдату бобів сої з цілим насінням льону. Дані рис.5 б свідчать про те, що цей продукт має типовий характер бінгамовської в'язкопластичної рідини. ($P = P_k - \eta\varepsilon$ і $\eta = d(P - P_k)/d\varepsilon$). Значення кінцевого напруження P_k зростають з часом обробки: При тривалості обробки 5, 10 та 15 хвилин кінцеве напруження дорівнює відповідно 5, 11 і 28 Па. Для всіх досліджених в роботі сумішей неньютонівський характер в'язкості проявляється більш чітко при підвищенні часу обробки в пульсаційному диспергаторі кавітаційного типу.

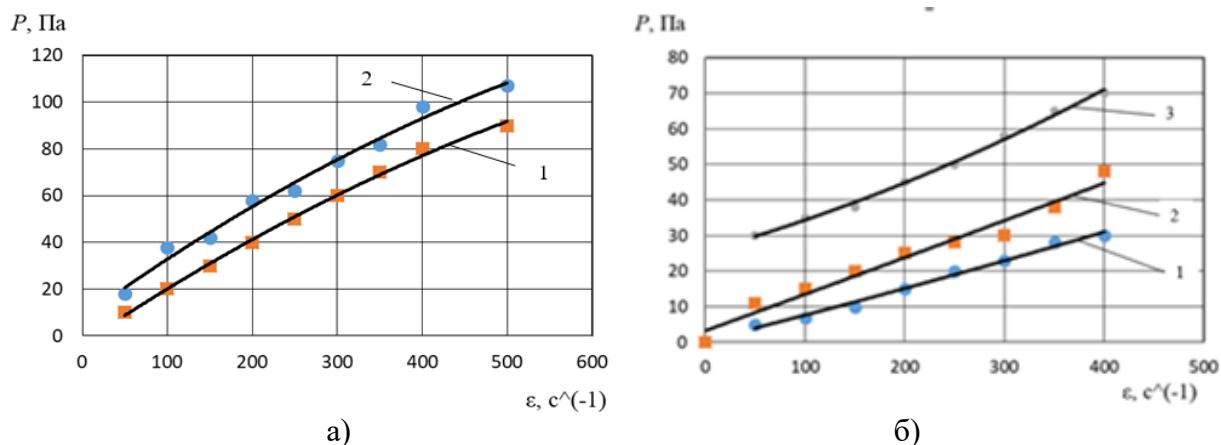


Рис. 5. Реологічні властивості одержаних сумішей після кавітаційної обробки

а – насіння льону ціле, б – екструдат бобів сої з цілим насінням льону.

Тривалість обробки, хв: 1–5; 2–10; 3–15

Висновки. Максимально можливий вихід біологічно активних компонентів з дослідної сировини одержано при впливі кавітаційних ефектів. Для цілого насіння льону вихід сухих речовин складає 4% при обробці у диспергаторі кавітаційного типу, що отримано протягом 10 хв. Із розмеленого насіння льону кавітаційною обробкою за 10 хв досягнуто на 6% (у 2 рази) більше виходу кількості сухих речовин порівняно з обробкою в диспергаторі ударного типу. Максимальне значення цього показника для суміші екструдату бобів сої з цілим насінням льону при кавітаційній обробці складає 14%, що у 2,3 рази перевищує значення при пульсаційному ударному впливі.

Вміст білка в одержаних суспензіях максимально вилучено протягом 5 хв обробки в пульсаційних диспергаторах. Залежно від подальшого застосування у технологічному процесі треба брати до уваги реологічні залежності від тривалості обробки.

Експериментальні дослідження порівняльного впливу сукупності механізмів ДІВЕ на сировину із сумішей на основі насіння олійних і зернобобових культур показують ефективність застосування кавітаційного впливу при обробці в пульсаційному диспергаторі без пошкодження структури волокон.

Для отримання рідких суспензій з масимальним виходом білка достатньо 10 хв обробки при застосуванні методу ДІВЕ в пульсаційних апаратах. Дослідження процесу екстракції проведено при температурі 30°C, що задовільняє особливості виходу термолабільних БАР з сировини.

Одержані показники фізико-хімічних та структурно-механічних властивостей екстрактів та сумішей насіння олійних і зернобобових культур, на прикладі насіння льону цілого та розмеленого, суміші екструдату бобів сої з цілим насінням льону, при обробці в пульсаційних диспергаторах ударного та кавітаційного типу мають вагоме практичне значення.

Бібліографія

1. Emadzadeh M K, Aarabi A, Aarabi Najvani F, Chiani M, Mehrabi M R. The Effect of Extraction Method on Physicochemical Properties of Mucilage Extracted from Yellow and Brown Flaxseeds. *Jundishapur J Nat Pharm Prod.* 2022;17(4):e123952. <https://doi.org/10.5812/jjnpp-123952>.
2. Srb, P., Syrovátková, M., Kulhavý, P., & Tomková, B. (2018). Study of Mechanical Properties and Modeling of Flax Reinforced Composites. In *Materials Science Forum* (Vol. 919, pp. 152–159). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.919.152>.
3. Thierry Hellebois, Jennyfer Fortuin, Xuan Xu, Alexander S. Shaplov, Claire Gaiani, Christos Soukoulis. Structure conformation, physicochemical and rheological properties of flaxseed gums extracted under alkaline and acidic conditions, *International Journal of Biological Macromolecules*, Volume 192, 2021, Pages 1217–1230, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.087>.

4. Янюк Т. І., Шаповаленко О. І., Тракало Т. О., Малюта К. С. Технологія отримання суспензії з насіння льону. *Хранение и переработка зерна*. 2016. № 9. 55–58. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/32902> (дата звернення 15.04.2024).
5. Ren X, Meng X, Zhang Z, Du H, Li T, Wang N. Effects of Ultrasound-Assisted Extraction on Structure and Rheological Properties of Flaxseed Gum. *Gels*. 2023; 9(4):318. <https://doi.org/10.3390/gels9040318>.
6. Вітенько Т. М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах. Тернопіль: Видавн. Терноп. держ. техн. ун-ту ім. І. Пулюя, 2009. 220 с.
7. Дячок В. В., Запорожець Ю. В. Про механізм масообміну з тілами клітинної будови. *Харчова промисловість*. 2017. № 22. 85–92.
8. 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>.
9. 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.
10. 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*. 2012. № 41 (1). 48–51.

References

1. Emadzadeh M K, Aarabi A, Aarabi Najvani F, Chiani M, Mehrabi M R. The Effect of Extraction Method on Physicochemical Properties of Mucilage Extracted from Yellow and Brown Flaxseeds. *Jundishapur J Nat Pharm Prod*. 2022;17(4):e123952. <https://doi.org/10.5812/jjnpp-123952>.
2. Srb, P., Syrovátková, M., Kulhavý, P., & Tomková, B. (2018). Study of Mechanical Properties and Modeling of Flax Reinforced Composites. In *Materials Science Forum* (Vol. 919, pp. 152–159). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.919.152>.
3. Thierry Hellebois, Jennyfer Fortuin, Xuan Xu, Alexander S. Shaplov, Claire Gaiani, Christos Soukoulis, Structure conformation, physicochemical and rheological properties of flaxseed gums extracted under alkaline and acidic conditions, *International Journal of Biological Macromolecules*, Volume 192, 2021, Pages 1217-1230, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.087>.
4. Yaniuk T. I., Shapovalenko O. I., Trakalo T. O., Maliuta K. S. (2016). *Technologia otrymannia suspenzii z nasinnia lionu*. [The technology of obtaining a suspension from seeds]. *Khranenia i pererabotka zerna* [Grain storage and processing]. 9. 55–58. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/32902> [in Ukrainian].
5. Ren X, Meng X, Zhang Z, Du H, Li T, Wang N. Effects of Ultrasound-Assisted Extraction on Structure and Rheological Properties of Flaxseed Gum. *Gels*. 2023; 9(4):318. <https://doi.org/10.3390/gels9040318>.
6. Vitenko, T. (2009). *Hidrodynamichna kavitatsia u masoobminnykh, chimichnykh i biolohichnykh protsessakh: Monografiia*. [The hydrodynamic cavitation in mass transfer, chemical and biological processes: Monograph]. Ternopil. Ternopil Ivan Puluiy National Technical University. 220 p.
7. Diachok, V. V., Zaporozhets, Yu. V. (2017). Pro mechanism masoobminu z tilamy klityynnoi budovy [On the mechanism of mass exchange with the bodies of the cellular structure]. *Charchova promyslovist* [Food Industry]. № 22. 85–92. [in Ukrainian].
8. Ivanitskyi, G. K., Chayka, O. I., Gozhenko, L. P. (2015). Zastosuvannia kavitatsiynoho reaktora pulsatsionnoho typu dlia ekstrakuvannia z roslynnoi 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].
9. 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. Teplotekhnika* [Industrial heat engineering]. 5 (35). 20–26. [in Ukrainian].
10. Chaika, O. I., Maletska, K. D., Matiushkin, M. V., Gozhenko, L. P. (2012) *Eksperymentalni doslidzhennia ekstrakuvannia z roslynnoi syrovyny metodom dyskretno-impulsnoho vvedennia enerhii* [Research of extraction from plant raw materials by the method of discrete-pulse energy input] *Naukovi pratsi ONAKHT* [Scientific Works]. № 41 (1). 48–51. [in Ukrainian].