

**Шибецький В. Ю.**

к. т. н., доцент

Остапенко Ж.І.

асистент

Фесенко В. В.

магістр

*Національний технічний
університет України
«Київський політехнічний
інститут імені Ігоря
Сікорського»*

Shybetsky V.Ph.D. of Engineering, Associate
Professor**Ostapenko Zh.**

assistant

Fesenko V.

master's student

*National Technical
University of Ukraine "Igor
Sikorsky Kyiv Polytechnic
Institute"*

УДК 66-5**DOI: 10.37128/2306-8744-2022-1-16**

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ І ТЕПЛООБМІНУ У ВІНОСНИХ ТЕПЛООБМІННИХ ЕЛЕМЕНТАХ ЕКСТРАКТОРІВ

У даній статті розповідається про інноваційні методи вилучення олії з рослинної сировини. Враховуючи техногенне навантаження на навколишнє середовище, багато досліджень спрямовані на дослідження нових та вдосконалення старих методів вилучення корисних компонентів із сировини. Інноваційні методи мають бути не лише ресурсозберігаючими, а й екологічно безпечними. Сучасні вимоги ринку спрямовані на розвиток виробництва екологічно безпечних та більш якісних продуктів фармацевтичної та біотехнологічної промисловості. Серед такої продукції значний обсяг складає біологічно активні речовини (БАР), які виробляються з рослинної сировини. Об'єми рослинної сировини в Україні дозволяють говорити про величезний потенціал отримання цінних компонентів рослинних матеріалів.

Вдосконалення виробництва різних продуктів на основі інноваційних методів ведення технологічних процесів є необхідною передумовою розвитку сучасної промисловості.

Однією з проблем на вирішення якої направлені інноваційні методи і технології є максимальне вилучення корисних продуктів з сировини. Зокрема це стосується виробництва олій, яке знаходить своє застосування не лише як необхідний продукт харчування, але і як сировина для створення біопалив.

Зважаючи на ряд переваг, розглядається процес ультразвукової екстракції. Представлений ультразвуковий екстрактор з виносним теплообмінним елементом. Для вдосконалення даного апарату пропонується змінити теплообмінний елемент типу труби в трубі. Проведені моделювання та розрахунки у програмі ANSYS підтверджують, що запропонований теплообмінний елемент змійникового типу істотно впливає на температуру екстрагенту на виході, а отже, на час процесу екстракції.

Ключові слова: екстракція, теплообмінний елемент, ультразвук, екстрагент, теплообмін, змійовик.

Аналіз літературних джерел. На сьогоднішній день найбільш поширеними методами вилучення олії є метод механічного пресування сировини і екстракція олії розчинниками [1]. Шляхом пресування олія вилучається з сировини під дією стискаючих зовнішніх сил, створених в пресах. Цей метод забезпечує вилучення олії високої якості, разом з тим при пресуванні біля 8–14% олії залишається в жмиху [2]. Екстракція розчинниками дозволяє

вилучити олію, залишаючи в сировині 0,5–0,7% [3] і може використовуватись для сировини з низьким вмістом олії, а також для остаточного вилучення олії з жмиху після пресування. Відомі роботи в яких наводяться результати використання як чистих розчинників, так і сумішей [4].

Екстракція олії забезпечує максимальне знежиренні рослинної сировини і здійснюється шляхом масопереносу. Масоперенос при екстракції олії із частинок попередньо подрібненої



рослинної сировини складається з процесу масовіддачі на поверхні частинок і дифузії всередині.

Останнім часом набули поширення дослідження нових методів вилучення олії з сировини, таких як ультразвукова екстракція, мікрохвильова екстракція і екстракція надкритичною рідиною [5–6]. Наведені в літературі [6–9] результати дослідження ультразвукової екстракції засвідчили, що цей процес забезпечує більш високу селективність, має меншу тривалість, зменшує енергозатрати і шкідливі викиди в навколишнє середовище. А також проводиться в обладнанні, конструкція якого набагато простіша ніж обладнання для пресування. Крім того, ультразвукова екстракція дозволяє отримати олію більш високої якості, ніж проста екстракція. Цей метод вважається екологічно чистим, оскільки більша частина розчинника, що використовується для екстракції, може бути відновлена.

В промислових умовах процес екстракції проводять в змішувачах, колонних (ротаторно-дискових, насадкових, тарілчастих, пульсаційних), відцентрових екстракторах.

Для інтенсифікації процесу екстракції запропоновані різноманітні конструкції, такі як віброекстрактори, екстрактори що працюють в умовах кавітації, екстрактори що працюють в умовах дії ультразвуку з комбінованим використанням енергії.

Екстракція під дією ультразвуку [10] має свої переваги. Особливості ультразвукової екстракції полягають в тому, що обладнання має можливість безперервної роботи і підходить для масового екстрагування БАР з рослинної сировини та скорочення часу екстрагування. Звукові хвилі, які мають частоти вище, ніж 20 кГц – це механічні коливання в твердих тілах, рідинах і газах. На відміну від електромагнітних хвиль, звукові хвилі переміщуються в будь-якій матерії, вони пов'язані

з циклами стиснення і розширення під час переміщення в середовищі [11]. Крім того, при ультразвуковій екстракції можна використовувати будь-який розчинник.

В результаті експериментальних досліджень [12] встановлено, що перемінний температурний режим, за рахунок переривчатої роботи ультразвукового генератора інтенсифікує циркуляційні потоки розчинника в капілярах твердих часточок сировини. [13–15].

Постановка проблеми. При екстракції олії з рослинної сировини необхідно враховувати можливість негативного впливу росту температури на якість цільового продукту.

В процесі екстракції в умовах ультразвукового випромінювання відбувається інтенсивне нагрівання екстрагенту. Такі екстрагенти як метиленхлорид, ацетон і т.д. мають низьку температуру кипіння і при нагріванні починають інтенсивно випаровуватись. Температури кипіння найрозповсюдженіших екстрагентів наведено в таблиці 1.

Для підтримки температури необхідно забезпечити охолодження екстрагенту. Існують різноманітні способи охолодження, такі як розміщення змійовика для підведення охолоджуючої рідини всередині екстрактора, оснащення корпусу екстрактора сорочкою, в тому числі використання виносних теплообмінних елементів, в яких циркулює екстрагент.

Останній спосіб з нашої точки зору, є найдоцільнішим, тому що призводить до більш інтенсивного перемішування екстрагенту і додатково інтенсифікує омивання частинок рослинної сировини в екстракторі з оновленням приміжового шару і додаткової інтенсифікації процесів масообміну в приміжовому шарі екстрагенту.

Таблиця 1.

Температури кипіння екстрагентів [14–15]

Екстрагент	Температура кипіння, °С	Екстрагент	Температура кипіння, °С
Ацетон	56,2	Хлороформ	59,5-62
Етиловий ефір	34-36	Метиленхлорид	41

Для інтенсифікації процесу екстракції та підтримання належної температури в обладнанні використовуються виносні теплообмінні пристрої. Розміри виносних теплообмінних пристроїв обмежені розмірами екстрактора. Конструкція теплообмінного пристрою повинна забезпечувати інтенсивний теплообмін. Для вдосконалення конструкцій теплообмінного елемента необхідно провести дослідження процесів гідродинаміки і теплообміну в ньому.

Основні задачі

1. Дослідження процесів гідродинаміки і теплообміну і визначення зміни температури

теплоносія в виносному теплообмінному пристрої в залежності від його конструкції.

2. Представлення нової конструкції виносного теплообмінного пристрою.

Викладення основного матеріалу. На основі літературного огляду встановлено, що на сьогодні актуально інтенсифікувати процес виділення рослинної олії з сировини різними фізичними факторами. Обрано конструкцію акустичного екстрактора з виносним теплообмінним елементом типу «труба в трубі» (рис 1). Даний апарат має відносно просту конструкцію та, за рахунок циркуляційного руху,



значно інтенсифікує процес масовіддачі від поверхні твердих частинок сировини.

Під дією акустичних коливань відбувається кавітаційне руйнування твердих частинок, утворюються мікротріщини, додаткові пори, що інтенсифікує процеси переносу цільового продукту всередині твердих часточок.

Принцип роботи акустичного екстрактора наступний. Перед кожним циклом роботи акустичний екстрактор очищують від залишків сировини, промивають м'якими засобами, ополіскують водою. У контейнер 5 сировина завантажується поза екстрактором, потім фіксується в робочому положенні. Закріплюють кришку 3 до корпусу 1 апарата. В апарат подають екстрагент через штуцер 14. Вмикають генератор ультразвукових коливань і насос на циркуляційній трубі.

Екстрагент проходить через шар твердих частинок в контейнері 5 і переходить до циркуляційної труби 10, у якій охолоджується до робочої температури за допомогою теплоносія, який надходить в кожух 11 через штуцер 12 і відводиться через штуцер 13. Вимушений циркуляційний рух екстрагенту інтенсифікує процес масовіддачі від поверхні твердих частинок.

Під дією акустичних коливань відбувається кавітаційне руйнування твердих частинок, з'являються мікротріщини, додаткові пори, що інтенсифікує процеси переносу цільового продукту всередині твердих частинок. [10]

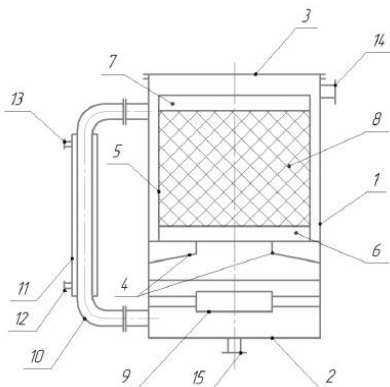


Рис. 1. Схема акустичного екстрактора:

1 – корпус; 2 – днище; 3 – кришка; 4 – опорні підставки; 5 – контейнер; 6, 7 – нижнє та верхнє кільця; 8 – сітка; 9 – генератор ультразвукових коливань; 10 – циркуляційна труба; 11 – сорочка; 12, 13 – штуцери для підводу та відведення теплоносія; 14, 15 – штуцери для підводу та відведення екстрагенту

Для оптимізації процесу ультразвукової екстракції в циркуляційно-акустичному екстракторі, слід окремо розглянути процес у виносному елементі.

В роботі досліджувалась гідродинаміка і теплообмін для двох конструкцій виносних

теплообмінних елементів, які встановлені на акустичному екстракторі:

1. Відома конструкція акустичного екстрактора з виносним теплообмінним елементом типу «труба в трубі».

2. Вдосконалена конструкція акустичного екстрактора з виносним теплообмінним елементом змієвикового типу.

Для моделювання процесу було обрано програмне забезпечення ANSYS.

У внутрішню трубу теплообмінного елементу подається екстрагент з температурою $t_1=33^{\circ}\text{C}$, витрата $G_1=2,5$ кг/с, в зовнішню трубу подається вода з температурою $t_2=8^{\circ}\text{C}$, витрата становить $G_2=5$ кг/с.

Розрахункову схему виносного теплообмінного елементу типу «труба в трубі» показано на рисунку 2 (а – подача теплоносія і води здійснюється прямотоком; б – протиток).

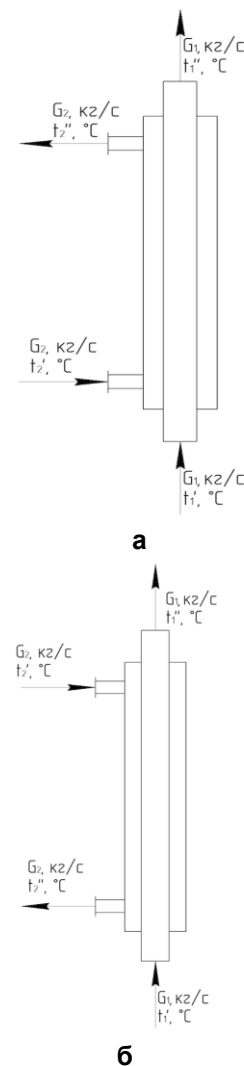
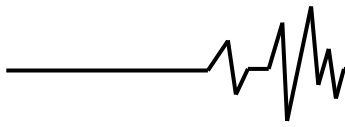


Рис. 2. Розрахункова схема виносного теплообмінного елементу типу «труба в трубі»



В результаті дослідження встановлено, що при використанні прямого екстрагенту на виході з теплообмінного елементу охолоджується до температури $t'_1=30,6^\circ\text{C}$, а при використанні протитоку $t''_1=29^\circ\text{C}$. Отже, охолодження екстрагенту відбувається більш

ефективно при подачі теплоносія і екстрагенту протитоком.

На рис. 3 та рис. 4 представлені результати моделювання процесу у виносному теплообмінному елементі типу «труба в трубі» з подачею екстрагенту і води прямою та протитоком відповідно.

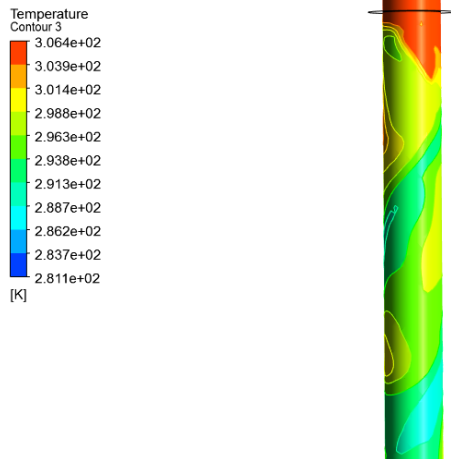


Рис. 3. Епюри температури при прямотоці

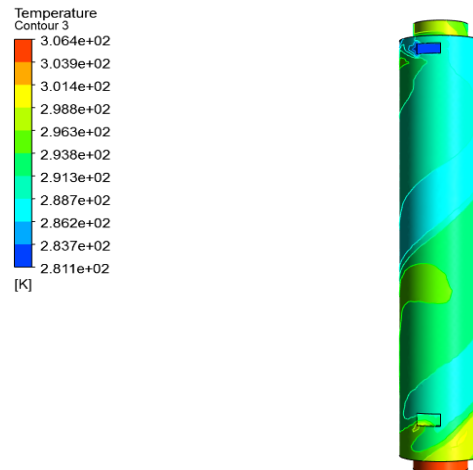


Рис. 4. Епюри температури при протитоці

Нами запропоновано використання виносного теплообмінного елементу змієвикового типу. Розрахункова схема представлена на рисунку 5.

виконана у вигляді змієвика, за рахунок витків, має більшу довжину, що призводить до збільшення площі контакту змієвика з теплоносієм. На рисунку 6 представлено результати моделювання.

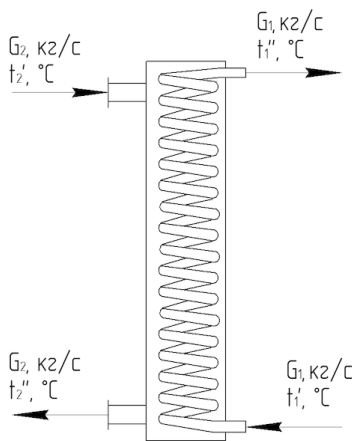


Рис. 5. Схема виносного елементу

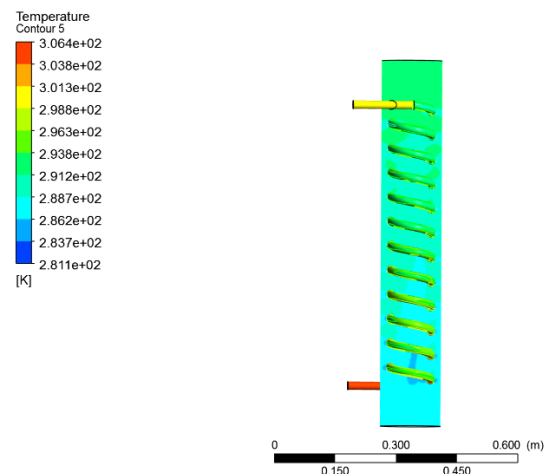


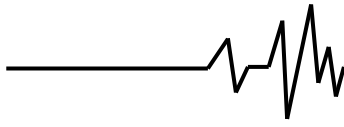
Рис. 6. Епюра температури

В змієвик подається екстрагент температурою $t'_1=33^\circ\text{C}$, витрата $G_1=2,5$ кг/с, в сорочку подається вода з температурою $t''_1=8^\circ\text{C}$, витрата становить $G_2=5$ кг/с.

Результати, одержані в процесі моделювання процесу, показали, що температура екстрагенту на виході із змієвика становить $t'_1=25^\circ\text{C}$. В порівнянні із конструкцією виносного теплообмінного елементу типу «труба в трубі» температура екстрагенту знизилась на 4°C . Це обумовлено тим, що внутрішня труба,

Висновок. Виносний теплообмінний елемент циркуляційно-акустичного екстрактора дозволяє оптимізувати процес ультразвукової екстракції. Так як розчинником (екстрагентом) зазвичай виступає летка, вибухонебезпечна та отруйна речовина, яка під дією ультразвуку нагрівається до високих температур, процес охолодження дозволяє забезпечити безперервну циркуляцію екстрагенту в контурі апарату.

За допомогою комп'ютерного моделювання проведені дослідження гідродинаміки і



теплообміну для виносних теплообмінних елементів типу «труба в трубі» і зі змієвиком.

Результати дослідження показали, що при використанні змієвика температура екстрагенту на виході становитиме 25°C. Для порівняння, в випадку використання виносного теплообмінного елементу типу труба в трубі ця температура сягає 29°C.

Список використаних джерел

1. Белобородов В.В. Основные процессы производства растительных масел : Пищевая промышленность. Москва: 1966, 478 с.
2. Г. В. Жматкова, А. Н. Нефёдов, А. С. Гордеев, А. Б. Килимник. Методы интенсификации биологических процессов экстрагирования биологически активных веществ из растительного сырья: Москва: Вестник ТГТУ, 2005, 701–707 с.
3. Karachun V. Research of influence of ultrasound on the extraction of vegetable oil. Kyiv: 2019, 33–35 p.
4. A. Abdolshahi, M. Maid, J. Rad. Choice of solvent extraction technique affects fatty acid composition of pistachio (*Pistacia vera* L.) oil: Journal of Food Science and Technology Vol. 52, 2013, 2422–2427 p.
5. Новицкий Б. Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. Москва: Химия, 1983, 192 с.
6. Owolarafe O. K. Mathematical modelling and simulation of the hydraulic expression of oil from oil palm fruit . Biosystems Engineering 101, 2008, 331–340 p.
7. Власивості ріпакової олії. URL: <http://wjournal.com.ua/rapsove-maslo-korisni-vlastivosti.html>
8. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, С. В. Байкин, О. Н. Кухарев. Оборудование перерабатывающих производств. Растительное сырье. Москва: Издательство Юрайт, 2018, 446 с
9. С. А. Матасова, Н. А. Митина, Г. Л. Рыжова. Получение сухого экстракта из корней девясила высокого и изучение его химического состава. Химия растительного сырья. Москва, 1999, с. 119–123.
10. L. Wang, C. Weller. Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants. 2006, 300–312 с.
11. Karachun V. Research of influence of ultrasound on the extraction of vegetable oil Technology Audit and Production Reserve. Kyiv, 2019, 33–35 с.
12. Р.Й. Вязлов, Ю.І. Сидоров, В.П. Новіков. Процеси і апарати мікробіологічної та фармацевтичної промисловості. Львів: «Інтелект-Захід», 2008, 736 с.

13. А. Н. Нефёдов, А. С. Гордеев, А. Б. Килимник. Методы интенсификации технологических процессов экстрагирования биологически активных веществ из растительного сырья. Вестник ТГТУ, 2008, 604с.

14. Дябцев Н. И. Газовое дело. Москва, 1969, 35–49 с.

15. Г. М. Островский, А. Р. Шовкетович, Ф. Л. Биленок. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий– СПб: НПО "Профессионал", 2006, 916 с.

Список джерел у транслітерації

1. Beloborodov V. V. Osnovnye processy proizvodstva rastitel'nyh masel : Pishchevaya promyshlennost'. Moskva: 1966, 478 s.
2. G. V. Zhmatkova, A. N. Nefyodov, A. S. Gordeev, A. B. Kilimnik. Metody intensifikacii tekhnologicheskikh processov ekstragirovaniya biologicheskii aktivnyh veshchestv iz rastitel'nogo syr'ya: Moskva: Vestnik TGTU, 2005, 701–707 s.
3. Karachun V. Research of influence of ultrasound on the extraction of vegetable oil. Kyiv: 2019, 33–35 p.
4. A. Abdolshahi, M. Maid, J. Rad. Choice of solvent extraction technique affects fatty acid composition of pistachio (*Pistacia vera* L.) oil: Journal of Food Science and Technology Vol. 52, 2013, 2422–2427 p.
5. Novickij B. G. Primenenie akusticheskikh kolebanij v himiko-tekhnologicheskikh processah. Moskva: Himiya, 1983, 192 s.
6. Owolarafe O. K. Mathematical modelling and simulation of the hydraulic expression of oil from oil palm fruit . Biosystems Engineering 101, 2008, 331–340 p.
7. Vlastivosti ripakovoї oliї. URL: <http://wjournal.com.ua/rapsove-maslo-korisni-vlastivosti.html>
8. A. Kurochkin, G. V. SHaburova, S. V. Bajkin, O. N. Kuharev. Oborudovanie pererabatyvayushchih proizvodstv. Rastitel'noe syr'e. Moskva: Izdatel'stvo Yurajt, 2018, 446 s
9. S. A. Matasova, N. A. Mitina, G. L. Ryzhova. Poluchenie suhogo ekstrakta iz kornej devyasila vysokogo i izuchenie ego himicheskogo sostava. Himiya rastitel'nogo syr'ya. Moskva, 1999, s. 119–123.
10. L. Wang, C. Weller. Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants. 2006, 300–312 с.
11. Karachun V. Research of influence of ultrasound on the extraction of vegetable oil Technology Audit and Production Reserve. Kyiv, 2019, 33–35 с.
12. R. J. Vyazlov, Y. I. Sidorov, V. P. Novikov. Procesi i aparati mikrobiologichnoї ta farmacevtichnoї promislovosti. L'viv: «Intelekt-Zahid», 2008, 736 s.



13. A. N. Nefyodov, A. S. Gordeev, A. B. Kilimnik. Metody intensifikatsii tekhnologicheskikh processov ekstragirovaniya biologicheskii aktivnykh veshchestv iz rastitel'nogo syr'ya. Vestnik TGTU, 200, 604 с.

14. Dyabcev N. I. Gazovoe delo. Moskva, 1969, 35–49 с.

15. G. M. Ostrovskij, A. R. SHovketovich, F. L. Bilenok. Novyj spravochnik himika i tekhnologa. Processy i apparaty himicheskikh tekhnologij– SPb: NPO "Professional", 2006, 916 s.

INVESTIGATIONS OF HYDRODYNAMICS AND HEAT EXCHANGE IN REMOTE HEAT EXCHANGE ELEMENTS OF EXTRACTORS

This article discusses innovative methods of extracting oil from vegetable raw materials. Due to the man-made load on the environment, many studies are aimed at researching new and improving old methods of extracting useful components from raw materials. Innovative methods must be not only resource-saving, but also environmentally friendly. That is why modern market requirements are aimed at developing the production of environmentally friendly and better products of the pharmaceutical and biotechnology industries. Among such products a significant amount is biologically active substances (BAS), which are

produced from plant raw materials. The volumes of vegetable raw materials in Ukraine allow us to speak about the huge potential for obtaining valuable components of plant materials.

Improving the production of various products based on innovative methods of technological processes is a necessary prerequisite for the development of modern industry.

One of the problems to be solved by innovative methods and technologies is the maximum extraction of useful products from raw materials. In particular, this applies to the production of oils, which is used not only as a necessary food product, but also as a raw material for biofuels.

Due to a number of advantages, the process of ultrasonic extraction is considered. An ultrasonic extractor with a remote heat exchange element is presented. To improve this device, it is proposed to change the heat exchange element such as "pipe in pipe". The simulations and calculations performed in the ANSYS program confirm that the proposed coil-type heat exchange element significantly affects the temperature of the extractant at the outlet, and hence the time of the extraction process.

Key words: extraction, heat exchange element, ultrasound, extractant, heat exchange, coil, "pipe in pipe", biologically active substances.

Відомості про авторів

Шибецький Владислав Юрійович – кандидат технічних наук, доцент. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект перемоги, 37, Київ, Україна, 03056 v.shybetsky@gmail.com

Остапенко Жанна Ігорівна – аспірант, асистент кафедри біотехніки та інженерії. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект перемоги, 37, Київ, Україна, 03056 zhanna.ost@gmail.com

Фесенко Валерія Володимирівна – кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект перемоги, 37, Київ, Україна, 03056 lerafesenko@ukr.net

Vladislav Shibetskiy - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Victory Avenue, 37, Kiev, Ukraine, 03056 v.shybetsky@gmail.com

Zhanna Ostapenko - postgraduate student, assistant of the Department of Biotechnology and Engineering. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Victory Avenue, 37, Kiev, Ukraine, 03056 zhanna.ost@gmail.com

Valeriya Fesenko - Department of Biotechnology and Engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", prospectus, 37, 03056 lerafesenko@ukr.net/