

пр. Тауке хана, 5, г. Шимкент, Республика Казахстан, 160012. E-mail: m.tolegen@bk.ru.

**Толеген Маржанкул Ерхожақызы**, магистр техники и технологии, ст. преп., кафедра «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Південно-Казахстанський державний університет ім. М. Ауезова. Адреса: пр. Тауке хана, 5, м. Шимкент, Республика Казахстан, 160012. E-mail: m.tolegen@bk.ru.

**Tolegen Marzhankul**, Master of Engineering and Technology, Senior Lecturer of the Department of Life Safety and Environmental Protection, South Kazakhstan State University. M. Auezov. Address: Tauke Khan Ave., 5, Shymkent, Republic of Kazakhstan, 160012. E-mail: m.tolegen@bk.ru.

*Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. В.М. Михайловим.  
Отримано 15.04.2017. ХДУХТ, Харків.*

УДК 001.8:637.13

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ УЛЬТРАФІЛЬТРАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ БАРБОТУВАННЯ НЕЖИРНОЇ МОЛОЧНОЇ СИРОВИНИ**

**Г.В. Дейниченко, В.В. Гузенко, О.О. Удовенко,  
О.В. Омельченко, В.В. Перекрест**

*Розглянуто питання використання мембранних процесів у харчовій промисловості під час обробки нежирної молочної сировини. Подано результати дослідження з визначення показників якості нежирної молочної сировини під час її ультрафільтраційного концентрування із застосуванням режиму барботування. Приведений хімічний склад досліджуваних видів нежирної молочної сировини до обробки ультрафільтрацією та після неї.*

**Ключові слова:** нежирна молочна сировина, процес ультрафільтрації, мембранна обробка, барботування.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАРБОТИРОВАНИЯ НЕЖИРНОГО МОЛОЧНОГО СЫРЬЯ**

**Г.В. Дейниченко, В.В. Гузенко, О.А. Удовенко,  
А.В. Омельченко, В.В. Перекрест**

*Рассмотрен вопрос использования мембранных процессов в пищевой промышленности при обработке нежирного молочного сырья. Представлены*

---

© Дейниченко Г.В., Гузенко В.В., Удовенко О.О., Омельченко О.В., Перекрест В.В., 2017

результаты исследования по определению показателей качества нежирного молочного сырья во время его ультрафильтрационного концентрирования с применением режима барботирования. Приведен химический состав исследуемых видов нежирной молочной сырья до обработки ультрафильтрацией и после нее.

**Ключевые слова:** нежирное молочное сырье, процесс ультрафильтрации, мембранная обработка, барботирование.

## RESEARCH OF QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF THE ULTRAFILTRATION PROCESS WITH THE USE OF BUBBLING OF NONFAT MILK RAW MATERIALS

G. Deynichenko, V. Guzenko, O. Udovenko, O. Omelchenko, V. Perekrest

*The article is devoted to the study of qualitative indices of low-fat dairy raw materials in the process of their ultrafiltration concentration. The issue of using membrane processes in the food industry when processing low-fat dairy raw materials is considered. Simultaneously with the concentration of food liquids, ultrafiltration performs their purification from low molecular weight substances, bacteria, maintaining a constant pH. All of the above led to widespread usage of the ultrafiltration process in the processing of food liquids – protein-carbohydrate raw milk in particular. Food liquids were treated by ultrafiltration with flat membrane module elements (the membranes proper). The process was carried out in the dead end mode with using, as the method of intensification – perforated vibrating disc and bubbling device. The results of the study on the determination of the quality indices of low-fat dairy raw materials (buttermilk, skim milk curd and curdy whey) during ultrafiltration concentration using the bubbling regime are presented. Chemical composition of the products' ultrafiltration separation of the studied low-fat dairy raw materials with the indication of all food nutrients that are inherent in the types of raw materials under study is presented. Chemical composition of the products of ultrafiltration separation of low-fat milk dairy materials under study shows that ultrafiltration concentrate of buttermilk, skim milk curd and curdy whey contain all dietary nutrients, which are common for the studied types of raw materials. The performed analytical and experimental studies show technological limits of the modes of regulation for receiving concentrate in ultrafiltration concentration process of food liquids.*

**Keywords:** ultrafiltration membrane, process separation, membrane treatment, bubbling.

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Мембранні процеси обробки (зокрема ультрафільтрація) рідких високомолекулярних полідисперсних систем (РВДПС) належать до найбільш передових технологій сучасності. Висока ефективність використання ультрафільтрації в різних промислових технологіях, а також екологічність сприяли стрімкому зростанню в останні десятиріччя наукових та прикладних досліджень [1].

Отже, дослідження процесів мембранної обробки харчових рідин УФ-концентруванням є актуальним завданням, оскільки уможливило одержання рідких харчових концентратів із високими, яскраво вираженими харчовими та біологічними властивостями. Разом із цим необхідне також дослідження якості продуктів УФ-розділення, яке дає можливість оцінити ефективність ультрафільтраційної обробки зазначених харчових рідин [2; 3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Під час мембранного розділення РВПС основною причиною, яка знижує продуктивність напівпроникною мембрани та ефективність процесу в цілому, є концентраційна поляризація високомолекулярних речовин на поверхні мембрани. Для запобігання утворенню поляризаційного шару необхідно передбачити в конструкції майбутнього мембранного модуля пристрій, який турбулізує потік полідисперсної системи, що розділяється [4].

Як відомо, під час ультрафільтраційної (УФ) обробки нежирної молочної сировини (НМС) отримують дві фракції – концентрат, що являє собою збагачений високомолекулярними сполуками вихідний продукт, і фільтрат, у водному середовищі якого знаходяться низькомолекулярні з'єднання молока. Дослідження якісних характеристик продуктів УФ-концентрування дає можливість оцінити ефективність УФ-обробки нежирної молочної сировини [5; 6].

**Метою статті** є дослідження якісних показників нежирної молочної сировини під час її ультрафільтраційного концентрування з використанням барботування.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** На кафедрі устаткування харчової та готельної індустрії ім. М.І. Беляєва Харківського державного університету харчування та торгівлі проведено дослідження показників якості процесу УФ-концентрування нежирної молочної сировини (знежиреного молока, склотин, сироватки з-під кислого сиру). Харчові рідини обробляли в УФ-модулі з плоскими мембранними елементами (мембранами типу ПАН).

Фізико-хімічні показники якості одержаних концентратів визначено стандартними методами, математичну обробку результатів досліджень проводили за методиками, викладеними в підручнику [7].

Як метод інтенсифікації було запропоновано використання в процесі концентрування способів барботування систем, що обробляються бульбашками повітря або інертного газу в безпосередній близькості від поверхні напівпроникних мембран [8].

Залежність вмісту сухих речовин в ультрафільтраційних концентратах НМС від тривалості ультрафільтрації за різних режимів обробки подано на рис.

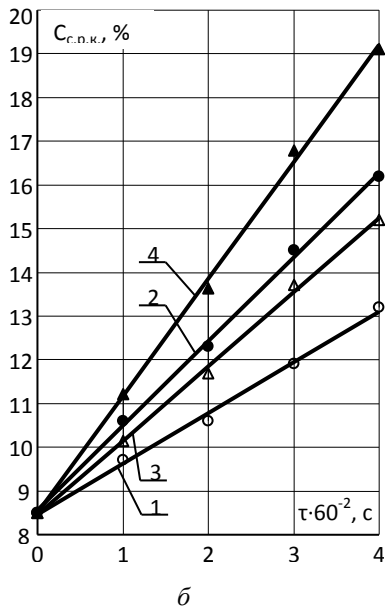
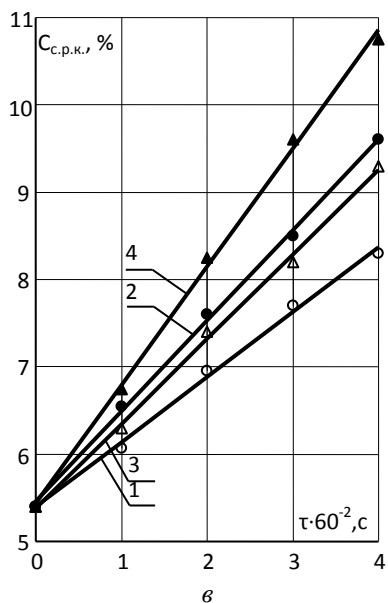
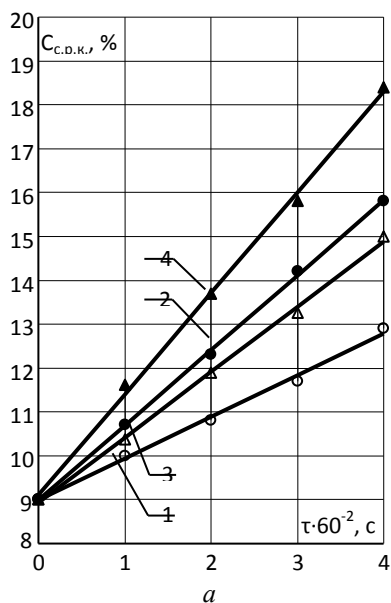


Рис. Залежність вмісту сухих речовин ( $C_{с.в.к.}$ ) у концентратах НМС від тривалості ( $\tau$ ) мембранного розділення з використанням УФ-мембран ПАН-50 (1, 2) и ПАН-100 (3, 4) в тупиковому режимі (1, 3) і в режимі барботування (2, 4): а – сколотини; б – знежирене молоко; в – сироватка з-під кислого сиру

Із даних рисунка бачимо, що зі збільшенням тривалості процесу ультрафільтрації як у тупиковому режимі, так і в режимі барботування вміст сухих речовин в ультрафільтраційних концентратах підвищується. Це відбувається за рахунок виведення з продукту розчинника (води) разом із низькомолекулярними речовинами, і, як наслідок цього, збільшення концентрації білка та жиру в одиниці об'єму концентрату білково-вуглеводної молочної сировини. При цьому підвищення вмісту сухих речовин у концентратах усіх трьох видів НМС під час ультрафільтрації в тупиковому режимі відбувається повільніше, ніж під час ультрафільтрації в режимі барботування. Використання барботування дозволяє підвищити вміст сухих речовин в УФ-концентраті склотин у 1,6–1,8 разу (рис. 1а), в УФ-концентраті знежиреного молока – у 1,6–1,7 разу (рис. 1б), в УФ-концентраті сирної сироватки – у 1,4–1,5 разу (рис. 1в). Це ще раз підтверджує той факт, що застосування барботування поділлованих РВПС перешкоджає утворенню на поверхні УФ-мембрани поляризаційного шару високомолекулярних речовин, унаслідок чого збільшується продуктивність мембрани та швидкість проходження через неї розчинника з низькомолекулярними речовинами, що містяться в ньому.

На наступному етапі було отримано залежність вмісту сухих речовин у пермеатах видів НМС, що розділяються, від тривалості процесу ультрафільтрації з використанням напівпроникних мембран типу ПАН. Отримані залежності показали, що зі збільшенням тривалості процесу ультрафільтрації вміст сухих речовин у пермеатах також незначно підвищується, причому всі отримані залежності мають лінійний характер. На нашу думку, це відбувається як унаслідок переходу в пермеат лактози, мінеральних елементів, вітамінів, органічних кислот, так і за рахунок проходження через пори мембрани окремих фракцій білків молока та поліпептидних обривків білкових молекул, розмір яких менше розміру пор УФ-мембрани [9].

Використання за ультрафільтраційної обробки барботування РВПС, що розділяються, підвищує вміст сухих речовин у пермеатах усіх видів НМР у середньому на 3–4%, що відбувається за рахунок збільшення швидкості проходження пермеата через пори мембрани, а також підвищення кількості молекул високомолекулярних речовин, які потрапляють у пермеат унаслідок руйнування поляризаційного шару на поверхні мембрани під дією барботування РВПС.

Потім було виявлено динаміку відношення вмісту сухих речовин у концентраті до вмісту сухих речовин у пермеаті під час мембранного розділення НМС із використанням УФ-мембран типу ПАН. Результати свідчать, що інтенсивність підвищення вмісту сухих речовин у концентраті всіх видів НМС значно вище, ніж підвищення їх

вмісту в пермеатах НМС. У режимі барботування відношення  $C_{с.р.к.}/C_{с.р.п.}$  в 1,3–1,7 разу більше за ультрафільтрації сколотин, в 1,5–1,6 разу більше за ультрафільтрації знежиреного молока, в 1,3–1,4 разу більше за ультрафільтрації сироватки з-під кислого сиру, ніж у тупиковому режимі.

Досліджували фактор концентрації, який показує, у скільки разів збільшується вміст цільового компонента системи (молочного білка) у концентраті рідких високомолекулярних полідисперсних систем після її УФ-обробки порівняно з його вмістом у вихідній системі. Результати показали, що застосування барботування молочної сировини, що розділяється, інтенсифікує процес УФ знежиреної молочної сировини порівняно з тупиковим режимом у 1,5–1,6 разу за УФ сколотин, у 1,3–1,4 рази за УФ знежиреного молока, у 1,4–1,5 рази за УФ сироватки з-під кислого сиру [10].

Комплексну характеристику якості продуктів УФ-концентрування НМС і дослідження загальної кількості складу кінцевих продуктів ультрафільтрації – концентратів і пермеатів – подано в таблиці.

Таблиця

**Хімічний склад продуктів ультрафільтраційного розділення нежирної молочної сировини**

Показник	Ви-хід-на НМС	Значення фактора концентрації					
		1,5		2,0		3,0	
		кон-цен-трат	пер-меат	кон-цен-трат	пер-меат	кон-цен-трат	пер-меат
1	2	3	4	5	6	7	8
Вміст, %:	<b>С к о л о т и н и</b>						
сухих речовин	9,01	10,11	5,10	12,0	5,30	15,82	5,70
білка	3,10	4,65	0,19	6,20	0,21	9,30	0,26
жиру	0,60	0,91	сл.	1,20	сл.	1,80	сл.
лактози	4,50	4,15	4,27	4,05	4,31	3,92	4,37
золи	0,70	0,47	0,51	0,45	0,53	0,42	0,57
Вміст, %:	<b>З н е ж и р е н е м о л о к о</b>						
сухих речовин	8,50	9,90	5,30	11,40	5,40	14,90	5,60
білка	3,20	4,80	0,18	6,40	0,20	9,60	0,31

Продовження табл.

1	2	3	4	5	6	7	8
жиру	0,07	0,11	сл.	0,14	сл.	0,20	сл.
лактози	4,50	4,33	4,31	4,26	4,38	4,22	4,46
золи	0,70	0,51	0,62	0,50	0,65	0,49	0,71
Вміст, %:	Сироватка з-під кислого сиру						
сухих речовин	5,40	6,52	5,20	7,68	5,30	8,85	5,50
білка	1,10	1,65	0,16	2,20	0,18	3,30	0,19
жиру	0,20	0,31	сл.	0,40	сл.	0,60	сл.
лактози	3,50	4,01	4,12	4,09	4,24	4,15	4,43
золи	0,50	0,48	0,41	0,47	0,48	0,47	0,54

Із даних таблиці випливає, що вміст білка та жиру в концентратах НМС збільшується пропорційно зростанню фактора концентрації. Важливо констатувати, що за різних значень фактора концентрації співвідношення білок : жир у концентратах усіх видів НМС зберігається на рівні вихідної сировини. Вміст лактози в УФ-концентратах склотин і знежиреного молока в міру збільшення фактора концентрації незначно знижується внаслідок її переходу у фільтрат, а в концентратах сирної сироватки незначно підвищується, що пояснюється підвищеною питомою вагою лактози в складі сухих речовин сирної сироватки. Вміст золи в концентратах усіх видів НМС із підвищенням фактора концентрації залишається практично незмінним із незначною тенденцією до зменшення.

Вміст сухих речовин у пермеатах усіх видів НМС із підвищенням фактора концентрації збільшується, що є наслідком переходу за ультрафільтрації в пермеат насамперед лактози та зольних елементів. Вміст білка в пермеатах незначний і знаходиться на рівні 0,6–0,26%, молочний жир у зазначених продуктах УФ-розділення наявний у слідових кількостях.

Аналізуючи отримані дані, можна зробити загальний висновок, що застосування режиму барботування РВПС, що розділяються, дозволяє інтенсифікувати процес ультрафільтраційного розділення НМС порівняно з УФ у тупиковому режимі в 1,5–1,6 разу за УФ-обробки склотин, у 1,3–1,4 разу – за УФ-обробки знежиреного молока, у 1,4–1,5 разу – за УФ-обробки сироватки з-під кислого сиру.

**Висновки.** Таким чином, досліджено якісні характеристики УФ-поділу НМС за допомогою напівпроникних мембран типу ПАН. Визначено залежності фактора концентрації від тривалості

мембранного розділення в тупиковому режимі та в режимі барботування. Отримано дані про хімічний склад концентратів і пермеатів досліджуваних видів НМС за різних значень фактора концентрації.

Отримані результати можуть бути використані в дослідженнях інших характеристик якості рідких високомолекулярних полідисперсних систем за їх оброблення методом ультрафільтраційного концентрування, що дозволить запровадити одержані результати у виробництво харчових продуктів на об'єктах з обробки молочної сировини.

### Список джерел інформації / References

1. Zeki Berk (2009), *Food process Engineering and Technology*, Elsevier, USA, 605 p.

2. Kumar, P., Sharma, N., Ranjan, R., Kumar, S. (2013). "Technology in Dairy Industry: A Review", *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, № 9, Vol. 26, pp. 1347-1358.

3. Cheng, T., Li, L. (2007), "Gas-sparging cross-flow ultrafiltration in flat-plate membrane module: Effects of channel height and membrane inclination", *Separation and Purification Technology*, № 55, pp. 50-55.

4. Deynichenko, G., Guzenko V., Udovenko O., Omelchenko A., Melnik O. (2016). "The study of the method of fight against formation of polarizing layer at the process of ultrafiltration concentration of the skim milk", *EUREKA: Life Sciences*, Vol. 5, pp. 53-60.

5. Мирончук В. Г. Мембранні процеси в технології комплексної переробки сироватки : монографія / В. Г. Мирончук, Ю. Г. Змієвський. – К. : НУХТ, 2013. – 153 с.

Myronchuk, V.G., Zmiyevskiy, Yu.G. (2013), *Membrane processes in technology of whey processing complex [Membrani procesy` v texnologiyi kompleksnoyi pererobky` sy`rovatky]*, NУХТ, Kyiv, 153 p.

6. Свитцов А. А. Введение в мембранную технологию / А. А. Свитцов. – М. : Дели принт, 2007. – 208 с.

Svitcov, A.A. (2007), *Introduction to membrane technology [Vvedenie v membrannuju tehnologiju]*, Deli print, Moscow, 208 p.

7. Мазняк З. О. Дослідження процесу ультрафільтраційного концентрування сколотин та його апаратурне оформлення : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 / Мазняк Захар Олександрович. – Х., 2003. – 660 с.

Maznyak, Z.O. (2003), *Research of process of ultrafiltration concentration of whey and its equipment decision: dissertation [Doslidzhennya protsesu ul'trafil'tratsiynoho kontsentruvannya skolytyn ta yoho aparaturne oformlennya: dis. ... kand. tech. nauk]*, Kharkiv, 660 p.

8. Остапчук М. В. Математичне моделювання на ЕОМ : підручник / М. В. Остапчук, Г. М. Станкевич. – Одеса : Друк, 2006. – 313 с.

Ostapchuk, M., Stankevych, G. (2006), *Mathematical modeling of computer [Matematy`chne modelyuvannya na EOM]*, Druk, Odessa, 313 p.

9. Дейниченко Г. В. Ультрафільтраційні процеси та технології раціональної переробки білково-вуглеводної молочної сировини /



Г. В. Дейниченко, З. О. Мазняк, І. В. Золотухина. – Х. : Факт, 2008. – 208 с.

Dejnichenko, G.V., Maznyak, Z.O., Zolotuhina, I.V. (2008), *Multifiltering processes and technology rational processing of Ultrafiltration Protein-Carbohydrate Raw Milk [Ul'trafil'tratsiyni protsesy ta tekhnolohiyi ratsional'noyi pererobky bilkovo-vuhlevodnoyi molochnoyi syrovyny]*, Fakt, Kharkiv, 208 p.

10. Дейниченко Г. В. Дослідження фактору концентрації білково-вуглеводної молочної сировини / Г. В. Дейниченко, В. В. Гузенко, О. О. Удовенко, О. В. Омельченко, В. В. Перекрест // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2017. – Вип. 17, – Т. 1. – С. 56–61.

Dejnichenko, G.V., Guzenko, V.V., Udovenko, O.O., Omelchenko, O.V, Perekrst, V.V. (2017), “Research of concentration factor of the protein-carbohydrate raw milk” [“Doslidzhennya faktoru koncentraciyi bilkovo-vuglevodnoyi molochnoyi syrovyny”] *Proceedings of the Tauride State University Agrotechnological*, Vol. 17, T. 1, pp. 56-61.

**Дейниченко Григорій Вікторович**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри устаткування харчової і готельної індустрії ім. М.І. Беляєва, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Ключківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-56; e-mail: deynichenkov@rambler.ru.

**Дейниченко Григорій Вікторович**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрою обладнання харчової та готельної індустрії ім. М.І. Беляєва, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Ключковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-56; e-mail: deynichenkov@rambler.ru.

**Deynichenko Gregory**, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Department equipment for food and hotel industry after M.I. Belyaeva. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-56; e-mail: deynichenkov@rambler.ru.

**Гузенко Василь Володимирович**, канд. техн. наук, ст. науч. співроб., кафедра устаткування харчової і готельної індустрії ім. М.І. Беляєва, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Ключківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-56, e-mail: Peresada\_7@mail.ru.

**Гузенко Василий Владимирович**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., кафедра оборудования пищевой и гостиничной индустрии им. М.И. Беляева, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Ключковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-56; e-mail: Peresada\_7@mail.ru.

**Guzenko Vasily**, Cand. Sci. (Tech.), senior researcher of Scientific and research sector HSUFTT, Department equipment for food and hotel industry after M.I. Belyaeva, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel.: (057)349-45-56; e-mail: Peresada\_7@mail.ru.

**Удовенко Олег Александрович**, канд. техн. наук, доц., кафедра загальноінженерних дисциплін і обладнання, Донецький національний університет економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. Адреса: вул. Островського, 16, м. Кривий Ріг, Україна, 50005. Тел.: 0671472630; e-mail: Udoleg@mail.ru.

**Удовенко Олег Александрович**, канд. техн. наук, доц., кафедра общинженерных дисциплин и оборудования, Донецкий национальный университет экономики и торговли им. М. Туган-Барановского. Адрес: ул. Островского, 16, г. Кривой Рог, Украина, 50005. Тел.: 0671472630; e-mail: Udoleg@mail.ru.

**Udovenko Oleg**, Cand. Sci. (Tech.), Associate professor, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Department of general engineering disciplines and equipment. Address: Ostrowski str., 16, Kryvyi Rih, Ukraine, 50005. Tel.: 0671472630; e-mail: Udoleg@mail.ru.

**Омельченко Александр Владимирович**, канд. техн. наук, доц., кафедра загальноінженерних дисциплін і обладнання, Донецький національний університет економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. Адреса: вул. Островського, 16, м. Кривий Ріг, Україна, 50005. Тел.: 0972958852; e-mail: omelchenko84@ukr.net.

**Омельченко Александр Владимирович**, канд. техн. наук, доц., кафедра общинженерных дисциплин и оборудования, Донецкий национальный университет экономики и торговли им. М. Туган-Барановского. Адрес: ул. Островского, 16, г. Кривой Рог, Украина, 50005. Тел.: 0972958852; e-mail: omelchenko84@ukr.net.

**Omelchenko Aleksandr**, Cand. Sci. (Tech.), Associate professor, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Department of general engineering disciplines and equipment. Address: Ostrowski str., 16, Kryvyi Rih, Ukraine, 50005. Tel.: 0972958852; e-mail: omelchenko84@ukr.net.

**Перекрест Владимир Викторович**, асист., кафедра загальноінженерних дисциплін і обладнання, Донецький національний університет економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. Адреса: вул. Островського, 16, м. Кривий Ріг, Україна, 50005. Тел.: 0980717294; e-mail: vv-perekrest@yandex.ru.

**Перекрест Владимир Викторович**, асист., кафедра общинженерных дисциплин и оборудования, Донецкий национальный университет экономики и торговли им. М. Туган-Барановского. Адрес: ул. Островского, 16, г. Кривой Рог, Украина, 50005. Тел.: 0980717294; e-mail: vv-perekrest@yandex.ru.

**Perekrest Vladimir**, Assistants, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Department of general engineering disciplines and equipment. Address: Ostrowski str., 16, Kryvyi Rih, Ukraine, 50005. Tel.: 0980717294; e-mail: vv-perekrest@yandex.ru.

*Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. А. А. Дубініною.  
Отримано 15.04.2017. ХДУХТ, Харків.*